



UNIVERSITE PARIS-EST  
ECOLE DOCTORALE SCIENCES, INGENIERIE ET ENVIRONNEMENT

THESE DE DOCTORAT

Présentée pour l'obtention du diplôme de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS-EST  
Spécialité : Sciences de l'Ingénieur

Présentée par

**Mathieu RIVALLAIN**

Sujet de la thèse

**ETUDE DE L'AIDE A LA DECISION  
PAR OPTIMISATION MULTICRITERE  
DES PROGRAMMES DE REHABILITATION ENERGETIQUE  
SEQUENTIELLE DES BATIMENTS EXISTANTS**

Thèse soutenue publiquement le 21 Janvier 2013

devant le jury composé de :

Rapporteur : **Niklaus KOHLER**  
Rapporteur : **Stéphane PLOIX**  
Examineur : **Francis ALLARD**  
Examineur : **Christophe GOBIN**  
Examineur : **Julien HANS**  
Examineur : **Etienne WURTZ**  
Directeur de thèse : **Olivier BAVEREL**  
Directeur de thèse : **Bruno PEUPORTIER**



**THESE DE DOCTORAT**

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS-EST**

Spécialité : Sciences de l'Ingénieur

Présentée par

**Mathieu RIVALLAIN**

Sujet de la thèse

**ETUDE DE L'AIDE A LA DECISION  
PAR OPTIMISATION MULTICRITERE  
DES PROGRAMMES DE REHABILITATION ENERGETIQUE  
SEQUENTIELLE DES BATIMENTS EXISTANTS**



*A Fernanda et à Enzo,  
Et à tous ceux qui me sont chers.*



***Watch your thoughts, for they become words.  
Watch your words, for they become actions.  
Watch your actions, for they become habits.  
Watch your habits, for they become your character.  
And watch your character, for it becomes your destiny!***

***Margaret Thatcher***



# Remerciements

Une aventure commence souvent par des rencontres, j'ai eu la chance d'en faire deux, qui ont conditionné ce projet de thèse. En premier lieu, je souhaite donc exprimer toute ma gratitude à mes directeurs de thèse, Olivier Baverel et Bruno Peuportier, pour l'enthousiasme permanent qu'ils m'ont témoigné, pour l'ambiance de travail particulièrement agréable qu'ils ont su instaurer, pour leur confiance, pour l'implication et la complémentarité dont ils ont fait preuve dans l'encadrement de mes travaux. Je les remercie également pour ce qu'ils représentent. Leur implication professionnelle, rigoureuse et intègre, sur des sujets au cœur des défis de demain permet aujourd'hui à notre génération de doctorants de conduire des projets passionnants sur des thématiques à forts enjeux pour nos sociétés en évolution !

Je tiens également à remercier chaleureusement M. Francis Allard qui a présidé mon jury de soutenance, M. Niklaus Kohler et M. Stéphane Ploix qui se sont investis dans l'évaluation ce manuscrit, M. Christophe Gobin, M. Julien Hans et M. Etienne Wurtz qui ont participé à l'analyse critique des contributions. Leurs appréciations, leurs critiques et leurs suggestions constructives ont ouvert de multiples perspectives et ont rendu la soutenance, comme la discussion qui a suivi, très agréable.

Au sein de ces pages, comment ne pas remercier Stéphane Thiers, Alain Guiavarch et Pierre Beinsteiner, chercheurs et doctorant à l'Ecole des Mines, qui m'ont aussi activement accompagné sur les premiers mois de thèse. Stéphane, Alain, merci pour m'avoir ouvert les portes de la programmation sous Dephi, inoubliable. Pierre, merci pour toutes les discussions que nous pu avoir, à un moment où, l'un comme l'autre, on cherchait encore à définir ce qui allait devenir les projets des années suivantes.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à Pierre Emmanuel Leger, étudiant de l'Ecole des Ponts ParisTech, qui au travers de son stage puis de son projet scientifique, aura grandement contribué au développement et à l'implémentation de ces travaux. Pierre Emmanuel, ta rigueur, ta curiosité intellectuelle et ton esprit d'initiative ont rendu ce travail en commun aussi efficace qu'enrichissant.

Ce travail de thèse a été mené au sein du Laboratoire Navier de l'Ecole des Ponts ParisTech et du Centre d'Energétique et des Procédés de l'Ecole des Mines de Paris. Il a été financé par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Il a profité d'une collaboration avec la Chaire VINCI ParisTech, sur l'Eco-conception des Ensembles bâtis et des infrastructures. Le résultat présent doit beaucoup à toutes les personnalités rencontrées, qui y ont contribué, chacune à leur façon.

Un grand merci donc aux permanents, techniciens, personnels administratifs, aux post-doctorants, aux doctorants et aux stagiaires, que j'ai eu le plaisir de côtoyer au sein des deux Ecoles. Merci pour la collection des bons moments passés, pour les discussions toujours vivantes, pour les idées rafraichissantes échangées, sur nos sujets de Recherche comme sur tout le reste !

Merci également aux acteurs de la Chaire VINCI pour nous avoir offert des échanges transdisciplinaires de grande valeur et le partage des expériences professionnelles, plaçant les recherches conduites dans une perspective transversale, maintenant le lien nécessaire à l'applicabilité opérationnelle.

Que seraient des projets professionnels sans le soutien de ses proches.

Et ces quelques mots ne suffiront pas à remercier mes parents, Antoine, Céline, ma famille et ma belle-famille, mes amis pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien sans faille, et ce depuis près de trois décennies! Je suis fier dans ces pages de pouvoir confirmer à mon grand-père que mes études touchent à présent à leur fin, à un âge où il travaillait déjà depuis près de 15 ans. Il commençait à s'en inquiéter.

Enfin, il est m'est impossible de refermer ce paragraphe de remerciements sans rendre hommage à deux personnes incroyables, partageant au plus près ma réalité quotidienne.

Enzo, muito obrigado por tudo que os seus quatros anos de vida já fizeram por nós. E uma felicidade constante, um prazer e um honra te acompanhar nesses seus primeiros passos pela Vida.

Fernanda, nem sei como te agradecer por você compartilhar da minha vida diariamente. A sua presença e a sua luz são fonte de equilíbrio e de profundidade na minha existência. Já está sendo para mim uma honra dividir tantos momentos ao lado de uma pessoa tão especial como Você!

# Résumé

Sous nos latitudes, l'usage des bâtiments existants et les consommations énergétiques associées (chauffage, climatisation, ventilation, eau chaude sanitaire, éclairage et autres usages) sont responsables d'impacts considérables sur l'Environnement. De plus, le renouvellement du parc existant étant inférieur à 1% par an, dans la plupart des pays développés, la réhabilitation des bâtiments constitue un levier majeur de réduction des consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, l'identification de stratégies optimales de réhabilitation énergétique, incluant la planification des actions dans le temps, demeure une problématique complexe pour les acteurs de la Construction.

Ces travaux de thèse visent à produire des connaissances afin de contribuer à l'aide à la décision pour l'identification de programmes efficaces de réhabilitation énergétique, à partir de méthodes d'optimisation multicritères.

Les solutions (programmes séquentiels de réhabilitation énergétique) sont optimisées en termes de composition et de phasage. La composition est définie par la combinaison de mesures de réhabilitation mise en œuvre. Celles-ci concernent l'enveloppe des bâtiments (isolation thermique, remplacement des fenêtres, surfaces de fenêtres) et le remplacement des équipements de chauffage, ventilation et production d'ECS. Pour chacune des mesures, plusieurs alternatives sont envisagées. Le phasage correspond à la permutation de ces mesures, définissant la séquence de mise en œuvre.

Les solutions sont évaluées sur une base multicritère et sur le cycle de vie. Les fonctions objectives ciblent les impacts environnementaux de l'ACV (Analyse de Cycle de Vie), des indicateurs économiques, le bien-être des occupants par le confort thermique adaptatif en été. Des modèles d'ACV et d'analyse du coût du cycle de vie, utilisant la simulation thermique dynamique pour le calcul des besoins de chauffage et des températures intérieures, ont été développés pour l'évaluation des performances des solutions.

Etant donnée la nature mathématique du problème (multicritère, combinatoire, à variables discrètes et à fonctions objectifs implicites non-linéaires), deux méthodes d'optimisation multicritères sont étudiées : les algorithmes génétiques (NSGA II) et la programmation dynamique.

Dans l'approche génétique, la modélisation des solutions, sous la forme d'un couple de chromosomes, permet d'identifier des programmes séquentiels efficaces de réhabilitation énergétique et d'analyser les surfaces de compromis, en termes de définition et performances des solutions, de compromis entre les critères de décision.

A partir de la représentation du problème par un graphe séquentiel, la programmation dynamique permet alors de comparer les solutions approchées issues de l'algorithme génétique, ou d'approches court-termistes, au front de Pareto exact. L'optimisation exacte a également été exploitée pour analyser la sensibilité des solutions à différents paramètres de modélisation dont le comportement des occupants, l'évolution des prix de l'énergie, la durée de vie des composants de réhabilitation.

Les contraintes budgétaires s'appliquant au projet de réhabilitation ont été ensuite intégrées dans un algorithme génétique multicritère sous contraintes, adapté à l'étude des stratégies de réhabilitation sous la contrainte d'un plan de financement.

Enfin, l'approche génétique a été étendue depuis l'échelle du bâtiment à celle du parc et l'optimisation exacte a été utilisée pour caractériser les typologies de bâtiment en réhabilitation. L'intérêt des différentes méthodes est illustré sur une étude de cas.

Des connaissances ont été produites en termes de méthodologie d'optimisation multicritère, appliquée à la réhabilitation énergétique séquentielle, et de compréhension de l'évolution d'un parc de bâtiments. Ces connaissances contribuent à l'aide à la décision, en fournissant aux décideurs le moyen d'identifier des stratégies efficaces de réhabilitation énergétique ainsi qu'une description des compromis accessibles, à l'échelle du bâtiment ou à celle du parc, sur une base multicritère et sur le cycle de vie.

**Mots-clés** : réhabilitation énergétique des bâtiments existants, optimisation multicritère, analyse de cycle de vie, aide à la décision.

# Abstract

Under our latitudes, existing buildings energy consumptions, related to heating, cooling, ventilation, domestic hot water (DHW), lighting and other uses, are responsible for significant environmental burdens. Moreover, existing buildings annual replacement rate being lower than 1%, in most developed countries, existing stock retrofit represents a major lever to reach commitments on climate change and non-renewable energy consumption mitigation. However, the identification of optimal sustainable retrofit programs, including actions planning over a time period, is still a difficult task for professionals.

This thesis aims at producing knowledge in order to contribute to decision support for efficient energy retrofit programs identification, through the application of different multi-criteria optimization techniques.

The solutions (sequential building energy retrofit programs) are optimized both on their content and planning. The content refers to the combination of retrofit measures considered. These address holistically building envelopes (thermal insulation, windows replacement, window to wall ratios), and the replacement of equipment for ventilation, heating and DHW production. For each of these measures, various options are considered. The planning corresponds to the permutation of these measures, defining a time sequence for implementation.

The solutions are evaluated on a multi-criteria and life cycle basis. The objective functions considered target environmental impacts evaluated using LCA (Life Cycle Assessment), some financial indicators and occupants' well-being through thermal comfort in summer. Life cycle assessment and life cycle cost models, using building dynamic thermal simulation for heating load and thermal comfort evaluation, are implemented to assess solutions performances.

Considering the problem mathematical nature (multi-criteria, combinatorial, discrete variables, implicit non-linear objective functions), two suitable multi-criteria optimization techniques have been studied: multi-criteria genetic algorithm (NSGA-II) and dynamic programming.

In the genetic approach, the modelling of each solution by a pair of chromosomes allowed to identify efficient sequential energy retrofit programs and analyse Pareto compromise surfaces, in terms of solutions features, performances and relationships in between criteria.

Then, the representation of the problem on a sequential graph enabled us to apply dynamic programming, to compare both the genetic approximate solutions, and the results of some short-term approaches to the exact Pareto frontier. The search for exact solutions also been exploited to perform sensitivity analysis on different modelling parameters such as heating temperature setting, energy prices evolution or materials lifespan.

Real life budget constraints have been incorporated to build a constrained multi-criteria genetic optimisation method, suitable to study retrofit strategies under financing plans.

At the end, the genetic approach has been extended from building scale to stock scale and exact optimization has been used to characterize building types in terms of energy retrofit.

The benefits of these methods have been illustrated on case studies.

Knowledge has been produced in terms of multi criteria optimization methodology, applied to sequential energy retrofit, and understanding of building stocks evolution. These developments contribute to decision aiding; providing decision makers with efficient energy retrofit strategies and a description of the comprise surface, at the building or building stock scale, on a multi-criteria basis, over life cycle.

**Key words:** existing building energy retrofit, multi-criteria optimization, life cycle assessment, decision support.

# Table des matières

<b>Remerciements.....</b>	<b>9</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>11</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>13</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>15</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>17</b>
<b>1 Aide à la décision pour la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants .....</b>	<b>25</b>
1.1 Introduction	27
1.2 Espace de décision et espace des objectifs	29
1.3 Evaluation des solutions et modèle de cycle de vie	55
1.4 Présentation de l'étude de cas	69
1.5 Aide à la décision et multicritère	84
1.6 Optimisation et multicritère	95
1.7 Conclusion	111
<b>2 Optimisation multicritère et algorithme génétique pour la réhabilitation énergétique des bâtiments existants .....</b>	<b>113</b>
2.1 Introduction	115
2.2 Algorithmes évolutionnaires et génétiques	115
2.3 Application à la réhabilitation énergétique	128
2.4 Etude de cas	138
2.5 Conclusion	169
<b>3 Optimisation multicritère et programmation dynamique pour la réhabilitation énergétique des bâtiments existants .....</b>	<b>171</b>
3.1 Introduction	173
3.2 La programmation dynamique	173
3.3 Application à la réhabilitation énergétique	184
3.4 Etude de cas et comparaison aux méthodes approchées	189
3.5 Etude de cas et analyse de sensibilité	205
3.6 Conclusion	244
<b>4 Réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments, sous contraintes de financement .....</b>	<b>247</b>
4.1 Introduction	249
4.2 Problème d'optimisation multicritère sous contraintes	249
4.3 Etat de l'art de l'optimisation génétique sous contraintes	251
4.4 Application à la réhabilitation énergétique	261
4.5 Etude de cas	266

4.6 Conclusion	286
4.7 Perspectives	287
<b>5 Vers la réhabilitation énergétique séquentielle d'un parc de bâtiments existants .....</b>	<b>289</b>
5.1 Introduction	291
5.2 De la réhabilitation de bâtiment à la gestion de parc	292
5.3 Typologies de bâtiment et réhabilitation énergétique	321
5.4 Conclusion	349
<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>351</b>
Bilan des travaux	351
Perspectives	355
<b>Bibliographie.....</b>	<b>361</b>
<b>A Annexe A Indicateurs environnementaux.....</b>	<b>374</b>
6.1 Introduction	374
6.2 Consommation cumulée d'énergie primaire	376
6.3 Consommation d'eau	377
6.4 Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques	377
6.5 Potentiel de changement climatique	378
6.6 Potentiel d'acidification	380
6.7 Potentiel d'eutrophisation	382
6.8 Potentiel de formation d'ozone photochimique	383
6.9 Dommages causés aux écosystèmes	384
6.10 Dommages sur la santé humaine	384
6.11 Déchets non radioactifs	385
6.12 Radiations ionisantes et déchets radioactifs	386
6.13 Odeurs	386
<b>B Annexe B Hypothèses de coûts économiques.....</b>	<b>388</b>
7.1 Production et mise en œuvre des composants	388
7.2 Traitement en fin de vie des composants	389
7.3 Evolution des coûts de l'énergie	389
<b>C Annexe C Limites de la pondération .....</b>	<b>391</b>
8.1 Présentation de l'étude de cas	391
8.2 Pondération et solutions efficaces	392
8.3 Sensibilité des solutions au choix des pondérations	393
8.4 Conclusion	395
<b>D Annexe D Classement en fronts de Pareto .....</b>	<b>396</b>
<b>E Annexe E Inputs du logiciel d'optimisation.....</b>	<b>398</b>
10.1 Eventails de réhabilitation	398
10.2 Paramétrage de l'algorithme génétique NSGA II	404
<b>Table des figures.....</b>	<b>405</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>413</b>

# Introduction générale

L'aube du XXIème siècle nous impose de porter un regard nouveau sur les modes de vie, de consommation et de développement de nos sociétés modernes, ainsi que sur les sciences et les techniques qui les transforment.

## L'impératif de développement durable

Depuis l'entrée dans l'ère industrielle, nos sociétés occidentales ont fondé leur croissance sur une demande expansive en énergie fossile et en matières premières non-renouvelables.

Ces consommations conduisent logiquement vers l'épuisement de certaines ressources énergétiques et sont responsables d'un accroissement brutal des émissions de gaz à effet de serre, rendant bien réelle la menace d'un changement climatique de grande ampleur à l'échelle planétaire, aux implications considérables tant sur les écosystèmes que sur les activités anthropiques.

Au-delà de ces deux problématiques largement médiatisées, un nombre croissant de signaux interrogent également les limites de nos modes de développement actuels.

Les matières non-renouvelables représentaient ainsi 60% de la consommation massive de matériaux aux Etats-Unis, en 1900. En 2000, près de 95% des matières consommées sont considérées non-renouvelables (USGS, 2002 ; Matos et Wagner, 1998).

Conjuguées à la forte croissance de la demande sur les dernières décennies, ces consommations nous entraînent vers l'épuisement progressif de certaines matières d'usage courant. La Figure 1 illustre ainsi la disponibilité aujourd'hui limitée à quelques dizaine d'années, selon les réserves prouvées, pour des métaux tels que : le zinc, cuivre, nickel, aluminium, fer, etc.

Ainsi, épuisement des ressources énergétiques fossiles, épuisement des ressources naturelles, changement climatique planétaire, émissions polluantes, atteintes à la biodiversité, etc. sont autant de manifestations aujourd'hui quantifiées des implications de nos modes de vies et de développement sur l'équilibre d'une planète finie.

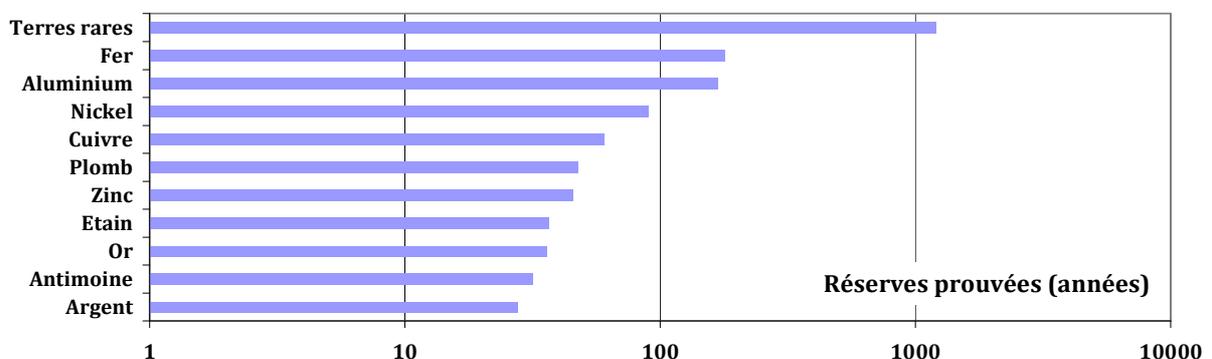


Figure 1. Disponibilité en années des réserves mondiales prouvées pour différents minéraux (sous un scénario de croissance nulle de la demande) (USGS, 2007 ; Fraunhofer ISI, 2009)

Suivant les contextes nationaux, le concept de développement durable doit trouver des déclinaisons pratiques et des objectifs différents. Pour les pays développés, le maintien du développement économique et social doit s'accompagner d'une réduction importante des impacts sur l'Environnement.

Les transformations sont d'autant plus nécessaires que l'inaction représente également un coût économique considérable. En cas de réchauffement global de 5 à 6°C, la revue conduite par Sir Nicholas Stern estime par exemple que les coûts et les risques globaux seront équivalents à une perte d'au moins 5% du PIB mondial chaque année et sur les 200 prochaines années. Ainsi, le coût de l'inaction, en matière de changement climatique, pourrait s'élever à 5,500 milliards d'euros par an pour l'économie mondiale (Stern, 2006).

Des objectifs environnementaux peuvent inspirer la mise en œuvre opérationnelle et sectorielle des engagements.

Par exemple, les lois Grenelle promulguées en 2010 renforcent l'engagement du Facteur 4, en France. Le gouvernement s'engage ainsi à diviser par 4 les émissions nationales de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, par rapport au niveau de 1990. A cette échéance, les rejets annuels dans l'atmosphère doivent être ramenés à un niveau inférieur à 140 millions de tonnes équivalent de dioxyde de carbone. Ces lois ouvrent des chantiers sectoriels prioritaires.

Le développement durable est donc un impératif, face auquel il est urgent de ne plus attendre. Les limites de nos modes de développement actuels doivent conduire à interpréter, dans chacune de nos activités et dans chaque secteur de l'économie, les principes du développement durable.

### **Le secteur de la Construction, problème ou levier majeur ?**

A l'échelle nationale comme à l'échelon mondial, le secteur de la Construction représente des enjeux majeurs en termes d'impacts sur l'Environnement, d'emplois et d'activité économique, de transformation de nos modes de vie, ce qui en fait une composante incontournable des approches de développement durable.

Ainsi, au niveau mondial, la Construction est responsable de près de 40% des consommations d'énergie finale, 40% des émissions de gaz à effet de serre, 40% de l'épuisement des ressources naturelles et énergétiques, 40% des volumes de déchets générés (UNEP, 2003 ; UNEP, 2006 ; IEA, 2008a ; OECD, 2008).

Sur le plan économique et social, la Construction est également poids lourd, générateur de nombreux emplois et d'activité économique. La Construction emploie près de 1,8 millions de personnes en France (INSEE, 2009). Elle représente 28% des emplois et 10% du PIB mondial.

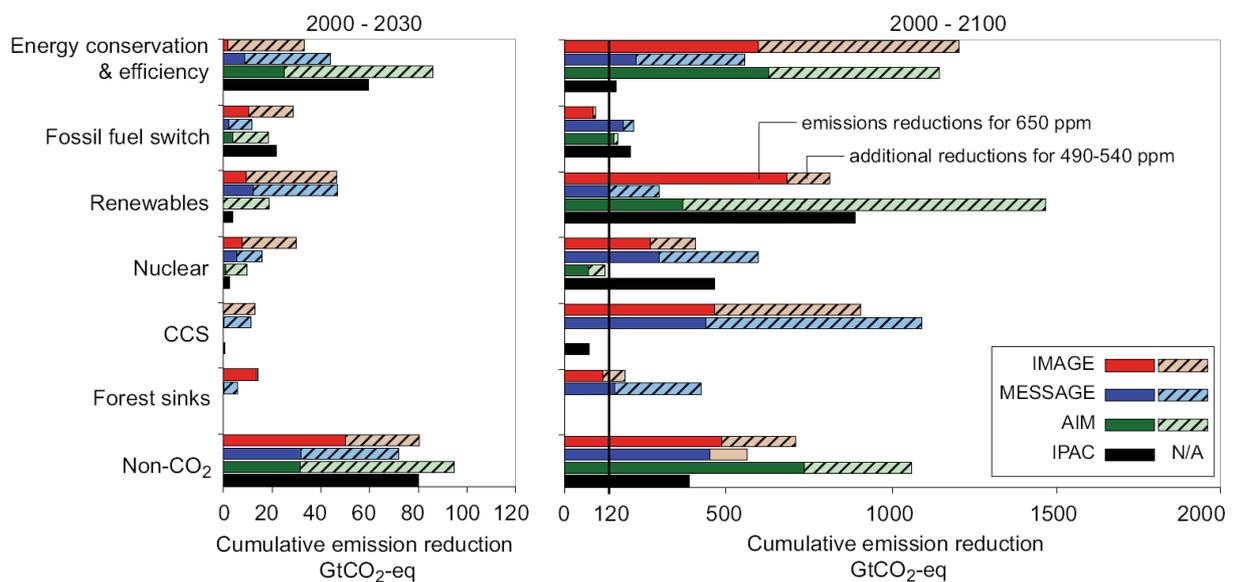
Les sphères environnementale, économique et sociétale du développement durable sont évidemment en interaction. Par exemple, le niveau des consommations énergétiques actuelles du parc existant n'est pas sans conséquences sur le plan économique et social. Selon le Comité stratégique du Plan Bâtiment Grenelle, environ 7 millions de Français se trouvaient en situation de précarité énergétique, en 2009. Près d'un 1,7 millions de personnes sont régulièrement en situation d'impayés (INSEE, 2006). La part des dépenses énergétiques dans le revenu des ménages les plus pauvres est passée de 10 à 15% entre 2001 et 2006 (Pouget, 2011).

Sur le plan environnemental, si les impacts du secteur sont incontestables, la Construction demeure pour autant l'un des principaux gisements d'économies d'énergie et de réduction du potentiel de changement climatique, en l'état actuel des technologies.

La sobriété et l'efficacité énergétique sont clairement identifiées comme des axes prioritaires de lutte contre le changement climatique, notamment à court et moyen terme, soit sur la période 2000-2030 (GIEC, 2007).

La Figure 2 compare ainsi les potentiels de réduction des émissions de GES de différentes approches technologiques dont : les économies d'énergie (incluant celles du Bâtiment), le développement des énergies renouvelables, la production d'électricité nucléaire, le stockage géologique du carbone (CCS), l'exploitation forestière durable valorisant les puits de carbone, etc. Les réductions cumulées aux horizons à court-moyen terme (2000-2030) ou long terme (2000-2100) sont évaluées suivant deux cibles de stabilisation des concentrations de GES en atmosphère : 650 ppm ou 490-540 ppm.

Si sur le long terme, différentes voies apparaissent complémentaires, sobriété et efficacité énergétique demeurent les principaux leviers sur la période 2000-2030.



**Figure 2. Réductions cumulées sur la période 2000-2030 (gauche) et 2000-2100 (droite), pour différentes mesures de maîtrise des émissions de GES (GIEC, 2007)**

Dans l'état actuel des technologies, la Construction constitue donc un gisement considérable d'économies d'énergie et de mitigation des impacts sur l'Environnement. La réduction des consommations énergétiques et la qualité environnementale des bâtiments sont ainsi des priorités de la politique énergétique européenne (« paquet énergie climat ») (EC, 2003).

### **Eco-conception des bâtiments et priorité à la réhabilitation de l'existant**

L'éco-conception des bâtiments vise précisément à concevoir des espaces habitables suivant des stratégies visant à limiter les consommations de ressources, à réduire les déchets et les émissions polluantes sur le cycle de vie des ouvrages, en offrant aux usagers des conditions de vie et de travail confortables et saines (Woolley et al, 1997).

En Europe occidentale, comme dans la plupart des pays développés, les analyses de cycle de vie de bâtiments soulignent l'importance des consommations énergétiques en exploitation (chauf-

fage, climatisation, ventilation, eau chaude sanitaire, éclairage et autres usages) sur le bilan énergétique et environnemental des constructions, sur leur cycle de vie (Peuportier et al., 2011).

En construction neuve comme en réhabilitation, il est donc nécessaire de définir des programmes permettant de limiter ces consommations énergétiques, tout en préservant le confort des occupants sur ces différentes dimensions.

Les cadres réglementaires nationaux ont ainsi évolué sur les exigences en termes de performances énergétique, en témoignant la Réglementation Thermique 2012 (RT2012), introduisant en France le bâtiment basse consommation (BBC) ou la RT2020 visant le bâtiment à énergie positive. Cependant, ces évolutions ambitieuses ciblent essentiellement la construction neuve.

Or, le taux de renouvellement du parc de bâtiments existants est très faible, inférieur à 1% par an dans la plupart des pays développés (Meijer et al, 2009). Ce taux de 1% représente d'ailleurs davantage la croissance du parc existant (300,000 logements) qu'un réel renouvellement.

Par conséquent, l'effort porté sur les constructions neuves, certes nécessaire à la mutation des parcs existants, ne suffira pas à atteindre des objectifs comme le Facteur 4. La réhabilitation énergétique du parc existant représente un enjeu considérable et un levier majeur dans la poursuite des engagements nationaux ou internationaux en matière de changement climatique et de réduction des consommations d'énergie non renouvelables (IEA, 2008b).

## **Etat du parc existant français**

En France, le secteur résidentiel et tertiaire est le premier responsable des consommations d'énergie. L'usage des bâtiments représente ainsi en 2010 environ 68,1 millions de tonnes équivalent pétrole (MTep), soit près de 45% de la consommation totale, dont 47.3 MTep pour le résidentiel et 21.6 pour le tertiaire (SOeS, 2010).

Le parc résidentiel comporte environ 33 millions de logements, dont 27,7 millions de résidences principales et 44% en bâtiment collectif. Le secteur du Logement représente 75% de la surface totale de bâtiments et environ 70% de la consommation d'énergie finale (ADEME, 2011). Parmi les résidences principales, 11 millions de logements appartiennent au parc locatif, 15 millions sont occupés par les propriétaires.

En termes énergétiques, l'introduction de la première Réglementation Thermique (RT) marque une scission claire entre les bâtiments résidentiels antérieurs à 1974, généralement non-isolés à la construction, et ceux postérieurs à 1974 ayant dû satisfaire à une réglementation et donc nécessairement isolés. 58% des logements français ont été construits avant 1974 (Pouget, 2011), ils sont responsables de 65% des consommations d'énergie. A partir de 1974, la performance énergétique des constructions neuves progresse graduellement au rythme des réglementations thermiques (1982, 1988, 2000, 2005, 2012).

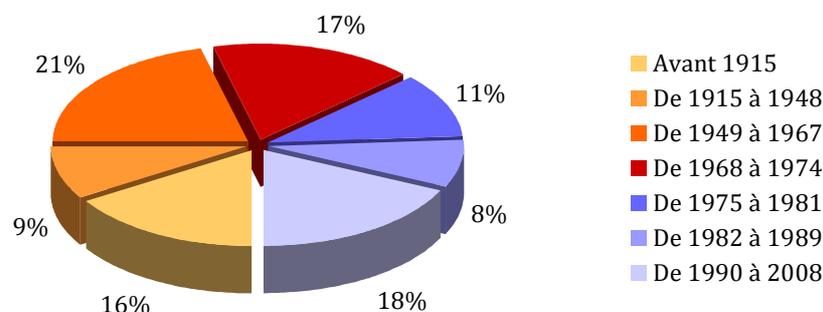
En moyenne sur le parc existant, la consommation énergétique pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) atteint 240 kWh/m<sup>2</sup>.an (ADEME, 2011).

La répartition moyenne de la consommation d'énergie par usage des résidences principales est de 62,7 % pour le chauffage, 12 % pour l'eau chaude, 6,8 % pour la cuisson et 18,5 % pour les usages spécifiques, qui continuent leur progression (ADEME, 2011).

Le parc résidentiel collectif compte 14 millions de logements, dont 63% construits avant 1974. La consommation d'énergie pour le chauffage atteint 330 kWh/m<sup>2</sup>.an en moyenne.

Etant donné leur état partiellement rénové (en particulier dans le cas de certaines copropriétés du fait de la complexité des mécanismes de décision), leur nombre et leurs niveaux de consommations énergétiques, les logements collectifs d'avant 1974 constituent une cible prioritaire.

Le segment issu de la reconstruction, et plus largement construit entre 1948 et 1974, apparaît d'ailleurs plus énergivore que les constructions du début du XX<sup>ème</sup> siècle. Il représente 75% des consommations d'énergie des bâtiments collectifs, pour 38% des logements (Pouget, 2011).



**Figure 3. Répartition des logements collectifs en fonction des dates de construction (Pouget, 2011)**

Le secteur tertiaire constitue également un enjeu considérable. Il représente une surface chauffée de plus de 912 millions de m<sup>2</sup>. 65% de la surface tertiaire est dévolue aux activités commerciales, d'enseignement et de bureaux. 70% des bâtiments ont plus de 30 ans.

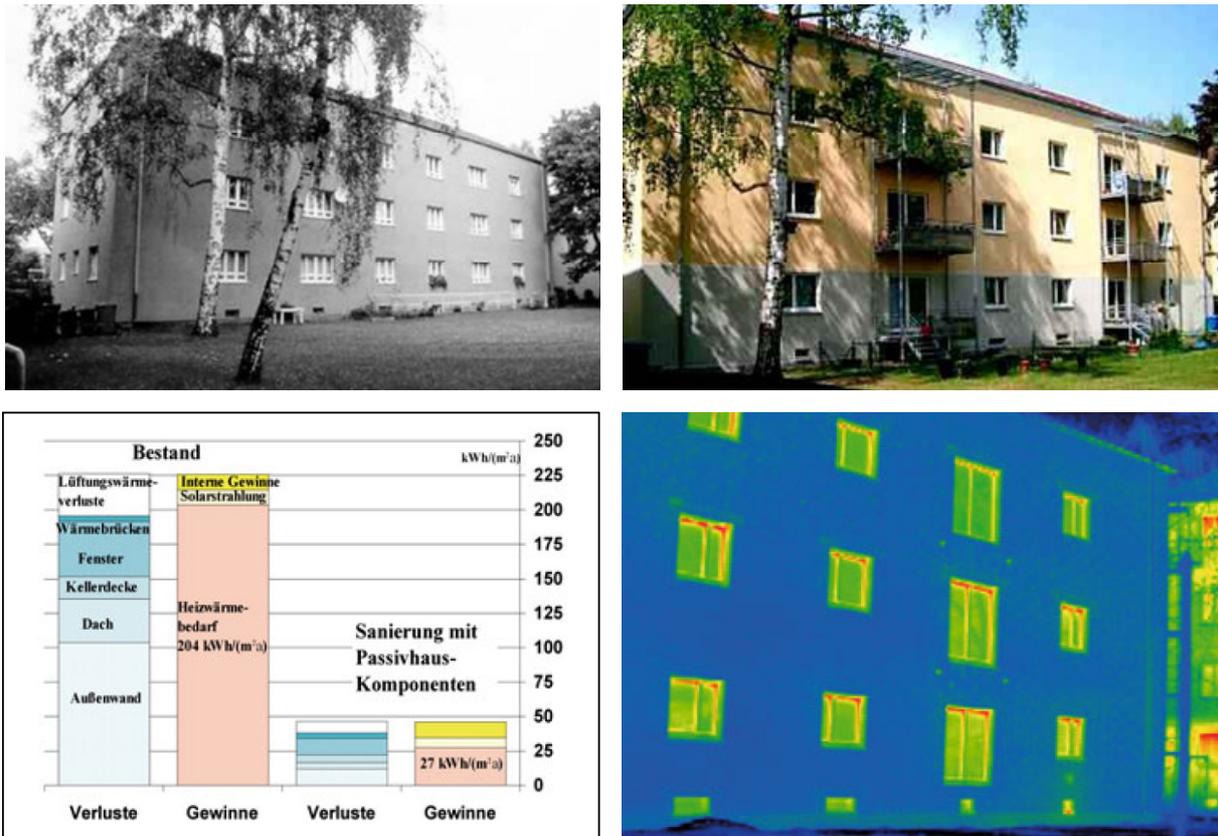
En moyenne, la consommation d'énergie atteint 209 kWh/m<sup>2</sup>.an (ADEME, 2011). Suivant le type d'infrastructure, la part du chauffage varie entre 44% (commerces) et 86% (enseignement). Sur le plan énergétique, le secteur tertiaire se distingue du résidentiel par l'importance des consommations d'électricité spécifique et de climatisation. Les interventions de réhabilitation répondent donc à des logiques et des priorités sensiblement différentes.

L'état du parc existant souligne des niveaux élevés de consommations énergétiques, en particulier sur le segment résidentiel collectif, construit entre 1848 et 1974. Ces bâtiments constituent une cible prioritaire, sur laquelle se focalisent ces travaux de thèse. Les potentiels d'économies sont considérables, au vu des performances pouvant être atteintes en réhabilitation énergétique.

### **Des expériences encourageantes de réhabilitation énergétique**

La réhabilitation énergétique à haute performance existe ! La performance énergétique n'est pas réservée à la construction neuve, même si elle y est souvent plus simple à atteindre.

Plusieurs dizaines d'opérations de réhabilitation ont ainsi démontré que les consommations énergétiques en usage des bâtiments existants peuvent être réduites très significativement (Sidler, 2009). La Figure 4 illustre le cas d'un bâtiment résidentiel de Nuremberg pour lequel le besoin de chauffage (204 kWh/m<sup>2</sup>.an, avant réhabilitation) a été réduit de 88%. Sur cette figure, les façades avant et après réhabilitation sont apparaissent respectivement en haut à gauche et à droite. La pose d'une isolation thermique par l'extérieur a permis de réduire considérablement les déperditions de l'enveloppe, comme le suggère l'image de thermographie (en bas à droite). Le coût de cette opération représente 530 €/m<sup>2</sup>.



**Figure 4. Exemple de réhabilitation à haute performance énergétique  
« Das Nürnberger 3-Liter Haus » Jean Paul Platz 4 (Schulze Darup, 2005)**

Ces opérations à haute performance mettent en œuvre des combinaisons intégrées de différentes mesures de réhabilitation énergétique. Ces interventions concernent l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, la limitation des ponts thermiques, l'exploitation des gains solaires, l'efficacité et la régulation des équipements de production de chaleur et de ventilation, l'intégration d'une production d'énergie renouvelable, par exemple.

Associés de manière systémique, les matériaux, composants et systèmes d'aujourd'hui permettent d'atteindre des niveaux de performance énergétique élevée, en garantissant à terme le retour sur investissement.

*« L'ambition sur le parc existant doit être accentuée car il est techniquement et économiquement possible de diviser par un facteur 8 ou 10 les consommations d'énergie sur une bonne partie du patrimoine bâti ».*

Alain Maugard, Ingénieur Général des Ponts des Eaux et des Forêts  
Ancien Président du CSTB, Président de Qualibat.

## **Objectifs et approche méthodologique des travaux de thèse**

Face à l'importance de l'enjeu et à l'étendue du parc, l'ambition de réhabilitation énergétique commande d'accompagner les Professionnels de la Construction, dans la définition de programmes de réhabilitation efficaces, sur le cycle de vie des bâtiments existants.

Ces programmes se doivent d'envisager, de manière intégrée et potentiellement séquencée dans le temps, des combinaisons d'interventions de réhabilitation ciblant la réduction des besoins en énergie, l'efficacité des équipements et l'intégration des énergies renouvelables.

Si la réduction des consommations énergétiques et des impacts sur l'Environnement est un objectif intrinsèque, la réhabilitation énergétique doit également démontrer une pertinence économique et préserver voire contribuer au confort des occupants. Simulation thermique de bâtiments, analyse de cycle de vie et analyse du coût du cycle de vie sont autant d'outils servant l'évaluation de ces multiples objectifs.

Enfin, l'enjeu de la réhabilitation de l'existant impose de dépasser l'échelle du bâtiment et bien de travailler sur les stratégies d'intervention à l'échelle des parcs bâtis. Des acteurs comme les bailleurs sociaux sont demandeurs d'outils les accompagnant dans le déploiement de la réhabilitation sur l'ensemble de bâtiments dont ils ont la charge.

Cette thèse de doctorat se donne pour objectif de contribuer au développement de méthodologies et outils robustes, permettant d'identifier des stratégies efficaces de réhabilitation des bâtiments existants, sur une base multicritère et sur leur cycle de vie.

## **Plan du manuscrit**

Ces travaux de thèse de doctorat visent à produire des connaissances afin de contribuer à l'aide à la décision pour l'identification de programmes efficaces de réhabilitation énergétique, à partir de méthodes d'optimisation multicritère. Le mémoire est subdivisé en cinq Chapitres.

Le problème d'aide à la décision pour la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtis existants est spécifié et modélisé au Chapitre 1. Le positionnement de la recherche de stratégies efficaces au sein des projets de réhabilitation est précisé. Les variables d'action étudiées et les performances attendues pour les programmes de réhabilitation sont détaillées. Les fonctions objectifs ciblent en particulier les impacts environnementaux de l'ACV, des indicateurs financiers, le bien-être des occupants par le confort thermique adaptatif en été. Ce chapitre présente enfin une synthèse des approches académiques d'aide à la décision en contexte multicritère, ce qui permet de positionner la démarche d'optimisation multicritère, proposée dans ces travaux.

La nature du problème a conduit à construire une approche d'aide à la décision à partir de méthodes d'optimisation multicritère. Le Chapitre 2 présente l'approche par algorithme génétique. Sur la base d'une synthèse des principes généraux, un algorithme génétique est développé pour répondre à la problématique de réhabilitation énergétique séquentielle, à l'échelle d'un bâtiment. Un développement logiciel permet alors l'étude de la réhabilitation d'un immeuble résidentiel collectif, situé en banlieue parisienne. Celle-ci illustre l'approche d'aide à la décision, par l'identification de solutions efficaces et la description d'une surface de compromis.

L'approche par algorithme génétique du Chapitre 2 constitue une méthode pour l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle. Cependant, cette métaheuris-

tique stochastique ne fournit que des solutions approchées. Le Chapitre 3 construit alors une recherche de programmes de réhabilitation à partir de la programmation dynamique, méthode d'optimisation exacte. A partir des solutions exactes, la qualité des solutions obtenues par les méthodes approchées, telles les algorithmes génétiques, peut être qualifiée. De plus, l'influence, sur les solutions et leurs performances, de différents paramètres de modélisation comme le comportement des occupants, les scénarios d'évolution du coût des énergies ou de maintenance et de remplacement des composants de réhabilitation, sont analysées par études de sensibilité.

La réalité opérationnelle des projets de réhabilitation commande de considérer des contraintes sur le financement des phases d'intervention. Le Chapitre 4 présente ainsi les principales techniques de prise en compte des contraintes faibles en optimisation multicritère stochastique, avant de proposer une approche appliquée à la réhabilitation énergétique des bâtiments. Une étude de cas sur la barre Grimaud met en œuvre l'approche développée.

Les quatre premiers Chapitres ont considéré la problématique de la réhabilitation énergétique à l'échelle du bâtiment. Le Chapitre 5 dépasse cette échelle pour s'intéresser aux stratégies d'interventions sur les parcs bâtis existants. L'approche par optimisation génétique est ainsi étendue au système « parc de bâtiments ». L'optimisation exacte par programmation dynamique est mobilisée pour contribuer aux réflexions sur la problématique des typologies de bâtiments en réhabilitation énergétique.

Au terme de ce mémoire, un bilan des travaux entrepris est proposé et une mise en perspective esquissée. En particulier, sont discutées les limitations actuelles, quelques pistes de développements complémentaires, le positionnement de ces méthodes et outils dans le processus global d'aide à la décision pour la réhabilitation énergétique des bâtiments existants.

# Chapitre 1

## **Aide à la décision pour la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants**

---

*Ce chapitre se donne pour objectif de dresser l'état de l'art et de présenter la démarche d'aide à la décision, pour l'identification de programmes systémiques de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants.*

*Le positionnement de la recherche de stratégies efficaces au sein des projets de réhabilitation est ainsi précisé. Les variables d'action étudiées et les fonctions objectifs servant ici l'évaluation des programmes de réhabilitation sont détaillées. Ce chapitre présente enfin une synthèse des approches académiques d'aide à la décision en contexte multicritère, ce qui permet de positionner la démarche d'optimisation multicritère, proposée dans ces travaux.*

---

## Plan du chapitre 1

1.1	Introduction	27
1.2	Espace de décision et espace des objectifs	29
1.2.1	Définitions	29
1.2.2	Espace de décision et mesures de réhabilitation	30
1.2.3	Espace des objectifs et réhabilitation	41
1.3	Evaluation des solutions et modèle de cycle de vie	55
1.3.1	Introduction à l'approche d'analyse de cycle de vie	55
1.3.2	Précisions sur le cadre et les objectifs de l'étude	56
1.3.3	Modèle de cycle de vie et analyse de l'inventaire	57
1.3.4	Conclusion	68
1.4	Présentation de l'étude de cas	69
1.4.1	Présentation de la barre Grimaud	69
1.4.2	Etat avant réhabilitation	70
1.4.3	Mesures de réhabilitation	77
1.4.4	Problématique systémique et interactions entre les mesures	81
1.5	Aide à la décision et multicritère	84
1.5.1	Concepts de base en multicritère	84
1.5.2	Approches par simulations	88
1.5.3	Approches d'aide multicritère à la décision	89
1.5.4	Conclusion et choix d'une approche par optimisation multicritère	93
1.6	Optimisation et multicritère	95
1.6.1	Formalisation du problème d'optimisation	95
1.6.2	Approches basée sur la préférence	97
1.6.3	Méthodes Pareto de génération	100
1.6.4	Conclusion sur l'optimisation multicritère pour la réhabilitation	109
1.7	Conclusion	111

## 1.1 Introduction

Plus de 60% des bâtiments de 2050 existent déjà (CSTB, 2009) ! Le taux de renouvellement moyen du parc existant est inférieur à 1% par an, en France. La réhabilitation énergétique des bâtiments existants est une priorité en termes de développement durable, pour espérer répondre aux engagements pris à l'échelle internationale ou nationale en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre, comme le Facteur 4.

### Rénovation et réhabilitation

Sur leur cycle de vie, les bâtiments peuvent faire l'objet d'opérations de rénovation ou de réhabilitation, deux notions à différencier (Rosenfeld et Shohet, 1999). En rénovation, les modifications apportées à l'ouvrage existant visent traditionnellement des actions de maintenance, destinées à recouvrer l'état physique et les performances initiales du bâtiment, à l'état neuf. Par opposition, la réhabilitation vise au contraire l'amélioration des performances du bâtiment existant, au-delà de leur niveau à la livraison de la construction neuve. Nous nous intéressons ici à la réhabilitation.

### Deux contextes d'aide à la décision en réhabilitation

Dans le cadre de la réhabilitation de bâtiment, il existe deux situations nécessitant aide à la décision (Kolokotsa et al., 2009) : la gestion du bâtiment en usage, en temps réel, et l'aide à la décision en conception, en amont du projet.

Les approches d'aide à la décision en temps réel recourent généralement à l'instrumentation, plus ou moins conséquente, du bâtiment considéré. Elles exploitent le suivi direct ou l'anticipation des performances du bâtiment et des conditions extérieures (dont climatiques) pour adapter la stratégie de gestion, optimiser les consignes et régulations des systèmes.

L'aide à la décision en amont cible quant-à elle la performance du bâtiment par la conception, par l'identification et le choix de composants ou systèmes à intégrer au projet de construction pour en améliorer les performances.

Ces deux approches sont évidemment complémentaires du point de vue de l'optimisation des performances sur le cycle de vie. Elles peuvent mobiliser des outils scientifiques similaires comme par exemple les méthodes d'optimisation. Certains travaux sur la régulation dynamique des consignes de chauffage et des protections solaires mettent ainsi en œuvre une technique de programmation dynamique (Favre et Peuportier, 2012), également appliquée dans cette thèse.

### Positionnement en aide à la décision

Les présents travaux visent à contribuer à l'aide à la décision en conception, par l'identification des programmes de réhabilitation optimaux à l'échelle d'un ou de plusieurs bâtiments, et comme préalable à l'optimisation de la gestion dynamique des ouvrages.

Un problème d'aide à la décision est classiquement caractérisé par (Mousseau, 2010) :

- Un groupe d'acteurs : décideurs, parties prenantes et analystes ;
- Un type de problème ;
- Un ensemble de solutions potentielles ;
- Une famille de critères de décision ;
- Une approche d'aide à la décision.

Dans ce contexte d'aide à la décision, nous nous positionnons en tant qu'analystes, et nous proposons de mettre en œuvre une approche fournissant aux décideurs (maîtres d'ouvrages, architectes, bureaux d'études) des solutions efficaces et une description des compromis accessibles. Les sections suivantes précisent la nature mathématique du problème d'aide à la décision, à partir de la description des solutions potentielles et du choix des critères de décision.

### **Aide à la décision et conception des programmes de réhabilitation**

En conception, l'aide à la décision pour l'identification des programmes de réhabilitation optimaux impose classiquement 4 étapes, explicitées ci-après :

- Définition des critères de décision.
- Audit énergétique du bâtiment existant.
- Présélection des mesures élémentaires adaptées au projet de réhabilitation.
- Identification des stratégies efficaces de réhabilitation.

La définition des critères de décision est une étape fondamentale du processus d'aide à la décision. Elle est établie à partir des réglementations et directives en vigueur mais procède aussi du dialogue entre les différents acteurs (décideurs, parties prenantes et analystes), qui au-delà des critères réglementaires peuvent choisir de s'intéresser à d'autres aspects performantiels du bâtiment. A partir de la définition de ces critères de décision, les performances des programmes de réhabilitation peuvent être évaluées. Les critères de décision considérés dans cette thèse sont présentés en partie 1.2.3.

L'objectif de l'audit énergétique est d'établir l'inventaire détaillé de l'ensemble des informations permettant de calibrer le modèle du bâtiment existant : consommations énergétiques en usage, caractéristiques géométriques et physiques, systèmes mis en œuvre et performances, conditions climatiques, environnement urbain, ressources, mode de vie et habitudes des occupants, etc. A partir de l'audit, un modèle numérique peut alors être reconstruit permettant de calculer les performances (gains obtenus) des programmes de réhabilitation par rapport à l'état actuel du bâtiment. La qualité de l'audit conditionne la garantie de performance énergétique. Cet enjeu fait l'objet de nombreux travaux actuels (<http://www.batiment-energie.org/>). Nous nous plaçons ici en aval de l'audit énergétique.

A partir de l'audit précédent, en fonction des caractéristiques du projet et des objectifs de performances, des mesures de réhabilitation élémentaires peuvent alors être identifiées parmi les matériaux, composants et systèmes de construction existants (Wilde and van der Voorden, 2004). Par exemple, pour la réhabilitation des façades d'un bâtiment donné, on peut être amené à considérer une isolation thermique par l'extérieur (ITE), à base de polystyrène expansé, d'une épaisseur variant entre 50 et 150mm, revêtue d'un enduit projeté. Les travaux de thèse ne se concentrent pas spécifiquement sur cette étape d'identification experte, fonction des spécificités

du bâtiment, de son usage et de son contexte climatique. Par hypothèse, on suppose que les mesures de réhabilitation proposées ont été identifiées conformément aux spécificités du projet. Les mesures de réhabilitation élémentaires étudiées sont détaillées en partie 1.2.2.

Enfin, des stratégies de réhabilitation systémiques, efficaces sur le cycle de vie étendu du bâtiment, doivent être élaborées à partir d'une combinaison cohérente de mesures élémentaires, éventuellement séquencée dans le temps, en fonction des critères de décision retenus. Cependant, l'identification de programmes de réhabilitation optimaux, incluant le phasage des travaux, demeure une tâche difficile pour les professionnels du secteur. Certes, de nombreux outils de simulation existent aujourd'hui et permettent aux concepteurs et bureaux d'études de prédire les performances, dont le bilan énergétique des constructions qu'ils conçoivent. Cependant, en pratique, la recherche de programmes de réhabilitation optimaux est généralement itérative et procède de l'expérience des professionnels (Alanne, 2004).

## Objectifs des travaux

L'objectif de ces travaux de thèse est de contribuer à l'aide à la décision en conception, par l'identification des programmes de réhabilitation efficaces, sur une base multicritère, et sur le cycle de vie des bâtiments réhabilités. Ce chapitre décrit l'approche d'aide à la décision suivie, depuis la définition des solutions potentielles et des critères de décision jusqu'à l'identification d'une approche de résolution.

## 1.2 Espace de décision et espace des objectifs

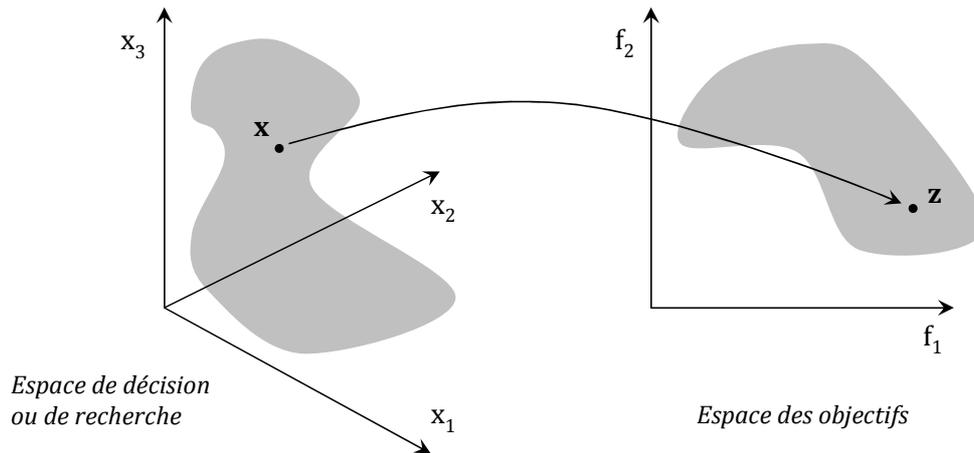
L'identification d'une approche d'aide à la décision dépend de la nature du problème étudié et donc de l'espace de recherche et des critères de décisions. Cette section précise la définition de l'espace de décision et de l'espace des objectifs considérés dans le cas de la réhabilitation énergétique des bâtiments existants.

### 1.2.1 Définitions

L'espace de recherche, noté  $X$ , désigne l'ensemble des solutions potentielles du problème. Il est défini à partir des domaines de variations des paramètres ou variables caractérisant les solutions du problème. La dimension de l'espace de décision dépend du nombre de ces variables. Sa nature, continue ou discrète, est déterminée par celle des variables.

Les critères de décision, aussi appelés fonctions objectifs, indicateurs ou attributs, sont les fonctions mathématiques permettant d'évaluer quantitativement ou qualitativement les performances des solutions potentielles. Les fonctions objectifs considérées définissent l'espace des objectifs, noté  $Z$ , dont la dimension dépend du nombre de critères de décision.

La Figure 5 représente l'espace de décision et l'espace des objectifs d'un problème à deux objectifs et dont les solutions sont caractérisées par trois paramètres. Une solution  $x$  du problème est donc définie à partir des valeurs prises par les trois variables  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$ . L'évaluation des performances de la solution  $x$  sur les critères de décision  $f_1$  et  $f_2$  permet d'identifier un point unique  $z$  de l'espace des objectifs dont les coordonnées sont les valeurs prises par  $x$  sur  $f_1$  et  $f_2$ .



**Figure 5. Représentation des espaces de décision et des objectifs correspondant, pour un problème à 3 paramètres et deux fonctions objectifs.**

## 1.2.2 Espace de décision et mesures de réhabilitation

L'espace de décision ou de recherche est défini par l'ensemble des solutions potentielles du problème de réhabilitation énergétique.

La performance énergétique d'un bâtiment dépend des conditions climatiques locales, du comportement énergétique du bâtiment et des conditions de confort intérieures requises. L'évolution des conditions météorologiques locales peut être mesurée, voire prédite dans une certaine mesure. Les consignes de chauffage sont définies et peuvent être modulées par l'occupant. Le facteur à maîtriser dès les étapes préliminaires de conception demeure le comportement énergétique du bâtiment (enveloppe et équipements inclus) (Gero et al., 1983).

Les solutions du problème, soit les programmes de réhabilitation énergétique, doivent donc s'attacher à améliorer le comportement énergétique des bâtiments existants. Chacun de ces programmes est caractérisé la double donnée de : sa composition et du phasage des travaux qu'il impose. Notre contribution à l'aide à la décision cible tant l'identification de la combinaison de mesures élémentaires de réhabilitation à mettre en œuvre que la séquence de mise en œuvre.

### 1.2.2.1 Etat de l'art des mesures de réhabilitation existantes

La composition des programmes de réhabilitation représente la combinaison de mesures élémentaires à mettre en œuvre. Dans ces travaux, nous nous intéressons exclusivement aux technologies existantes, disponibles sur le marché. Des développements ultérieurs pourront avantageusement étudier l'influence de l'intégration de technologies prospectives sur les stratégies de réhabilitation proposées.

Il existe aujourd'hui une grande diversité de mesures de réhabilitation (Gero et al., 1983 ; Kolokotsa et al, 2009 ; Marszal et al, 2011 ; Diakaki, 2008). Ces mesures peuvent être envisagées individuellement ou composer des programmes de réhabilitation, ciblant le bâtiment de manière systémique, sur l'ensemble des aspects énergétiques :

- L'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment ;
- L'étanchéité à l'air de l'enveloppe ;
- La forme géométrique et la compacité du bâtiment ;
- L'exploitation et le contrôle passif ou actif des gains solaires (dont l'orientation bioclimatique ou l'inertie thermique) ;
- L'efficacité énergétique des équipements ;
- L'intégration de production d'énergie renouvelable ;
- La gestion énergétique dynamique active en usage.

Sans ambition à l'exhaustivité, le Tableau 1 détaille les actions les plus fréquemment mises en œuvre en réhabilitation, pour chacune de ces mesures. La description des différents composants et systèmes existant sur le marché, pour chacune des catégories identifiées, n'est pas l'objet de ce travail. Cependant, quelques remarques peuvent être faites dans le cas de la réhabilitation.

La réhabilitation se distingue de la construction neuve par une évidente réduction des degrés de liberté en conception. En particulier, la forme géométrique du bâtiment est généralement peu amenée à évoluer après la construction initiale.

Une modification de la compacité d'un ouvrage existant n'est pourtant pas à exclure. Paramètre descriptif géométrique, la compacité d'un bâtiment peut être définie comme le rapport de son volume intérieur, divisé par sa surface d'enveloppe, soit l'ensemble des parois en contact avec l'extérieur. Certaines mesures de réhabilitation ou certains projets immobiliers peuvent tendre à améliorer la compacité des bâtiments existants, par exemple :

- Fermeture des balcons ou loggias ;
- Création d'atrium entre deux bâtiments proches (espace non chauffé) ;
- Construction d'un étage supplémentaire.

De la même perspective, si l'orientation des façades du projet construit peut difficilement être remise en cause, le ratio de surface vitrée par paroi demeure un paramètre permettant d'agir sur la surface de captage solaire par façade, soit l'orientation bioclimatique de l'ouvrage existant.

L'inertie thermique d'un bâtiment désigne la capacité de l'ouvrage à amortir de manière passive les variations extérieures de température, en mobilisant la capacité thermique massique des matériaux en contact avec l'ambiance intérieure. Cet amortissement s'accompagne en général également d'un déphasage. L'inertie d'un bâtiment existant peut être affectée par les opérations de réhabilitation. Par exemple, la pose d'une isolation thermique par l'intérieur modifie nécessairement les échanges thermiques par conduction entre la masse thermique structurelle et l'ambiance intérieure. Dans ces travaux, l'inertie n'est cependant pas vue comme une variable d'action explicite des programmes de réhabilitation mais plutôt comme un paramètre implicite, fonction des configurations géométriques et physiques des compositions de parois intérieures et d'enveloppe.

Stratégie	Système	Sous-système	Actions
Isolation thermique	Enveloppe	Toiture	Isolation thermique de la toiture dans les combles ou addition de panneaux d'isolant rigides sur la surface externe de la toiture.
		Murs extérieurs	Isolation thermique injectée dans les lames d'air ou isolation par l'intérieur (ITI) ou isolation par l'extérieur (ITE)
		Plancher bas	Isolation thermique du plancher en sous face ou pose d'isolant rigide sous chape
		Ouvrants	Remplacement des ouvrants existants par des vitrages haute performance basse émissivité (double ou triple) et menuiseries performantes en isolation Pose de double fenêtre Réduction des surfaces de vitrages Pose de volets isolants
Étanchéité à l'air		Ouvrants et systèmes	Utilisation de composants (portes, fenêtre) performants. Attention particulière sur la mise en œuvre des composants, dont en particulier l'étanchéité de l'interface entre la menuiserie et la structure de l'enveloppe. Contrôle de la mise en œuvre et actions correctives sur l'étanchéité à l'air de l'enveloppe (jointements, bandes adhésives d'étanchéité).
		Enveloppe	Pose de membrane d'étanchéité à l'air dans le cas des enveloppes à ossature.
Compacité	Bâtiment		Fermeture des balcons ou loggias Construction d'un atrium commun à différents bâtiments Construction d'un étage supplémentaire
Exploitation des gains solaires	Protections solaires et stratégies passives		Intégration de protections solaires externes ou internes (dont casquettes, etc.) Remplacement des ouvrants par des vitrages à hautes performances (contrôle solaire) Pose de films réfléchissants sur la face externe du vitrage Réduction de la surface de vitrage, à confort lumineux contrôlé. Exploitation de l'inertie thermique Murs capteurs
	Eclairage Chauffage passif		Intégration de lucarnes, puits de lumière, diffuseurs, étagères de lumière Optimisation de l'orientation bioclimatique (répartition des surfaces de vitrage) Exploitation de l'inertie thermique Pas de volets sur fenêtres des espaces chauffés non occupés
Efficacité des équipements	Équipements techniques	Chauffage	Remplacement de l'équipement existant par un système de chauffage à haut rendement (chaudière gaz/fuel basse température ou à condensation, cycle combinés, etc.)

		Intégration des ENR (énergies renouvelables): chauffage bois, pompe à chaleur, etc. Raccordement à un réseau de chaleur urbain (RCU)
	Ventilation	Remplacement de l'équipement existant par un système à récupération de chaleur sur l'air extrait (ventilation double flux), ou ventilation hygroréglable (type Hygro-B)
	ECS	Intégration des ENR (dont chauffe eau solaire thermique) Efficacité des moteurs et pompes
	Eclairage	Remplacement des lampes à incandescence : systèmes d'éclairage efficaces, lampes fluorescentes, LED, etc.
Autres équipements	Electricité Spécifique	Remplacement des équipements existants par des produits performants (dont électroménager et audiovisuel), gestion des veilles. Intégration des ENR : panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes, etc.
Suivi, contrôle et gestion énergétique du bâtiment en usage	Régulations des consignes de chauffage	Mesure des consommations et affichage : capteurs, mesure des consommations énergétiques, thermographie infrarouge, Intégration de régulations intelligentes : horloge programmable d'intermittence sur une régulation existante, thermostat d'ambiance programmable, robinets thermostatiques, ordinateurs de bord, systèmes de pilotage des stratégies de gestion en usage
	Contrôle des gains solaires	Capteurs et régulations pour le pilotage des protections solaires actives (dont stores déployables, volets, etc.)

**Tableau 1. Une classification des actions pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, adaptée de (Kolokotsa et al, 2009) (Marszal et al, 2011) (Diakaki, 2008).**

D'une manière générale, les travaux ciblant l'efficacité énergétique ou l'amélioration de la performance des bâtiments se concentrent sur quelques actions spécifiques, ou quelques types d'action. Ils intègrent rarement une approche systémique, étant donnée la complexité du problème (Kolokotsa et al, 2009).

### 1.2.2.2 Mesures de réhabilitation étudiées

Dans ces travaux, les mesures élémentaires considérées pour la réhabilitation énergétique forment un sous ensemble de l'inventaire de mesures précédemment décrit dans le Tableau 1. En particulier, on se focalise ici sur les paramètres généralement déterminés en phase de conception du programme de réhabilitation et ayant une influence considérable sur le bilan énergétique de la construction sur son cycle de vie. Dans la perspective d'une approche systémique, ce sous ensemble cible :

- **La réduction du besoin de chaleur** : isolation thermique de l'enveloppe (surfaces de toiture, de façades, de plancher bas), remplacement des ouvrants existants, optimisation du ratio de surface vitrée sur les façades ;
- **L'efficacité énergétique des équipements** : remplacement des systèmes existants de ventilation et de chauffage ;
- **L'intégration d'une production d'énergie renouvelable** : production d'eau chaude sanitaire à partir de panneaux solaires thermiques.

Pour chacune de ces mesures, plusieurs alternatives sont étudiées.

Dans le contexte d'un projet de réhabilitation donné, les travaux présentés ne portent pas sur l'identification des mesures élémentaires pertinentes mais bien sur l'identification de stratégies optimales à partir d'un ensemble d'actions élémentaires connu.

Cependant, les mesures considérées pour constituer les programmes de réhabilitation sont supposées avoir été préalablement identifiées à partir des spécificités locales du projet et donc de l'audit énergétique qui aura été conduit sur le bâtiment existant (caractéristiques géométriques et physiques, environnement urbain, climat, usage des locaux, etc.). On suppose par ailleurs que ces actions élémentaires de réhabilitation satisfont à l'ensemble des réglementations existantes, en particulier sur la sécurité et la santé humaine.

Formellement, les mesures élémentaires de réhabilitation sont représentées par des variables discrètes, en lien avec les contraintes industrielles de production. Par exemple, le concepteur peut rechercher quelle épaisseur d'isolation thermique mettre en œuvre sur une façade donnée, parmi des références dont il dispose : 100mm, 120mm, 140mm ou 200mm.

### 1.2.2.3 Détails sur les mesures de réhabilitation étudiées

Cette sous partie vise à apporter quelques compléments techniques sur les mesures de réhabilitation étudiées. Elle cible les matériaux, composants ou systèmes, et leur mise en œuvre.

## Isolation thermique par l'extérieur (ITE) de l'enveloppe

L'isolation thermique de l'enveloppe cible la réduction des transferts thermiques par conduction entre les espaces intérieurs et l'extérieur du bâtiment. L'isolation thermique peut être mise en œuvre par l'intérieur ou par l'extérieur ; le matériau d'isolation étant rapporté respectivement sur la face intérieure ou extérieure de la paroi d'enveloppe à isoler, comme l'illustre la Figure 6.

La mise en œuvre d'un matériau isolant, de faible conductivité thermique (exemple : laine de verre,  $\lambda = 0,041 \text{ W/(m.K)}$ ), contribue au confort thermique en hiver par la limitation de la sensation de paroi froide (la température de paroi d'un mur isolé est supérieure à celle d'une paroi non isolée). Par ailleurs, l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) limite les ponts thermiques, préserve l'inertie du bâtiment existant, n'impose aucune réduction de l'espace habitable ou intervention en site occupé, contrairement à l'isolation thermique par l'intérieur (ITI).

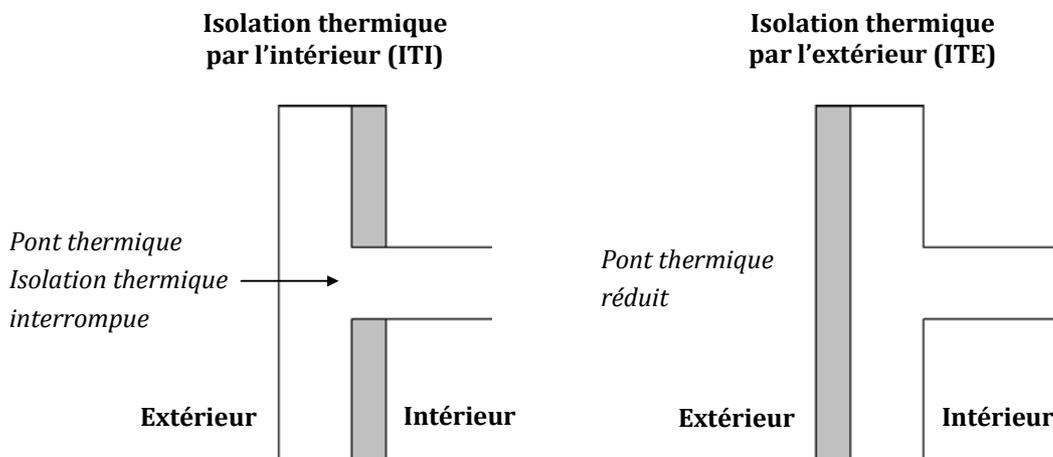


Figure 6. Position de l'isolant (ITE et ITI) et incidence sur les ponts thermiques

Différents matériaux d'isolation thermique (Tableau 2) peuvent être mis en œuvre : laine de verre, laine de roche, polystyrène expansé, polystyrène extrudé, polyuréthane, laine de bois, ouate de cellulose, panneaux sous vide.

Matériau	Conductivité [W/(m.K)]
Laine de verre	0,041
Laine de roche	0,041
Polystyrène expansé	0,039
Polystyrène extrudé	0,029
Polyuréthane	0,030
Laine de bois	0,042
Laine de chanvre	0,039
Ouate de cellulose	0,040 (0,035-0,045)
Panneaux sous vide	0,007

Tableau 2. Conductivité thermique de différents matériaux d'isolation (source : logiciel Pléiades)

Le prix et la conductivité thermique président en général au choix d'un matériau en dehors de contraintes spécifiques du projet ; les panneaux sous vide peuvent par exemple représenter une solution limitant la perte de surface habitable, dans les projets où d'isolation par l'intérieur est imposée. Les produits rigides ou à haute densité sont privilégiés pour l'isolation des planchers ou pour une pose en façade sous forme de panneaux collés. Les principales techniques de mise en œuvre de l'ITE en façade sont illustrées sur la Figure 7.

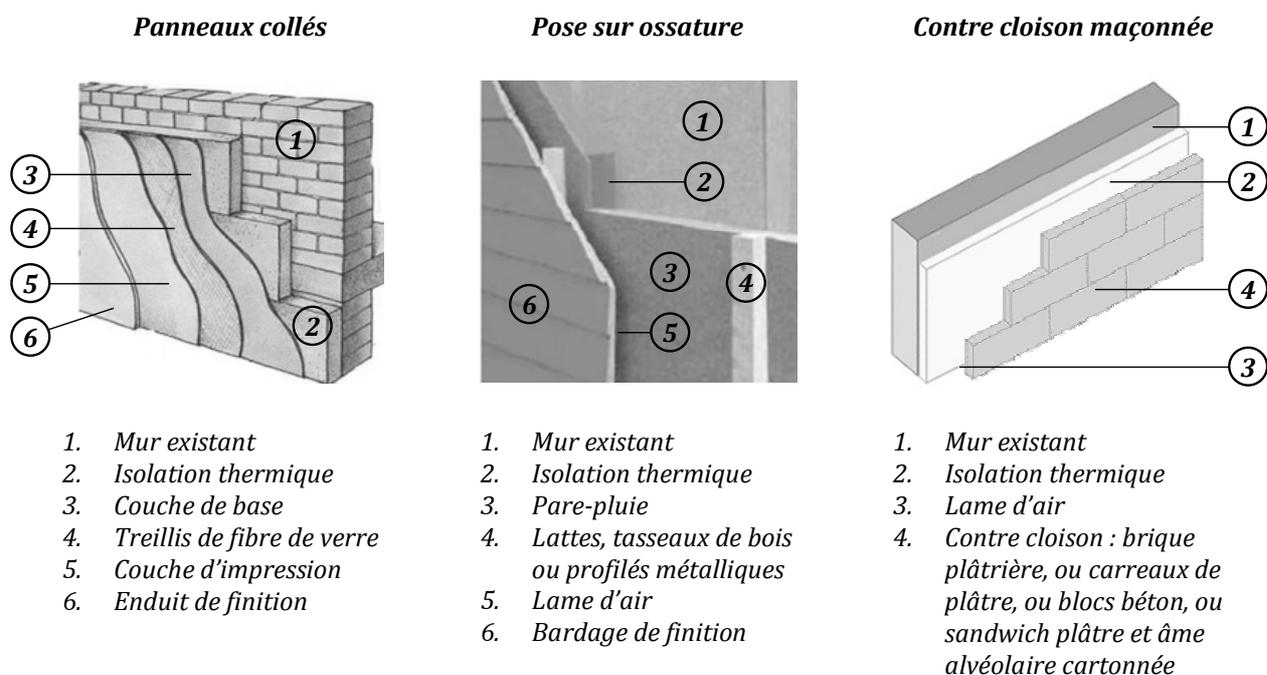


Figure 7. Illustration de quelques techniques de mise en œuvre de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) sur les façades (adapté de Sauvageon (2008))

## Remplacement des ouvrants

Les fenêtres à simple vitrage ou à double vitrages classiques ( $U_v \approx 3,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) sont des sources de déperditions thermique importantes. Le remplacement des menuiseries existantes par des fenêtres à isolation renforcée ( $U_v < 1,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ), à double ou à triple vitrage, permet de réduire les déperditions thermiques, contribue à diminuer les infiltrations d'air de l'enveloppe ainsi que les risques de condensation sur le vitrage, améliore le confort acoustique du point de vue des bruits extérieurs.

Les fenêtres les plus performantes sont à double ou triple vitrage et intègrent des lames d'air ou d'argon de quelques millimètres d'épaisseur entre les vitres pour réduire la conductivité globale du composant. Le dépôt en usine d'une fine couche d'oxyde métallique (de l'ordre de 1 angström) sur le vitrage intérieur limite l'émission du rayonnement infrarouge de la vitre chaude vers la vitre froide et contribue donc à la performance de la fenêtre en isolation : on parle de vitrage basse émissivité. Les doubles vitrages basse émissivité à lame argon sont ainsi caractérisés par un coefficient de transfert thermique du vitrage  $U_v$  de l'ordre de  $1,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  ; les triple vitrages pouvant atteindre un niveau de l'ordre de 0,7.

Différentes technologies permettent de réaliser des menuiseries (ouvrants et dormants) performantes en isolation : bois, mixte bois/aluminium, métal à rupture de pont thermique ou PVC.

Dans ces travaux, nous considérons différents types de fenêtres dont les double et triple vitrages à lame argon, basse émissivité et menuiseries bois.

Au chapitre de la mise en œuvre, les menuiseries doivent être posées dans le plan de l'isolation de l'enveloppe pour limiter les ponts thermiques, comme le suggère la Figure 8 (gauche). Une fois l'isolation thermique par l'extérieur posée, la fenêtre sera alors placée dans le plan de l'isolation de la paroi.



**Figure 8. Illustrations fenêtres performantes,  
Pose d'une menuiserie double vitrage en attente de l'isolation par l'extérieur (gauche),  
Fenêtre double vitrage à menuiserie mixte bois-aluminium (centre, source Bieber),  
Fenêtre triple vitrage à menuiserie bois (droite, source Bieber)**

Enfin, signalons que la pose de nouvelles menuiseries impose souvent d'intervenir en site occupé. De plus, la réduction des infiltrations contraint, si ce n'est pas déjà le cas, à l'intégration d'une ventilation mécanique, pour assurer le renouvellement sanitaire d'air intérieur et contrôler le niveau d'humidité dans l'ambiance.

### **Systeme de ventilation**

La ventilation des bâtiments est nécessaire pour assurer le renouvellement sanitaire de l'air intérieur et contrôler le degré d'humidité, pour éviter les risques de condensation, moisissures et dégradations relatives du bâti. Bon nombre de bâtiments existants sont encore ventilés naturellement, par les infiltrations d'air contrôlées ou non, au travers de l'enveloppe. La performance énergétique du bâtiment, dans nos contextes climatiques, impose un faible niveau de perméabilité à l'air de l'enveloppe, ayant pour conséquence la nécessaire introduction d'une ventilation mécanique contrôlée (VMC) performante.

Les niveaux de renouvellement d'air intérieur sont fixés par la réglementation et dépendent de la taille et du type d'occupation des pièces (en France, arrêtés du 29 octobre 1969, du 24 mars 1982 et du 28 octobre 1983).

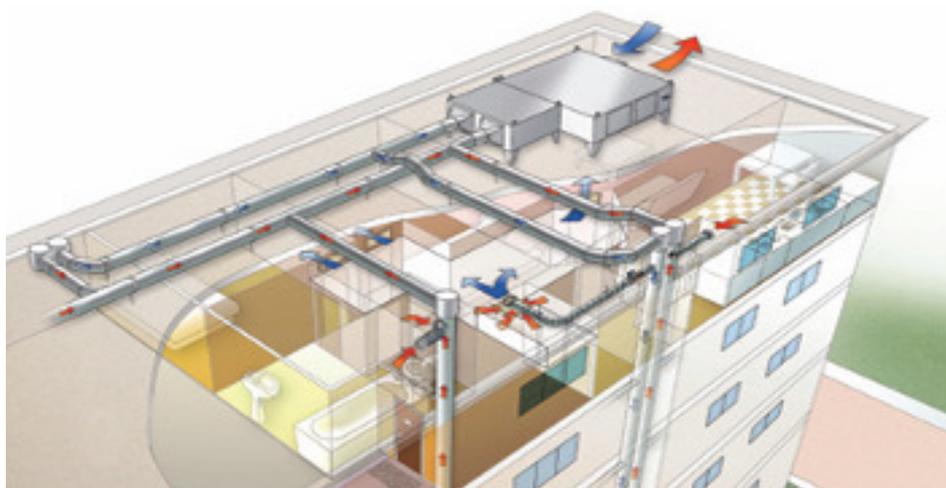
Débits sanitaires de renouvellement de l'air intérieur [m <sup>3</sup> /h]					
Nombre de pièces principales du logement	Cuisine	Salle de bains ou de douche avec cabinets d'aisance	Autre salle d'eau	Cabinet d'aisance unique	Cabinet d'aisance multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	15	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

**Tableau 3. Débits de ventilation dans les logements en France (Arrêtés du 24 mars 1982 et du 28 octobre 1983)**

Nous nous intéressons ici à deux systèmes en particulier : la ventilation simple flux hygroréglable de type B et la ventilation double flux.

Dans le cas de la VMC simple flux hygroréglable B, un ventilateur extrait l'air vicié par des bouches hygroréglables, situées dans les pièces humides (cuisine, salle de bains, WC). Le débit de ces bouches varie en fonction de l'humidité, ce qui permet de garantir l'évacuation rapide d'un air très humide tout en limitant les déperditions énergétiques (ventilation adaptée aux besoins). Le logement étant alors mis en légère dépression, l'air neuf entre par aspiration par des entrées d'air hygroréglables situées en pièces sèches (chambres et séjour). Les entrées hygroréglables sont situées spécifiquement au dessus des fenêtres.

Cet équipement convient particulièrement en réhabilitation, en particulier lorsqu'il est possible de mobiliser le réseau de conduites de la VMC existante. En revanche, le renouvellement d'air est concentré sur les moments où le niveau d'humidité est élevé, or un certain nombre de polluants peuvent être émis en continu (par exemple COV : composés organiques volatils).



**Figure 9. Ventilation double flux en logement collectif**

Le principe de fonctionnement de la ventilation double flux est illustré sur la Figure 9. L'air neuf qui est insufflé dans les pièces sèches par des bouches d'insufflation via un ventilateur. L'air vicié est extrait des pièces humides par un ventilateur. En hiver, la VMC double flux associée à un échangeur thermique (ou récupérateur sur air vicié) permettant de préchauffer l'air entrant à l'aide de l'air sortant et, pour une maison climatisée, l'été de rafraîchir cet air. L'échangeur, dont le rendement peut atteindre plus de 80%, permet de limiter les pertes énergétiques engendrées par le renouvellement d'air.

En revanche, ce système impose généralement la création d'un réseau secondaire pour l'insufflation d'air neuf dans les logements. Le ventilateur d'insufflation engendre une consommation électrique plus importante que dans le cas d'une VMC simple flux. L'installation d'une ventilation double flux requiert souvent une intervention en site occupé.

## **Système de chauffage**

Le remplacement du système de chauffage existant permet notamment d'améliorer le rendement de génération de chaleur. Dans ces travaux, une seule alternative de chauffage est proposée en remplacement du système existant : l'installation d'une chaudière gaz à condensation. D'autres possibilités pourront être ultérieurement étudiées comme : les chaudières bois, les pompes à chaleur, le raccordement au réseau de chauffage urbain (suivant les cas), etc.

Les chaudières gaz à condensation exploitent la combustion du gaz naturel pour produire de la chaleur. Avant d'être rejetées, les fumées issues de la combustion sont refroidies jusqu'à condenser la vapeur d'eau contenue dans les gaz de combustion, pour récupérer la chaleur latente de condensation et ainsi optimiser le rendement de l'installation. Les condensats sont traités en circulant dans un bac de neutralisation, avant d'être rejetés dans le réseau d'eaux usées.

Grâce à la récupération de chaleur latente sur la vapeur d'eau, les chaudières gaz à condensation atteignent de très hauts niveaux de rendement : environ entre 102 et 110 % sur PCI. Le PCI (pouvoir calorifique inférieur du gaz) est la quantité d'énergie qu'on peut retirer de la combustion du gaz, sans condensation des fumées. Le rendement sur PCI ne prend donc pas en compte la chaleur latente de condensation, que le rendement sur PCS (pouvoir calorifique supérieur) intègre. Ces très hauts rendements permettent de réduire les consommations de gaz par rapport aux chaudières traditionnelles.

La chaleur produite permet de chauffer de l'eau. Cette eau chaude va ensuite circuler dans les radiateurs pour chauffer la maison. Elle peut également être mobilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire, qui est dans ce cas stockée dans un ballon d'eau chaude à proximité de la chaudière à condensation gaz.

En réhabilitation, le dimensionnement du générateur doit être réalisé en fonction des besoins courants du bâtiment et non pas par rapport à la puissance nominale du générateur existant, qui peut s'avérer inadaptée.

Dans le cas où le chauffage du bâtiment utilisait déjà une chaudière centrale, l'ensemble des circulations et les radiateurs peut être conservé avec le nouvel équipement.

## Production d'eau chaude sanitaire solaire thermique

La production d'eau chaude sanitaire (ECS) est généralement assurée par une chaudière thermique (gaz ou fioul) ou un ballon électrique. En réhabilitation, nous proposons d'intégrer un chauffe-eau solaire thermique. Une part des besoins de chaleur pour la production d'ECS est alors directement assurée par le captage du rayonnement solaire, ce qui permet une réduction nette des consommations d'énergie non renouvelables.

Le principe général du chauffe-eau solaire est présenté sur le système de la Figure 10. Le rayonnement solaire incident est absorbé par un capteur ou panneau solaire thermique (1), basé généralement sur une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers un ballon de stockage (3), avant utilisation finale (Joffre, 2004). Un échangeur thermique (2) peut être placé entre le circuit primaire de chauffage solaire et le circuit secondaire de stockage et distribution de l'ECS. Un appoint énergétique (4) est intégré pour couvrir les besoins résiduels de chaleur et faire face à l'intermittence de la production solaire.

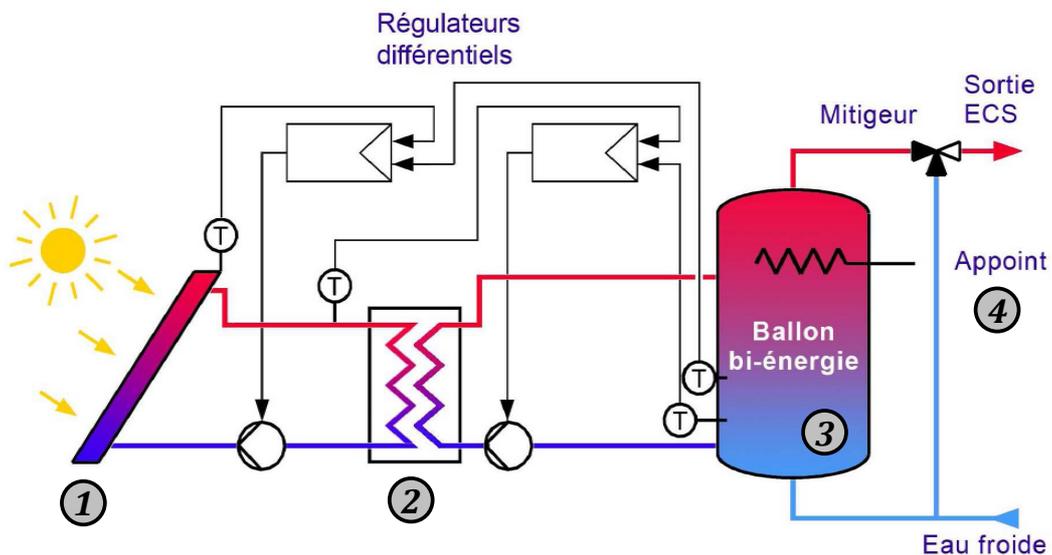


Figure 10. Illustration d'un système de chauffe-eau solaire à appoint intégré (COSTIC, 2007)

La plupart des capteurs sont munis d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire incident et limite les pertes par convection et l'émission de rayonnement infrarouge de l'absorbeur. Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction.

Il existe de multiples équipements capteurs et montages possibles, aux performances variées. L'étude de différents systèmes et stratégies de régulation a fait l'objet de différentes publications (Duffie et Beckman, 1980 ; Joffre, 2004 ; Bay, 2009 ; Yettou1 et al., 2008).

Les températures de chauffe dans les ballons de stockage doivent être bien adaptées, supérieures à 55°C, pour éviter les risques sanitaires et en particulier le développement des légionelles.

#### 1.2.2.4 Phasage des travaux

Le phasage des travaux représente la permutation, au sens mathématique, de la combinaison de mesures élémentaires de réhabilitation, considérée pour un programme donné. Cette permutation fixe la séquence de mise en œuvre des actions.

Le phasage des opérations intervient nécessairement si l'ensemble du programme de réhabilitation ne peut être considéré en une seule phase, pour des questions de financement ou d'intervention en site occupé, par exemple.

Dans la pratique, toutes les permutations potentielles ne peuvent être considérées. Par exemple, la réhabilitation de l'enveloppe associée au remplacement des ouvrants et à l'étanchéité à l'air de l'enveloppe impose une réflexion sur la ventilation. En effet, si le renouvellement de l'air intérieur était assuré par une ventilation naturelle, en lien avec les infiltrations, la réhabilitation de l'enveloppe commande alors l'installation d'un système mécanique de ventilation pour garantir le débit d'air sanitaire, nécessaire aux occupants.

#### 1.2.2.5 Conclusion sur l'espace de décision en réhabilitation

Les stratégies de réhabilitation énergétique étudiées sont construites à partir de combinaisons de mesures élémentaires ciblant :

- L'isolation thermique de l'enveloppe : façades, toiture et plancher bas ;
- Le remplacement des ouvrants ;
- Le remplacement du système de ventilation ;
- Le remplacement du système de chauffage ;
- L'intégration d'une production d'eau chaude sanitaire d'origine solaire thermique.

Plus précisément, et tenant compte du phasage des travaux, ces stratégies sont des permutations des mesures élémentaires ci-dessus. De plus, pour chacune de ces mesures, les contraintes industrielles de production obligent à considérer les alternatives comme des variables discrètes. En conclusion, les solutions du problème d'aide à la décision – les programmes de réhabilitation – sont donc des permutations de variables discrètes. Le problème est de nature combinatoire.

L'identification du problème d'aide à la décision réclame également de préciser l'espace des objectifs.

#### 1.2.3 Espace des objectifs et réhabilitation

La conception des bâtiments est multicritère. Si les bâtiments répondent depuis toujours au besoin fondamental de fournir des espaces intérieurs assurant sécurité, protection face aux variations climatiques extérieures et favorables au développement des activités humaines, les performances requises ont significativement évolué et se sont accrues avec le temps. Aujourd'hui, la conception des bâtiments doit remplir de nombreux objectifs ayant trait tant au respect des réglementations qu'aux attentes en évolution des occupants. Stabilité structurelle, sécurité incendie, durabilité, confort thermique, visuel, acoustique, qualité de l'air intérieur, efficacité énergétique, limitation des impacts sur l'environnement, etc. doivent être étudiés et maîtrisés dès les phases préliminaires de conception.

Si la réhabilitation énergétique cible en particulier la réduction des consommations d'énergie en usage des bâtiments, les performances des programmes de réhabilitation doivent être évaluées sur un ensemble de critères de décision, caractérisant la performance globale de la construction réhabilitée, et évitant les transferts d'impacts d'une phase du cycle de vie sur une autre, ou encore d'une problématique sur une autre. La réduction des consommations énergétiques en usage ne doit pas être annihilée par l'accroissement des impacts liés au traitement en fin de vie des composants additionnels introduits. La performance énergétique ne peut imposer une forte dégradation du confort thermique ou acoustique.

Une large diversité de critères quantitatifs ou qualitatifs a été progressivement introduite par les différentes communautés de recherche pour évaluer les conceptions de bâtiments sur les différentes dimensions de leurs performances : performance énergétique, bilan environnemental, analyse économique, confort des ambiances intérieures (thermique, acoustique, visuel) et santé (qualité de l'air intérieur), par exemple (Kolokotsa et al., 2009).

Les sous-parties suivantes reviennent sur les critères proposés dans la littérature puis introduisent ceux utilisés dans ces travaux de thèse.

Dans les développements suivants, les termes indicateurs, critères de décision ou fonctions objectifs sont utilisés indifféremment pour désigner les critères utilisés pour évaluer les performances des stratégies de réhabilitation étudiées.

### **1.2.3.1 Etat de l'art des objectifs en conception de bâtiment**

Dans une perspective de développement durable, les objectifs peuvent être classés en différentes catégories, suivant les sphères auxquelles ils se rapportent :

- Bilan énergétique et environnemental ;
- Bilan économique ;
- Aspects sociétaux (en général) ;

#### **1.2.3.1.1 Performance énergétique et bilan environnemental**

##### **Performance énergétique**

Relativement à la problématique de réduction des consommations énergétiques, une large diversité d'indicateurs a été introduite, parmi lesquels :

- Besoins de chaleur pour le chauffage ou la climatisation (D'Cruz and Randford, 1987 ; Al-Homoud, 1997 ; Bouchlaghem, 2000) ;
- Consommation annuelle normalisée d'énergie pour le chauffage (Rey, 2004; Zhu, 2006) ;
- Consommation d'énergie finale sur différents usages (Wetter, 2001 ; Coley and Schukat, 2002) ;
- Consommation d'énergie grise (Chen et al., 2006) ;
- Economies d'énergie par la réhabilitation (Gholap and Khan, 2007) ;
- Consommation d'énergie primaire sur le cycle de vie (Pernodet, 2010).

Ces indicateurs peuvent être différenciés suivant les phases de cycle de vie étudiées, les postes de consommation considérés, la distinction entre besoins et consommations énergétiques.

Les besoins de chaleur représentent la quantité d'énergie nécessaire pour répondre à un usage donné (chauffage, ventilation, climatisation, production d'eau chaude sanitaire), sans considération du système utilisé pour y répondre. Dans le cas du chauffage, les besoins de chaleur dépendent des déperditions par conduction, convection ou rayonnement par l'enveloppe du bâtiment, ainsi que des apports solaires et internes. L'analyse des besoins de chaleur sert la conception de l'enveloppe et des éventuelles régulations (D'Cruz and Randford, 1987). En revanche, elle n'inclut pas, dans le périmètre d'étude, la conception et l'intégration des systèmes et équipements.

L'analyse des consommations d'énergie finale peut recouvrir différents usages de l'énergie. Par exemple, Coley et Schukat (2002) se sont intéressés à la réduction des consommations de climatisation. Suivant les contextes, certaines mesures de réhabilitation peuvent affecter simultanément plusieurs postes de consommation. Par exemple, la réhabilitation de l'enveloppe permet de limiter les déperditions par conduction et les infiltrations d'air extérieur, soit respectivement les consommations de chauffage et de ventilation. Il est alors essentiel que l'analyse recouvre les postes de consommation énergétique, affectés par les mêmes actions de réhabilitation.

La prise en compte de l'énergie grise étend le champ de l'étude, au-delà de la seule phase d'exploitation du bâtiment. Sont ainsi incluses les consommations énergétiques liées à la production des matériaux, composants et systèmes, à leur transport, mise en œuvre, maintenance, par exemple (Chen et al., 2006).

Cette extension de l'analyse des consommations énergétiques au-delà de la seule phase d'usage du bâtiment semble essentielle pour deux raisons principales. Premièrement, limiter l'analyse à l'usage conduit à une vision partielle et ne permet pas de maîtriser les transferts d'impacts sur le cycle de vie. Deuxièmement, avec la performance énergétique, les autres phases du cycle de vie sont alors responsables d'impacts croissants en valeur relative et absolue, sur le bilan énergétique et environnemental (Peuportier, 2004 ; Blengini et di Carlo, 2010).

Enfin, l'évaluation des consommations d'énergie primaire sur le cycle de vie et pour différents usages du bâtiment en exploitation (Peuportier, 2004 ; Pernodet, 2010) offre une approche globale, introduisant également la différence entre consommation d'énergie finale et d'énergie primaire. Les indicateurs précédents se basent tous sur la consommation d'énergie finale, qui représente la quantité d'énergie consommée pour une utilisation finale, par exemple pour le chauffage. L'énergie finale n'est pourtant qu'une fraction de l'énergie primaire, qui a été consommée au long de la chaîne de transformation et de distribution de l'énergie, avant d'être utilisée par le consommateur final. Le terme d'énergie primaire tient compte de l'ensemble de l'énergie mobilisée, pour assurer une consommation finale.

## **Bilan environnemental**

En termes de réduction des impacts sur l'environnement, une différenciation apparaît entre les approches monocritères, focalisées sur une problématique jugée prépondérante, et les travaux multicritères. Ont ainsi été considérés :

- Potentiel de changement climatique (Rey, 2004 ; Alanne, 2004) ;
- Potentiel d'acidification atmosphérique (Rey, 2004 ; Alanne et al, 2007) ;

- Consommation d'eau (Alanne et al, 2007) ;
- Consommation cumulée d'exergie (Wang et al, 2005) ;
- Impacts environnementaux sur le cycle de vie (Peuportier, 2004 ; Pernodet Chantrelle, 2010).

L'annexe A détaille les modèles utilisés pour calculer les différents impacts environnementaux cités ci-dessus. Les parties 1.3.1 et 1.2.3.2 reviennent plus précisément sur la méthodologie d'analyse de cycle de vie et les impacts environnementaux calculés dans ces travaux.

L'exergie est définie par « le travail maximal théorique pouvant être extrait de l'ensemble formé par le système étudié et l'environnement quand le système passe d'un état donné à l'équilibre avec l'environnement » (Moran, 1982). L'exergie est une mesure extensive de l'irréversibilité des phénomènes, permettant de caractériser une forme d'épuisement des ressources naturelles. C'est la combinaison de la prise en compte des consommations de ressources naturelles et des émissions. L'épuisement des ressources énergétiques peut être inclus ou non. La consommation cumulée d'exergie est alors la différence, cumulée sur le cycle de vie, entre la consommation d'exergie due aux consommations de ressources et l'exergie relative au traitement des émissions (Wang et al., 2005).

Relativement peu de travaux d'aide à la décision ont ciblé la réduction du bilan environnemental sur le cycle de vie, par la conception des bâtiments. Selon Kolokotsa et al. (2009), ce constat serait lié au développement relativement récent des outils d'évaluation dans le domaine.

L'évaluation des consommations d'énergie primaire, sur les usages cibles les opérations de réhabilitation, et d'une variété d'indicateurs environnementaux sur le cycle de vie semble indispensable à la caractérisation globale de la performance des stratégies proposées.

#### 1.2.3.1.2 Analyse économique et financière

La performance économique et financière des projets de bâtiment est également caractérisée par une large variété d'indicateurs. Voici quelques uns des critères de décision identifiés dans la littérature :

- Coût d'investissement (D'Cruz and Radford, 1987 ; Rosenfeld and Shohet, 1999) ;
- Coût de la rénovation (Gholap and Khan, 2007) ;
- Coût de maintenance en exploitation (Rosenfeld and Shohet, 1999 ; Rey, 2004) ;
- Coût d'usage (Rey, 2004) ;
- Valeur verte (Bullier et al., 2011).
- Coût des économies d'énergie (Martinaitis et al., 2004) ;
- Temps de retour sur investissement (WBCSD, 2009) ;
- Valeur actuelle nette (VAN) des investissements (Martinaitis et al., 2004) ;
- Taux de rentabilité interne (TRI) des investissements (Martinaitis et al., 2004) ;
- Taux d'enrichissement en capital apparent – Méthode TEC (Chabot, 2005) ;
- Durée de vie économique (Rosenfeld and Shohet, 1999 ; Miles et al., 1996) ;
- coût global sur le cycle de vie (Wang et al, 2005) ;

La valeur verte désigne « la valeur immobilière nette additionnelle d'une propriété en fonction de son bilan environnemental » et permet de soutenir l'investissement en considérant le bénéfice financier en terme de valeur immobilière du bâtiment considéré (Bullier et al., 2011).

La méthode TEC (Chabot, 2005) permet une analyse économique de la rentabilité globale des investissements, et non de la seule rentabilité des fonds propres engagés. Elle est particulièrement intéressante dans le cas de la comparaison de projets d'investissements, partiellement subventionnés et générant des revenus commerciaux potentiels par la vente de produits ou de services (production électrique d'une centrale photovoltaïque, par exemple).

La durée de vie des bâtiments est généralement envisagée dans ses dimensions physique ou fonctionnelle. Elle traduit alors respectivement la dégradation graduelle des performances physiques et mécaniques initiales ou capacité fonctionnelle à répondre à l'usage voulu (Thomsen and Van der Flier, 2009). La durée de vie économique est relative à la valeur du bien immobilier en tant que produit économique (Miles et al., 1996). Elle est évaluée sur la base de l'offre et de la demande ou du bilan en exploitation, par exemple. La fin de vie du bâtiment est alors atteinte si la demande n'existe plus ou si les coûts d'exploitation ne sont plus compensés par les bénéfices liés à l'usage. En ce sens, la durée de vie économique est davantage liée à l'évolution du marché qu'à l'âge des bâtiments.

L'ensemble de ces indicateurs apporte éclairages différents sur la nature et l'interprétation des performances économiques et financières des bâtiments étudiés.

Certains se concentrent uniquement sur les montants d'investissement: coût d'investissement, coût de la rénovation. Ils répondent alors à la vision première du propriétaire ou investisseur cherchant à maîtriser les capitaux engagés.

D'autres permettent d'évaluer les bénéfices économiques de la conception, sur la phase d'exploitation. Ils traduisent alors les intérêts d'acteurs variés, propriétaires ou occupants, potentiellement différents. Si les coûts de maintenance, la valeur verte, etc. intéressent directement les propriétaires, les coûts d'usage sont des critères concernant davantage les locataires.

Enfin, l'analyse économique et financière peut être menée de manière plus globale sur le cycle de vie de l'ouvrage et intégrer tant les coûts d'investissements que les coûts ou les économies financières générées par la conception, en exploitation : coût global sur le cycle de vie, coût des économies d'énergie, valeur actuelle nette, taux de rentabilité interne des investissements, temps de retour sur investissement ou encore durée de vie économique.

Remarquons qu'en réhabilitation énergétique, les investissements permettent davantage une réduction des dépenses que de véritables gains nets. Dans ce cas, la valeur actuelle nette est égale au coût global actualisé (Chabot, 2005).

En aide à la décision, il semble donc pertinent d'introduire une combinaison d'indicateurs, représentant la vision des différentes parties prenantes tant du point de vue des investissements que de l'usage du bâtiment, sur son cycle de vie.

### 1.2.3.1.3 Aspects sociétaux

Les bâtiments sont construits pour fournir des espaces intérieurs propices au développement des activités de leurs occupants. Nous passons en moyenne 90% de notre temps en intérieur (CSTB). Aussi, les aspects sociétaux sont souvent considérés au travers de la qualité d'usage des espaces intérieurs, en termes de :

- Confort thermique ;
- Confort visuel ;
- Confort acoustique ;
- Qualité de l'air intérieur ;
- Fonctionnalité et autres aspects.

En effet, les consommations énergétiques des bâtiments dépendent significativement de la conception des ambiances intérieures, qui affecte également la santé, la productivité et le confort des occupants (AFNOR, 2007). Nous nous proposons donc de revenir sur les critères de décision devant motiver une conception en faveur de la qualité des ambiances.

### **Confort hygrothermique**

A l'intérieur des bâtiments, les occupants sont soumis à des variations de température et d'humidité, en lien avec les conditions climatiques extérieures et l'activité à l'intérieur des espaces. En été comme en hiver, ces fluctuations forcent, chez les occupants, des processus de régulation thermo-physiologique involontaires, pour maintenir leur température corporelle proche de 37°C (Dittmar et al., 1995). Si ces réactions sont ressenties comme des désagréments, les occupants en limitent alors l'amplitude en adaptant leur comportement ou celui du bâtiment (Thellier, 1999). Ainsi, en hiver, la sensation d'inconfort s'accompagne d'une modification de la tenue vestimentaire, souvent d'une augmentation des consignes de chauffage et donc d'un accroissement des factures énergétiques. En été, en l'absence de climatisation, les températures élevées sont assorties d'une diminution de l'attention, de l'activité, de difficultés à dormir mais aussi une mortalité accrue chez les plus fragiles, pendant les épisodes de canicules. Le confort thermique est donc une composante particulièrement importante de la conception des ambiances. De nombreuses méthodes en proposent une évaluation, certaines sont présentées ici. Les modèles de thermique de l'homme, construits sur une représentation détaillée du corps humain, ne sont pas abordés dans ce développement.

Les approches les plus simples quantifient l'inconfort thermique à partir du dépassement d'un seuil de confort (en °C), par la température d'air (Rutman et al., 2005) ou par la température opérative (Bouchlaghem, 2000) du local. Contrairement à la température d'air, la température opérative modélise la température ressentie par l'occupant en intégrant également la convection et le rayonnement des parois, à l'intérieur de la pièce.

A partir du seuil de confort, l'inconfort thermique est alors caractérisé par sa durée et son intensité. La durée représente le temps au cours duquel la température opérative dépasse le seuil de confort, en occupation (Roulet et al., 2002). L'intensité de l'inconfort est mesurée en degrés-heures et intègre, sur la période d'occupation, le produit du temps de dépassement par le niveau du dépassement de température, soit la différence entre la température opérative et le seuil de confort défini (Rey, 2004).

Cependant, comme le rappelle F. Thellier (1999), le confort thermique est un jugement évaluatif, comportant une composante psycho-socio-affective qui est subjective, et dépend donc des préférences de chaque individu et pas uniquement de la température du local. Il s'exprime sur une échelle centrée sur le confort qui représente « l'état d'esprit ou l'homme exprime la satisfaction des conditions thermiques ».

La méthode de Fanger, décrite dans son ouvrage « Thermal confort » (Fanger, 1970) et base de la norme NF EN ISO 7730 (ISO 7730, 1984 ; AFNOR, 1995), introduit ainsi deux indices pour évaluer le confort thermique d'un local : le PMV (predicted mean vote) et le PPD (percentage of people dissatisfied). Le PMV est basé sur le bilan thermique du corps humain, soit la différence entre la production de chaleur métabolique et la dissipation de chaleur dans l'ambiance, dans des conditions de température et de vêture données. Il prévoit alors le vote moyen d'un groupe de personnes, exprimant leur sensation thermique sur une échelle graduée à sept niveaux (entre -3 et +3). A partir de la valeur du PMV, le PPD modélise le pourcentage de personnes insatisfaites dans l'ambiance thermique donnée.

$$PMV = (0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028) \cdot L$$

Avec :

- M : Métabolisme énergétique [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] ;
- L : Différence entre chaleur produite et dissipée, dans métabolisme corporel ;

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)$$

Les indices PMV et PPD ont été utilisés dans différents travaux de recherche sur la conception des bâtiments (Blondeau et al., 2002 ; Rutman et al., 2005).

Différentes critiques ont été émises sur la méthode de Fanger. Etablie en conditions stationnaires, en chambre climatique, son application demeure limitée aux ambiances dont les conditions ne varient pas ou peu dans le temps (Moujalled, 2007). De plus, l'établissement des indices PMV et PPD à partir d'études statistiques, sur un échantillon de 1300 personnes aux Etats-Unis, a été remis en cause par des observations complémentaires sur d'autres échantillons (Candas, 2000), tant sur l'appréciation du confort que sur les pourcentages d'individus insatisfaits.

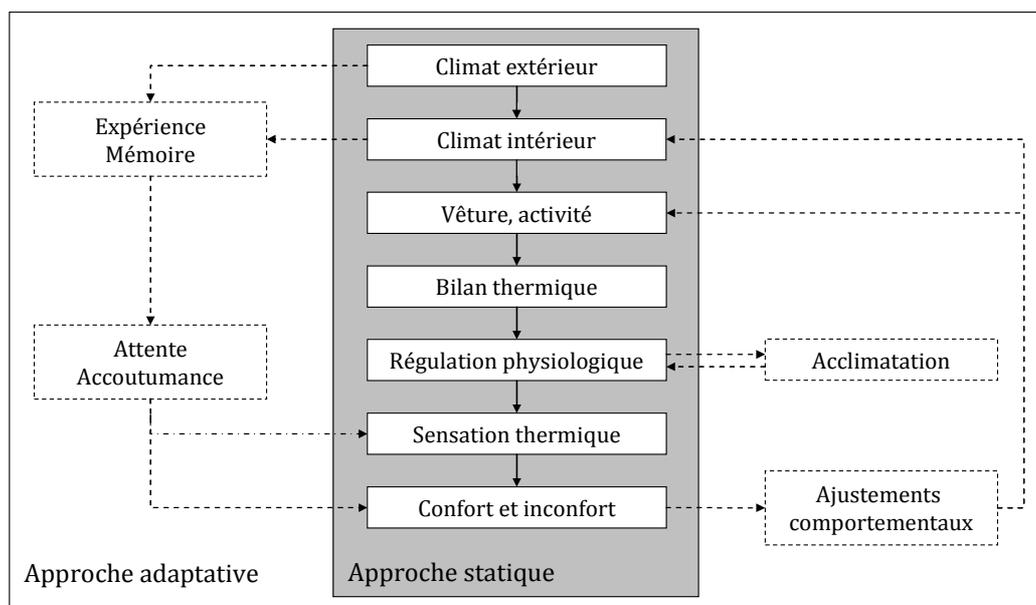


Figure 11. Approche adaptative du confort thermique et représentation des mécanismes (De Dear et al., 1997; Pernodet, 2010)

Les travaux les plus récents se concentrent sur l'approche adaptative du confort, qui repose sur l'idée que les occupants interagissent et s'adaptent à leur environnement. Par conséquent, la définition du confort thermique doit en dépendre. L'adaptation des occupants met en œuvre des mécanismes complexes, dont certains sont illustrés sur la Figure 11. Cette approche a été développée à partir d'études in situ et non d'expériences en chambre climatique.

Dans le cadre de l'approche adaptative, il apparaît que la définition du confort thermique dépend de l'évolution des conditions climatiques extérieures et de l'accoutumance des occupants. Des températures ou plages de températures de confort ont ainsi été définies en fonction de l'évolution des températures extérieures (AFNOR, 2007). Cette évolution est représentée par la moyenne glissante journalière de la température extérieure :

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot (\theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{ed-2} + \alpha^2 \cdot \theta_{ed-3} + \dots)$$

Qui peut être définie par récurrence comme suit :

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{rm-1}$$

Avec :

- $\theta_{rm}$  : Température moyenne glissante du jour ;
- $\theta_{rm-1}$  : Température moyenne glissante de la veille ;
- $\theta_{ed-1}$  : Température moyenne journalière extérieure de la veille ;
- $\alpha$  : Constante de temps comprise entre 0 et 1. (valeur recommandée 0,8) ;

La moyenne pondérée est évaluée sur une période de n jours. La constante de temps  $\alpha$  permet de relativiser l'effet des températures extérieures moyennes journalières passées. La définition du confort thermique adaptatif dépend des températures extérieures moyennes constatées les jours précédents, et en particulier des derniers jours. La moyenne glissante journalière de la température extérieure illustre la définition dynamique du confort thermique.

Pour les bâtiments réhabilités et non climatisés, le modèle de la norme NF EN 15251 (AFNOR, 2007) définit une plage de températures de confort (approche adaptative) par les expressions suivantes (Catégorie II) :

$$\begin{cases} \theta_{i_{max}} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 3 \\ \theta_{i_{min}} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 3 \end{cases}$$

Avec :

- $\theta_{i_{max}}$  : Limite maximale de température opérative [°C] ;
- $\theta_{i_{min}}$  : Limite maximale de température opérative [°C] ;
- $\theta_{rm}$  : Température moyenne glissante du jour ;

Ces valeurs-limites s'appliquent : pour la limite haute, si la température journalière extérieure glissante moyenne est comprise entre 10°C et 30°C ; pour la limite basse si elle est comprise entre 15°C et 30°C. Les coefficients directeurs et ordonnées à l'origine de ces relations affines dépendent des catégories de bâtiments et d'usage, qui fixent un niveau de confort thermique attendu. Le niveau I est recommandé pour les personnes sensibles et fragiles avec des exigences

spécifiques (personnes âgées, enfants, etc.). La catégorie II cible la construction neuve et la rénovation. Enfin, les bâtiments existants sont supposés répondre à la catégorie III.

Il apparaît donc que l'évaluation du confort thermique est une problématique complexe faisant intervenir de nombreux paramètres physiques et humains. L'approche adaptative présente l'avantage de modéliser une forme d'interaction entre l'évolution des conditions climatiques extérieures et la plage thermique de confort.

### **Confort lumineux**

Le confort lumineux dépend notamment du niveau d'éclairage, de la part d'éclairage naturel et de l'éblouissement de l'occupant.

La demande d'éclairage varie en fonction de l'activité affectée aux espaces intérieurs. La norme NF X35-103 (AFNOR, 1990) définit ainsi des niveaux d'éclairage en distinguant les types de bâtiments (logements, bureaux, industrie, écoles, centres commerciaux, etc.) ainsi que les activités exercées à l'intérieur des espaces, pour chacune des applications. La conception des bâtiments prend donc en compte des valeurs d'éclairage recommandées.

Cependant, la lumière ne se traduit pas uniquement par un niveau d'éclairage. En particulier, la décomposition spectrale joue un rôle important dans la sensation de confort, perçue par les occupants, soulignant l'importance de la lumière naturelle (Barrier and Gilgen, 1970). Ainsi, de nombreux travaux quantifient l'exploitation de la lumière naturelle par le facteur de lumière du jour (Radford and Gero, 1980 ; D'Cruz and Radford, 1987). Ce facteur est défini comme le rapport de l'éclairage naturel mesuré dans un bâtiment à l'éclairage horizontal extérieur, qui est constant pour un ciel et un environnement donnés (obstructions, position des stores, réflectivité des murs, mobilier, etc.) (Paule et al., 2008). D'autres indicateurs comme le pourcentage d'autonomie ou le facteur d'éclairage naturel, ratio entre l'éclairage naturel et l'éclairage artificiel, ont été mobilisés pour qualifier la performance en termes de confort visuel (Rey, 2004).

Enfin, il est important de maîtriser l'éblouissement par le rayonnement solaire direct. En pratique, les problèmes d'éblouissement sont facilement résolus par l'occupant à partir des protections solaires (volets ou stores) et de l'éclairage artificiel. Cependant, ils conduisent à une augmentation des consommations énergétiques et à une dégradation du confort par une moindre exploitation de la lumière naturelle. Aussi, le niveau d'éblouissement est considéré dans différentes études de conception (Becker et al, 2007).

### **Confort acoustique**

En termes de confort acoustique, des performances minimales sont requises par la réglementation, en fonction des types de bâtiments et d'usage. Cependant, les spécificités d'un projet en lien avec le site, l'activité accueillie, etc. peuvent justifier une conception au-delà des niveaux réglementaires. Le traitement acoustique cible en particulier l'isolation par rapport aux bruits extérieurs, aux bruits aériens provenant de locaux mitoyens, aux bruits de chocs (pas ou déplacements d'objets aux étages supérieurs) et aux bruits générés par des équipements (chauffage, ventilation, etc.) (Peuportier, 2008). Les niveaux d'isolement acoustique en dB (Rey, 2004), les indices de classement des nuisances sonores (Rutman et al., 2005) permettent de comparer des conceptions en termes de confort acoustique pour l'occupants.

## Qualité de l'air intérieur

La qualité de l'air intérieur représente une préoccupation croissante de la conception des bâtiments, en lien avec le temps passé dans les espaces intérieurs et l'identification d'émissions polluantes comme les composés organiques volatils (COV). En particulier, il est important de prévenir l'entrée de polluants extérieurs dans les bâtiments ainsi que les émissions gazeuses liées aux produits de finition (peintures) ou au mobilier, d'assurer le renouvellement de l'air intérieur garantissant l'évacuation des polluants (y compris CO<sub>2</sub> lié à la respiration des occupants), de limiter la prolifération bactérienne (Peuportier, 2008).

Des indicateurs sur la concentration en CO<sub>2</sub> de l'air intérieur (Kolokotsa et al, 2001 ; Doukas et al, 2007), la proportion maximale entre la concentration moyenne d'un polluant donné et une valeur limite de seuil pour l'exposition de courte ou longue durée (Blondeau et al, 2002), le taux de renouvellement de l'air (Blondeau et al, 2002) sont classiquement étudiés en conception de bâtiment pour progresser en termes de qualité de l'air intérieur.

## Autres indicateurs

Au-delà des aspects sanitaires ou de confort, d'autres indicateurs ont été introduits, pour qualifier la qualité d'usage des espaces, la gêne occasionnée par les travaux de réhabilitation, la sécurité des ouvrages réhabilités :

- Fonctionnalité de mise en œuvre des techniques de réhabilitation (Alanne, 2004) ;
- Durée des travaux de construction/réhabilitation (Rosenfeld and Shohet, 1999);
- Fonctionnalité, influence par la réduction d'espace habitable (Alanne, 2004),
- Sécurité au feu, etc. (Wong and Li, 2008).

Enfin, même si leur pertinence n'est pas remise en cause, l'introduction d'indices portant sur le développement des sociétés (par exemple, indice de développement humain) est plutôt réservée à l'analyse globale sectorielle de la construction sur un territoire donné (Gibbert, 2012). Elle semble moins adaptée à l'étude de projets ponctuels de réhabilitation de bâtiments.

### 1.2.3.1.4 Discussion

Sans ambition d'exhaustivité, cette revue bibliographique souligne la diversité des critères servant la conception des bâtiments, l'évaluation de leurs performances sous leurs différentes dimensions. La problématique de conception des programmes de réhabilitation apparaît nécessairement multicritère.

Par ailleurs, il semble difficile d'identifier une solution globale optimisant tous les critères simultanément. Certains des critères de décision sont de nature à imposer des compromis (par exemple, le coût d'investissement et la performance énergétique).

Enfin, la perspective de développement durable et la nécessité d'une approche systémique incitent à considérer les indicateurs portant sur le cycle de vie plutôt que sur une phase donnée, à l'échelle du système global plutôt que sur une restriction à un sous-système, lui-même en interaction.

### 1.2.3.2 Fonctions objectifs étudiées

Dans ces travaux, les solutions – soient les programmes de réhabilitation énergétiques – sont évalués sur une base multicritère et cycle de vie. Dans une perspective de développement durable, les critères de décision considérés ciblent :

- les impacts environnementaux sur le cycle de vie des bâtiments réhabilités (consommation cumulée d'énergie primaire, potentiel de réchauffement climatique, potentiel d'acidification atmosphérique, épuisement des ressources abiotiques, etc.) ;
- des indicateurs financiers (coût d'investissement, coût global sur le cycle de vie) ;
- le confort des occupants (inconfort thermique adaptatif d'été).

### Performance énergétique et indicateurs environnementaux

Les indicateurs sur la consommation cumulée d'énergie primaire et les indicateurs environnementaux sont directement issus de précédents travaux sur l'analyse de cycle de vie des bâtiments (Popovici, 2006), implémentés dans le logiciel d'ACV bâtiment EQUER. Les modèles de calcul utilisés pour leur évaluation sont rappelés en Annexe A.

Ces indicateurs permettent d'évaluer la contribution, sur différentes problématiques environnementales, des matières et énergies consommées, des substances émises dans l'air, l'eau ou les sols, sur l'ensemble des phases du cycle de vie considéré.

Ces indicateurs sont listés dans le Tableau 4 ci-dessous :

Indicateurs d'impact	Unité	Légende
Consommation cumulée d'énergie primaire	MJ	CUMULATIVE ENERGY
Consommation d'eau	m <sup>3</sup>	WATER
Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques	kg eq. Sb	ABIOTIC DEPLETION
Potentiel de changement climatique à 100 ans	tonne eq. CO <sub>2</sub>	GWP100
Potentiel d'acidification	kg eq. SO <sub>2</sub>	ACIDIFICATION
Potentiel d'eutrophisation	kg eq. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	EUTROPHICATION
Potentiel de formation d'ozone photochimique	kg eq. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	SMOG
Dommages causés aux écosystèmes	PDF m <sup>2</sup> an	ECOTOXICITY
Dommages sur la santé humaine	DALY	HUMAN HEALTH
Déchets non radioactifs	tonne eq.	WASTE
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	RADIOACTIVE WASTE
Odeurs	10 <sup>6</sup> m3	ODOUR

**Tableau 4. Indicateurs environnementaux (implémentés dans le logiciel EQUER)**

Les simulations menées dans les chapitres suivants se sont focalisées, en particulier, sur les indicateurs environnementaux suivants :

- Consommation cumulée d'énergie primaire ;
- Potentiel de changement climatique à 100 ans ;
- Potentiel d'acidification atmosphérique ;

- Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à des catégories d'impact à échelle planétaire ou continentale, à temps long. Certains travaux ont en effet souligné que les résultats des modèles théoriques étaient affectés d'une plus grande incertitude dans le cas des catégories d'impact plus locales (éco-toxicité, par exemple) (Barnthouse et al., 1998).

Sur la base des outils développés, d'autres indicateurs environnementaux pourraient bien être inclus dans les analyses. Ces études apporteraient d'intéressantes conclusions sur des problématiques complémentaires.

### Critères d'analyse économique et financière

En termes économiques et financiers, deux indicateurs sont utilisés pour évaluer les performances des stratégies de réhabilitation étudiées :

- Le coût d'investissement du programme de réhabilitation ;
- Le coût global sur le cycle de vie.

Le coût d'investissement est la somme sur les différentes phases du programme de réhabilitation, des coûts d'investissements liés aux composants de bâtiment mis en œuvre. Le coût global sur le cycle de vie est la somme des coûts d'investissements précédents, du coût des consommations d'énergie en usage (pendant l'implémentation du programme de réhabilitation et sur la poursuite du cycle de vie) et des coûts liés au traitement en fin de vie des composants de bâtiment déposés et mis en œuvre en réhabilitation énergétique.

$$\text{INVESTMENT} = \sum_{\text{phases}} I(P_i)$$

$$\text{GLOBAL COST} = \sum_{\text{phases}} [I(P_i) + C(P_i) + C_{FDVd}(P_i)] + \sum_{DVR} [C(A_i)] + C_{FDVr}$$

Avec :

- $P_i$  : Phase de réhabilitation  $i$  ;
- $A_i$  : Année d'exploitation  $i$ , après mise en œuvre du programme de réhabilitation ;
- $I$  : Investissement liés à la réhabilitation ;
- $C$  : Coût des consommations énergétiques en usage ;
- $C_{FDVd}$  : Coût du traitement en fin de vie des composants déposés ;
- $DVR$  : Durée de vie résiduelle du bâtiment après réhabilitation ;
- $C_{FDVr}$  : Coût du traitement en fin de vie des composants de réhabilitation

Ces deux critères de décision sont rappelés dans le Tableau 5 ci-dessous :

Indicateurs d'impact	Unité	Légende
coût d'investissement du programme de réhabilitation	k€	INVESTMENT
coût global sur le cycle de vie	k€	GLOBAL COST

Tableau 5. Indicateurs de performance économique

### Aspects sociétaux

Les aspects sociétaux sont ici considérés sous l'angle du confort thermique des occupants. L'indicateur utilisé est l'inconfort thermique d'été, défini dans le cadre de l'approche adaptative. L'évaluation du confort thermique se concentre donc sur les surchauffes. En effet, on suppose que les bâtiments réhabilités ne sont pas climatisés. De plus, la régulation du système de chauffage assure une température minimale de 19°C (sauf mention contraire), toute l'année et dans toutes les pièces, ce qui prémunit contre les chutes de températures en hiver.

L'inconfort thermique adaptatif d'été est évalué conformément à la norme NF EN 15251 (AFNOR, 2007), à partir de la température opérative et de la moyenne glissante des températures sur les jours précédents. Mesuré en degrés-heures, il somme, sur les heures d'occupation, les différences positives entre la température opérative et la température limite maximale calculée dans le cadre de l'approche adaptative du confort thermique :

$$\text{THERMAL CONFORT} = \sum_{\text{occupation}} (\theta_{op}(h) - \theta_{imax}(j))_{\theta_{op} > \theta_{imax}}$$

Avec :

- $\theta_{op}$  : Température opérative de la zone à l'heure h [°C] ;
- $\theta_{imax}$  : Limite maximale de température opérative au jour j [°C],  
Définie dans le cadre de l'approche adaptative du confort, au sens de la norme NF EN 15251 (section 1.2.3.1.3) ;

Cet indicateur est rappelé dans le Tableau 6 présenté ci-dessous :

Indicateurs d'impact	Unité	Légende
Inconfort thermique adaptatif d'été	°C.heures	THERMAL CONFORT

Tableau 6. Indicateur sur le confort thermique d'été de l'occupant

### 1.2.3.3 Discussion

Face au caractère multicritère, ces travaux de thèse ne s'intéressent pas aux approches d'agrégation des critères de décision. En effet, comme le rappelle explicitement la norme NF EN ISO 14040 (ISO, 2006a) sur l'analyse de cycle de vie, «il n'existe pas de base scientifique pour réduire les résultats d'ACV à un nombre unique ou à une note globale unique, puisque la pondération requiert l'utilisation de choix de valeur». Par ailleurs, les procédures d'agrégation introduisent une compensation implicite entre les critères, en amont de la recherche de solu-

tions. Nous recherchons au contraire à contribuer à l'aide à la décision par l'identification de solutions efficaces et la description des compromis accessibles aux décideurs.

Par ailleurs, l'évaluation des solutions est ici restreinte à certains indicateurs quantitatifs relatifs au bilan environnemental, économique ou au confort des occupants. L'étude bibliographique a largement souligné la diversité des critères de décision pouvant être envisagés pour la conception des bâtiments. Nous reconnaissons donc parfaitement qu'au-delà des travaux entrepris dans la thèse ici présentée, d'autres fonctions objectives quantitatives, semi-quantitatives ou qualitatives mériteraient d'être considérées de manière complémentaire pour contribuer à l'évaluation globale des stratégies de réhabilitation étudiées, sur des aspects comme : la qualité architecturale et esthétique, la durée des travaux de réhabilitation, la facilité de mise en œuvre des composants de bâtiment, la réduction éventuelle des espaces intérieurs, etc. Les approches et méthodes d'aide à la décision ici développées sont alors transposables et parfaitement compatibles avec l'intégration de ces objectifs complémentaires.

## 1.3 Evaluation des solutions et modèle de cycle de vie

La partie précédente a souligné la diversité des critères servant la conception des bâtiments. Elle a permis de spécifier les fonctions objectifs considérées ici pour l'évaluation de la performance multicritère des stratégies de réhabilitation. Cette partie a pour objectif de préciser les modèles utilisés pour calculer ces performances, dans le cas de la réhabilitation de bâtiment. Les performances étant quantifiées sur la poursuite du cycle de vie des bâtiments à réhabiliter, un modèle de cycle de vie est donc proposé.

### 1.3.1 Introduction à l'approche d'analyse de cycle de vie

Les performances des programmes de réhabilitation sont évaluées à partir de modèles d'analyse de cycle de vie (ACV) et d'analyse du coût du cycle de vie, couplés à la simulation thermique dynamique de bâtiment. L'analyse du coût du cycle de vie est le pendant de l'analyse de cycle de vie, appliquée aux études économiques et financières.

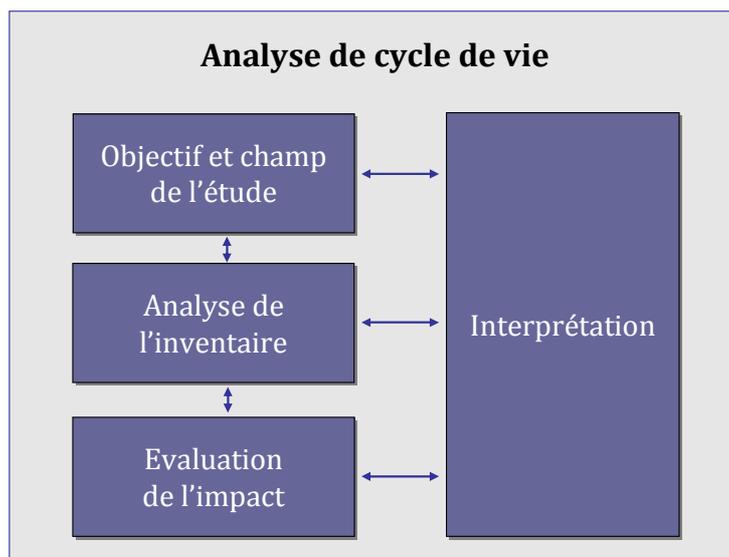


Figure 12. Méthodologie d'analyse de cycle de vie en 4 étapes (NF ISO 14040-44, 2006)

L'analyse de cycle de vie est une méthodologie multicritère normalisée permettant d'évaluer le bilan environnemental de tout produit, procédé ou service sur son cycle de vie (ISO, 2006a ; ISO, 2006b). L'ACV est une méthodologie scientifique basée sur la construction d'un inventaire de flux élémentaires – entrants ou sortants – du système sur son cycle de vie. La définition du cycle de vie dépend du système étudié. Pour un bâtiment, on considère souvent les impacts depuis la production des matériaux et énergies, jusqu'au traitement en fin de vie des composants, en passant par les phases de : transport des matériaux, construction du bâtiment sur site, exploitation de l'ouvrage, maintenance, etc. L'ACV permet de comparer, en termes de bilan environnemental, différents systèmes satisfaisant à la même unité fonctionnelle. L'unité

fonctionnelle correspond à une « quantité de service » précisément définie, qui sera utilisée comme unité de référence pour l'ensemble de l'étude. Elle comporte généralement trois facettes : l'unité de produit, l'unité de service et l'unité de temps.

L'application d'une démarche d'ACV impose de suivre les 4 étapes détaillées sur la Figure 12 : définition des objectifs et du cadre de l'étude, analyse de l'inventaire (ensemble des flux de matières et d'énergies, associés aux étapes du cycle de vie, rapporté à l'unité fonctionnelle), évaluation des impacts sur l'environnement et interprétation des résultats. Optionnelle, une cinquième étape est parfois proposée et vise le retour d'expérience, l'amélioration continue des méthodes et les applications.

Dans le secteur de la construction, l'ACV a été appliquée à l'étude du bilan environnemental de différents composants ou matériaux (Shah et al., 2008 ; Zabalza et al., 2012 ; Gomes et al., 2012), de bâtiments (Kohler, 1986 ; Polster, 1995 ; Peuportier, 2001 ; Kofoworola et Gheewala, 2008 ; Thiers et Peuportier, 2012), systèmes urbains (réseaux d'eau) ou même de quartiers (Peuportier et al, 2012).

Suivant les recommandations des deux premières étapes de l'ACV, les parties 1.3.2 et 1.3.3 précisent les objectifs de l'étude, le système analysé et le modèle de cycle de vie mis en œuvre pour établir l'inventaire de cycle de vie associé à un programme de réhabilitation énergétique. Le calcul des indicateurs et la phase d'interprétation des résultats sont proposées dans les chapitres suivants, consacrés à la recherche de stratégies optimales de réhabilitation.

### **1.3.2 Précisions sur le cadre et les objectifs de l'étude**

La première étape d'une ACV vise explicitement à détailler l'objectif et le cadre de l'étude. Nous revenons donc sur ces aspects, dans le cadre de nos travaux, en précisant notamment le système étudié et ses frontières.

L'objectif est ici d'identifier des stratégies efficaces de réhabilitation des bâtiments existants (en particulier, logements) et donc de comparer différentes solutions potentielles sur la base d'une évaluation multicritère, incluant le bilan environnemental.

Du point de vue fonctionnel, les bâtiments visent à offrir une surface habitable à ses occupants en leur garantissant des conditions sanitaires et de confort propres à leur usage.

L'unité fonctionnelle retenue est donc d'offrir une surface habitable égale à celle du bâtiment existant avant réhabilitation, dans des conditions sanitaires et de confort fixées (sauf mention contraire : renouvellement d'air de 0,5 volume par heure et 19°C minimum dans toutes les pièces, à tout instant de l'année), pendant une durée spécifiée (ici 50 ans) et sans détériorer le confort d'été.

Le système étudié correspond au bâtiment existant réhabilité. Il est étudié sur la poursuite de son cycle de vie, à partir du début des opérations de réhabilitation.

Plus précisément, le système est limité aux éléments différenciant entre les programmes de réhabilitation. Ce système inclut donc les sous systèmes suivants :

- Production des composants de bâtiment additionnels, introduits par la réhabilitation (matériaux, produits, systèmes ou équipements) ;

- Traitement en fin de vie des composants déposés du bâtiment existant, lors des travaux de réhabilitation ;
- Consommations énergétiques en usage du bâtiment réhabilité, selon un scénario d'occupation défini, sur les postes suivants : chauffage, ventilation, production d'eau chaude sanitaire (incluant la consommation d'électricité des différents auxiliaires) et équipements ;
- Traitement en fin de vie des composants de bâtiment introduits par la réhabilitation.

Du point de vue des frontières du système, les impacts liés à la production des infrastructures, machines et moyens de transports nécessaires à la production, au transport ou au traitement en fin de vie des matériaux ou énergies mobilisés ne sont pas pris en compte.

Le transport des matériaux entre les usines de production et le chantier, les opérations de mise en œuvre sur chantier et la maintenance ne sont pas pris en compte du point de vue du bilan environnemental (sauf mention contraire : partie 3.5.3). Plusieurs études antérieures ont en effet souligné le caractère négligeable des phases de transport et de mise en œuvre des matériaux, pour les applications bâtiment. En revanche, le coût économique de la mise en œuvre est non négligeable dans le bilan et est pris en compte.

Les performances, dont le bilan environnemental, des programmes de réhabilitation étudiés sont évaluées sur les objectifs définis en partie 1.2.3.2, et détaillés en Annexe A.

Les hypothèses et les données environnementales, modélisant les procédés utilisés, sont représentatives du contexte français et d'Europe occidentale, dans l'état des technologies disponibles en 2010.

### 1.3.3 Modèle de cycle de vie et analyse de l'inventaire

La deuxième étape de la méthodologie d'ACV consiste à construire un modèle permettant d'identifier et de quantifier l'ensemble des substances et énergies entrant et sortant du système.

#### 1.3.3.1 Architecture globale du modèle de cycle de vie

La Figure 13 représente l'architecture globale des modèles d'analyse de cycle de vie et d'analyse du coût du cycle de vie, construits pour évaluer les performances des solutions sur les objectifs précédemment définis.

Le modèle thermique du bâtiment existant (0) est construit en utilisant le modèleur 3D AL-CYONE puis l'interface PLEIADES, développés par MINES ParisTech et l'entreprise Izuba Energies. Cette chaîne logicielle permet la saisie à l'échelle de la géométrie simplifiée du bâtiment, son découpage en zones thermiques homogènes, la définition de l'orientation du bâtiment, de sa localisation géographique (données climatiques sous-jacentes), des compositions des différentes parois, des caractéristiques des menuiseries et de leur implantation, des états de surface, des valeurs de ponts thermiques, etc. Les masques générés par l'environnement urbain peuvent être intégrés de même que la définition des scénarios d'occupation et des équipements.

Le modèle objet du bâtiment constitué à partir de cette chaîne logicielle permet de calculer les besoins énergétiques en usage, sous l'hypothèse du scénario d'occupation. Il donne aussi accès

à l'inventaire des composants mis en œuvre dans le bâtiment existant (directement), à leur quantitatif (indirectement), à la description de la composition des murs multicouches (empilement de différents matériaux).

Un programme de réhabilitation définit plusieurs phases de travaux. Pour chacune d'entre elles, la boucle d'itération (i) impose, en mobilisant le modèle objet du bâtiment courant (éventuellement partiellement réhabilité suivant le numéro de la phase), d'identifier et de quantifier :

- l'ensemble des composants produits et mis en œuvre pour la réhabilitation (1) ;
- l'ensemble des composants déposés du bâtiment existant et à traiter en fin de vie (2) ;
- ainsi que les consommations énergétiques en usage, liées à l'état courant du bâtiment réhabilité (état de réhabilitation partiel, intégrant la nouvelle phase) (3).

A l'issue de l'ensemble des phases de réhabilitation, les consommations énergétiques en usage sur la poursuite du cycle de vie (4), ainsi que le traitement en fin de vie des composants mis en œuvre pour la réhabilitation (5) sont évalués.

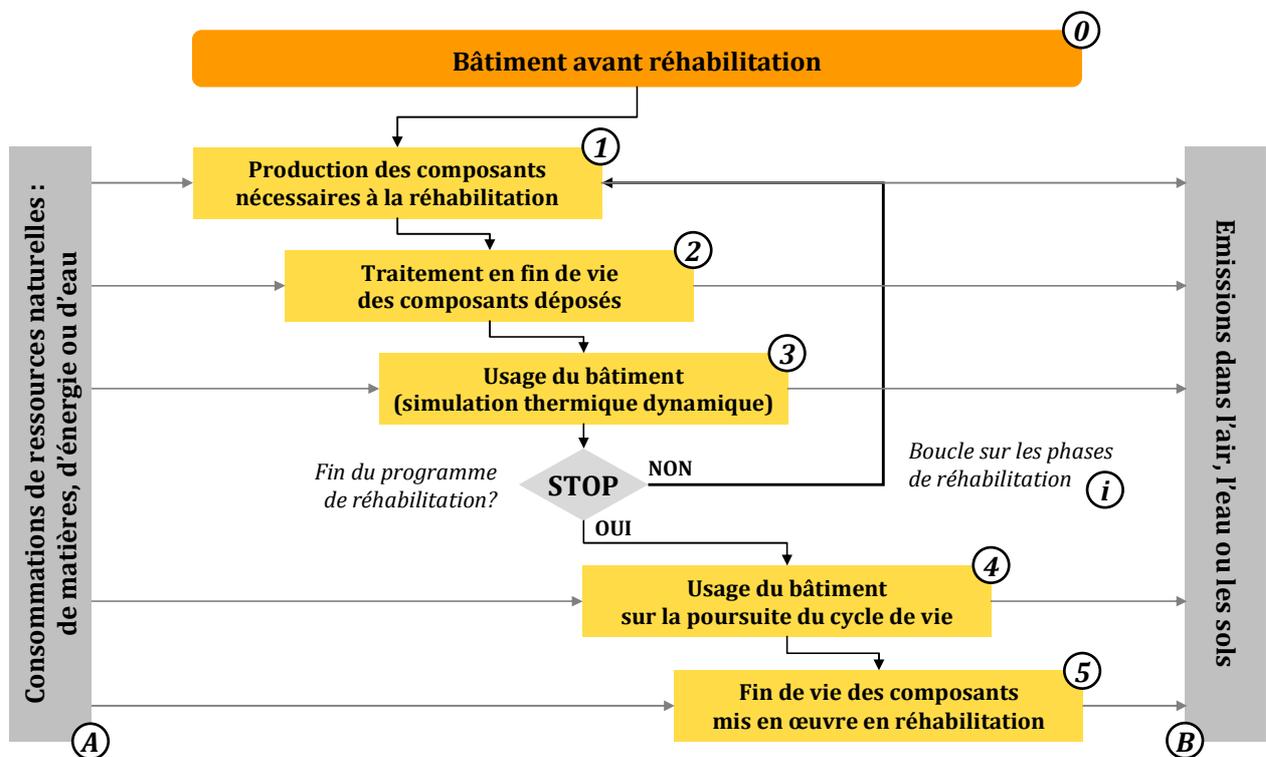


Figure 13. Modèle LCA LCC, sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment réhabilité.

L'usage du bâtiment est modélisé par les consommations énergétiques nécessaires : au chauffage des espaces, au renouvellement de l'air intérieur, à la production d'eau chaude sanitaire (ECS), aux équipements. Les consommations d'électricité induites par les auxiliaires s'y rapportant sont également incluses. Le détail de l'évaluation de ces consommations énergétiques est précisé dans les sous-parties suivantes : 1.3.3.5 à 1.3.3.9. L'évaluation du confort thermique d'été est également réalisée à partir des résultats de la simulation thermique dynamique, mobilisée pour le calcul des besoins horaires de chauffage.

A partir de ce modèle de cycle de vie, est établi l'inventaire de cycle de vie (ICV), imposé par la mise en œuvre d'un programme de réhabilitation, sur les phases de réhabilitation et la poursuite du cycle de vie du bâtiment existant. A chaque étape ((1) à (5)), l'inventaire des flux élémentaires entrants (A) et sortants (B) (matière, eau, énergie) est établi (identification et quantification). Pour un flux élémentaire donné, les quantités de substance, identifiées sur les différentes phases, sont agrégées pour construire l'ICV du système global.

Profitant des propriétés de l'algèbre linéaire, le logiciel EQUER calcule, en réalité, des indicateurs à partir des ICV de chacun des composants ou chacune des consommations d'énergie ou d'eau et agrège les impacts au niveau du système global. Cette procédure équivalente du point de vue des résultats évite de manipuler des quantités de données importantes.

Les consommations de matières et d'énergie, ainsi que les émissions dans l'air, l'eau et les sols, sont ainsi inventoriées depuis l'extraction des ressources et la production des matériaux jusqu'aux opérations de traitement en fin de vie. Suivant la méthodologie normalisée de l'ACV, cet inventaire de cycle de vie permet ensuite d'évaluer les performances et le bilan environnemental, suivant différents indicateurs.

### 1.3.3.2 Mise en équation

Le modèle de cycle de vie détaillé ci-dessus est mis en équation, sous une forme générale à toutes les fonctions objectifs, pour illustrer l'évaluation multicritère des performances des programmes de réhabilitation.

Pour l'objectif  $FO_\alpha$ , les équations générales suivantes représentent le modèle d'évaluation :

$$FO_\alpha = \sum_{\text{phases}} I_{i,\alpha}$$

Avec :  $I_{i,\alpha}$ , l'impact de la phase  $i$  du cycle de vie, sur la fonction objectif  $\alpha$ .

$$FO_\alpha = I_{PRODr,\alpha} + I_{EOLd,\alpha} + I_{USE,\alpha} + I_{EOLr,\alpha}$$

$$FO_\alpha = \sum_i \left[ \sum_j f_{PRODr,\alpha,i}(q_j) + \sum_k f_{EOLd,\alpha,i}(p_k) + f_{USE,\alpha,i}(C_h, C_{DHW}, C_e) \right] + f_{USE,\alpha}(C_h, C_{DHW}, C_e) + \sum_i \sum_j f_{EOLr,\alpha,i}(q_j)$$

Avec, pour la fonction objectif  $FO_\alpha$  :

- $i$  : Phase de travaux du programme de réhabilitation ;
- $PRODr,\alpha,i$  : Production des composants mis en œuvre en phase  $i$  de réhabilitation ;
- $EOLd,\alpha,i$  : Traitement en fin de vie des composants déposés en phase  $i$  ;
- $USE,\alpha,i$  : Exploitation du bâtiment en configuration courante sur la phase  $i$  ;
- $USE,\alpha$  : Exploitation du bâtiment réhabilité sur la poursuite du cycle de vie ;

- $EOLr, \alpha, i$  : Traitement en fin de vie des composants mis en œuvre en phase  $i$  ;
- $q_j$  : Quantité de composant de réhabilitation  $j$  mis en œuvre ;
- $p_k$  : Quantité de composant  $k$  déposé en réhabilitation ;
- $C_h$  : Consommation énergétique pour le chauffage (incluant la ventilation) ;
- $C_{DHW}$  : Consommation énergétique pour la production d'eau chaude sanitaire ;
- $C_e$  : Consommation énergétique d'électricité ;

Remarque 1 : ne retenant que les éléments différentiels entre programmes de réhabilitation, les quantités de composants déposés pour traitement en fin de vie, à l'issue du cycle de vie du bâtiment réhabilité, sont évidemment égales aux quantités de composants de réhabilitation mis en œuvre, ce qui explique l'écriture du dernier terme de l'équation précédente.

Remarque 2 : les consommations énergétiques  $C_h$ ,  $C_{DHW}$ ,  $C_e$  représentent les consommations d'énergie non renouvelable ou renouvelable limitée en flux, liées aux usages de chauffage, de production d'ECS et d'électricité (pour le fonctionnement des auxiliaires et équipements) respectivement. La « limitation en flux » fait référence à des ressources énergétiques renouvelables dont les réserves sont limitées, à un instant donné (ex. biomasse). Le terme éventuel d'énergie renouvelable (ex. solaire thermique) n'est pas intégré car il est considéré illimité en flux.

Les sous parties suivantes explicitent l'évaluation de ces différents paramètres.

### 1.3.3.3 Production et traitement en fin de vie des composants

L'évaluation des impacts liés à la production et au traitement en fin de vie des matériaux et systèmes requiert la connaissance : des quantités de composants mis en œuvre ( $q_j$ ) ou déposés ( $p_k$ ), ainsi que la donnée des impacts environnementaux ou de coût financier par unité de masse ou de volume, pour chacun des composants considérés.

Les quantités de matériaux ou le dimensionnement des équipements relatifs aux actions de réhabilitation sont calculées à partir de l'analyse du modèle objet du bâtiment existant. Les surfaces de façades, de toiture, de vitrages, les surfaces habitables ou encore le volume des pièces sont renseignées dans le modèle, et accessibles directement ou indirectement. La surface habitable ou le volume des espaces intérieurs servent aussi au dimensionnement des équipements.

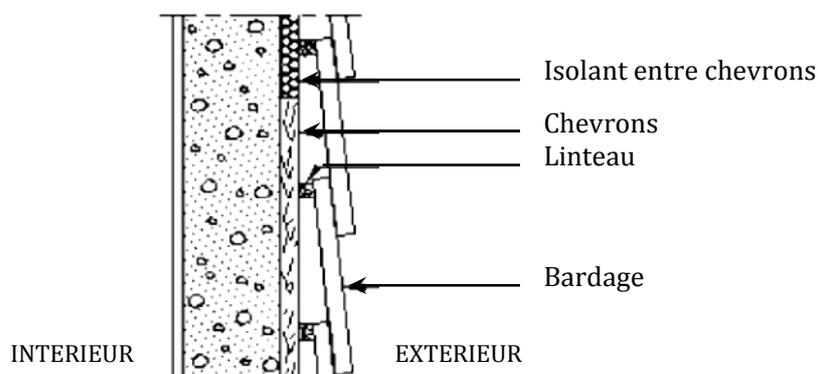


Figure 14. Illustration d'une façade multicouche (Exemple de mur type IV - DTU 23.1)

De la même manière, les quantitatifs des matériaux à déposer lors des opérations de réhabilitation sont estimés à partir du modèle objet du bâtiment existant.

Par ailleurs, la connaissance de la composition des parois est exploitée pour identifier précisément l'ensemble des couches de matériaux à déposer. Sur l'exemple de la Figure 14, la pose d'une isolation thermique par l'extérieur sur la façade impose alors de déposer l'ensemble des matériaux de parement extérieur (bardage, linteaux, chevrons et isolant préexistant), qui doivent ensuite être remis à neuf.

Suivant les matériaux plusieurs scénarios de traitement en fin de vie peuvent être considérés : mise en décharge en tant que déchet inertes, incinération. Le recyclage des composants n'est pas proposé dans le modèle actuel, en dehors du pourcentage de matériau recyclé directement intégré en production.

Les données environnementales d'inventaires de cycle de vie (ICV) – utilisées pour modéliser la production des matériaux ou systèmes et leur traitement en fin de vie – sont issues du logiciel EQUER. Ces données proviennent elles-mêmes de la base de données suisse Ecoinvent (Version 2.0) (Frischknecht et al., 2004).

EQUER est un outil d'analyse de cycle de vie du bâtiment développé par le Centre d'Energétique et des Procédés (CEP) de l'Ecole des Mines ParisTech (Polster et al, 1996). Les bilans environnementaux obtenus à partir d'EQUER ont été comparés à des valeurs issues d'autres outils d'analyse de cycle de vie du bâtiment, dans le cadre de projets européens (REGENER, PRESCO) (Peuportier et al., 2004). Les comparaisons ont souligné la correspondance des valeurs moyennes calculées. Cette même base de données est utilisée pour les données d'inventaires des énergies consommées en exploitation du bâtiment.

Les données économiques relatives aux coûts des matériaux et composants de bâtiment posés, au traitement en fin de vie sont issues de différentes sources dont le projet CIBLE (Cohérence des interventions pour réaliser des bâtiments de logement basse énergie) de la Fondation Bâtiment Energie (FBE). Les principales hypothèses sont portées en Annexe B.

#### **1.3.3.4 Données environnementales et coût des énergies**

La phase d'exploitation du bâtiment est modélisée par différentes consommations énergétiques ( $C_h$ ,  $C_{DHW}$ ,  $C_e$ ). Par conséquent, l'évaluation des performances de programmes de réhabilitation réclame : les données d'inventaire de cycle de vie (ICV) de ces énergies, l'évolution de leur coût économique dans le temps, le calcul des consommations d'énergie en exploitation.

Les données d'inventaires des énergies consommées en exploitation du bâtiment sont issues de la base de données Ecoinvent (Version 2.0), de même que les ICV matériaux (1.3.3.3).

Les hypothèses relatives au scénario d'évolution du coût de l'énergie sont portées en Annexe B.

Le calcul de ces consommations fait l'objet des développements suivants.

#### **1.3.3.5 Besoins et consommation d'énergie pour le chauffage**

##### **Besoins de chauffage**

Les besoins d'énergie pour le chauffage sont évalués par couplage du modèle de cycle de vie présenté avec un outil de simulation thermique du bâtiment, le logiciel COMFIE.

Il existe principalement deux classes d'outils de simulation pour l'évaluation des besoins énergétiques de chauffage ou de climatisation :

- Les outils simplifiés sont basés sur des modèles analytiques prenant en compte les phénomènes physiques simples (la conduction) et introduisant des facteurs de corrélation pour les aspects dynamiques.
- Les outils de simulation dynamique utilisent des modèles aux éléments, volumes ou aux différences finies pour simuler le comportement thermique des bâtiments, en intégrant des modélisations pour l'ensemble des principes physiques régissant les transferts de chaleur (Clarke, 2001). Les résultats obtenus en quelques secondes à quelques minutes sont plus précis et plus détaillés.

COMFIE est un outil de simulation du comportement thermique dynamique du bâtiment, développé par le Centre d'Energétique et des Procédés (CEP) de l'Ecole des Mines ParisTech (Peuportier and Blanc-Sommereux, 1990).

La simulation intègre les apports solaires, les apports internes, les échanges thermiques par conduction, convection et rayonnement ainsi que les échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur, en prenant en compte l'inertie thermique des différentes zones.

Le bâtiment est représenté par un modèle numérique aux volumes finis, résolu après réduction par analyse modale (Bacot et al., 1984). La simulation procède en plusieurs étapes :

- Lecture de l'ensemble des paramètres d'entrée (définis dans le modèle initial de bâtiment créé sous ALCYONE puis PLEIADES ; adaptés par le couplage avec le modèle de cycle de vie pour la prise en compte de la réhabilitation séquentielle) ;
- Initialisations des différentes grandeurs utilisées ;
- Calcul des apports solaires, à partir des données météorologiques et des masques ;
- Maillage du bâtiment ;
- Analyse modale du système d'équation ;
- Calcul thermique du bâtiment.

Par ailleurs, le cœur de calcul est interfacé à plusieurs modules permettant la prise en compte des mouvements d'air, de l'éclairage, des interactions avec des systèmes utilisant des énergies renouvelables, etc. Pour le calcul thermique, COMFIE active de façon séquentielle chaque module afin de prendre en compte leur contribution respective (sous la forme d'une puissance fournie à chaque zone du bâtiment), et calcule la température de chaque zone thermique à l'instant  $t+dt$ , en fonction de la valeur au temps  $t$ .

De nombreux outils de simulation thermique dynamique existent pour évaluer les besoins de chauffage ou de climatisation des bâtiments : TRNSYS, DOE-2, EnergyPlus, SERIRES, ESP-r, SPARK, COMFIE, CoDyBa, etc. (Hong et al., 2000 ; EERE, 2008).

COMFIE a fait l'objet d'une campagne de validation basée sur des comparaisons des résultats à la fois à des mesures expérimentales effectuées sur une cellule de test PASSYS, et à des valeurs de références issues de plusieurs modèles et outils de simulation, sur le plan international. Cette seconde forme de validation a notamment été conduite dans le cadre de la tâche 12 du « Solar heating and cooling programme » de l'Agence Internationale de l'Energie (Judkoff et Neymark, 1995), ainsi que sur la base des comparaisons menées par Brun et al. (2009) sur un bâtiment à

haute efficacité énergétique. Cette dernière référence est d'autant plus intéressante que la réhabilitation doit permettre d'atteindre des niveaux élevés de performance énergétique.

La simulation thermique dynamique, conduite sur le bâtiment réhabilité (totalement ou partiellement pendant la séquence de réhabilitation), donne accès aux puissances de chaleur de chauffage et/ou de climatisation nécessaires au respect des températures de consignes, au pas de temps horaire et sur l'année. De plus, l'évaluation des températures horaires d'air intérieur permet d'estimer le degré d'inconfort thermique en été, suivant la méthode du confort adaptatif présentée en 1.2.3.1.3.

### Consommations de chauffage

A partir des puissances de chaleur horaires (appelées pour le respect des températures de consigne), le rendement horaire de l'équipement de chauffage est alors estimé pour évaluer la consommation horaire d'énergie pour le chauffage.

Le rendement horaire du système de chauffage, à charge partielle, est calculé suivant la méthode Th-BCE 2012. Le développement suivant s'applique aux générateurs à combustion de type :

- Chaudière à gaz (condensation, basse température, standard) ;
- Chaudière fioul (condensation, basse température, standard) ;
- Chaudière bois (classe 1, 2 ou 3) ;
- Radiateurs gaz avec ou sans ventilateurs ;
- Accumulateurs gaz (standard ou à condensation) ;
- Générateurs d'air chaud (standard ou à condensation) ;
- Tubes radiants ;
- Panneaux radiants.

Le Tableau 7 donne la nomenclature des différentes variables utilisées pour évaluer le rendement, à charge partielle, des systèmes de chauffage mentionnés ci-dessus.

Notation	Description	Unité
$P_N$	Puissance utile nominale du générateur	kW
$P_{30\%}$	Puissance utile à la charge partielle de 30% de la puissance nominale	kW
$P_X$	Puissance utile à charge partielle	kW
$\eta_G(P_N)$	Rendement de génération à la charge utile nominale (sur PCI)	%
$\eta_G(P_{30\%})$	Rendement de génération à la charge partielle de 30% (de $P_N$ ) (sur PCI)	%
$\eta_G(P_X)$	Rendement de génération à la charge partielle de X% de $P_N$ (sur PCI)	%
$Q_{P030}$	Pertes à l'arrêt, pour un écart de 30°C entre eau chaude et air ambiant	kW
$Q_{P0}$	Pertes à charge nulle	kW
$Q_{PX}$	Pertes thermiques totales pour une puissance utile à charge partielle	kW
$PCSI$	Ratio entre pouvoir calorifique supérieur et pouvoir calorifique inférieur	-
$\theta_{wh,g}$	Température de fonctionnement de la génération de chaleur	°C
$\theta_{amb}$	Température ambiante du lieu où se trouve le générateur	°C

Tableau 7. Nomenclature des variables du modèle de rendement à charge partielle

Les générateurs à combustion sont généralement caractérisés par la donnée des 4 paramètres suivants (précisés dans la nomenclature ci-dessus) :

$$P_N \quad \eta_G(P_N) \quad \eta_G(P_{30\%}) \quad Q_{P_{0,30}}$$

Pour les chaudières gaz, fioul (y compris à condensation), les générateurs d'air chaud, les chaudières à bois et les accumulateurs gaz, le rendement à charge partielle est évalué comme suit :

- **Pour une charge comprise entre 30% et 100%**

L'interpolation du rendement entre le rendement à charge partielle et le rendement à pleine charge se fait linéairement sur la base de la puissance utile.

$$\eta_G(P_X) = \eta_G(P_{30\%}) - (P_{30\%} - P_X) \cdot \frac{\eta_G(P_{30\%}) - \eta_G(P_N)}{P_{30\%} - P_N}$$

- **Pour une charge comprise entre 0% et 30%**

A charge partielle comprise entre 0% et 30% de la puissance utile nominale, les rendements se déduisent des pertes thermiques totales. Ces pertes sont calculées sur le pouvoir calorifique supérieur des combustibles (PCS), il convient donc pour être homogène de les ramener en pouvoir calorifique inférieur (PCI).

Le rendement est alors calculé à partir des pertes thermiques totales :

$$\eta_G(P_X) = \frac{P_X}{P_X + Q_{P_X}} \cdot PCSI$$

Les pertes thermiques totales sont évaluées comme suit :

- **Pour une charge comprise entre 30% et 100%**

$$Q_{P_X} = (100 - \eta_G(P_X) / PCSI) \cdot P_X / \eta_G(P_X) / PCSI$$

On en déduit alors les pertes thermiques à charge partielle de 30%.

- **Pour une charge nulle**

Les pertes à charge nulle sont supposées connues pour une différence de 30°C entre la température de l'eau chaude et celle de l'air ambiant. Elles sont alors rapportées à l'écart de température effectif, selon la formule :

$$Q_{P_0} = \frac{100 \cdot Q_{P_{0,30}}}{\eta_G(P_N)} \cdot \left( \frac{\theta_{wh,g} - \theta_{amb}}{30} \right)^{1,25}$$

- **Pour une charge comprise entre 0% et 30%**

L'évolution des pertes thermiques est considérée linéaire entre la charge nulle et la charge partielle à 30%.

La consommation horaire de chaleur pour le chauffage est calculée par le quotient du besoin de chaleur par le rendement horaire.

Remarque : Nous choisissons ici d'introduire le rendement horaire à charge partielle plutôt que de considérer un rendement moyen annuel de génération de chaleur. En effet, les actions séquentielles de réhabilitation mises en œuvre conduisent (pour certaines) à une réduction des besoins de chauffage horaires et annuels, dont l'influence sur le rendement du système de chauffage doit être prise en compte.

La consommation annuelle de chauffage est obtenue par intégration sur l'année des consommations horaires.

### 1.3.3.6 Ventilation et perméabilité à l'air de l'enveloppe

Les besoins de chaleur liés au renouvellement de l'air intérieur sont évalués directement au sein du calcul horaire effectué par COMFIE, à partir d'un scénario de ventilation.

Le scénario de ventilation fixe, au pas de temps horaire, le débit de ventilation des différentes zones du bâtiment. On considère, dans l'étude présentée ici, le même débit horaire en [vol/h] dans toutes les zones thermiques du bâtiment modélisé. La consigne de renouvellement d'air comprend deux termes :

- Le débit de ventilation contrôlé [vol/h] ;
- Le débit d'infiltrations, dû aux défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe [vol/h] ;

En réhabilitation, chaque système de ventilation est caractérisé par la donnée d'un débit moyen de renouvellement d'air contrôlé, supposé constant. En revanche, le débit d'infiltration modélisé dépend de l'état de l'enveloppe : façades, toiture et ouvertures (réhabilitées ou non).

Aussi, différentes valeurs du débit d'infiltration sont considérées, suivant les cas ci-dessous :

- Etat initial : avant réhabilitation de l'enveloppe et du système de ventilation ;
- Etat de réhabilitation partiel : système de ventilation initial remplacé mais enveloppe en l'état initial ou réhabilitée partiellement ;
- Enveloppe réhabilitée totalement (façades, toiture, plancher bas et ouvertures) ;

Pour chacun de ces cas, une valeur de débit d'infiltration est proposée. Les valeurs de débits de ventilation contrôlée et par infiltration dépendent des systèmes et des bâtiments considérés. Celles utilisées dans l'étude de cas sont spécifiées en partie 1.4.3.2.

Par ailleurs, un scénario de sur-ventilation nocturne est intégré en été pour contribuer au confort thermique. Pendant les journées les plus chaudes d'été, un débit de sur-ventilation nocturne (entre minuit et 7h), très supérieur au débit de ventilation contrôlé précédemment évoqué, est imposé pour rafraîchir la structure. Le détail du scénario de sur-ventilation nocturne, dans le cadre de l'étude de cas, est précisé en partie 1.4.2.3.

### 1.3.3.7 Consommation énergétique et production d'eau chaude sanitaire

L'évaluation des besoins de chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire ( $B_{DWH}$ ) fait l'objet d'une modélisation simplifiée. On a considéré une consommation d'eau chaude  $c_{pers/j}$  de 40L/pers/jour pendant une durée  $n_j$  de 365 jours/an. Les besoins de chaleur sont alors estimés à partir de la température d'eau froide ( $T_{froide}$ ) et la température d'eau chaude ( $T_{chaude}$ ), respectivement 10°C et 50°C par hypothèse.

La formule suivante permet une évaluation simplifiée des besoins de chaleur :

$$B_{DWH} = c_{pers/j} \cdot n_j \cdot n_{pers} \cdot c_{eau} \cdot (T_{chaude} - T_{froide}) \cdot (1 - F_S)$$

Dans cette formule, les paramètres complémentaires représentent :

- $c_{eau}$  : Capacité calorifique massique de l'eau égale à 4.18kJ/(kg.K);
- $F_S$  : Fraction solaire de production d'ECS ;

La fraction solaire représente la part des besoins de chaleur pour la production d'ECS, qui est couverte par l'installation solaire thermique (si existante).

Par ailleurs, on considère un rendement de génération et de distribution moyen annuel pour la production d'ECS. Les valeurs de rendements considérés sont basées sur la méthode 3CL.

### 1.3.3.8 Consommations des auxiliaires

Les équipements de production de chaleur et de ventilation mobilisent un certain nombre d'auxiliaires consommant de l'électricité en fonctionnement : pompes, ventilateurs. Le nombre d'auxiliaires considérés dans le modèle pour différents systèmes est porté ci-dessous :

Type de ventilation	Nombre de ventilateurs
Ventilation naturelle	0
Ventilation naturelle assistée	0,5
VMC simple flux, hygroréglable (ou non) (type A ou B)	1
VMC double flux	2

Tableau 8. Systèmes de ventilation et auxiliaires

Type d'équipement de chauffage	Nombre de pompes
Chaudière gaz, fioul ou bois	1
Chauffage électrique	0
Pompe à chaleur	1
Réseau de chaleur urbain	1

Tableau 9. Systèmes de chauffage et auxiliaires

Type de circuit de distribution ECS	Nombre de pompes
Sans boucle	0
Avec boucle	1

**Tableau 10. Production ECS et auxiliaires**

Les consommations d'électricité des ventilateurs, pompes pour le chauffage et la production d'ECS sont respectivement estimées à partir du volume d'air renouvelé et des besoins de chaleur. On considère une puissance électrique consommée par ventilateur, égale à 0,1 W/(m<sup>3</sup>/h) d'air renouvelé (Peuportier, 2008) et une consommation électrique par pompe égale à 1% des besoins de chaleur assurés.

### 1.3.3.9 Consommation électrique des équipements

Les consommations énergétiques de l'éclairage et des équipements (électroménager, matériel TV, HiFi et informatique, etc.) sont prises en compte, via une puissance électrique consommée par unité de surface. Du point de vue du calcul des besoins de chauffage, elles doivent être pris en compte car ils induisent des dissipations de chaleur dans les espaces.

Les mesures de réhabilitation étudiées ne ciblant pas ces catégories d'usage, ces postes ne sont donc pas discriminants ici pour identifier des stratégies de réhabilitation efficaces.

Le remplacement et la gestion de ces systèmes et appareils peuvent d'ailleurs être envisagés de manière complémentaire et relativement indépendante dans le cas des logements, cœur de cible de ces travaux. Dans le cas du tertiaire, ce découplage serait en revanche très discutable, étant donné que l'éclairage et les équipements influencent grandement les besoins de chaleur et de climatisation des bureaux.

### 1.3.3.10 Synthèse et implémentation du modèle de cycle de vie

L'ensemble du modèle de cycle de vie, et des sous modèles détaillés précédemment, a été implémenté dans l'environnement de programmation DELPHI, pour couplage avec le cœur de calcul de COMFIE.

L'étude d'une configuration de réhabilitation, pour un bâtiment donné, procède alors des différentes étapes suivantes, de manière automatisée :

- Etape 1 – Lecture et acquisition des données de réhabilitation : type et caractéristique de la (des) mesure(s) de réhabilitation à intégrer ;
- Etape 2 – Analyse du modèle de bâtiment avant réhabilitation (à partir du modèle initial créé et renseigné sous ACYONE et PLEIADES) pour la détermination des types et quantités de composants à produire, déposer, traiter en fin de vie ;
- Etape 3 – Adaptation du modèle à la configuration réhabilitée : intégration des composants de réhabilitation, interactions sur le modèle de l'existant (modification éventuelle des scénarios d'usage en fonction de la configuration de réhabilitation, par exemple : scénarios de ventilation et débits d'infiltrations), etc. ;

- Etape 4 – Simulation thermique dynamique sous COMFIE ;
- Etape 5 – Evaluation des performances de la configuration de réhabilitation, suivant le modèle de cycle de vie exposé (mobilisant les résultats de la simulation et de l'analyse de l'étape 2) ;
- Etape 6 – Ecriture des résultats.

L'étude d'un programme de réhabilitation impose de boucler itérativement sur ces 6 étapes pour chacune des phases de réhabilitation. Le modèle de bâtiment analysé en étape 1 est alors la configuration courante du bâtiment (sauvegardée ou reconstruite) et non son état initial avant toute opération de réhabilitation.

### **1.3.4 Conclusion**

Les critères de décision choisis pour évaluer les performances des programmes de réhabilitation étudiés avaient été présentés précédemment. Cette partie a permis de préciser le modèle de cycle de vie mis en œuvre pour servir cette évaluation.

Ce modèle de cycle de vie, implémenté sous DELPHI et couplé à l'outil de simulation thermique dynamique COMFIE, permet alors d'étudier les configurations de réhabilitation de manière automatisée.

Le couplage à la simulation thermique dynamique impose la nature mathématique des critères de décision, qui sont donc des fonctions non linéaires et implicites. Par ces outils, nous sommes capables d'évaluer les performances d'une solution donnée. En revanche, nous ne disposons pas de l'expression analytique globale reliant toutes les variables de décision du problème. Cette caractéristique du problème influencera les choix méthodologiques en termes d'aide à la décision pour l'identification de programmes de réhabilitation énergétique efficaces.

## 1.4 Présentation de l'étude de cas

Avant de détailler les approches d'aide à la décision multicritère pour l'identification de stratégies de réhabilitation efficaces, nous nous proposons de présenter le bâtiment qui servira d'étude de cas à la mise en pratique des méthodes proposées. Celles-ci ont été systématiquement développées dans le cas général, indépendamment d'un modèle spécifique de bâtiment. Leur application sera cependant illustrée sur le cas de la barre Grimaud, notamment dans les chapitres 2, 3 et 4.

Cette partie présente le bâtiment étudié – la barre Grimaud – ainsi que les nombreuses hypothèses de modélisation retenues pour en simuler le comportement thermique, sous le logiciel PLEIADES+COMFIE. Ces hypothèses concernent par exemple la composition des parois de l'enveloppe, le comportement des occupants, le rendement des installations de chauffage ou les débits de ventilation. Par ailleurs, les mesures de réhabilitation considérées pour ce bâtiment et leurs variantes sont détaillées. Les programmes de réhabilitation étudiés mettent en œuvre une combinaison de ces mesures élémentaires de réhabilitation énergétique, sous la forme d'une séquence dans le temps. Enfin, la présentation de cette étude de cas éclaire sur la nature du problème d'aide à la décision.

### 1.4.1 Présentation de la barre Grimaud

La barre Grimaud est un bâtiment collectif résidentiel de 4 étages, situé en banlieue Sud de Paris (Sainte Geneviève des Bois). Sa construction a été achevée en 1974, soit avant l'introduction de la première réglementation thermique (1975) en France. Cette barre de logements appartient donc au segment résidentiel, construit après la Seconde Guerre Mondiale et avant 1974, qui représente un enjeu considérable en termes de réhabilitation énergétique.

Le bâtiment modélisé, inspiré de la barre Grimaud, est composé de 10 appartements se partageant une surface habitable totale de 792m<sup>2</sup> (SHAB). La hauteur sous plafond de chacun des niveaux est de 2,50 m. Sauf mention contraire (Chapitre 5), nous ne considérons, dans les simulations effectuées, aucun masque proche au rayonnement solaire sur le bâtiment modélisé.



Figure 15. Barre Grimaud, vue de la façade Sud

## 1.4.2 Etat avant réhabilitation

### 1.4.2.1 Modélisation du bâti

#### Géométrie du bâtiment

Le logiciel Alcyone est utilisé pour la saisie géométrique du bâtiment. Le plan du niveau courant (ici 1<sup>er</sup> étage) est présenté sur la Figure 16. Il comprend deux appartements de type T3 par palier.

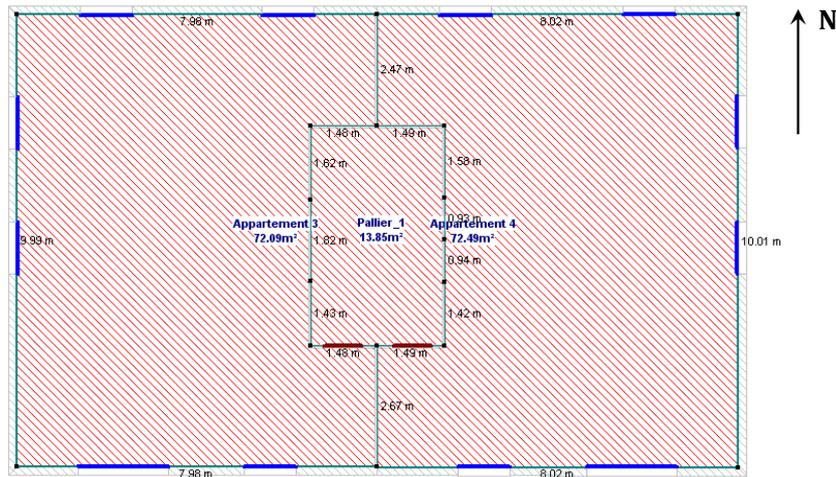


Figure 16. Barre Grimaud, saisie de la géométrie du 1er étage sous Alcyone

#### Modélisation en zones thermiques

Suivant l'orientation et la distribution des espaces intérieurs, les logements et leurs pièces ne bénéficient pas des mêmes apports et ne représentent pas les mêmes surfaces déperditives. Profitant de la capacité de simulation thermique multizones du logiciel PLEIADES+COMFIE, le bâtiment est découpé en différentes zones, considérées thermiquement homogènes.

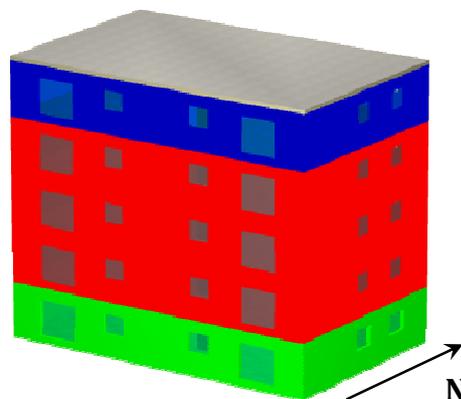


Figure 17. Barre Grimaud, illustration 3D des zones thermiquement homogènes

La Figure 17 explicite les trois zones thermiques qui ont ainsi été définies, séparant les étages courants des logements du rez-de-chaussée et du dernier étage. En effet, le dernier étage présente une surface d'échange thermique avec l'extérieur nettement supérieure à celle des étages courants, en raison de la surface de toiture. Le rez-de-chaussée est construit sur vide sanitaire (zone tampon entre le sol et les logements), imposant une forme de régulation thermique. Les parties communes (paliers) sont incluses dans la zone thermique des étages courants.

Sur ce modèle de bâtiment, aucune distinction entre les pièces situées au Sud et au Nord n'a été introduite. Elles sont donc considérées thermiquement homogènes, ce qui conduit vraisemblablement à une légère sous-estimation des besoins de chauffage. Les méthodes et outils développés permettent parfaitement de prendre en charge une description avec davantage de zones thermiques. Le modèle à trois zones a été privilégié, à ce stade, pour limiter les temps de calcul, en validation des approches d'optimisation.

### Composition de l'enveloppe

Avant réhabilitation, l'enveloppe du bâtiment ne met en œuvre aucun matériau spécifique d'isolation thermique. Les caractéristiques thermiques des parois opaques et vitrées avant réhabilitation sont présentées dans les tableaux suivants. Dans le cas des parois opaques, Les matériaux composant une paroi sont énumérés de l'extérieur vers l'intérieur ; du haut vers le bas, pour les planchers intermédiaires. Les coefficients  $e$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $c$  et  $R$  désignent respectivement :

- L'épaisseur de matériau mise en œuvre [mm] ;
- La conductivité thermique du matériau [W/(m.K)] ;
- La masse volumique [kg/m<sup>3</sup>] ;
- La chaleur massique [J/(kg.K)] ;
- la résistance thermique du composant de bâtiment seul [m<sup>2</sup>.K/W].

Les murs extérieurs sont constitués de bloc de béton pleins, enduits à l'extérieur et doublés d'une cloison de carreau de plâtre à l'intérieur.

Matériau	$e$ [mm]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/(kg.K)]	$R$ [m <sup>2</sup> .K/W]
Enduit extérieur	20	1,15	1700	1000	0,02
Bloc béton plein	150	1,75	2300	920	0,09
Air	10	0,07	1	1224	0,14
Carreau de plâtre	50	0,36	790	799	0,14

Tableau 11. Barre Grimaud, détail de la composition des murs de façade

Les murs intérieurs de refend, représentés sur la Figure 16, sont construits en blocs béton pleins et sont doublés de part et d'autre de plaques de plâtre de type BA13 (bords amincis, épaisseur totale de 13mm).

Matériau	e [mm]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/(kg.K)]	R [m <sup>2</sup> .K/W]
Placoplatre BA 13	13	0,320	850	799	0,04
Bloc béton plein	150	1,75	2300	920	0,09
Placoplatre BA 13	13	0,320	850	799	0,04

**Tableau 12. Barre Grimaud, détail de la composition des murs intérieurs**

La toiture est une toiture terrasse sur dalle béton. Une couche de graviers et de bitume assurent respectivement le drainage et l'étanchéité à l'eau de la toiture.

Matériau	e [mm]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/(kg.K)]	R [m <sup>2</sup> .K/W]
Calcaire ferme	30	1,70	2200	800	0,02
Bitume pur	4	0,17	1050	1000	0,02
Béton lourd	150	1,75	2300	920	0,09
Placoplatre BA 13	13	0,320	850	799	0,04

**Tableau 13. Barre Grimaud, détail de la composition de la toiture terrasse**

La structure des planchers intermédiaires est basée sur une dalle béton pleine, d'épaisseur 150 mm. Une chape de ragréage a été rapportée pour faciliter la pose du carrelage.

Matériau	e [mm]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/(kg.K)]	R [m <sup>2</sup> .K/W]
Carrelage	10	1,70	2300	700	0,04
Mortier	50	1,15	2000	840	0,04
Béton lourd	150	1,75	2300	920	0,09
Placoplatre BA 13	13	0,32	850	799	0,04

**Tableau 14. Barre Grimaud, détail de la composition des planchers intermédiaires**

La composition du plancher bas, sur vide sanitaire, est très similaire à celle des plancher intermédiaires.

Matériau	e [mm]	$\lambda$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	c [J/(kg.K)]	R [m <sup>2</sup> .K/W]
Béton lourd	150	1,75	2300	920	0,09
Mortier	50	1,15	2000	840	0,04
Carrelage	10	1,70	2300	700	0,04

**Tableau 15. Barre Grimaud, détail de la composition du plancher bas, sur vide sanitaire**

Avant réhabilitation, l'ensemble des fenêtres de la barre Grimaud sont à simple vitrage et les menuiseries en PVC. Les coefficients  $U_w$ ,  $U_f$  et  $U_g$  représentent respectivement les coefficients de transfert thermique moyen de la fenêtre (vitrage + cadre), du cadre et du vitrage.

Type d'ouvrant	Simple vitrage, menuiserie PVC
Facteur solaire moyen	0,56
Coefficient $U_w$ fenêtre [W/(m <sup>2</sup> .K)]	3,54
Coefficient $U_f$ bâti [W/(m <sup>2</sup> .K)]	1,8
% de vitrage	62
Coefficient $U_g$ vitrage [W/(m <sup>2</sup> .K)]	4,6
Facteur solaire à une incidence de 0°	0,9

Tableau 16. Barre Grimaud, détail de la composition des ouvrants

## Ponts thermiques

Les ponts thermiques utilisés pour la modélisation du bâtiment sont présentés dans le tableau suivant.

Type de pont thermique	$\Psi$ [W/(m.K)]
Plancher haut / Mur extérieur	0,52
Plancher intermédiaire / Mur extérieur	0,17
Plancher bas / Mur extérieur	0,54
Mur extérieur / Refend / Mur extérieur	0,13
Mur extérieur / mur extérieur	0,32
Appui de fenêtre	0,8
Linteau	0,8
Tableau	0,8

Tableau 17. Barre Grimaud, détail des ponts thermiques

### 1.4.2.2 Modélisation des équipements

#### Ventilation et scénario de renouvellement d'air

La ventilation est assurée par une VMC (ventilation mécanique contrôlée) classique non modulée. On suppose que le système de ventilation existant assure un renouvellement d'air moyen de 0.5 vol/h (Peuportier, 2008). En France, l'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements fixe les débits minimaux de ventilation suivant le nombre de pièces. On fait l'hypothèse que les infiltrations d'air dues aux défauts d'étanchéité impliquent un débit d'air additionnel, voisin de 0.1 vol/h.

Cette dernière valeur correspond à une perméabilité moyenne, considérant un indice de perméabilité à l'air  $I_4 = 1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ . Cet indice représente un débit de fuite par la surface de parois

froides (au sens de la RT 2005, ensemble des parois en contact avec l'extérieur ou un local non chauffé, hors plancher bas), sous une différence de pression de 4 Pa entre l'intérieur et l'extérieur du logement. L'estimation se base sur des études du CETE de Lyon (CETE, 2006), selon lesquels le coefficient  $n_{50}$  (taux de renouvellement d'air sous 50Pa), le débit de perte par infiltration  $Q$  et le coefficient  $I_4$  sont reliés entre eux par les équations suivantes :

$$I_4 = \left( \frac{4}{50} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{V}{A_{pf}} \cdot n_{50}$$

$$Q_{\text{infiltrations}} \cong \frac{n_{50}}{20}$$

Avec :

- $V$  est le volume chauffé
- $A_{pf}$  la surface totale de parois froides.

Le rapport  $V/A_{pf}$  définit la compacité d'un bâtiment. Pour la barre Grimaud, la compacité est estimée à 2,5 m. Le débit d'infiltration est alors d'environ de 0.11 vol/h.

On retient donc un débit de renouvellement d'air global moyen de 0.6 vol/h, toute l'année.

### Production de chaleur pour le chauffage

La production de chaleur pour le chauffage est assurée par une chaudière collective au fioul, installée avant 1988. Le rendement horaire de génération est calculé sur la base de la méthode TH-BCE 2012, présentée précédemment. La Figure 18 présente l'évolution du rendement de génération de la chaudière fioul existante, en fonction du taux de charge.

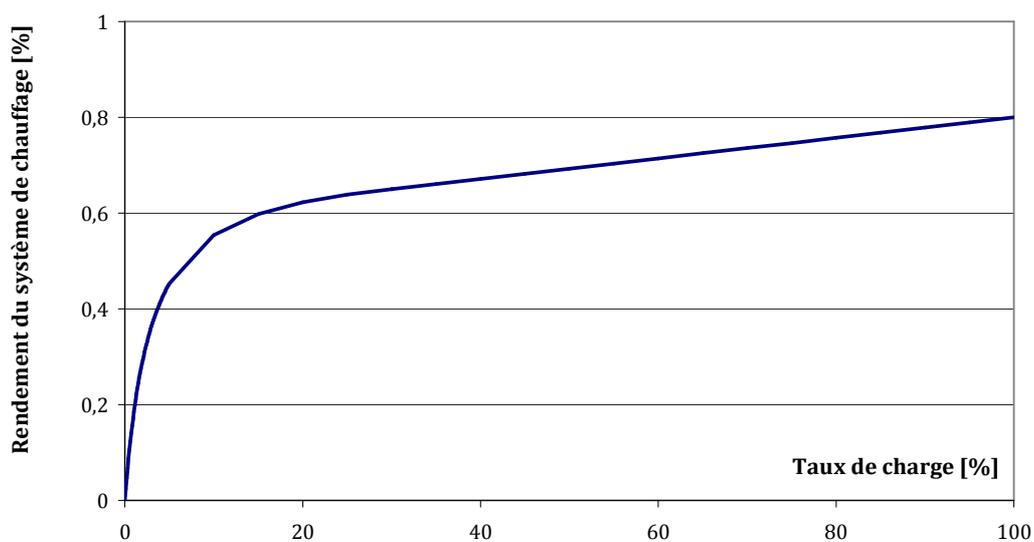


Figure 18. Evolution du rendement de la chaudière fioul existante en fonction du taux de charge

Ce système est caractérisé par les paramètres suivants :

- Puissance nominale : 70 kW
- Rendement à la charge nominale : 80%
- Rendement à charge partielle (30%) : 65%
- Pertes à vide : 3 kW

### Production de chaleur pour l'eau chaude sanitaire

La production d'eau chaude sanitaire (ECS) est assurée par des chauffe-bains individuels au gaz, installés avant 1988. Les rendements de l'installation d'ECS ont été repris de la méthode de calcul 3CL et sont présentés dans le tableau ci-dessous. Le rendement de distribution correspond à une boucle isolée.

	Rendement de génération [%]	Rendement de distribution [%]	Rendement global [%]
Chauffe-bain gaz	0,75	0,70	0,525

Tableau 18. Barre Grimaud, rendements de la production d'ECS par les chauffe-bains gaz

### Auxiliaires de ventilation et de chauffage

Les consommations d'électricité des ventilateurs, pompes pour le chauffage et la production d'ECS sont respectivement estimées à partir du volume d'air renouvelé et des besoins de chaleur. On considère une puissance électrique consommée par ventilateur, égale à 0,1 W/(m<sup>3</sup>/h) d'air renouvelé (Peuportier, 2008) et une consommation électrique des pompes égale à 1% des besoins de chaleur assurés. Avant réhabilitation, on compte 1 ventilateur par logement, 1 pompe pour le chauffage collectif et 1 pompe pour l'alimentation en eau des chauffe-bains gaz individuels.

#### 1.4.2.3 Modélisation des scénarios d'usage

##### Occupation et apports internes

Les apports internes (éclairage compris) sont modélisés par une puissance supposée constante sur l'ensemble de la journée égale à 2,6 W/m<sup>2</sup>. Cette estimation se base sur une consommation électrique annuelle de 3000 kWh par logement (source : bureau d'études Enertech), dont environ 75% constitue les apports internes. Ce ratio représente les pertes par des équipements tels que le lave-linge et le lave-vaisselle, qui évacuent une partie de leur chaleur à l'intérieur de l'habitat.

##### Scénario d'occupation

On considère un occupant pour 25 m<sup>2</sup> de surface habitable. Au cours de la semaine, le logement demeure occupé suivant le scénario ci-dessous :

- Du lundi au vendredi :
  - De 0 h à 8 h : 100 % d'occupation ;
  - De 8 h à 18 h : 50 % d'occupation ;
  - De 18 h à 24 h : 100 % d'occupation.
- Samedi et dimanche : 100 % d'occupation toute la journée.

### Consigne de chauffage

La consigne de chauffage est fixée à 19°C (sauf mention contraire), à toute heure de la journée, du début du mois d'octobre à la fin du mois d'avril, et dans toutes les pièces. On considère que les paliers et les escaliers sont des espaces chauffés.

### Confort d'été

Pendant l'été, des protections solaires (volets) sont utilisés en journée pour contribuer au confort thermique : occultations à 70% en journée (de 7h à 19h) par des volets roulants PVC. La sur-ventilation nocturne (10 vol/h, entre minuit et 7h) est mise en œuvre pour rafraîchir la structure pendant les journées chaudes d'été.

#### 1.4.2.4 Performances énergétiques avant réhabilitation

Le tableau suivant présente le récapitulatif des performances énergétiques et thermiques de la barre Grimaud modélisée avant réhabilitation

<b>Barre Grimaud</b>	<b>Avant réhabilitation</b>
Besoin annuel de chauffage [kWh/m <sup>2</sup> ]	178
Puissance maximale de chauffage [kW]	63,8
Rendement moyen annuel de chauffage [%]	67,5
Consommation annuelle de chauffage [kWh/m <sup>2</sup> ]	260,8
Besoin annuel de chaleur ECS [kWh/m <sup>2</sup> ]	38,9
Consommation annuelle de chaleur ECS [kWh/m <sup>2</sup> ]	74,1
Consommation annuelle des auxiliaires [kWh/m <sup>2</sup> ]	3,45

**Tableau 19. Barre Grimaud, performances énergétiques avant réhabilitation**

<b>Barre Grimaud</b>	<b>Avant réhabilitation</b>
Température maximale rez-de-chaussée [°C]	25,9
Température maximale étages courants [°C]	25,3
Température maximale dernier étage [°C]	31,5
Confort thermique adaptatif [°C.heure]	15

**Tableau 20. Barre Grimaud, confort thermique avant réhabilitation**

## 1.4.3 Mesures de réhabilitation

### 1.4.3.1 Récapitulatif des variantes de réhabilitation

Les programmes de réhabilitation étudiés sont formulés à partir de combinaisons des mesures de réhabilitation élémentaires présentées dans les Tableau 21 ou Tableau 22 ci-dessous. Ces mesures sont regroupées en 7 classes : murs de façades, toiture, plancher inférieur, ouvertures, ventilation, chauffage et production d'eau chaude sanitaire (ECS). Pour chacune de ces classes, différentes alternatives peuvent être considérées.

Deux espaces de recherche sont définis et détaillés ci-dessous. Suivant les cas d'application l'un ou l'autre sera alors mobilisé, les performances de certaines méthodes étant limitées sur les espaces de recherche de grande cardinalité.

#### Remarques générales

La puissance nominale du système de chauffage mis en œuvre en réhabilitation est logiquement fonction de la puissance courante de chauffe maximale appelée. Par conséquent, et suivant les séquences de réhabilitation définies par les programmes, le dimensionnement de la chaudière pourra varier ; si l'enveloppe a déjà été réhabilitée, la puissance nominale de l'équipement est alors réduite.

Sauf mention contraire (chapitre 4), les classes de mesures de réhabilitation sont considérées séquentiellement, chacune à une étape différente du programme de réhabilitation. Ces étapes sont séparées d'une durée fixée arbitrairement à un an. L'influence de ce choix pourra être étudiée. Toutes les façades sont réhabilitées lors de la même phase. Tous les ouvrants, quelle que soit la façade à laquelle ils appartiennent, sont remplacés lors de la même phase.

#### Espace de recherche 1 (large)

Dans ce cas, il est possible de différencier le type d'ouvrant mis en œuvre en réhabilitation, suivant l'orientation des façades. En revanche, l'épaisseur d'isolation est systématiquement la même, quelle que soit la façade considérée.

Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation
Murs de façades	ITE laine minérale : 100, 120, 150, 180, 200, 250 ou 300 mm
Toiture	ITE polyuréthane : 100, 150, 200, 250, 300 ou 350 mm
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100, 120, 150, 180, 200 ou 250 mm
Ouvertures	Double ou triple vitrages basse émissivité, menuiseries bois
Ventilation	Double flux ou ventilation de type Hygro-B
Chauffage	Chaudière gaz à condensation
Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%, 55% ou 75%

**Tableau 21. Mesures élémentaires de réhabilitation pour la barre Grimaud (espace de recherche 1)**

Sur la base des hypothèses précédentes, il est possible de construire 60 963 840 programmes de réhabilitation différents.

## Espace de recherche 2 (réduit)

Dans ce second cas, le type d'ouvrants et l'épaisseur d'isolation mise en œuvre ne peuvent être différenciés suivant l'orientation des façades.

Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation
Murs de façades	ITE laine minérale : 100, 150 ou 200 mm
Toiture	ITE polyuréthane : 150, 200 ou 300 mm
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100, 150 ou 200 mm
Ouvertures	Double ou triple vitrages basse émissivité, menuiseries bois
Ventilation	Double flux ou ventilation de type Hygro-B
Chauffage	Chaudière gaz à condensation
Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%, 55% ou 75%

Tableau 22. Mesures élémentaires de réhabilitation pour la barre Grimaud (espace de recherche 2)

Sur la base des hypothèses précédentes, il est possible de construire 1 632 960 programmes de réhabilitation différents.

### 1.4.3.2 Détails des variantes

#### Isolation thermique de l'enveloppe

En réhabilitation, les surfaces opaques d'enveloppe de la barre Grimaud (murs de façades, toitures ou plancher inférieur) sont isolées par l'extérieur (ITE : Isolation thermique par l'extérieur). L'ITE permet limiter les ponts thermiques, par exemple aux jonctions entre les planchers intermédiaires et les façades ou entre les murs de refend et les façades. Par ailleurs, l'ITE permet de préserver l'inertie thermique du bâtiment existant, contrairement à l'ITI. La mise en œuvre d'une ITE sur la barre Grimaud ne pose a priori pas de difficultés particulières en termes d'intégration architecturale.

Trois matériaux d'isolation sont envisagés : la laine de verre, le polyuréthane et le polystyrène extrudé, respectivement pour la réhabilitation des façades, la toiture et le plancher bas. Les propriétés thermiques et physiques de ces matériaux sont rappelées dans le Tableau 23 ci-dessous :

Matériau	$\lambda$ [W/(m.K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/(kg.K)]
Laine de verre	0,041	12	840
Polyuréthane	0,030	35	837
Polystyrène extrudé	0,029	35	1188

Tableau 23. Barre Grimaud, matériaux d'isolation

Le matériau d'isolation thermique est posé directement en contact avec les éléments de structure des murs ou planchers, soit donc immédiatement sur les blocs de béton des façades, les dalles béton de la toiture ou du plancher bas. Leur mise en œuvre impose donc la dépose des enduits, revêtements et couches d'étanchéités existantes, qui doivent être remplacées.

### Remplacement des ouvrants

Les ouvrants existants, simples vitrages à menuiserie PVC, sont remplacés par des fenêtres appartenant à un des deux types suivants :

- Double vitrage basse émissivité à lame argon, menuiserie bois : DV be Ar bois ;
- Triple vitrage basse émissivité à lame argon, menuiserie bois : TV be Ar bois.

Les performances de ces deux types d'ouvertures sont présentées ci-dessous :

Type d'ouvrant	DV be Ar bois	TV be Ar bois
Facteur solaire moyen	0,54	0,44
Coefficient $U_w$ fenêtre [W/(m <sup>2</sup> .K)]	1,42	0,87
Coefficient $U_f$ bâti [W/(m <sup>2</sup> .K)]	2,1	0,9
% de vitrage	85	85
Coefficient $U_g$ vitrage [W/(m <sup>2</sup> .K)]	1,3	0,86
Facteur solaire à une incidence de 0°	0,63	0,52

Tableau 24. Barre Grimaud, détail de la composition des ouvrants

### Système de ventilation

La ventilation mécanique classique non-modulée est remplacée par une ventilation double flux ou une ventilation Hygro-B. On suppose que ces systèmes de ventilation assurent un renouvellement d'air moyen respectivement de 0,1 vol<sub>eq</sub>/h (volume équivalent, l'efficacité de l'échangeur thermique étant prise à 80%) et 0,4 vol/h, hors infiltrations (Tableau 25).

Les débits d'infiltrations sont fonction de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, qui n'est pas considérée ici comme une mesure de réhabilitation indépendante. La perméabilité à l'air est liée à la réhabilitation de l'enveloppe (isolation des façades et remplacement des vitrages) et au remplacement du système de ventilation.

On considère ainsi que l'étanchéité de l'enveloppe demeure au même niveau tant que l'ensemble des actions de réhabilitation portant sur les façades, les ouvrants et la ventilation n'a pas été mis en œuvre. Dans ce cas, de débit total de renouvellement d'air (contrôlé et infiltration) est alors jugé similaire (égal à 0,6 vol/h), quel que soit le système de ventilation.

Après réhabilitation du groupe « enveloppe, ouvertures, ventilation », le débit d'infiltrations est limité à 0,1 vol/h, quel que soit le système mis en œuvre.

Type de ventilation	Débit d'air contrôlé [vol <sub>eq</sub> /heure]
VMC non modulante	0,5
Hygro-B	0,4
Double flux	0,1

Tableau 25. Barre Grimaud, débit de ventilation contrôlée, suivant les systèmes de ventilation

Du point de vue des auxiliaires, on considère deux ventilateurs dans le cas de la ventilation double flux, un en ventilation de type hygro-B.

### Système de chauffage

La chaudière collective au fioul existante est remplacée par une chaudière gaz à condensation. Ce système est caractérisé par les paramètres suivants :

- Puissance nominale : < 70 kW (adaptée aux besoins au moment de la réhabilitation)
- Rendement à la charge nominale : 90% (sur PCS)
- Rendement à charge partielle (30%) : 95% (sur PCS)
- Pertes à vide : 1 kW

De même que précédemment, le rendement horaire de génération est calculé sur la base de la méthode TH-BCE 2012, présentée précédemment.

L'évolution du rendement de génération de la chaudière gaz à condensation, en fonction du taux de charge, est présentée sur la figure suivante :

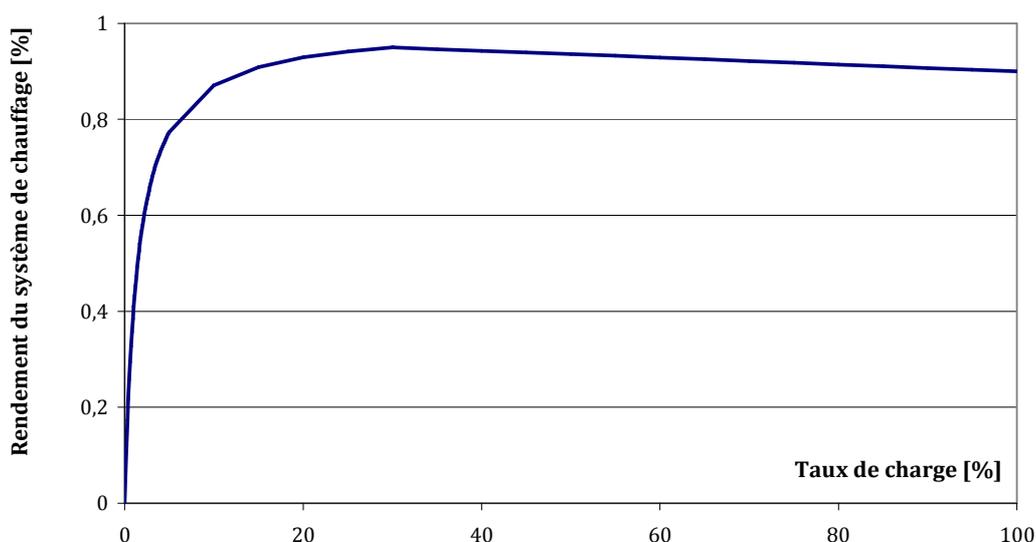


Figure 19. Evolution du rendement sur PCS de la chaudière gaz en fonction du taux de charge

## Intégration d'une production d'ECS par panneau solaire thermique

En réhabilitation, une part de la production d'eau chaude sanitaire peut être assurée par la pose de panneaux solaires thermiques. Dans ce cas, on considère que le besoin de chaleur pour la production d'ECS est réduit d'un facteur égal à la fraction solaire de l'installation, soit 35%, 55% ou 75%. Les consommations électriques de deux pompes sont alors prises en compte : circulation du circuit de production solaire, circulation du circuit de distribution finale.

### 1.4.4 Problématique systémique et interactions entre les mesures

Le bâtiment est un système complexe. Ce système est constitué de différents sous-systèmes en interaction. Dans le cas de la réhabilitation énergétique, les sous-systèmes considérés sont les mesures élémentaires. Les performances obtenues par la mise en œuvre d'une mesure de réhabilitation donnée dépendent de la configuration courante du bâtiment étudié, soit des mesures de réhabilitation précédemment mises en œuvre.

#### Etude de cas sur la barre Grimaud

Sur le cas de la barre Grimaud, nous nous proposons d'étudier l'influence des mesures de réhabilitation précédemment mises en œuvre sur les performances d'une isolation par l'extérieur de 200mm ( $R = 4,88 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ), notée F ITE 200mm, posée sur les façades du bâtiment.

La Figure 20 représente ainsi la réduction des besoins de chauffage (en  $\text{kWh}/(\text{m}^2\cdot\text{an})$ ) et la réduction des consommations d'énergie primaire cumulées sur le cycle de vie (en MJ), entre les états avant et après mise en œuvre de l'isolation des façades (F ITE 200mm).

Les états courants de la barre Grimaud, avant introduction de l'isolation des façades (F ITE 200mm), sont portés sur l'axe des abscisses. Ils correspondent de gauche à droite à :

- Etat avant toute action de réhabilitation : état initial ;
- ITE du plancher haut par 150mm de polyuréthane : PIH ITE PU 150mm ;
- ITE du plancher haut par 200mm de polyuréthane : PIH ITE PU 200mm ;
- ITE du plancher bas par 120mm de polystyrène extrudé : PIB ITE XPS 120mm ;
- ITE du plancher bas par 150mm de polystyrène extrudé : PIB ITE XPS 150mm ;
- Remplacement des ouvrants existants par DV be Ar bois : Ouvertures DV ;
- Remplacement des ouvrants existants par TV be Ar bois : Ouvertures TV ;
- Remplacement de la VMC existante par une ventilation hygro-B : Ventilation HB ;
- Remplacement de la VMC existante par une ventilation double flux : Ventilation DF ;
- Remplacement de la chaudière existante par une chaudière gaz à condensation : Chaudière gaz condens. ;
- Intégration d'une fraction solaire de 75% de la production ECS : ECS FS 75%.

Le plancher haut désigne ici la toiture terrasse de la barre Grimaud.

## Résultats et interprétation

Sur cette figure, on observe que la réduction des besoins de chauffage et la réduction des consommations énergétiques dépendent de la configuration courante du bâtiment avant introduction de l'isolation thermique par l'extérieur des façades.

La réduction des besoins de chauffage diminue lorsque l'enveloppe a déjà été partiellement réhabilitée. Physiquement, le niveau d'isolation des différentes parois influence la valorisation des gains solaires, ce qui explique les variations observées. Cette interaction est mise en évidence dans les modèles analytiques simplifiés de thermique du bâtiment (ISO, 2004), où le taux de valorisation des apports solaires est fonction de la constante de temps du bâtiment et donc de son coefficient de déperdition de chaleur.

Lorsque la réduction des besoins de chauffage diminue, la réduction des consommations énergétiques augmente. En effet, la réduction des besoins annuels de chauffage s'accompagne en moyenne d'une diminution des puissances horaires de chauffe. Or dans le cas du système de chauffage existant, le rendement de l'équipement décroît avec la puissance de chauffe, ce qui se traduit par une augmentation des consommations énergétiques.

On confirme également que la réduction du besoin de chauffage n'est pas sensible au système de ventilation, à l'équipement de chauffage ou au type de production d'eau chaude sanitaire. Cette remarque demeure vraie pour la réduction des consommations énergétique sauf dans le cas du système de chauffage où le remplacement de l'équipement existant par une chaudière à rendement plus élevé impacte nécessairement la réduction des consommations énergétiques. On retrouve cependant le fait que le remplacement du système de ventilation ou le type de production d'eau chaude sanitaire sont des mesures de réhabilitation indépendantes de l'isolation thermique de l'enveloppe. Dans ce cas particulier, le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire sont assurés par deux équipements indépendants.

## Conclusions

Par conséquent, les mesures de réhabilitation énergétique du bâtiment ne sont pas globalement indépendantes. Les réductions de consommations énergétiques par l'application d'une mesure donnée dépendent pour partie des actions de réhabilitation précédemment mises en œuvre. Cette conclusion importante souligne les limites de certaines approches simplifiées négligeant les interactions entre les mesures de réhabilitation.

Une stratégie de réhabilitation efficace sur le cycle de vie ne peut a priori être construite simplement à partir de la sélection séquentielle et indépendante des sous-systèmes constitutifs, les uns après les autres.

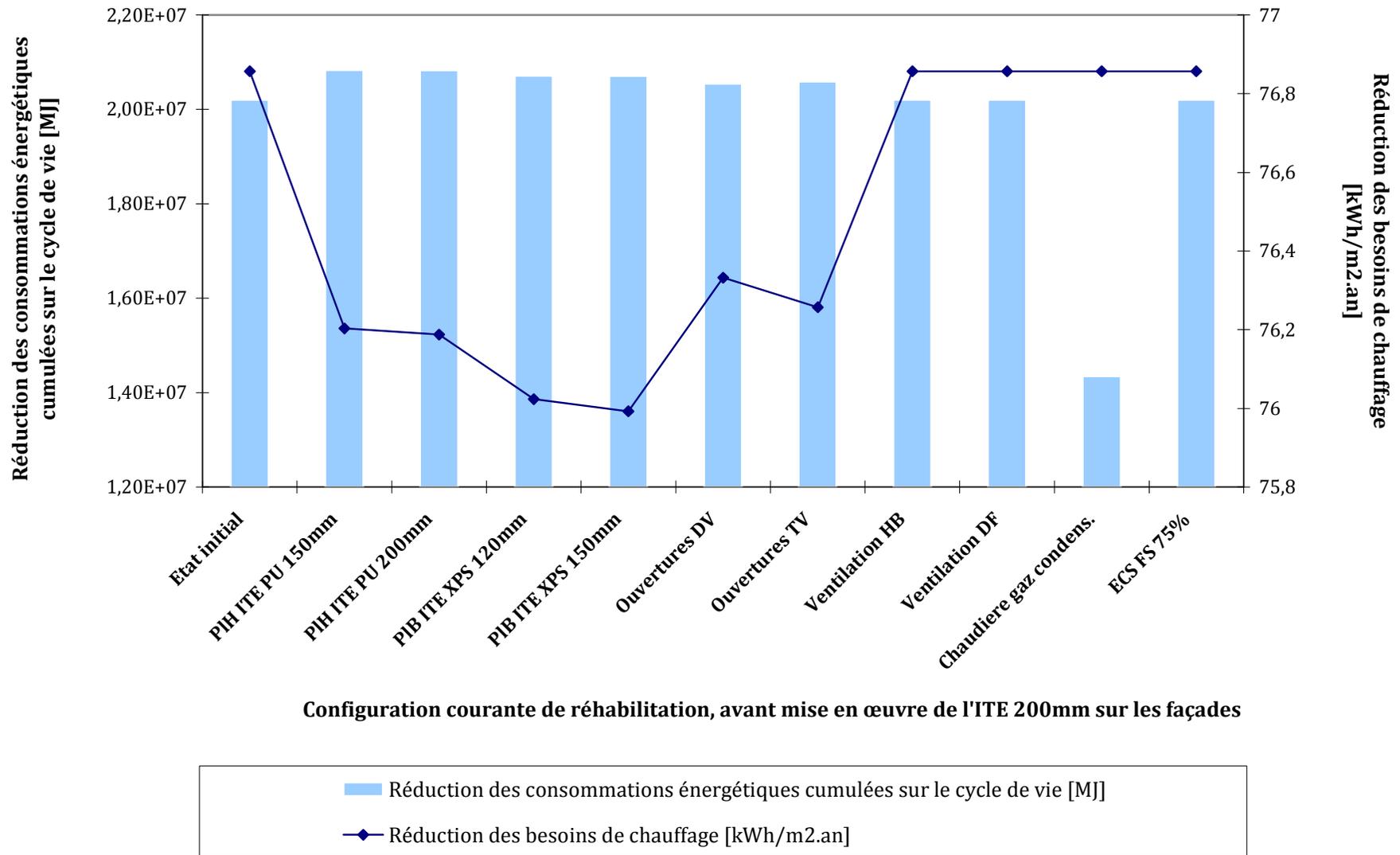


Figure 20. Influence de la mise en œuvre d'une isolation thermique sur les façades (ITE 200mm) en fonction de la configuration courante du bâtiment

## 1.5 Aide à la décision et multicritère

La conception des programmes de réhabilitation énergétique est un problème complexe, combinatoire et multicritère, dont les fonctions objectifs sont ici implicites, comme l'a mis en évidence l'analyse précédente des espaces de recherche et des objectifs.

On considère ici acquises la définition des critères de décision, l'étape d'audit énergétique du bâtiment existant et l'identification des mesures élémentaires de réhabilitation.

Différents matériaux, systèmes et équipements doivent alors être associés, de manière systématique, pour construire des programmes de réhabilitation efficaces, sur la poursuite du cycle de vie des bâtiments. Toutes les solutions sont identifiées par leurs caractéristiques de composition et de phasage, leurs performances ne sont pas connues a priori.

Les développements suivants s'intéressent donc à l'état de l'art sur les méthodologies d'aide à la décision pour l'identification de stratégies de réhabilitation efficaces. Dans le cas des problèmes multicritères, à espace de recherché fini discret, l'aide à la décision peut être basée sur différentes approches (Kolokotsa et al, 2009) :

- Approches par simulations ;
- Approches d'optimisation multicritère ;
- Approches d'aide multicritère à la décision (MCDA) ;
- Approches hybrides.

Ces quatre approches ne sont pas équivalentes en termes de contribution à l'aide à la décision.

Ainsi, certaines méthodes sont consacrées à la génération de solutions, soit l'identification de solutions optimales ou d'un ensemble de bonnes solutions. Ces approches sont généralement basées sur la simulation ou l'optimisation multicritère.

Dans le cas où un ensemble de bonnes solutions est déjà explicitement connu, d'autres méthodes contribuent alors davantage à la sélection d'une ou plusieurs solutions, ou à leur classement. Les approches pouvant être mobilisées appartiennent alors au groupe des méthodes d'aide multicritère à la décision (MCDA : multi criteria decision analysis).

Les méthodes hybrides associent une approche de génération de solutions et une méthode d'aide multicritère à la décision. Cette association pouvant être interactive, les méthodes hybrides structurent le dialogue entre analystes et décideurs et les activités de conceptions. Reposant largement sur les deux types précédents, ces méthodes ne sont pas davantage développées ici.

Nous nous proposons de revenir sur ces différentes approches. En préliminaire, il est nécessaire de définir la relation de dominance de Pareto et d'introduire quelques concepts de base de l'analyse multicritère.

### 1.5.1 Concepts de base en multicritère

Classer les solutions d'un problème multicritère revient à comparer des vecteurs de nombres réels. Les relations d'ordre, servant de critères de décision pour la comparaison et le classement des solutions multicritères, s'appellent les relations de dominance.

## Relation de dominance de Pareto

La littérature fait état de plusieurs relations de dominance : la  $\alpha$ -dominance (Othmani, 1998), la dominance au sens de Geoffrion (Ehrgott, 2000), la dominance de cône (Collette et Siarry, 2002), etc. La dominance au sens de Pareto demeure la plus célèbre et la plus largement répandue. C'est cette relation de dominance qui est utilisée dans ces travaux. Elle évite en effet d'avoir à introduire des paramètres additionnels, à l'interprétation complexe.

Par définition, une solution  $x^*$  domine une solution  $x$  au sens de Pareto si et seulement si :

- La solution  $x^*$  est au moins aussi bonne que la solution  $x$  sur tous les objectifs ;
- La solution  $x^*$  est strictement meilleure que la solution  $x$  sur un objectif, au moins.

Mathématiquement, et pour un problème de minimisation, la solution  $x^*$  domine une solution  $x$  de l'espace de décision si et seulement si (Deb, 2001) :

$$\begin{cases} \forall i \in [1..N], f_i(x^*) \leq f_i(x) \\ \exists k \in [1..N], f_k(x^*) < f_k(x) \end{cases}$$

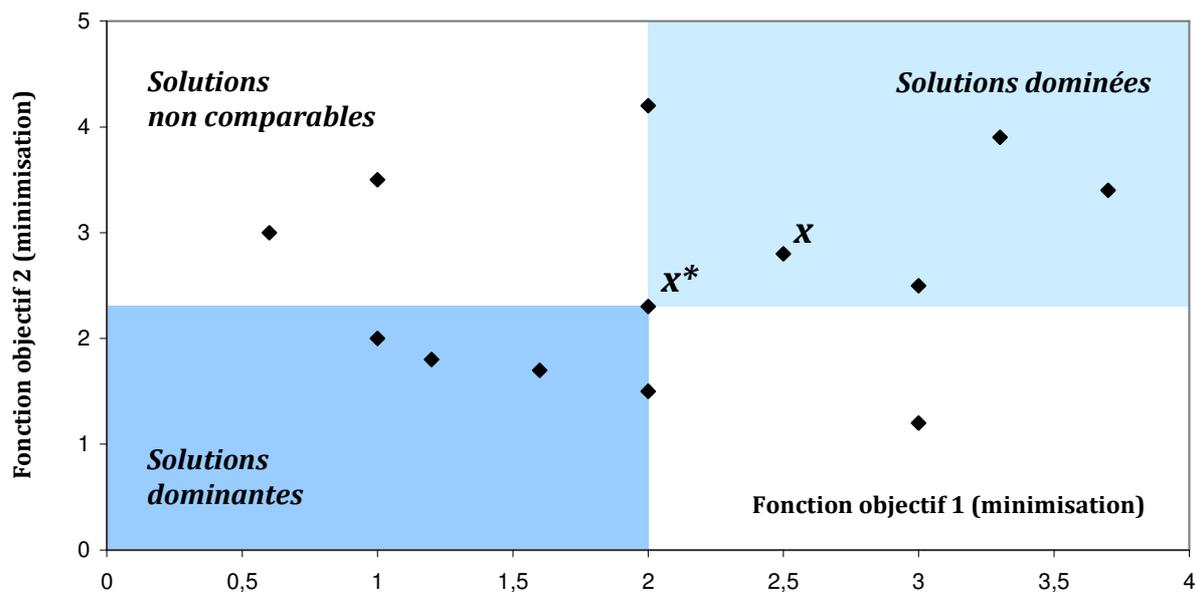


Figure 21. Illustration de la relation de dominance de Pareto (Problème de minimisation)

Sur la Figure 21, la solution  $x^*$  domine la solution  $x$ , qui appartient à l'ensemble des solutions dominées par  $x^*$ . Une solution est dite non-dominée, Pareto optimale ou efficace si et seulement si elle n'est dominée par aucune des solutions de l'espace de recherche.

## Front de Pareto

Le front de Pareto est défini comme l'ensemble des solutions non dominées ou efficaces de l'espace de recherche. Il est aussi appelé surface de compromis. La connaissance de ce front

éclairer la compréhension des compromis accessibles entre les critères de décision ainsi que les interactions entre les critères de décision.

Les solutions de l'espace de recherche peuvent être classées en fronts de Pareto de rang croissant. Les solutions non-dominées forment le front de rang 1. Ensuite, les solutions dominées par les seules solutions du front de rang 1, constituent le front de rang 2. Pour déterminer le front de rang  $n$ , on retire de l'ensemble de recherche les solutions appartenant aux fronts de rang 1 à  $(n-1)$ , les solutions non-dominées du sous ensemble résultant forment alors le front de rang  $n$ .

Les graphiques **a)** et **b)** de la Figure 22 représentent, dans l'espace des objectifs, l'ensemble des solutions d'un problème de minimisation à deux objectifs. Sur le graphique **a)**, il n'existe pas dans l'espace de recherche de solutions meilleures que celle du front de Pareto identifié, sur les deux objectifs. Par exemple, la solution **A**, appartenant au front de Pareto, minimise les performances sur les deux objectifs considérés par rapport à la solution **B** ; **B** est donc une solution dominée. Sur le graphique **b)**, les solutions sont classées par front de Pareto de rangs croissants. Les solutions non dominées constituent le front de rang 1. Les fronts successifs sont identifiés en recherchant les solutions non dominées au sein du sous ensemble formé par les solutions n'appartenant à aucun des fronts précédemment décrits.

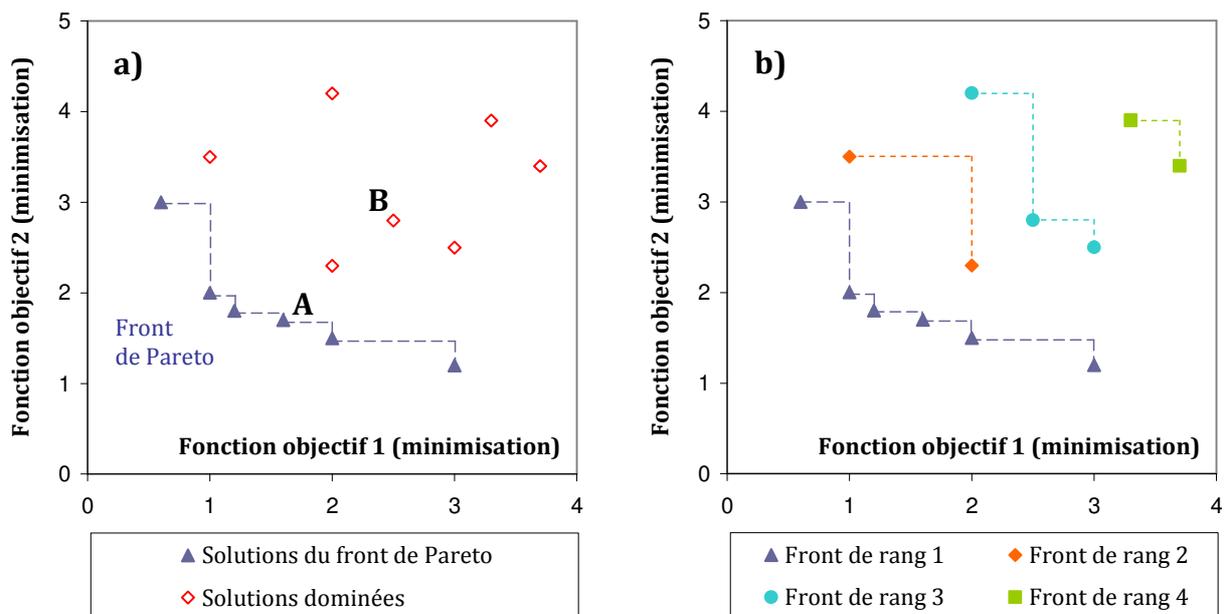


Figure 22. Front de Pareto et solutions dominées sur un problème de minimisation à deux objectifs

Dans un problème multicritère, seules les solutions non-dominées appartenant au front de rang 1 nous intéressent. Cependant, l'analyse des fronts successifs contribue à l'identification des solutions efficaces dans certaines méthodes d'optimisation présentées ultérieurement.

## Point idéal

En multicritère, deux points singuliers sont souvent introduits et servent certaines des méthodes d'aide à la décision. Le premier est le point idéal.

Pour chacune des  $N$  fonctions objectifs ( $f_i$ ), il existe une solution optimale. Le point idéal est le vecteur dont les composantes sont les solutions des problèmes monocritères sur chacun des objectifs. Par définition, la  $i^{\text{ème}}$  composante du point idéal est solution du problème d'optimisation suivant :

$$\begin{cases} \text{optimiser} & f_i(x) \\ \text{avec} & x \in X \end{cases}$$

En général, le point idéal n'est pas une solution du problème. Il est solution du problème multicritère uniquement si les fonctions objectifs ne sont pas en conflit. La connaissance de ce point singulier peut permettre de guider la recherche vers un point de référence.

## Point Nadir

Le second point singulier est le point Nadir. Contrairement au point idéal – qui en minimisation multicritère est construit à partir de la borne inférieure sur chaque fonction objectif – le point Nadir représente la borne supérieure sur chaque objectif pour les solutions du front de Pareto. Il est donc différent de la plus mauvaise de solution existant sur l'espace de recherche. La connaissance de ce point permet de borner les performances des solutions efficaces d'un problème et restreindre l'exploration de l'espace de recherche. La figure suivante illustre le point idéal  $I$  et le point Nadir  $N$  sur l'exemple du problème de minimisation à deux objectifs.

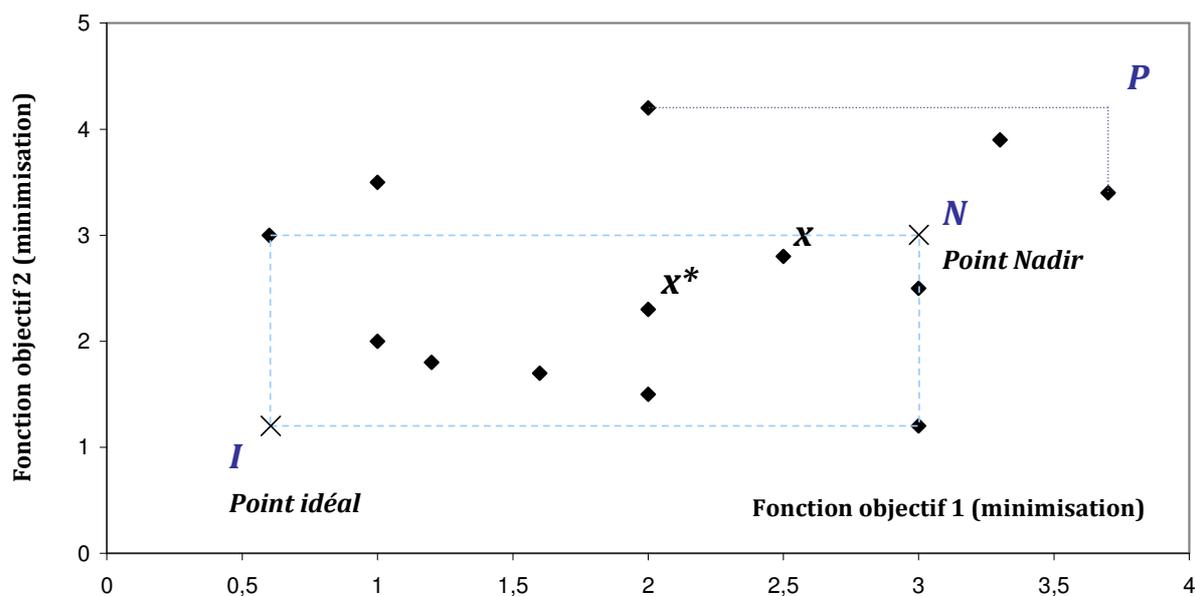


Figure 23. Point idéal et point Nadir sur une minimisation à deux objectifs

## 1.5.2 Approches par simulations

Les approches traditionnelles d'aide à la conception basent la recherche de solutions efficaces sur l'itération de simulations de bâtiment, à partir de configurations prédéfinies.

Bien qu'il existe de nombreux outils de simulation pour l'évaluation des performances des bâtiments, relativement peu de méthodes d'optimisation y ont été intégrées. Aussi, la plupart des approches opérationnelles basent la génération de solutions sur l'expérience des concepteurs ou l'exploration empirique de l'espace de recherche.

Ce constat explique le processus cyclique, présenté en Figure 24, sur lequel reposent généralement les activités de conception des bâtiments, par la modification itérative et incrémentale des paramètres d'entrée, jusqu'à identifier une bonne configuration.

A partir de la définition des critères de décision, une solution potentielle est proposée. Ses performances sont évaluées par simulation. En fonction des performances atteintes, les décideurs choisissent de retenir ou non la solution proposée. Dans le cas où la solution est rejetée, il est intéressant de questionner la définition des critères de décision utilisés. La génération d'une nouvelle solution est alors directe ou passe par la redéfinition des objectifs d'évaluation.

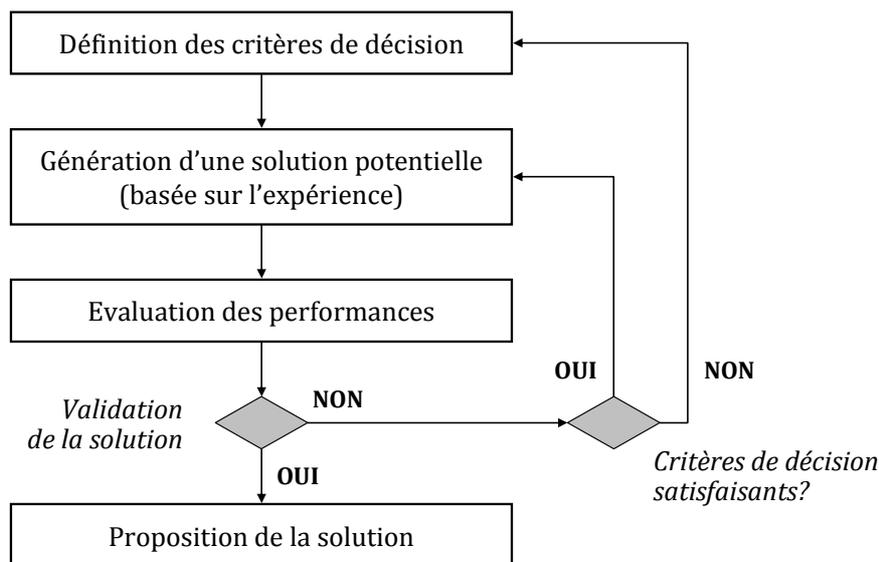


Figure 24. Processus d'aide à la décision basés sur des simulations itératives

Rosenfeld et Shohet (1999) proposent ainsi une approche d'aide à la décision pour la réhabilitation ou la rénovation des bâtiments existants structurée en quatre étapes : étude et préliminaire, évaluation de l'état initial, génération des alternatives de réhabilitation, comparaison technico-économique des scénarios générés.

Des méthodes heuristiques basées sur une connaissance experte permettent de structurer la génération de solutions potentielles (Shaviv et al., 1996). Par exemple, des arbres de décision peuvent être mobilisés pour guider les professionnels dans la génération de programmes de réhabilitation (projet CIBLE, Fondation Bâtiment Energie). La génération d'un programme de

réhabilitation répond alors à un questionnement séquentiel qui, en fonction des spécificités du bâtiment existant, propose progressivement une combinaison d'actions à entreprendre.

Dans cet esprit, les logiciels EPIQR et TOBUS ont été développés dans le cadre de projets européens pour contribuer à l'aide à la décision sur des projets associant rénovation et réhabilitation, respectivement sur les bâtiments résidentiels (EPIQR) ou les bureaux (TOBUS).

Ces outils mobilisant la simulation reposent sur une méthode constructiviste et interactive. Ils dressent l'état initial du bâtiment : dégradation physique, bilan énergétique et fonctionnel mais n'établissent pas de liens automatiques entre diagnostic et scénarios de travaux.

A partir d'un premier scénario intuitif, EPIQR ou TOBUS apportent une connaissance experte additionnelle au praticien par : identification et mise en évidence des incohérences, illustration de perspectives systémiques, information sur les liens entre plusieurs objets.

Chaque sous-système est évalué sur différents critères de décision. Puis en fonction de ses interactions avec le système global et de ses performances, le scénario intuitif peut être modifié par le concepteur. Les solutions potentielles sont évaluées en termes de coûts d'investissements, de performance énergétique, de confort et qualité des ambiances intérieures.

Plus généralement, l'efficacité des processus basés sur des simulations itératives, demeure fortement contrainte par les temps de modélisation et de simulation de chacune des solutions étudiées. De plus, ce processus de décision considérablement influencé par l'expérience et la connaissance spécifique de l'expert ou du décideur. Et même si la valeur de cette expertise est incontestable, il est pourtant nécessaire de développer des méthodes robustes permettant une exploration large et efficace des solutions potentielles, au-delà des restrictions aux solutions connues ou prédéfinies (Diakaki, 2008).

### **1.5.3 Approches d'aide multicritère à la décision**

L'aide multicritère à la décision (MCDA: multi criteria decision analysis) fait référence à « l'étude de l'ensemble des méthodes et procédures par lesquelles sont intégrées les problématiques de critères conflictuels dans les processus de décision » (International Society on Multiple Criteria Decision Making). Cette communauté de recherche travaille notamment sur la modélisation et l'intégration des préférences d'un ou plusieurs décideurs dans les méthodes et processus d'aide multicritère à la décision. Les domaines d'intervention ciblent : le management, la planification stratégique, la sélection de projets, l'économie.

Les méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDA) ne ciblent pas la génération de solutions mais supposent plutôt qu'un ensemble de bonnes solutions (non-dominées) a été préalablement identifié et est connu explicitement : par ces caractéristiques paramétriques et ses performances. Elles contribuent alors à la sélection d'une ou plusieurs solutions parmi l'ensemble des solutions efficaces, ou à leur classement. A ce stade, la relation de dominance n'est plus d'aucun secours, toutes les solutions considérées étant non dominées.

Pour progresser vers une décision, au-delà de la relation de dominance, il faut alors introduire des informations complémentaires subjectives (Vanderpooten, 2008) :

- Faire exprimer au décideur ses préférences ;
- Intégrer les préférences au sein d'un mécanisme d'agrégation.

L'élicitation des préférences est le processus itératif visant à collecter et structurer l'expression des préférences des décideurs. L'information préférentielle peut être inter ou intra-critère. On parle alors d'information préférentielle inter-critère si la préférence est fonction des performances sur différents critères. La préférence est dite intra-critère lorsqu'elle porte sur l'appréciation du niveau de performance sur un critère donné, indépendamment des performances sur les autres critères.

La nature de l'information préférentielle modélisée dépend du type de méthode. Différentes approches permettent de construire un modèle global des préférences :

- Critère de synthèse, à la forme analytique plus ou moins complexe ;
- Modèle relationnel, une ou plusieurs relations de préférence globale ;

Des approches exploratoires interactives sont également en développement, basées sur des échanges entre décideurs et analystes.

Des principes généraux des deux approches sont proposés ci-après. Le lecteur intéressé pourra consulter (Vincke, 1992; Bouyssou et al., 2001) pour une présentation plus détaillée de ces problématiques.

### 1.5.3.1 Approche par critère de synthèse

L'approche par critère unique de synthèse est parfois citée comme celle de l'Ecole Américaine. Elle consiste à synthétiser les performances multicritères des solutions sous la forme d'une note unique, par une modélisation élaborée des préférences des décideurs. Elle propose donc un ordre total, l'incomparabilité entre les solutions n'existe pas.

Parmi les techniques de critères de synthèse, l'analyse de la valeur multi-attributs (MAVT) et l'analyse de l'utilité multi-attributs (MAUT) mobilisent l'agrégation de fonctions de valeur ou d'utilité, qui modélisent l'information préférentielle. En avenir certain, on utilise la MAVT ; en avenir probabilisable, la MAUT est employée. On se concentre ici sur l'analyse de la valeur multi-attributs (MAVT). La transposition au cas de la MAUT est relativement directe. Le terme d'attribut est ici synonyme de critère de décision.

Une fonction de valeur est une modélisation mathématique des préférences. C'est une projection des performances évaluées sur un critère donné sur une échelle normalisée représentant l'appréciation de la valeur de la performance. La Figure 25 représente la construction d'une fonction de valeur portant sur la distance domicile/travail, dans le cas du choix d'un appartement en location. Le futur locataire apprécie la valeur qu'il attribue aux logements potentiels en fonction de la distance au lieu de travail.

Pour construire la fonction d'utilité associée à une fonction objectif donnée, l'analyste questionne le décideur sur la valeur qu'il accorde à différents niveaux de performances (valeur ordinale) ou à différentes transition de niveaux de performance (valeur cardinale) sur le critère considéré. La construction des fonctions d'utilité suppose donc la connaissance explicite de l'ensemble des solutions potentielles.

Les fonctions de valeurs sont enfin agrégées par pondération pour former un critère unique. A condition qu'elles soient préférentiellement indépendantes. Dans ce cas, la préférence sur un critère ne dépend pas des performances sur les autres critères ou attributs.

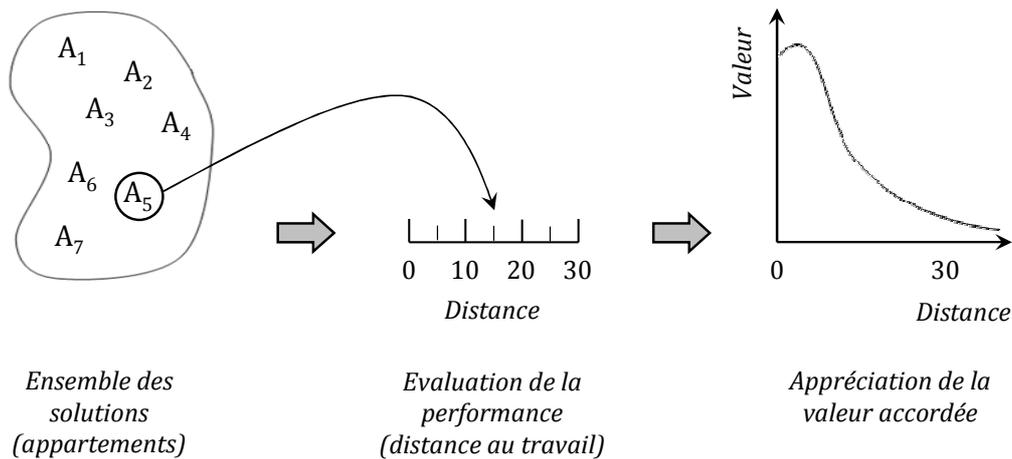


Figure 25. Construction d'une fonction de valeur (extrait de von Winterfeldt et Edwards (1986))

Pour une solution  $A$  de l'espace de recherche, la valeur de  $A$  est définie par :

$$V(A) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot V_i(f_i(A))$$

$$\forall i \in [1..N], V_i : X \mapsto \mathfrak{R}$$

$$\forall i \in [1..N], w_i > 0$$

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1$$

Avec :

- $V_i$  : la fonction de valeur associée à la fonction objectif  $f_i$ .
- $w_i$  : le coefficient de pondération associé à la fonction de valeur  $V_i$  ;

Les coefficients de pondération ne représentent pas nécessairement des taux de substitution entre les critères de décision mais peuvent être définis en fonction des gains relatifs en valeur, sur chaque critère, entre la plus mauvaise et la meilleure solution.

Ces méthodes ont été appliquées à différentes études de conception des bâtiments. Par exemple, Blondeau et al. (2002) mettent en œuvre la technique de MAUT sur l'étude de stratégies de ventilation en été, dans un bâtiment d'enseignement, au regard des performances sur la qualité de l'air intérieur, du confort thermique des occupants et de la performance énergétique. Les conclusions soulignent alors la forte dépendance des résultats à la fonction d'utilité choisie, qui totalement compensatoire fournit des résultats parfois contre intuitifs, soulignant les limites de cette forme de modélisation des préférences. Les valeurs prises par les fonctions d'utilités peuvent rendre très prépondérant l'un des critères, sans qu'il n'y ait de préférence relative sur celui-ci.

Certaines des méthodes d'optimisation multicritères basées sur la préférence, détaillées ultérieurement, proposent également des formes de critères de synthèse (méthode du but à atteindre, méthode du compromis).

### 1.5.3.2 Approche par modèle relationnel

L'approche par construction d'un modèle relationnel global des préférences est issue de l'Ecole Française (Roy, 1985). Elle repose sur un postulat de base selon lequel le décideur manque d'informations pour construire sa fonction de préférence (valeur ou utilité). Dans certains cas, il peut même être incapable de choisir entre deux solutions, ce qui exclut la possibilité d'un ordre total. Il est alors nécessaire de construire un ordre partiel, dans lequel des situations d'incomparabilité peuvent exister.

Le principe général repose sur la construction d'une relation binaire de préférence entre tout couple de solutions potentielles  $a$  et  $b$  ( $a$  et  $b$  sont des solutions non-dominées, appartenant au même front de Pareto), ce qui suppose donc que l'ensemble de solutions efficaces soit connu explicitement. On dira ainsi que  $aSb$  ( $a$  surclasse  $b$ ) si on a des raisons suffisamment fortes d'accepter l'assertion suivante : «  $a$  est au moins aussi bon que  $b$  ».

La construction la relation de surclassement  $aSb$  est basée sur deux aspects :

- Les performances des solutions ;
- L'information préférentielle : poids, seuils ;

En fonction des seuils de préférence, d'indifférence et de veto définis avec le décideur, la préférence de la solution  $a$  par rapport à la solution  $b$  est évaluée, sur chacun des critères. La relation de surclassement, établissant l'assertion  $aSb$ , utilise alors les coefficients de pondération introduits sur chaque critère par le décideur, en se basant sur deux principes fondamentaux :

- Principe de concordance : une majorité de critères de décision, compte-tenu de leur importance, supporte l'assertion  $aSb$  (principe majoritaire) ;
- Principe de non discordance : Parmi les critères qui ne supportent pas l'assertion  $aSb$ , aucun ne doit exprimer un désaccord trop fort (principe de respect des minorités).

Quatre cas se présentent alors :

- $aSb$  et non  $bSa$  :  $a$  est préférée à  $b$  ;
- non  $aSb$  et  $bSa$  :  $b$  est préférée à  $a$  ;
- $aSb$  et  $bSa$  : indifférence entre les deux solutions ;
- non  $aSb$  et non  $bSa$  : incomparabilité entre les deux solutions.

Toutes solutions sont ainsi triées sur la base de comparaisons par paires et sur chaque critère.

De nombreuses méthodes de surclassement ont été développées : ELECTRE (I, II et III), PROMETHEE, ORESTE, MELCHIOR, TACTIC, MAPPAC etc. Par exemple, la méthode Electre I permet d'effectuer une sélection à partir de l'algorithme suivant :

- Affectation des poids aux critères et définition des seuils sur chaque critère
- Comparaisons par paires des solutions
- Conversion en valeurs numériques
- Calcul des indices de concordance / discordance
- Filtrage des actions

- Représentation sous la forme de graphe

La relation de surclassement constitue une forme d'enrichissement de la relation de dominance, mettant l'accent sur la modélisation des préférences : trois valeurs de seuil sont renseignées à partir du dialogue avec les décideurs (préférence, indifférence et veto). Il demeure des cas d'incomparabilité potentiels, ce qu'excluent les méthodes totalement compensatoires.

Les méthodes de surclassement ont été appliquées, par exemple, à l'étude des systèmes de climatisation sur des objectifs de qualité de l'air intérieur, de confort thermique et de performance énergétique (Rutman et al., 2005).

S'intéressant à la maintenance des bâtiments en exploitation, Rey (2004) applique la méthode ELECTRE à l'étude de trois scénarios de rénovation prédéfinis : remplacement de quelques composants, modification lourde modifiant l'aspect et la fonctionnalité du bâtiment ou intégration d'une façade double peau.

### 1.5.3.3 Bilan sur l'aide multicritère à la décision (MCDA)

Critère de synthèse ou modèle relationnel global présentent tous deux avantages et inconvénients, en termes de modélisation des préférences et de sélection des alternatives.

Les approches par critère de synthèse permettent d'identifier une ou plusieurs solutions optimales et excluent les cas où l'incomparabilité de certaines solutions subsistent, au-delà de la relation de dominance. En revanche, elles imposent le caractère totalement compensatoire entre les critères, par l'agrégation de fonctions de valeurs par exemple. De plus, elles sont applicables dans le cas où les critères sont préférentiellement indépendants.

La modélisation des préférences par le surclassement est particulièrement intéressante lorsque :

- la préférence des décideurs s'exerce de manière inter-critère, qu'elle dépend des performances sur plusieurs critères en même temps ;
- Certains critères sont qualitatifs ;
- La compensation inter-critère n'est pas justifiable ;
- Des seuils de préférence et de veto doivent être pris en compte.

En revanche, des cas d'incomparabilité peuvent subsister et l'aide à la décision ne permet pas dans ce cas d'isoler une solution préférée.

L'une et l'autre imposent de travailler sur un ensemble de solutions efficaces connues explicitement par leurs caractéristiques paramétriques et leurs performances.

### 1.5.4 Conclusion et choix d'une approche par optimisation multicritère

En contexte combinatoire multicritère, la littérature fait état de différentes approches d'aide à la décision. En fonction de la connaissance – explicite ou implicite – des solutions, une distinction forte apparaît entre les méthodes de génération et les méthodes orientées vers la décision (MCDA). Dans le cadre de la réhabilitation de bâtiment, l'application des méthodes d'aide multicritère à la décision (MCDA) offre une perspective intéressante d'identification

d'une ou plusieurs stratégies préférées, au-delà de la relation de dominance. Leur application soulève cependant quelques difficultés.

Si l'élaboration de méthodes relève du contexte académique, leur application ne peut être entreprise que dans le cas d'une conception collaborative impliquant étroitement décideurs et parties prenantes, autour d'un projet réel. En effet, l'expression des préférences, données subjectives, dépend grandement des acteurs en situation.

De plus, dans le cas de critères de décision basés sur le bilan environnemental, le recueil de préférence entre les critères ou même concernant des gains différentiels sur un même critère semble particulièrement complexe.

Enfin, à ce stade de nos travaux, les programmes de réhabilitation des bâtiments existants sont connus implicitement seulement : par leurs caractéristiques dans l'espace de recherche mais pas par leurs performances dans celui des objectifs. L'aide à la décision requiert une première étape d'identification des solutions efficaces, pouvant être avantageusement conduite par les méthodes d'optimisation multicritère.

Plusieurs techniques d'optimisation multicritère peuvent contribuer à l'aide à la décision multicritère dans le cas des problèmes combinatoires discrets.

Ces méthodes nous semblent particulièrement intéressantes dans la mesure où elles ciblent l'identification de solutions efficaces et la description des compromis accessibles. La connaissance d'une surface de compromis permet alors de proposer aux décideurs de bonnes solutions, ainsi que de progresser dans la compréhension des interactions entre les critères de décision. Nous choisissons donc de construire notre approche d'aide à la décision multicritère à partir de méthodes d'optimisation.

Les travaux de Gero et al. (1983) ont d'ailleurs été parmi les premiers à démontrer l'intérêt de l'optimisation multicritère et de la description de surfaces de compromis, en conception de bâtiments neufs. Ils s'intéressaient alors à différentes variables de conception : forme du bâtiment, nombre d'étages, orientation, surfaces et types de vitrage. Les performances des solutions étaient évaluées sur trois critères : besoin de chaleur pour le chauffage, coûts d'investissement et surface utile. Les résultats ont permis d'exhiber des solutions efficaces, ont souligné la complexité des interactions entre les critères de décision et le fait que les gains relatifs sur ces mêmes critères étaient d'ordres de grandeur très disparates.

Ce type d'approche ne répond cependant pas à la question de la sélection finale d'une solution préférée ou du classement des solutions efficaces identifiées, ce à quoi contribuent les méthodes d'aide multicritère à la décision (MCDA). Dans des travaux ultérieurs, le recours à ces approches complémentaires pourra donc être considéré, comme le suggèrent d'ailleurs les méthodes hybrides d'aide à la décision.

La partie suivante revient sur quelques aspects et les principales techniques d'optimisation multicritère adaptées à notre problème.

## 1.6 Optimisation et multicritère

La nature mathématique de notre problème étant formalisée, nous cherchons à présent à identifier une méthode d'optimisation adaptée. Dans cette section, à partir de l'écriture formelle du problème d'optimisation multicritère et du rappel des principaux concepts, nous décrivons certaines des techniques pouvant être mises en œuvre sur le problème de réhabilitation énergétique des bâtiments. De nombreux auteurs ont travaillé sur la classification générale des méthodes d'optimisation. Basée sur la notion de préférence, une distinction en deux types a ainsi été proposée dans le cas du multicritère (Cohon, 1985) :

- les approches basées sur la préférence ;
- les approches de génération.

Dans le cas des approches de génération, un ensemble de solutions non-dominées est identifié en optimisation puis soumis aux décideurs, qui peuvent alors choisir l'une des alternatives. Aucune information sur l'importance relative des critères les uns par rapport aux autres n'est introduite. Au contraire, les méthodes basées sur la préférence exploitent une forme d'information préférentielle en amont de l'optimisation pour convertir le problème multicritère en monocritère. Ces deux types d'approches sont présentés dans les paragraphes 1.6.2 et 1.6.3.

### 1.6.1 Formalisation du problème d'optimisation

Optimiser, c'est identifier des solutions minimisant ou maximisant certains objectifs, en respectant un ensemble de contraintes (Barichard, 2003). Un problème d'optimisation multicritère est entièrement défini par la donnée d'un 5-uplet  $(X, Z, f, g, \leq)$  (Brockhoff et al., 2009) avec:

- $X$  : l'espace de recherche ou espace de décision ;
- $Z = \mathfrak{R}^N$  : l'espace des objectifs ;
- $f = (f_i)_{i \in [1..N]}$  : le vecteur des  $N$  fonctions objectifs  $f_i : X \mapsto \mathfrak{R}$  ;
- $g = (g_j)_{j \in [1..M]}$  : le vecteur des  $M$  fonctions de contraintes  $g_j : X \mapsto \mathfrak{R}$  ;
- $\leq \subseteq Z \times Z$  : une relation d'ordre binaire.

Une solution  $x$  de l'espace de décision est un vecteur de  $n$  variables de décision :

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

L'espace de recherche ou de décision est défini à partir du domaine de variation de chacune de variables  $(x_i)_{1 \leq i \leq n}$  du problème et la combinatoire éventuelle associée à ces variables.

La formulation du problème présente  $N$  fonctions objectifs. Chacune de ces fonctions peut être à maximiser ou à minimiser. Le principe de dualité en optimisation (Reklaitis et al., 1983) permet de convertir tout problème d'optimisation en un problème de minimisation, en multipliant les fonctions objectifs à maximiser par -1 (et réciproquement).

De même que dans le cas monocritère, le problème peut inclure un certain nombre de contraintes dans l'espace des objectifs, que les solutions doivent vérifier pour être admissibles. Ces contraintes peuvent être des contraintes faibles (d'inégalité) ou des contraintes fortes (d'égalité). Pour être admissible, une solution doit appartenir à l'espace de décision et vérifier les contraintes fortes et faibles associées au problème d'optimisation.

La relation d'ordre, qui peut être un ordre total (ex. inégalité sur l'ensemble des réels, en monocritère) ou un ordre partiel (ex. relation de dominance, en multicritère), permet de comparer les solutions entre elles.

Une des différences fondamentales entre les cas monocritère et multicritère tient au fait qu'en optimisation multicritère, les fonctions objectif définissent un espace multidimensionnel, en complément de l'espace de recherche qui lui aussi est en général multidimensionnel (plusieurs variables de décision) (Deb, 2001). Ce caractère multidimensionnel a d'importantes conséquences. En optimisation monocritère, l'objectif est d'exhiber une unique solution (à l'exception des cas d'optimisation multimodale) réalisant l'optimum sur la fonction objectif considérée. Dans le cas multicritère, il ne s'agit pas d'identifier une solution optimale sur chacun des critères mais l'objectif est double : rechercher un ensemble de solutions efficaces et décrire aussi largement que possible les compromis accessibles entre les critères de décision.

Dans notre problème de réhabilitation énergétique :

- L'espace de décision correspond à l'ensemble de programmes de réhabilitation pouvant être générés à partir des mesures de réhabilitation élémentaires précédemment identifiées (soit un ensemble de permutations sur des combinaisons de variables discrètes) (1.2.2) ;
- Les fonctions objectifs ont été définies en partie 1.2.3. Impacts environnementaux, coûts économiques ou inconfort thermique d'été sont tous à minimiser. Il s'agit de fonctions objectifs non-linéaires et implicites ;
- Le financement des travaux de réhabilitation peut induire un jeu de contraintes faibles, qui seront prises en compte dans le chapitre 4 ;
- Sur la base du choix de la relation de d'ordre, deux familles d'approches sont à distinguer : les méthodes basées sur la préférence en amont (non Pareto) et les approches génératrices (dominance de Pareto). Les premières transposent le problème multicritère en un ou plusieurs problèmes monocritères et mobilisent alors l'inégalité pour classer entre elles les solutions d'une optimisation monocritère. Les secondes reposent sur la relation de dominance de Pareto et conservent le caractère multicritère du problème. Toutes deux sont présentées ci après.

Notre problème de minimisation multicritère s'écrit alors :

$$\begin{array}{ll}
 \text{Minimiser} & f(x) = (f_i(x))_{i \in [1..N]} \\
 \text{tel que} & \forall j \in [1..M], g_j(x) \leq 0 \\
 \text{avec} & x \in X, f(x) \in \mathfrak{R}^N, g(x) \in \mathfrak{R}^M
 \end{array}$$

## 1.6.2 Approches basée sur la préférence

Les méthodes classiques (Deb, 2001) sont basées sur l'introduction, en amont de la recherche de solutions, d'une forme d'information préférentielle, qui dépend de la méthode employée. Ces approches n'exploitent pas la relation de dominance de Pareto mais visent à convertir le problème multicritère en une forme monocritère, sur laquelle les techniques d'optimisation mono-objectif peuvent être mises en œuvre. La relation d'ordre (total) permettant de comparer les solutions est l'inégalité sur le corps des nombres réels. Ces méthodes incluent différentes techniques dont la pondération, les  $\varepsilon$ -contraintes, l'approche Min-Max, etc. La transformation en problème monocritère n'est jamais neutre et présente avantages comme inconvénients.

### 1.6.2.1 Pondération

La méthode la plus simple, et certainement la plus largement répandue, consiste à agréger les différentes fonctions objectif sous la forme d'une somme pondérée.

En conservant le même formalisme, le problème de minimisation devient alors :

$$\begin{array}{l} \text{Minimiser} \quad f_{\Sigma}(x) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot f_i(x) \\ \text{tel que} \quad \forall j \in [1..M], g_j(x) \leq 0 \\ \text{avec} \quad x \in X, f(x) \in \mathfrak{R}^N, g(x) \in \mathfrak{R}^M \end{array}$$

Les coefficients de pondération  $W_i$  peuvent être normalisés sans perte de généralité.

Les solutions de la somme pondérée appartiennent nécessairement au front de Pareto du problème (Annexe C). Sous cette forme monocritère, la résolution du problème ne permet cependant d'identifier que quelques solutions efficaces, qui sont fonctions des coefficients de pondération. La recherche d'une description de la surface de compromis sur toute son étendue impose d'itérer l'optimisation, en considérant différents vecteurs de pondération (Barichard, 2003).

Cette approche présente l'avantage de la simplicité de mise en œuvre. De plus, les solutions identifiées sont nécessairement des solutions non-dominées, sous la condition que les pondérations soient positives sur tous les objectifs. Enfin, dans le cas des problèmes de minimisation dont le support du front de Pareto est convexe, elle garantit la possibilité d'identifier des solutions efficaces sur l'ensemble du front (Deb, 2001).

Cependant, la pondération impose d'établir une forme d'équivalence (totalement compensatoire) entre des critères de décision de nature très différente, exprimés sur des échelles et des unités différentes. Ces coefficients ne représentent pas uniquement l'importance relative des critères mais aussi un facteur de normalisation des échelles, rendant complexe leur interprétation. De plus, pour décrire la surface de compromis sur toute son étendue, les coefficients de pondération doivent être choisis judicieusement. Or, ce choix a priori demeure difficile, sans connaissance précise du problème. De faibles variations sur les coefficients de pondérations, peu significatives du point de vue du décideur, peuvent ainsi avoir d'importantes conséquences sur les solutions identifiées.

Enfin, dans le cas des problèmes de minimisation à front de Pareto non convexe (et réciproquement de maximisation à front non concave), certaines des solutions non-dominées ne peuvent

être identifiées par la pondération. La description de la surface de compromis est alors nécessairement partielle. Notons que les propriétés de convexité du problème ne sont en général pas connues a priori.

L'annexe C revient de manière plus détaillée sur les limites de la méthode de pondération.

A titre d'exemple, Hauglustaine et Azar (2001) ont utilisé la pondération pour optimiser la conception des enveloppes de bâtiment sur différentes critères : consommations énergétiques de chauffage, de climatisation, pour la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage ainsi que les couts de construction et d'exploitation.

### 1.6.2.2 $\epsilon$ - Contraintes ou méthode du compromis

Pour transposer le problème multicritère en optimisation monocritère, la méthode dite des  $\epsilon$ -contraintes propose de convertir en contraintes tous les objectifs sauf un (Haimès et al., 1971).

La formulation du problème devient alors :

$$\begin{array}{l} \text{Minimiser} \\ \text{tel que} \\ \text{avec} \end{array} \quad \begin{array}{l} f_i(x) \\ \left\{ \begin{array}{l} \forall j \in [1..N] \setminus \{i\}, f_j(x) \leq \epsilon_j \\ \forall j \in [1..M], g_j(x) \leq 0 \end{array} \right. \\ x \in X, f(x) \in \mathfrak{R}^N, g(x) \in \mathfrak{R}^M \end{array}$$

Pour chaque vecteur de contraintes  $\epsilon$  considéré, la méthode des  $\epsilon$ -contraintes permet d'identifier l'unique solution efficace du problème (Miettinen, 1999). De même que dans le cas de la pondération, cette méthode doit être itérée, avec différents niveaux de contraintes, pour permettre de décrire l'étendue de la surface de compromis. Décrire cette surface globalement sur son étendue impose de choisir judicieusement les valeurs des contraintes  $\epsilon_i$ , ce qui réclame une bonne connaissance a priori du problème.

En revanche, et contrairement à la pondération, cette approche n'est pas sensible à la convexité du front de Pareto (Deb, 2001). Les solutions efficaces des parties non-convexes du front de Pareto d'un problème de minimisation peuvent donc être identifiées.

Cette méthode a inspiré différents travaux sur la conception des bâtiments. Par exemple, Peippo et al. (1999) convertissent leur problème multicritère en différents cas d'optimisation monocritère sous contrainte. Les critères de décision ciblent : les consommations d'énergie primaire en usage (chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage, électricité spécifique) et le cout global annuel (intégrant investissement + cout de l'énergie consommée). Une variété de variables de décision sont considérées : géométrie et orientation du bâtiment ; isolation thermique ; inertie thermique ; type et surface des ouvertures ; type et régulation de l'éclairage ; type de ventilation ; inclinaison, type et surfaces de capteurs solaires thermiques et des panneaux photovoltaïques ; capacité de stockage thermique.

### 1.6.2.3 Approche Min-Max

La conversion en monocritère peut également reposer sur la minimisation d'une distance par rapport à un point  $P$  de référence. Ce point est fixé par la méthode ou proposé par les décideurs. Différentes normes peuvent être considérées pour le calcul de la distance.

Une norme est définie comme suit :

$$L_r(f(x)) = \left[ \sum_{i=1}^N |P_i - f_i(x)|^r \right]^{1/r}$$

Différentes normes peuvent être envisagées :

$$L_1(f(x)) = \sum_{i=1}^N |P_i - f_i(x)| \quad L_\infty(f(x)) = \max_{i \in [1..N]} (P_i - f_i(x))$$

La norme  $L_\infty$ , ou distance de Tchebychev (Miettinen, 1999), est utilisée dans le cadre de l'approche Min-Max.

La formulation du problème multicritère devient alors :

$$\begin{array}{l} \text{Minimiser} \quad L_\infty(f(x)) = \max_{i \in [1..N]} (P_i - f_i(x)) \\ \text{tel que} \quad \forall j \in [1..M], g_j(x) \leq 0 \\ \text{avec} \quad x \in X, f(x) \in \mathfrak{R}^N, g(x) \in \mathfrak{R}^M \end{array}$$

Cette méthode présente les mêmes écueils que les deux précédents. Seules quelques solutions efficaces sont identifiées à chaque itération de la recherche. Le choix itératif du point de référence est donc particulièrement important pour décrire la surface de compromis aussi largement que possible sur son étendue.

L'approche min-max permet d'identifier des solutions efficaces sur l'ensemble du front de Pareto, sans influence des propriétés de convexité, à condition que le point de référence soit judicieusement choisi.

### 1.6.2.4 Autres méthodes

D'autres méthodes, dont les principes sont généralement voisins, ont été proposées :

- But à atteindre, introduisant un vecteur fixant la direction de recherche, en plus du point de référence (Romero, 1991) ;
- Compromis : métriques pondérées, normes intégrant des pondérations (Deb, 2001) ;
- Méthode de Benson, qui place le point de référence parmi les solutions dominées et construit une distance particulière (Deb, 2001) ; Etc.

Ces méthodes ont été mise en œuvre dans différents travaux sur la conception des bâtiments.

Diakaki et al. (2008) optimisent les valeurs de différents paramètres de conception (type de fenêtre, type de matériau d'isolation thermique, épaisseur de l'isolation mise en œuvre) en convertissant un problème multicritère en monocritère, par l'application de différentes méthodes :

méthode par but à atteindre, méthode du compromis. Les fonctions objectifs considérées ciblent : couts d'investissement ; coefficient de transmission thermique de l'enveloppe.

En contexte méditerranéen, Znouda et al. (2007) adoptent le même type d'approche pour optimiser les compositions de parois, les types et surfaces de vitrage, la forme géométrique du bâtiment, les protections solaires, au regard d'objectifs concernant les consommations énergétique et le cout global sur les phases d'investissement, de maintenance et d'exploitation.

### 1.6.2.5 Discussion

Ces méthodes de transformation de problèmes multicritères en un ou plusieurs problèmes monocritères sont des approches d'optimisation non-Pareto. Elles visent à mobiliser les méthodes d'optimisation monocritère, largement développées.

Contrairement aux méthodes d'aide à la décision multicritère, ces approches ne travaillent pas véritablement sur la modélisation des préférences. Elles requièrent néanmoins une forme d'information préférentielle et a priori, injectée en amont de la recherche de solutions : coefficients de pondération,  $\varepsilon$ -contraintes, points de références, etc. Le choix même de ces paramètres demeure une problématique complexe, influençant souvent fortement les solutions identifiées et nécessitant donc une bonne connaissance a priori du problème.

Par ailleurs, ces approches font face à d'autres types de limitations. La somme pondérée est sensible aux propriétés de convexité du front de Pareto et, suivant les cas, ne permet pas d'identifier l'ensemble des solutions efficaces du problème, privant le décideur de compromis potentiellement pertinents. De plus, quelle que soit la méthode, la description globale de la surface de compromis impose de conduire itérativement différentes simulations en modifiant les valeurs des paramètres utilisés pour la conversion en monocritère.

Les méthodes d'optimisation multicritère, approches Pareto ou de génération, permettent de surmonter efficacement ces difficultés.

### 1.6.3 Méthodes Pareto de génération

Contrairement aux approches basées sur la préférence, les méthodes de génération assument le caractère multicritère du problème et ont pour objectif d'exhiber une surface de compromis. La connaissance de cette surface permet alors soumettre aux décideurs des solutions efficaces et une description étendue des compromis accessibles. Elle permet de comprendre les éventuelles interactions entre les critères de décision. Ces méthodes exploitent la relation de dominance de Pareto pour identifier les solutions non-dominées.

La recherche d'une méthode d'optimisation est orientée par la nature du problème de réhabilitation énergétique et par les caractéristiques que la technique doit présenter. En particulier, elle doit permettre une exploration globale de l'espace de recherche pour identifier des optimums globaux, au-delà de la recherche locale. Ensuite, si une méthode exacte semble intellectuellement plus satisfaisante, les temps de calculs imposés par la simulation thermique dynamique peuvent justifier l'intérêt pour des méthodes approchées.

### 1.6.3.1 Identification de techniques potentielles sur la classification

Pour orienter la recherche d'une méthode d'optimisation, nous choisissons de nous appuyer sur une classification générale des méthodes d'optimisation, adaptée de Collette et al. (2002) et présentée en Figure 26. Les développements suivants en proposent une lecture.

L'optimisation permet de répondre à des différents types de problèmes : minimisation des coûts, identification de solutions particulières, caractérisation de solutions, résolution de problèmes inverses. Ces travaux visent à identifier des programmes de réhabilitation énergétique minimisant impacts environnementaux, coûts économiques et degré d'inconfort thermique en été.

Deux cas d'optimisation se présentent suivant la nature des variables : discrètes ou continues. Comme la section 1.2.2 a permis de le souligner, notre problème est combinatoire, à variables discrètes. Aussi, nous nous sommes principalement intéressés aux méthodes exactes spécialisées et aux méthodes approchées d'optimisation combinatoire.

D'après la classification de Collette (2002), différentes familles de méthodes d'optimisation peuvent alors être considérées :

- Méthodes exactes spécialisées ;
- Méthodes approchées :
  - Heuristiques spécialisées ;
  - Métaheuristiques ;
  - Méthodes dites classiques ou déterministes.

Le terme d'heuristique est ici à comprendre au sens de méthode ou algorithme fournissant des solutions approchées en temps de calcul polynomial, contrairement aux méthodes exactes. Parmi les méthodes heuristiques, nous nous intéressons uniquement aux métaheuristiques qui sont des méthodes générales, dont l'application ne se limite pas à un type de problème particulier.

Les sous-parties suivantes introduisent les principes de quelques unes des méthodes appartenant à ces familles, explicitant ainsi certaines des branches de la Figure 26.

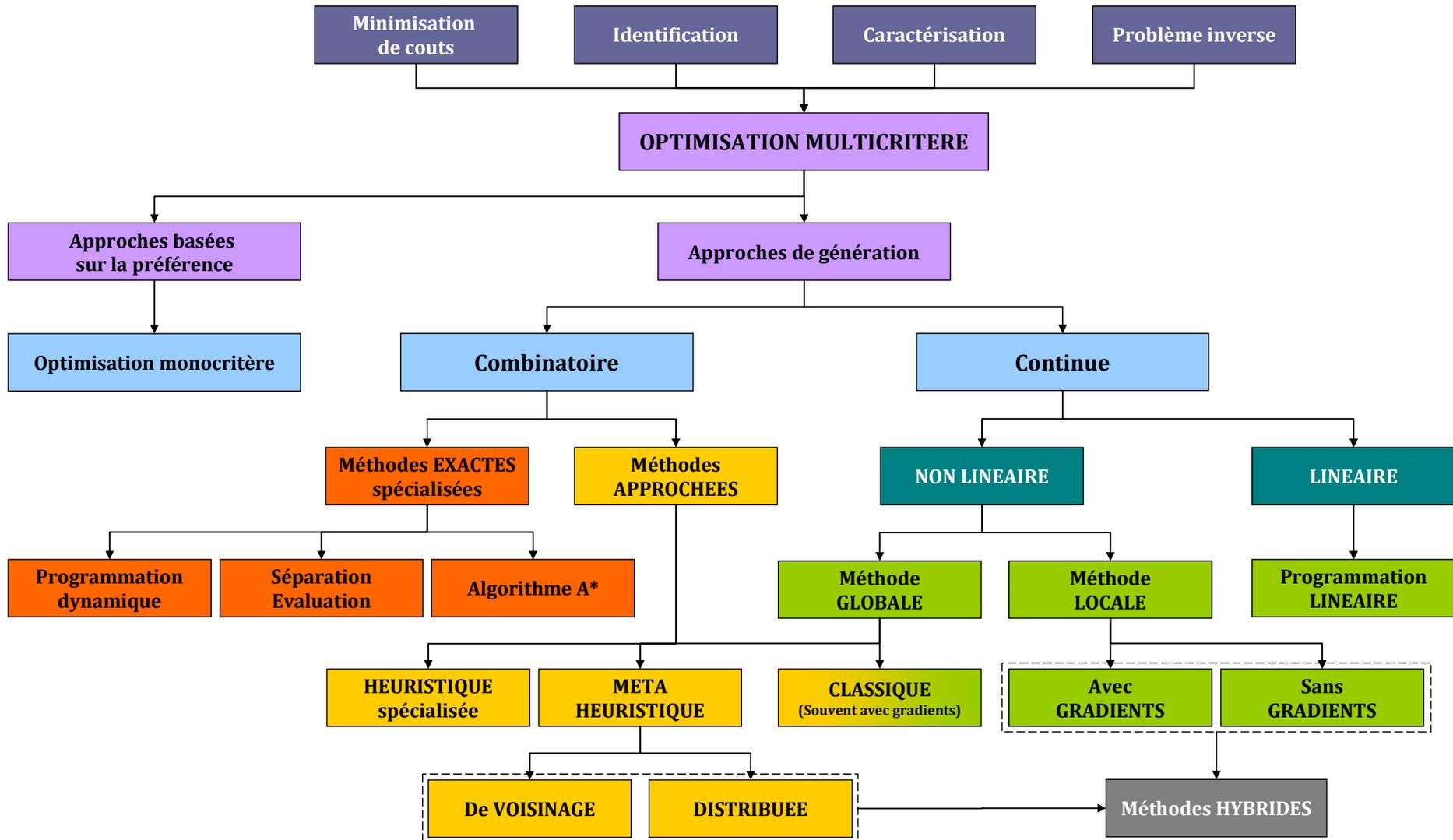


Figure 26. Classification des méthodes d'optimisation multicritère (adapté de Collette et al., 2003 ; Talbi, 2001)

### 1.6.3.2 Méthodes exactes

Différentes techniques d'optimisation exacte sont possibles, dont les méthodes énumératives, la programmation dynamique, la séparation et évaluation ou encore l'algorithme  $A^*$ .

#### Méthode énumérative

Les méthodes énumératives reposent sur l'évaluation systématique de toutes les solutions d'un espace de recherche fini ou discrétisé. Etant donnée la cardinalité de l'espace de recherche considéré dans les études de cas (plusieurs millions ou dizaines de millions de solutions, cf. 1.4.3.1), le recours à ce type de méthode est ici proscrit.

#### Programmation dynamique

Rendue célèbre par les travaux de Bellman (1940), la programmation dynamique est particulièrement adaptée à l'optimisation des processus séquentiels de décision.

Proposant une recherche de plus court chemin, la programmation dynamique s'appuie sur l'équation récursive de Bellman pour rechercher le chemin de valeur optimale, en temps polynomial, à partir des sous chemins optimaux. L'intérêt de l'algorithme devient évident dans le cas de problèmes combinatoires imposant de comparer un très grand nombre de solutions ou stratégies potentielles.

La constitution d'un programme de réhabilitation peut être interprétée comme un processus de décision séquentiel ; à chaque étape de réhabilitation, une ou plusieurs mesures élémentaires sont mises en œuvre. Cette technique semble donc particulièrement prometteuse. Le chapitre 3 est consacré à son application au cas de la réhabilitation énergétique multicritère des bâtiments existants.

#### Méthode par séparation et évaluation (“branch and bound”)

Algorithme énumératif implicite, la méthode par séparation et évaluation a été largement utilisée pour la résolution des problèmes combinatoires difficiles (Ehrgott et Gandibleux, 2000).

Elle repose sur la partition du problème en sous-problèmes disjoints. L'objectif est d'éliminer des solutions partielles, pour éviter l'énumération complète de l'espace de recherche. Des bornes sont alors calculées pour chacun des sous-problèmes et le processus de partition continue itérativement jusqu'à ce qu'une solution optimale soit identifiée. Les ensembles de solutions (et leurs sous-problèmes associés) ainsi construits ont une hiérarchie naturelle en arbre, souvent appelée arbre de recherche ou arbre de décision.

Ehrgott et Gandibleux (2000) soulignent le faible nombre d'applications de cette technique en multicritère. Dans ce contexte, l'adaptation de la méthode par séparation et évaluation pose en effet une difficulté particulière. Les solutions étant des vecteurs non dominés, les bornes sont donc également des vecteurs. Elles jouent le rôle de points Nadir (dont les composantes sont les valeurs les moins optimales identifiées sur chaque objectif) pour les sous-problèmes. L'efficacité de l'algorithme dépend largement de la qualité des bornes. Or, les points Nadir sont souvent difficiles à évaluer ou représentent des solutions trop mauvaises, ne permettant pas d'écarter un nombre suffisant de solutions inefficaces.

### Algorithme A\*

L'algorithme A\* est un algorithme de recherche de plus court chemin dans un graphe, entre un nœud initial et un nœud final, tous deux donnés. Cette technique d'optimisation exacte a fait l'objet de nombreuses applications en intelligence artificielle.

A partir de l'état de départ, l'algorithme A\* explore les états voisins en privilégiant ceux dont les performances évaluées par une estimation heuristique sont optimales. Les performances du chemin partiel déjà parcouru sont évaluées sur les fonctions objectifs du problème, celles du chemin partiel restant à parcourir jusqu'au nœud final sont évaluées à partir d'un estimateur minimisant la « distance » à l'arrivée (ex. longueur du segment en ligne droite, jusqu'au nœud final). La mémoire des états précédemment visités garantit un possible retour en arrière, si le chemin suggéré progressivement par l'estimateur s'avère finalement trop coûteux.

L'algorithme A\* a été généralisé au cas du multicritère (Mandow et Millan, 1996). Dans le cas de la réhabilitation énergétique, si le nœud initial est connu (état du bâtiment avant réhabilitation), le nœud final (état réhabilité) demeure à déterminer par l'optimisation. Aussi, cette technique bien qu'efficace semble difficilement applicable à notre problème.

#### 1.6.3.3 Méthodes approchées classiques ou déterministes

D'origine continue, de nombreuses méthodes d'optimisation déterministes dites *classiques* ont été développées pour conduire la recherche de solutions globalement sur l'espace de recherche (Berthiau et al. 2001). Cependant, ces techniques imposent souvent des propriétés mathématiques restrictives sur les fonctions objectifs, telles que la convexité. Certaines exploitent le calcul des fonctions objectifs, d'autres celui de leurs gradients.

#### Méthodes déterministes directes

Les méthodes déterministes directes exploitent uniquement l'évaluation des solutions sur les fonctions objectifs définies. Elles ne requièrent donc ni l'expression analytique, ni les conditions de régularité de ces fonctions.

Parmi ces méthodes, la méthode du simplexe, et ses dérivées (Nelder-Mead, Hook-Jeeves, méthode du polytope, etc.), utilise la transformation itérative d'un polytope pour identifier des optimum locaux (Bouchlaghem et al., 1990 ; Chelouah, 2000).

Comme le rappelle Pernodet (2010), un simplexe est un polytope particulier, une figure géométrique constituée de  $(n+1)$  sommets, qui sont des points de l'espace de recherche ( $n$  représentant la dimension du problème, soit le nombre de paramètres).

Le polytope est souvent initialisé de manière à former une base orthogonale dans l'espace de recherche. Les valeurs prises par les sommets du polytope initial sont calculées à partir des fonctions objectifs définies pour le problème.

Puis, à chaque itération, le polytope évolue par des transformations géométriques simples (réflexions, homothéties, etc.) appliquées sur un sommet. L'identification du sommet à transformer et de la transformation choisie peut reposer, dans la version multicritère de la méthode du simplexe, sur la relation de dominance associée à une métrique différenciant les solutions appartenant au même front de Pareto. Par exemple, les métriques suivantes peuvent être utilisées : la distance de crowding (Deb, 2001), l'hypervolume (Zitzler, 1999), la métrique C (Zitzler, 1999),

la métrique d'espace (Schott, 1995) et divers autres exemples (Collette et Siarry, 2002). Ces transformations itératives sont appliquées jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt.

Ce type d'approche présente cependant différentes limites. La convergence vers un optimum dépend de l'initialisation du polytope. Dans le cas des fonctions objectifs présentant de multiples optimums locaux, l'optimisation peut alors devenir très laborieuse. Enfin, la recherche d'une surface de compromis requiert l'application itérative de ces algorithmes depuis différents points initiaux, dont le choix est difficile à maîtriser sans une connaissance fine du problème.

### Méthodes déterministes indirectes

Les méthodes déterministes indirectes exploitent le calcul du gradient et les conditions de régularité des fonctions objectifs pour identifier des optimum locaux.

L'application de ces techniques, à partir des fonctions objectifs, est ici exclue étant donnée la formulation considérée pour le problème. En effet, les critères de décision définis sont des fonctions implicites sur des espaces discrets. Elles intègrent des termes calculés à partir de la réduction modale d'un modèle aux différences finies pour la simulation thermique dynamique de bâtiment. Nous ne disposons donc ni de leur expression analytique, ni des valeurs de leurs gradients ou de leurs conditions de régularité.

En revanche, des techniques exploitant les gradients pourraient être mises en œuvre non pas sur les fonctions objectifs mais sur des polynômes d'interpolation. De tels polynômes sont construits à partir des valeurs prises par les solutions dans l'espace des objectifs (calculées par les fonctions objectifs précédemment définies), par des techniques comme les plans d'expériences ou de la méthode du kriging, par exemple. Cette piste n'a toutefois pas été poursuivie à ce stade. Elle conduirait à introduire des incertitudes additionnelles liées à l'interpolation.

#### 1.6.3.4 Métaheuristiques stochastiques

Les métaheuristiques désignent une famille de méthodes d'optimisation stochastiques. Ces méthodes approchées sont bien adaptées à la recherche d'optimum globaux sur des espaces de recherche de grande dimension.

Les métaheuristiques partagent différentes caractéristiques, les rendant bien adaptées au traitement de notre problème :

- Elles sont d'origine combinatoire et peuvent s'adapter au traitement des problèmes continus (de manière plus ou moins aisée) ;
- Elles introduisent une composante stochastique (aléatoire) pour diriger la recherche et faire face à l'explosion combinatoire des solutions potentielles ;
- Elles sont directes, ne recourent pas au calcul des gradients des fonctions objectifs, dont elles ne requièrent aucune expression analytique, ni condition de régularité ;
- Leurs principes s'inspirent d'analogies avec différents phénomènes physiques (ex. refroidissement et cristallisation des métaux), biologiques (ex. théorie de l'évolution) ou éthologiques (ex. déplacement d'insectes ou d'essaims d'oiseaux) ;

Les métaheuristiques partagent aussi les mêmes inconvénients : réglage souvent empirique des paramètres et temps de calcul élevés. Le réglage optimal des paramètres, préconisé par la théorie, demeure souvent inapplicable en pratique devant des temps de calcul prohibitifs. De plus, les théorèmes de convergence sont souvent inexistantes ou applicables sous des hypothèses très restrictives (Berthiau et Siarry, 2001).

Parmi les métaheuristiques, sont différenciées les métaheuristiques de voisinage qui ne font progresser qu'une seule solution à la fois et s'apparentent à une recherche locale (ex. recuit simulé ou recherche tabou) et les métaheuristiques distribuées qui construisent des solutions en manipulant en parallèle toute une population de solutions (ex. algorithmes évolutionnaires ou génétiques, colonies de fourmis). La population de solutions obtenues à partir des métaheuristiques distribuées fournit directement la surface de compromis du problème.

Les principes généraux de quelques métaheuristiques d'optimisation sont exposés ci-après. Les algorithmes relatifs peuvent être consultés sur Berthiau et Siarry (2001) ou Dréo et al. (2003).

### Recuit simulé

La technique du recuit simulé (Kirkpatrick et al., 1982) s'inspire de l'analogie physique avec le refroidissement des solides en fusion. Pour atteindre une microstructure particulière, de basse énergie, les métallurgistes disposent d'un paramètre de contrôle : la température. Le recuit est précisément la stratégie d'évolution de la température, en vue d'approcher un optimum.

A partir d'une configuration initiale (une solution de l'espace de recherche), l'optimisation fait évoluer le système itérativement via des perturbations aléatoires. Ces perturbations proposent la modification des valeurs prises par un ou plusieurs paramètres de la configuration courante.

Pour éviter une marche purement aléatoire dans l'espace de recherche, l'acceptation de ces mouvements est régie par la règle de Metropolis (1953). Un paramètre fictif de contrôle est introduit et joue le rôle de la température pour les métallurgistes.

Ainsi, en multicritère, à une température donnée  $T$ , la transition proposée depuis la configuration courante  $\mathbf{x}_k$  vers un état  $\mathbf{x}_{k+1}$  peut être acceptée suivant une règle de décision probabiliste, basée sur les relations suivantes.

Pour chacune des fonctions objectifs  $f_i$ , la règle de Metropolis est appliquée :  
(ici pour un problème de minimisation)

$$\pi_i = \begin{cases} \exp\left(-\frac{f_i(\mathbf{x}_{k+1}) - f_i(\mathbf{x}_k)}{T_k}\right) & \text{si } (f_i(\mathbf{x}_{k+1}) - f_i(\mathbf{x}_k)) > 0 \\ 1 & \text{si } (f_i(\mathbf{x}_{k+1}) - f_i(\mathbf{x}_k)) \leq 0 \end{cases}$$

Avec  $\pi_i$ , la probabilité d'accepter la transition suivant la fonction objectif  $i$ .

La probabilité globale  $p$  d'accepter finalement la transition est reconstruite à partir du vecteur  $(\pi_i)$  et éventuellement de coefficients de pondération  $\lambda_i$  associés à la probabilité de transition sur chaque fonction objectif. Les relations suivantes permettent de calculer une valeur de  $p$  :

$$p = t(\Pi, \lambda)$$

$$\Pi = (\pi_i)_{i \in [1..N]}$$

Et

$$t(\Pi, \lambda) = \prod_{i=1}^N (\pi_i)^{\lambda_i}$$

Ou

$$t(\Pi, \lambda) = \min_{i \in [1..N]} (\pi_i)^{\lambda_i}$$

En multicritère, différentes stratégies sont possibles pour implémenter le recuit simulé. Celle-ci, proposée par Ulungu et al. (1999), permet d'éviter l'agrégation des fonctions objectifs.

A haute température, les perturbations sont très majoritairement acceptées, ce qui permet l'exploration de l'espace de recherche et d'éviter le piège des optimum locaux. En revanche, à basse température, quand l'optimisation progresse, la plupart des mouvements dégradant les performances de la solution courante sont rejetés et l'algorithme se ramène à une amélioration itérative classique.

Le nombre important de paramètres, à régler empiriquement, représente l'inconvénient majeur de la méthode : température initiale, loi de décroissance de la température, critères de changement de palier, critère d'arrêt.

Le recuit simulé a été exploité pour construire une méthode d'aide à la conception des bâtiments (Nielsen, 2002) sur quelques paramètres géométriques et le choix de composants. Les solutions minimisent le coût sur le cycle de vie du bâtiment, sous des contraintes de consommation énergétique, de confort thermique et visuel.

Différentes méthodes ont progressivement été développées (Berthiau, 1994). Siarry (1986) propose une présentation détaillée de la théorie générale et de quelques applications.

### Méthode tabou

La recherche Tabou (Glover et Laguna, 1997) consiste à introduire une forme de mémoire, dans l'exploration de l'espace de recherche. Elle se différencie en cela du recuit simulé qui représente l'évolution d'un marcheur amnésique, incapable de capitaliser sur les expériences passées. La mémoire permet en effet de se prémunir du retour cyclique sur les configurations connues, devenues taboues, pour poursuivre la recherche au-delà des optimums locaux identifiés.

La méthode Tabou est une recherche locale reposant sur la notion de voisinage, ensemble des configurations accessibles en un unique mouvement élémentaire (Berthiau et Siarry, 2001). On appelle mouvement une modification apportée à une solution. Pour un problème donné, il n'y a pas unicité de la définition du voisinage. A partir d'une configuration initiale, et à chaque itération, l'ensemble ou un sous-ensemble du voisinage est évalué. La meilleure solution identifiée, hors liste taboue, devient alors la nouvelle configuration courante.

Il est possible que cette nouvelle configuration dégrade les performances par rapport à la solution précédente, ce qui garantit la possibilité de s'échapper des optimums locaux. Par ailleurs, la liste taboue contient préférablement des mouvements interdits, plutôt que des configurations, pour des raisons d'économie de mémoire (Berthiau et Siarry, 2001).

La mémoire permet donc de contrôler le retour sur des configurations précédemment visitées. Cependant, interdire définitivement tout retour sur ces solutions est peu efficace algorithmiquement (à chaque itération, les solutions du voisinage sont toutes comparées aux configurations visitées) et présente le risque de bloquer l'accès des solutions pourtant non encore visitées. Aussi, la liste taboue est généralement une mémoire à court terme, les mouvements tabous étant interdits pendant un temps donné. De plus, pour favoriser l'exploration de l'espace de recherche à long terme, les mouvements les moins fréquemment utilisés peuvent être régulièrement forcés (Gendreau et al., 1994).

### **Colonies de fourmis**

La méthode des colonies de fourmis s'inspire du comportement collectif des insectes sociaux. En s'appuyant sur la modification de leur environnement, ceux-ci sont capables de faire émerger un modèle global uniquement à partir des interactions entre les individus ou composants de bas niveau du système.

Pour l'exploitation des sources de nourriture, les fourmis révèlent une grande efficacité collective. Au départ, tous les individus quittent la fourmilière, de manière aléatoire. En se déplaçant, elles déposent une piste de substances volatiles (les phéromones), dont l'intensité influence leurs congénères. Dès lors, le processus d'optimisation du trajet entre le nid et une source de nourriture s'effectue très simplement. Les fourmis empruntant le chemin le plus court font nécessairement davantage d'aller-retour, dans le même temps. La piste de phéromones se renforce, elle attire localement mais progressivement toute la colonie.

Introduite pour les recherches de plus court chemin, la méthode des colonies de fourmis exploite les mêmes principes. C'est une technique d'optimisation distribuée, basée sur une population de solutions, ce qui permet l'exploration large de l'espace de recherche.

Au départ, une population de solutions (pistes) est initialisée aléatoirement. A partir de ces premières solutions, les phéromones sont déposées par deux paramètres de modélisation : la visibilité et l'intensité de la solution. Sur chaque chemin partiel emprunté (solution partielle), la visibilité est fonction des performances globales, l'intensité est liée au nombre d'individus de la population ayant utilisé cette solution partielle. Une solution globale (piste) est une séquence de chemins partiels. Visibilité et intensité contribuent à l'intensification de la recherche localement, autour des solutions courantes.

A chaque itération, les individus (fourmis) construisent chacun une solution (piste). Ayant parcouru un certain chemin partiel, le choix du sous-chemin suivant est basé sur une règle probabiliste fonction de la visibilité et de l'intensité des sous-chemins potentiels.

D'une itération sur l'autre, les phéromones s'évaporent : l'intensité des solutions décroît avec le temps, en l'absence de renforcement par le passage d'individus. Ce mécanisme est fondamental pour l'exploration à long terme de l'espace de recherche. Il garantit la possibilité de s'extraire des optimums locaux.

## Algorithmes évolutionnaires et génétiques

L'observation de la biodiversité terrestre force à constater que l'évolution biologique a engendré une grande diversité d'êtres vivants, adaptés aux contraintes locales des milieux dans lesquels ils vivent et se développent, capables de s'adapter progressivement à un environnement complexe, incertain et en transformation constante. Cette capacité d'adaptation suggère une forme d'optimisation, très différente d'un processus déterministe (Dréo et al., 2003).

Les algorithmes évolutionnaires et génétiques sont directement inspirés de la théorie de l'Evolution naturelle des espèces (Darwin, 1859), enrichis des connaissances actuelles en génétique. La recherche de solutions optimales est fondée sur deux mécanismes : la compétition naturelle et la reproduction. La compétition sélectionne les individus les mieux adaptés, leur assurant ainsi une descendance. Les mécanismes de reproduction régissent les échanges de matériel génétique entre les individus d'une population et contribuent à la diversité. Ils permettent d'engendrer la génération suivante et conduisent vers l'adaptation graduelle, générationnelle, de la population à son environnement.

Les algorithmes génétiques font l'objet des développements de plusieurs des chapitres suivants, qui y consacrent une présentation plus détaillée.

## Autres méthodes

Bien que non traitées ici, la littérature fait état de quelques autres métaheuristiques : essais particuliers (Coello et Lechuga, 2002), réseaux de neurones (Sun et al., 1996), méthode GRASP (Greedy random adaptive search procedure) (Gandibleux et al., 1998), etc.

## Remarque fondamentale

Ces méthodes ne s'excluent pas mutuellement. Dans l'état actuel de la recherche, le choix d'une métaheuristique demeure un problème ouvert, face à un problème donné. Il est le plus souvent impossible de prévoir avec certitude l'efficacité d'une méthode donnée, quand elle est appliquée à un problème donné (Dréo et al., 2003). Les théorèmes de convergence sont souvent inexistantes ou applicables sous des hypothèses très restrictives. La comparaison des méthodes est souvent limitée à l'étude de problèmes de test idéalisés et spécifiques.

### 1.6.4 Conclusion sur l'optimisation multicritère pour la réhabilitation

Cet état de l'art des approches d'optimisation en contexte multicritère fait apparaître des distinctions à plusieurs niveaux : entre méthodes basées sur la préférence et méthodes de génération, entre méthodes exactes et métaheuristiques approchées.

Dans ces travaux, nous écartons les approches basées sur la préférence, qui convertissent le problème multicritère en monocritère en amont de la recherche. Ce choix est motivé par la difficulté à maîtriser l'influence de l'information préférentielle introduite a priori sur les résultats ainsi que la volonté d'exhiber une surface de compromis et non pas seulement quelques solutions potentielles isolées. Par ailleurs, nous assumons la conviction personnelle qu'un décideur a d'autant plus de facilité à s'interroger sur ces préférences lorsqu'il dispose de solutions potentielles sous les yeux.

Le choix d'une méthode d'optimisation doit satisfaire à la double nécessité d'identifier des solutions optimales ou de bonne qualité en un temps de calcul « raisonnable » et de répondre au problème posé. Notre objectif est d'identifier des stratégies de réhabilitation efficaces. Pouvoir caractériser les situations et comparer les solutions semble également pertinent. Les méthodes exactes sont certes coûteuses en temps de calculs mais offrent justement de pouvoir caractériser les solutions et de les comparer. Sur des ensembles de recherches de grande cardinalité, le recours aux méthodes approchées semble indispensable. Dans ce cas, il a été rappelé que la théorie n'est pas d'un grand secours face au choix d'une métaheuristique stochastique.

Aussi, nous avons décidé de travailler principalement sur l'application de deux types de méthodes d'optimisation multicritère : les algorithmes génétiques et la programmation dynamique, au regard des caractéristiques de ces méthodes ainsi que des applications précédentes à des cas de conception de bâtiment (Pernodet Chanterelle, 2010).

## 1.7 Conclusion

Dans une perspective de réhabilitation énergétique des bâtiments existants, il apparaît donc que l'identification de programmes de réhabilitation efficaces est une problématique complexe d'aide à la décision.

L'état de l'art a largement souligné la diversité des critères de décision utilisés en conception des bâtiments et la variété des mesures élémentaires permettant de contribuer à la réhabilitation énergétique de l'existant.

Les programmes de réhabilitation étudiés dans ces travaux sont des permutations de ces mesures élémentaires, modélisées comme des variables discrètes. Ils visent de manière systémique : la réduction des besoins de chaleur par le traitement de l'enveloppe, l'efficacité des systèmes et l'intégration des énergies renouvelables.

Dans ces travaux, leurs performances sont évalués en termes : de bilan énergétique et environnemental sur la poursuite du cycle de vie des bâtiments ; de bilan économique et financier au sens des investissements comme du coût global et du confort thermique en été.

Un modèle de cycle de vie a été construit pour évaluer les performances des programmes de réhabilitation potentiels sur ces fonctions objectifs. Ce modèle utilise la simulation thermique dynamique pour le calcul des besoins horaires de chauffage et des températures intérieures. Par conséquent, les fonctions objectifs considérées sont implicites.

La nature mathématique du problème – combinatoire et à fonctions objectifs implicites – conditionne le choix d'une approche d'aide à la décision. Si les méthodes d'aide multicritère à la décision (MCDA) semblent séduisantes par la possibilité d'exhiber une ou plusieurs solutions préférées sur une surface de compromis, elles imposent néanmoins de connaître explicitement un ensemble de solutions non-dominées.

Aussi, l'aide à la décision requiert une première étape de génération des solutions, correspondant à l'identification de solutions efficaces et pouvant être avantageusement conduite par les méthodes d'optimisation multicritère.

Dans cette perspective, nous préférons les approches Pareto, permettant d'identifier des solutions efficaces et une surface de compromis, aux techniques traditionnelles de conversion du problème multicritère en monocritère, qui imposent l'introduction d'une forme d'information préférentielle en amont de la recherche de solution.

Deux méthodes d'optimisation multicritère sont ainsi étudiées et appliquées au cas de la réhabilitation énergétique des bâtiments existants :

- Une méthode approchée : les algorithmes génétiques ;
- Une méthode exacte : la programmation dynamique.

Les développements sur ces méthodes font respectivement l'objet des deux chapitres suivants.



## Chapitre 2

# Optimisation multicritère et algorithme génétique pour la réhabilitation énergétique des bâtiments existants

---

*Ce chapitre présente la mise en œuvre de l'optimisation multicritère par algorithme génétique pour l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle, à l'échelle du bâtiment.*

*A partir d'une synthèse des principes généraux, un algorithme génétique de type NSGA-II a été développé, à partir de la représentation des programmes de réhabilitation par un couple de chromosomes.*

*Une étude de cas, sur un immeuble résidentiel collectif, illustre ensuite la contribution de l'optimisation génétique à l'aide à la décision, par l'identification de solutions efficaces et la description d'une surface de compromis.*

---

## Plan du chapitre 2

2.1	Introduction	115
2.2	Algorithmes évolutionnaires et génétiques	115
2.2.1	Généralités	115
2.2.2	Représentation des solutions	116
2.2.3	Principe général de l'algorithme	119
2.2.4	Choix de l'algorithme génétique NSGA II	120
2.2.5	Opérateurs de sélection (NSGA II)	121
2.2.6	Opérateurs de variation	125
2.2.7	Réglage des paramètres de l'algorithme	126
2.2.8	Convergence	126
2.2.9	Applications à la conception de bâtiments	127
2.2.10	Conclusion	127
2.3	Application à la réhabilitation énergétique	128
2.3.1	Représentation des solutions	128
2.3.2	Variation par croisements	131
2.3.3	Variation par mutations	135
2.3.4	Implémentation	137
2.4	Etude de cas	138
2.4.1	Paramètres de l'optimisation génétique	138
2.4.2	Progression vers des solutions efficaces	139
2.4.3	Compromis en réhabilitation énergétique séquentielle	146
2.4.4	Compromis et mesures élémentaires de réhabilitation	151
2.4.5	Corrélations critères environnementaux	157
2.4.6	Phasage et évolution temporelle des impacts cumulés	161
2.4.7	Reproductibilité des résultats	165
2.5	Conclusion	169

## 2.1 Introduction

Les ambitions de développement durable supposent dans de nombreux pays occidentaux dont la France, la réhabilitation énergétique des bâtiments existants. Comme l'a détaillé le chapitre précédent, l'identification de stratégies systémiques efficaces est un problème d'aide à la décision multicritère, combinatoire et à fonctions objectifs implicites.

Les métaheuristiques stochastiques sont des techniques d'optimisation approchée, bien adaptées à la résolution de ce type de problème. Face à un problème donné, le choix d'une métaheuristique demeurant un sujet ouvert (Dréo et al., 2003), nous choisissons de mettre en œuvre un algorithme génétique.

Métaheuristiques d'une grande flexibilité, les algorithmes évolutionnaires et génétiques permettent la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire. Ils ne requièrent aucune connaissance explicite du problème, et ne réclament donc pas l'expression analytique des fonctions objectifs. Enfin, le recours à une population de solutions en fait une méthode d'optimisation distribuée, conduisant efficacement l'exploration globale de l'espace de recherche.

Ce chapitre présente l'application des algorithmes génétiques à l'identification de programmes de réhabilitation énergétique efficaces, à l'échelle du bâtiment.

## 2.2 Algorithmes évolutionnaires et génétiques

### 2.2.1 Généralités

Les algorithmes évolutionnaires et génétiques sont directement inspirés des principes de la théorie de l'Evolution naturelle des espèces (Darwin, 1859), enrichis des connaissances actuelles en génétique.

La recherche de solutions optimales est fondée sur deux mécanismes : la compétition naturelle et la reproduction. La compétition sélectionne les individus les mieux adaptés, leur assurant une descendance. Les mécanismes de reproduction régissent les échanges de matériel génétique entre les individus d'une population et contribuent à la diversité. Ils permettent d'engendrer la génération suivante et conduisent vers l'adaptation graduelle, générationnelle, de la population à son environnement.

Du point de vue historique, le développement des calculateurs ayant rendu cette théorie accessible à la simulation, quelques chercheurs ont voulu la tester sur des problèmes d'ingénierie dès les années 1950. Cependant, ces travaux pionniers se sont heurtés à la compréhension de l'époque des mécanismes de l'évolution et à la puissance des calculateurs alors disponible.

Les années 1960-1970 ont vu, avec les progrès informatiques, de nombreux travaux de modélisation de l'évolution. Parmi ces efforts de recherche, les algorithmes génétiques ont été proposés en 1975, par J.H. Holland (1992).

La publication de "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning" (1989) par D.E. Goldberg a largement contribué à la diffusion des algorithmes génétiques dans le monde de

la recherche universitaire et opérationnelle. Depuis, plusieurs dizaines de milliers de publications ont été proposées, étendant la connaissance théorique sur le sujet, appliquant ces approches à la résolution de problèmes d'ingénierie très divers.

## 2.2.2 Représentation des solutions

L'analogie avec la génétique transparait clairement au travers de la sémantique attachée à la définition des solutions (Deb, 2001). La Figure 27 propose une illustration de la représentation attachée aux solutions d'un algorithme génétique.

En optimisation évolutionnaire ou génétique, une solution potentielle du problème, appartenant à l'espace de recherche, est appelée **individu**.

Une **population** est un ensemble d'individus. La population représentée en Figure 27 compte ainsi 5 individus, ou solutions potentielles différentes.

Une des originalités des algorithmes génétiques et évolutionnaires, par rapport au recuit simulé ou à la recherche tabou, tient à la manipulation à chaque itération d'une population de solutions, distribuée sur l'espace de recherche. Celle-ci évolue au cours des itérations algorithmiques pour former des générations (au sens de la généalogie), jusqu'à un critère d'arrêt, tenant compte de la qualité des solutions obtenues. Ces méthodes d'optimisation se différencient donc des recherches locales, par le traitement simultané d'un ensemble de solutions.

Le résultat de l'optimisation est directement un ensemble de solutions non-dominées.

Chaque individu est représenté par un ou plusieurs **chromosomes** (deux sur la Figure 27), qui codent sur des gènes l'information nécessaire à la définition complète de l'individu. Les **gènes** correspondent donc aux variables de décision du problème.

Sur les chromosomes, chaque gène porte un **allèle** donné. Les allèles représentent les différentes valeurs discrètes ou continues que peut prendre une solution sur une variable de décision donnée. Ainsi, plusieurs allèles peuvent généralement être considérés pour un même gène.

Par exemple, l'allèle porté par le gène 6 du chromosome détaillé en Figure 27 est l'entier 5.

Sur la même figure, l'allèle porté par le gène 04 est codé sous la forme d'une chaîne de nombres binaires, représentant l'entier 22 (lecture de gauche à droite), soit la 22<sup>ème</sup> valeur discrète pouvant être prise par la variable de décision représentée par le gène 04.

La distinction entre algorithmes évolutionnaires et génétiques tient au **codage de l'information** sur les gènes. Les algorithmes génétiques codent la valeur des allèles sous la forme de chaînes de nombres binaires. Les gènes d'un algorithme évolutionnaire contiennent des entiers ou des réels, représentant directement la valeur d'un paramètre de conception donné, ou le numéro associé à une variante de conception.

1 population composée de 5 individus

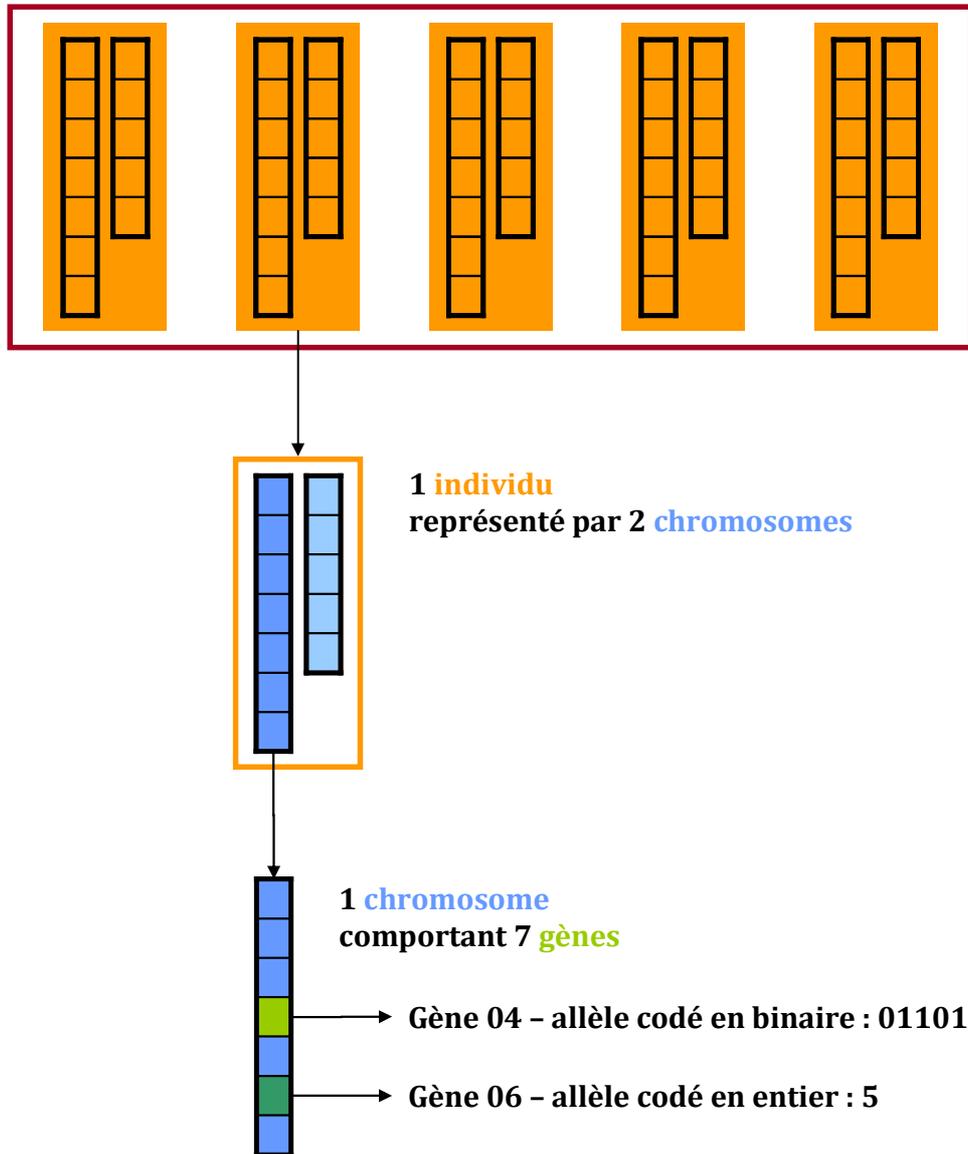


Figure 27. Illustration de la représentation des solutions pour les algorithmes génétiques ou évolutionnaires

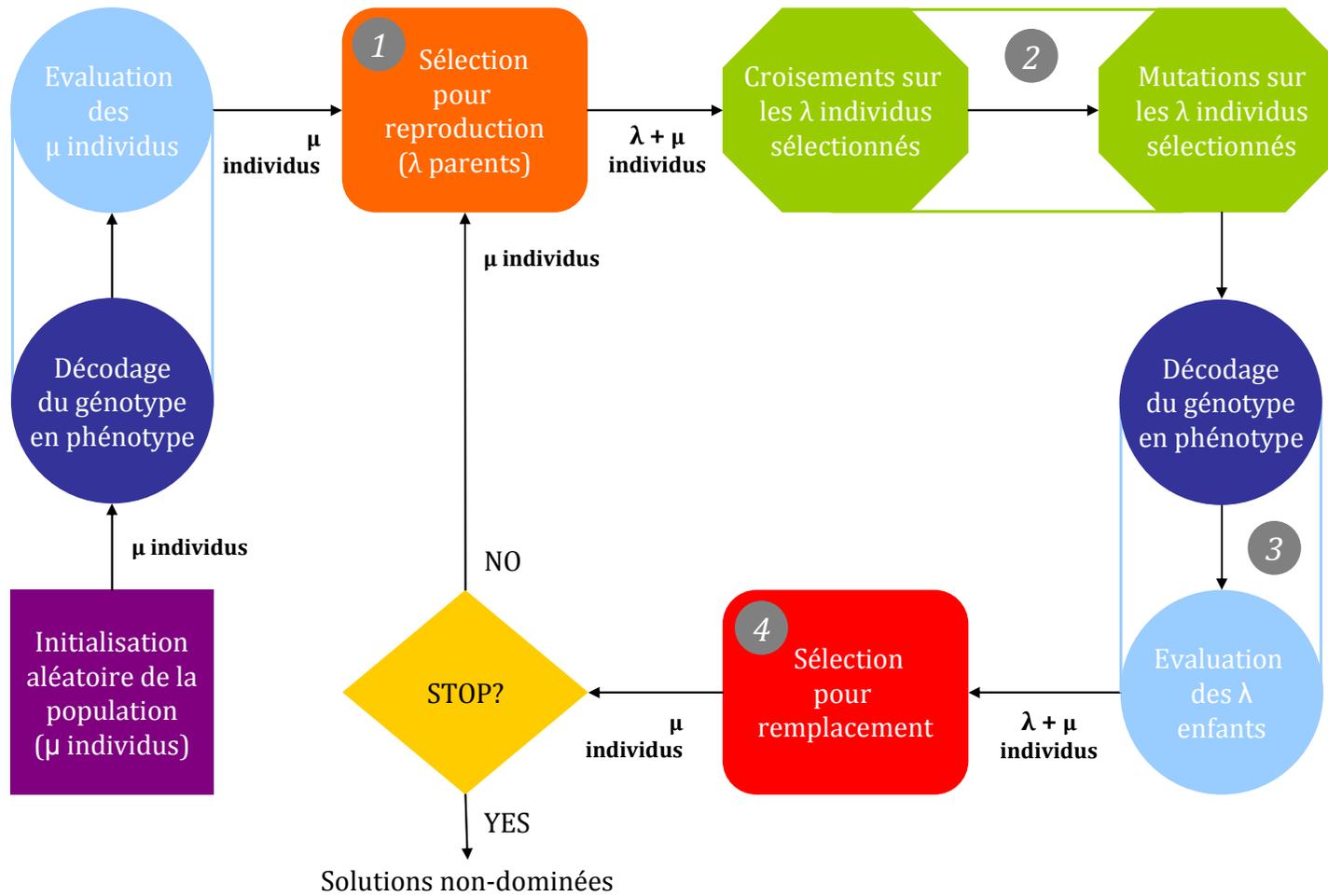


Figure 28. Principe d'un algorithme génétique (extrait de Dréo et al., 2003)

### 2.2.3 Principe général de l'algorithme

De nombreux algorithmes évolutionnaires ou génétiques ont été proposés. Tous reposent sur le même principe général, représenté sur la Figure 28.

L'optimisation commence par l'initialisation aléatoire d'une population de  $\mu$  individus. Les performances des  $\mu$  solutions initiales sont ensuite évaluées sur les fonctions objectifs.

Cette évaluation intervient après décodage du génotype en phénotype interprétable par les outils d'évaluation. L'information génétique codée sur les chromosomes (chaines de nombres binaires ou entiers) doit en effet être traduite en termes de valeurs prises par les variables de décisions pour permettre le calcul des performances sur les fonctions objectifs.

A l'issue de la première phase d'évaluation, commencent les itérations générationnelles. En effet, les algorithmes génétiques construisent l'amélioration des performances des individus de la population à partir de l'itération d'une boucle générationnelle en 4 étapes principales.

A chaque génération, l'application de ces 4 phases détermine l'évolution de la population :

- **Sélection pour la reproduction (1)** : sur la base de leurs performances,  $\lambda$  parents (ou individus générateurs de la génération suivante) sont sélectionnés, parmi les  $\mu$  individus de la population courante ;
- **Reproduction ou variation (2)** :  $\lambda$  enfants sont engendrés par application séquentielle et aléatoire d'opérateurs de variation (croisement et mutation) directement sur les chromosomes des parents sélectionnés précédemment. Les croisements recombinaient aléatoirement des segments d'information génétique provenant des parents, pour recomposer les chromosomes des enfants. Les mutations modifient aléatoirement les valeurs prises par certains gènes ;
- **Evaluation (3)** : les performances des  $\lambda$  enfants engendrés sont évaluées par rapport aux fonctions objectifs du problème considéré, après décodage du génotype en phénotype interprétable par les outils d'évaluation ;
- **Sélection pour le remplacement (4)** : dans la perspective de maintenir une population courante de taille donnée, les  $\mu$  individus qui formeront la population de la génération suivante sont sélectionnés à partir des  $\lambda$  enfants engendrés et/ou des  $\mu$  individus de la génération courante.

Un critère d'arrêt interrompt les itérations de l'algorithme. En général, celui-ci repose soit sur le nombre de générations considérées pour l'évolution de la population, soit sur les gains relatifs de performances des individus de la population courante, sur un certain nombre de générations.

L'évaluation est évidemment propre au problème considéré, qui conditionne les fonctions objectifs choisies pour mesurer la performance des individus.

L'état de l'art souligne la variété des algorithmes proposés. Ils se différencient principalement par les opérateurs implémentés pour les sélections pour reproduction et remplacement, dans une moindre mesure par les opérateurs de variation. Les variations (croisements et mutations) sont surtout dépendantes du problème et de la représentation choisie pour les individus : forme des chromosomes et information qui y est codée.

Ces travaux n'ont pas pour ambition de présenter l'état de l'art détaillé des algorithmes génétiques et évolutionnaires existants, ainsi que des opérateurs de sélection et variation relatifs. Le lecteur intéressé trouvera d'ailleurs des références bibliographiques assez complètes sur le sujet (Deb, 2001). Avant de détailler plus précisément les opérateurs de sélection et variation mis en œuvre pour la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments, il est nécessaire de procéder au choix d'un algorithme.

#### 2.2.4 Choix de l'algorithme génétique NSGA II

La littérature fait état de nombreuses variantes d'algorithmes génétiques ou évolutionnaires (Deb, 2001). Le choix d'un algorithme particulier doit privilégier la qualité des solutions obtenues et l'exploration de l'espace de recherche, influencés par les stratégies élitistes et le codage de l'information génétique sur les chromosomes.

##### Stratégies élitistes ou non ?

Les algorithmes existants peuvent être classés en deux catégories sur la base de la mise en œuvre (ou non) de stratégies élitistes.

Lors de la sélection pour remplacement, l'élitisme consiste à conserver tout ou partie des individus les plus performants, même s'ils n'ont pas été engendrés lors de la dernière boucle générationnelle. L'analogie avec la biologie trouve ici ses limites, les stratégies élitistes conduisent à constituer la population de la génération suivante à partir d'individus sélectionnés parmi : les enfants générés en reproduction et les individus la population courante, dont sont issus les parents. La conservation systématique des individus les plus performants assure que les performances optimales sur chaque objectif ne peuvent se dégrader. Elle peut néanmoins conduire à une perte de diversité génétique au sein de la population.

Ainsi, certains algorithmes sont non élitistes : vector evaluated genetic algorithm (VEGA), vector optimized evolution strategy (VOES), weight-based genetic algorithm (WBGA), random weighted genetic algorithm (RWGA), multiple objective genetic algorithm (MOGA), non dominated sorting genetic algorithm (NSGA), niched Pareto genetic algorithm (NPGA), etc.

D'autres au contraire mettent en œuvre des stratégies élitistes : Rudolph's elitist multi objective evolutionary algorithm, elitist non dominated sorting genetic algorithm (NSGA II), Distance-based pareto genetic algorithm (DPGA), strength pareto evolutionary algorithm (SPEA), etc.

Le choix d'un algorithme génétique pour résoudre un problème donné est un problème complexe et à ce jour non résolu. Cependant, de nombreuses études comparatives ont démontré l'importance de l'introduction de l'élitisme sur les performances de la recherche (Deb, 2001).

De plus, des tests menés sur de nombreux problèmes tendent à démontrer les bonnes performances de l'algorithme de type NSGA II, tant en termes de qualité des solutions que de description de l'étendue du front de Pareto (Zitzler et al., 1999 ; Deb et al., 2000).

Aussi, nous choisissons donc d'implémenter un algorithme de type NSGA II.

## Codage évolutionnaire ou génétique ?

Comme énoncé précédemment, la distinction introduite entre les algorithmes évolutionnaires et génétiques tient à la représentation de l'information portée par les gènes, soit respectivement : des nombres réels ou des chaînes de binaires, codant les valeurs prises par les solutions sur les variables de décision.

Cette distinction est importante du point de vue des variations (croisements et mutation) qu'il est possible d'appliquer en reproduction.

Dans les deux cas, la recombinaison de l'information génétique par croisement peut avoir lieu par coupure des chromosomes entre les gènes.

Dans le cas des algorithmes génétiques, les croisements ou les mutations peuvent également opérer directement sur les chaînes de nombres binaires, à l'intérieur des gènes. Les enfants alors engendrés sont susceptibles de disposer, par croisement seul, d'allèles présents chez aucun de leurs parents, ce qui n'est pas le cas du codage évolutionnaire. Cette possibilité accentue la diversité génétique de la population courante et donc l'exploration de l'espace de recherche.

Le codage génétique a été mis en œuvre dans certains travaux qui ont alors souligné son intérêt (Deb et al., 2000 ; Vincenti et al., 2010 ; Michalewicz, 1996).

Aussi nous choisissons de travailler sur la forme génétique plutôt qu'évolutionnaire.

Les développements suivants se concentrent donc principalement sur l'algorithme génétique NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm).

### 2.2.5 Opérateurs de sélection (NSGA II)

Les algorithmes génétiques reposent sur la sélection naturelle, qui favorise les individus les mieux adaptés à leur milieu en leur assurant survie et descendance. En modélisation de cette compétition, les algorithmes génétiques utilisent des opérateurs de sélection pour la reproduction et de sélection pour le remplacement générationnel. Les algorithmes se différencient notamment par les opérateurs de sélection mis en œuvre. Cette section revient en particulier sur ceux de l'algorithme génétique de type NSGA-II. Un concept de base, la distance de crowding, doit être introduit préalablement.

#### 2.2.5.1 Distance de crowding

La "distance de crowding" ou distance de peuplement est une mesure de la dispersion des solutions non-dominées sur un front de Pareto. Elle représente le demi-périmètre de l'hyper-cube défini par les plus proches voisins d'une solution appartenant au front. Plus elle est grande, plus la solution est distante de ses voisins sur le front.

La Figure 29 illustre la distance de crowding pour quelques solutions non-dominées, en représentant le périmètre de l'hyper-cube défini par les plus proches voisins, dans le cas d'un problème de minimisation à deux objectifs.

Cette métrique permet de différencier les solutions appartenant à un même front de Pareto, en identifiant celles qui sont situées dans des régions « peu peuplées » de l'hyper-surface de compromis (Rogers et Prigel-Bennett, 1999).

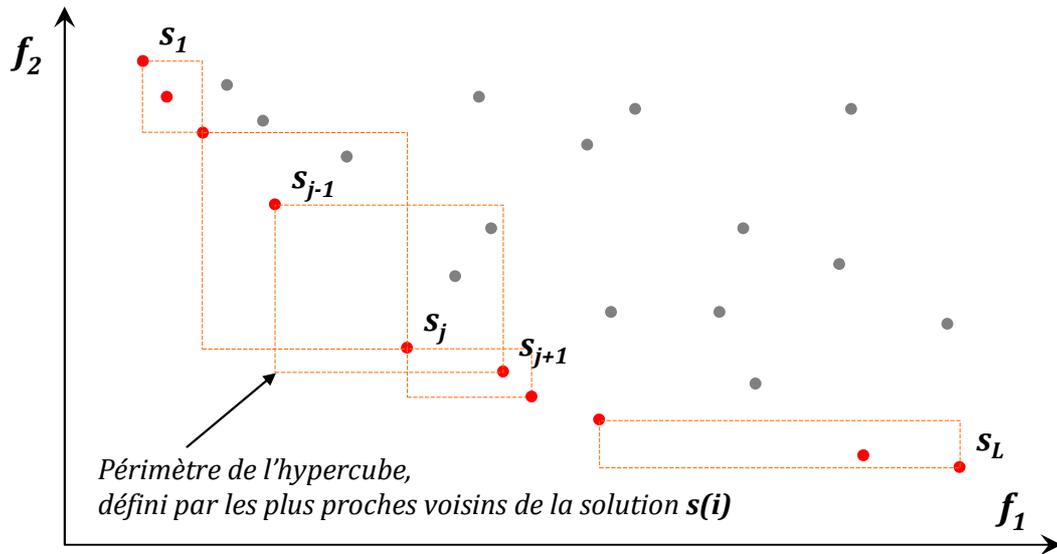


Figure 29. Représentation du périmètre de l'hypercube (en dimension 2), pour quelques solutions non-dominées d'un problème de minimisation à deux objectifs

Soient :

- $F$  : Le front de Pareto ;
- $L = \text{card}(F)$  : Le nombre de solutions du front  $F$  ;
- $N$  : Le nombre de fonctions objectifs ;
- $f_i$  : La fonction objectif d'indice  $i$  du problème ;
- $d_s$  : La distance de crowding de la solution  $s$  ;
- $I_j$  : L'indice de la  $j$ ème solution stockée dans un vecteur  $I$  ;

Pour chacune des solutions  $S_j$  appartenant à un front donné, l'évaluation de la distance de crowding  $d_{S_j}$  est effectuée selon la procédure suivante (Deb, 2001) :

Sur chacune des fonctions objectifs, les solutions du front sont triées par ordre croissant et leurs indices sont stockées dans les vecteurs suivants :

$$I^i \quad i \in [1..N]$$

Puis,

$$d_{S_j} = \sum_{i=1}^N d_{S(I_j^i)}$$

Avec :

$$d_{S(I_j^i)} = \begin{cases} \frac{f_i(S(I_{j+1}^i)) - f_i(S(I_{j-1}^i))}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & \forall i \in [1..N], \forall j \in [2..(L-1)] \\ +\infty & \forall i \in [1..N], j \in \{1; L\} \end{cases}$$

Remarques :

- La distance de crowding associée aux solutions correspondant aux extremums locaux, sur une ou plusieurs fonctions objectifs (« extrémités » de l'hyper-surface) est infinie. Ce modèle permet de préserver ces points particuliers, qui contribuent au premier rang à la dispersion de solutions non-dominées sur le front de Pareto ;
- Le terme introduit pour les solutions qui ne correspondent pas à un extremum local, sur un objectif donné, construit le calcul du demi-périmètre de l'hyper-cube défini par les plus proches voisins d'une solution appartenant au front. On remarque que ce terme est normalisé par la différence entre la meilleure et la moins bonne performance sur chaque objectif, ce qui permet de s'affranchir du facteur d'échelle entre les différentes fonctions objectifs.

### 2.2.5.2 Sélection pour reproduction

La sélection pour la reproduction permet d'identifier au sein de la population courante un nombre  $\lambda$  d'individus, dits parents, qui serviront à engendrer une population d'enfants, au cours de la boucle générationnelle. En toute généralité, la capacité d'un individu à être sélectionné dépend de sa performance, ici multicritère. La littérature sur les algorithmes génétiques propose différentes techniques pour procéder à la sélection multicritère (Dréo et al., 2003). Sélection par le rang, sélection proportionnelle ou sélection par tournois constituent les principales options.

En **sélection par le rang**, tous les individus de la population sont classés par rang croissant de dominance. Les individus appartenant aux premiers fronts sont utilisés pour la reproduction. Cette technique présente deux limites principales. Elle exclut nécessairement de la reproduction les individus dominés par plusieurs fronts de Pareto ; ces individus peuvent pourtant être porteurs d'un code génétique de qualité. Par ailleurs, la sélection par le rang ignore les différences de performance entre les individus ; quels que soient leurs performances, les individus appartenant aux premiers fronts de Pareto pourront perdurer dans la population. Il demeure cependant difficile d'apprécier l'influence de cette dernière remarque étant donné qu'elle permet aussi de générer une certaine diversité.

Par la **sélection proportionnelle**, les performances multicritères de chaque individu sont agrégées par une fonction de fitness. Cet opérateur de sélection est alors très semblable au principe de la roulette : la probabilité de sélection d'un individu est proportionnelle à sa fitness. Les enjeux liés à cette technique sont nombreux : agrégation de la performance multicritère (limites de la transformation en monocritère), risque de non sélection des meilleurs individus.

L'algorithme NSGA II met en œuvre la **sélection par tournoi de foules**. Au sein de la population courante, à une génération donnée, les parents sont sélectionnés comme suit :

- Tirage aléatoire de deux individus, parmi ceux qui n'ont pas encore été sélectionnés pour la reproduction, à cette phase générationnelle ;
- Comparaison des deux individus et sélection du meilleur sur la base de la relation de dominance et de la distance de crowding, s'ils appartiennent au même front.

Chaque individu ne pouvant participer qu'à un seul tournoi, par génération, l'algorithme contrôle la pression de sélection ; il empêche les meilleurs individus de participer et de remporter plusieurs tournois et alors de remplir la population des parents. Cet opérateur préserve une certaine diversité génétique au sein de la population des parents.

Le second opérateur de sélection est la sélection pour le remplacement générationnel.

### 2.2.5.3 Sélection pour remplacement

La sélection naturelle conduit à la disparition progressive des individus les moins adaptés à leur milieu. Par la sélection pour le remplacement générationnel, les algorithmes génétiques sélectionnent les individus qui formeront la génération suivante parmi : les enfants générés en reproduction et la population courante. La taille de la population est généralement maintenue constante. Il est donc nécessaire de sélectionner les individus les plus performants.

Cependant, la recherche de solutions efficaces en optimisation multicritère approchée doit satisfaire à un double objectif de :

- Progression du front courant vers le front de Pareto théorique (Figure 30 (1)) ;
- Et d'étalement des solutions non-dominées identifiées sur ce front (Figure 30 (2)).

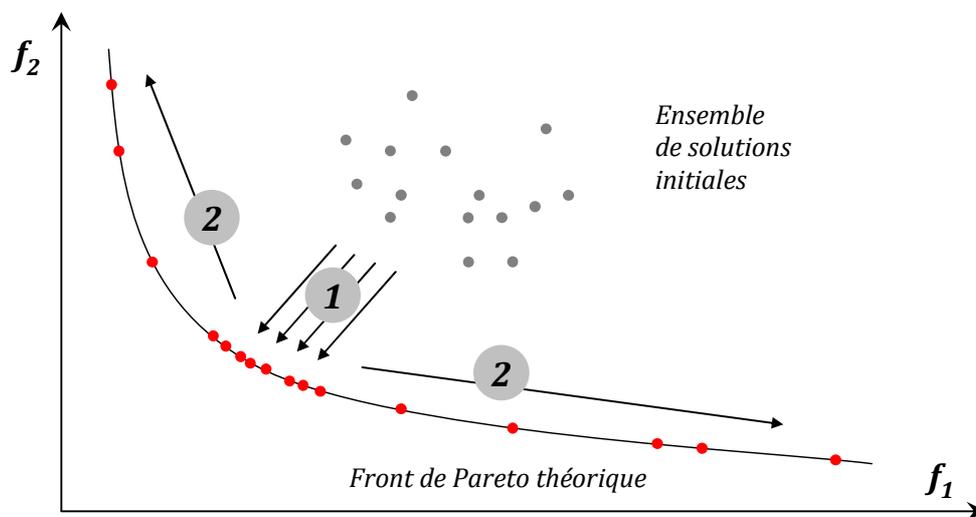


Figure 30. Deux objectifs pour la recherche de solutions multicritère (exemple d'un problème de minimisation à deux objectifs)

Le premier objectif cible l'identification de solutions de bonne qualité (1). Le second vise la diversification de la recherche, la description d'une hyper-surface représentant aussi largement que possible l'étendue des compromis accessibles (2).

Aussi, la sélection pour remplacement d'un algorithme génétique doit permettre de sélectionner des individus performants et décrivant l'étendue de l'hyper-surface de compromis. Dans le cas de l'algorithme NSGA II, élitisme et distance de crowding contribuent respectivement à satisfaire à ces deux objectifs intrinsèques de l'optimisation multicritère approchée.

La sélection pour remplacement de l'algorithme NSGA-II comprend deux étapes :

- **Classement par fronts de Pareto de la population :**

L'ensemble des individus de la population courante (dont sont issus les parents) et des enfants générés en reproduction, est classé par front de Pareto successifs ;

- **Génération de la population pour la génération suivante :**

Jusqu'à la sélection d'un nombre d'individus suffisant pour assurer le renouvellement générationnel (soit en général, le maintien d'une population de taille constante), la population de la nouvelle génération est remplie en parcourant les fronts de Pareto de rangs croissants. Si l'ensemble des solutions d'un même front ne peut pas être sélectionné, la distance de crowding est alors utilisée pour différencier les individus d'un même front et privilégier ceux des régions les moins « peuplées ».

Différentes procédures peuvent être mises en œuvre pour procéder au classement par fronts de Pareto des individus d'une population. La technique utilisée, l'algorithme de Kung et al. (1975), est présentée en annexe.

La sélection pour remplacement proposée dans l'algorithme NSGA II mobilise des mécanismes répondant à la double problématique d'identification de solutions de bonne qualité et de description de la surface de compromis sur toute son étendue. Le classement des solutions par front de Pareto, conjugué à l'évaluation des distances de crowding, permet de favoriser la progression du front et l'étalement des solutions sur le front de Pareto. Ce type de sélection est intrinsèquement élitiste ; une solution non-dominée ne peut disparaître que si une solution non-dominée et présentant une distance de crowding supérieure est générée au cours de la reproduction.

## 2.2.6 Opérateurs de variation

La sélection pour reproduction a abouti à la sélection de  $\lambda$  individus parents, au sein de la population courante. L'information génétique des parents est préalablement recopiée pour engendrer des individus enfants, qui à ce stade sont des clones directs de leurs parents.

L'application d'opérateurs de variation permet alors de créer, à partir de ces clones, des individus nouveaux, portant potentiellement une information génétique inédite. Ces opérateurs apportent donc de la diversité dans la population et permettent l'exploration de l'espace de recherche.

On distingue deux types d'opérateurs de variation :

- Les **opérateurs de croisement** : génération d'enfant(s) à partir de combinaison(s) d'information génétique contenue sur 2 parents au moins ;
- Les **opérateurs de mutation** : une partie du génotype de l'enfant est remplacée par une information génétique admissible et aléatoire ;

Ces opérateurs sont appliqués suivant des probabilités de croisement et de mutation, paramètres de l'algorithme génétique. Ces probabilités représentent le nombre de variations effectivement opérées sur 100 tentées, par exemple.

Les opérateurs de variation sont intimement liés à la nature du problème et au choix de représentation des individus. Aussi, la section 2.3 expose la représentation des individus retenue pour

l'application de l'algorithme génétique NSGA-II à la réhabilitation séquentielle des bâtiments, ainsi que les opérateurs de variation (croisements et mutations) associés.

### 2.2.7 Réglage des paramètres de l'algorithme

Les algorithmes génétiques conduisent à l'introduction de multiples paramètres :

- Nombre d'individus de la population courante ;
- Nombre de générations ;
- Nombre d'individus parents pour la reproduction ;
- Probabilités de croisement ;
- Probabilités de mutation.

Le réglage de ces paramètres est un des points sensibles des métaheuristiques. La littérature insiste sur l'intérêt des études de sensibilités pour procéder à ces réglages. Cependant, les algorithmes génétiques sont précisément mis en œuvre sur des problèmes complexes, pour lesquels les temps de simulation sont parfois très importants. Aussi, l'analyse de sensibilité demeure souvent inapplicable en pratique devant des temps de calcul prohibitifs (Berthiau et Siarry, 2001) et laisse place à un réglage empirique en accord avec des valeurs de la littérature.

Une borne inférieure à la taille de la population peut ainsi être calculée de manière à faire apparaître statistiquement tous les allèles considérés au moins une fois au sein de la population initiale, dans le cas de l'optimisation discrète. Il s'agit de la taille minimale de la population initiale telle que statistiquement toute solution de l'espace de recherche puisse être atteinte, par croisement seulement (Reeves, 1993).

La probabilité de croisement est en général prise de l'ordre de 0,8, pour chaque gène. La probabilité de mutation peut en première approximation être calée de manière à faire statistiquement apparaître un individu muté par génération. Les probabilités caractérisant les opérateurs de variation peuvent aussi être modifiées en cours de simulation pour favoriser, au cours de quelques générations, l'intensification de la recherche autour des solutions identifiées (forte probabilité de croisement évolutionnaire et faible taux de mutations) ou la diversification de l'exploration de l'espace de recherche (forte probabilité de croisement génétique et fort taux de mutations).

### 2.2.8 Convergence

L'optimisation génétique ou évolutionnaire est une optimisation approchée. De plus, il n'existe aucune preuve de convergence globale d'un algorithme génétique (Dréo et al., 2003). Les travaux sur la convergence reviennent à identifier les propriétés des opérateurs de variation. Les résultats actuels adressent principalement des cas particuliers.

En l'absence d'une connaissance précise du problème et de ses solutions, dont l'utilisateur des métaheuristiques est en général dépourvu, il est difficile d'estimer la distance entre le front de Pareto obtenu par simulation et le front global théorique du problème.

La comparaison des solutions obtenues par algorithme génétique à celles d'une méthode d'optimisation exacte permet alors de qualifier les performances de la méthode approchée. La programmation dynamique est ainsi étudiée au chapitre suivant.

### 2.2.9 Applications à la conception de bâtiments

Les algorithmes génétiques et évolutionnaires ont fait l'objet de différentes applications dans le secteur du bâtiment, tant en conception de sous-systèmes que pour la conception globale de l'ouvrage, tant en construction neuve qu'en réhabilitation.

Znouda et al. (2007) appliquent ainsi l'optimisation par algorithme génétique à la conception de bâtiments neufs méditerranéens. Les alternatives sont construites à partir de variables sur la composition des parois, la géométrie de la construction (compacité et taille des ouvertures), les protections solaires. Les différents critères sont cependant agrégés sous la forme de la somme des écarts relatifs par rapport aux solutions des problèmes monocritères résolus séparément.

Gama Caldas et Norford (2002) ou Coley et Schukat (2002) mettent également en œuvre des algorithmes génétiques, sous une forme monocritère, pour optimiser respectivement l'intégration de système de vitrage dans des bâtiments tertiaires ou la performance énergétique du bâtiment.

Wright et al. (2002) emploient un algorithme génétique (MOGA) non-élitiste et basé sur une fonction de fitness pour étudier des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation, sous des critères de coût d'investissement, d'usage et de confort thermique.

Wang et al. (2005) proposent une contribution sur la conception des bâtiments neufs. Les algorithmes génétiques employés sont mono ou multi-objectifs, avec ou sans contraintes. Les conceptions potentielles générées à partir de variables sur l'orientation, la compacité, les surfaces et types de vitrages, les technologies d'enveloppes sont évaluées sur deux critères : le coût global sur le cycle de vie et la consommation cumulée d'exergie. L'apport principal tient à la formalisation d'une approche objet de la représentation des chromosomes et de l'optimisation génétique pour la rendre transposable et opérationnelle sur une grande variété de problèmes.

Enfin, Pernodet (2011) couple un algorithme NSGA II à différents outils de simulation du bâtiment (TRNSYS, COMIS, Elodie) pour étudier les stratégies de rénovation de bâtiments tertiaires, constituées de mesures ciblant l'enveloppe, les systèmes et les régulations. Les objectifs ciblent les consommations énergétiques, les coûts, le bilan environnement et le confort thermique. Les solutions proposées sont des bouquets de travaux à l'échelle du bâtiment, le phasage n'est ici pas intégré.

### 2.2.10 Conclusion

Cette partie a permis de présenter le formalisme, le principe général et quelques opérateurs des algorithmes génétiques ou évolutionnaires.

Sur la base de différentes références bibliographiques, nous avons choisi d'appliquer un algorithme de type NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) à la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants. Cet algorithme met en œuvre la relation de dominance de Pareto, la distance de crowding et des stratégies élitistes pour les opérations de

sélection, pour la reproduction et le remplacement, ce qui permet d'identifier des solutions non-dominées, de bonne qualité et décrivant l'étendue des compromis accessibles à la décision.

A ce stade, les opérateurs de croisement et mutations n'ont pas été décrits, ils doivent en effet être adaptés à la représentation des solutions, choisie pour le problème d'application.

## 2.3 Application à la réhabilitation énergétique

L'application d'un algorithme génétique à un problème donné réclame de représenter les solutions potentielles sous la forme d'individus, constitués de chromosomes, et d'identifier des opérateurs de variations (croisements et mutations) adaptés à la représentation des solutions.

### 2.3.1 Représentation des solutions

Les individus, solutions potentielles du problème, sont ici des programmes de réhabilitation énergétique séquentiels. Ils définissent une séquence de mesures élémentaires de réhabilitation, à mettre en œuvre sur un bâtiment existant. Pour chaque mesure, plusieurs variantes potentielles sont étudiées. Pour rappel, les mesures de réhabilitation étudiées et leurs variantes ont été présentées en section 1.2.2.2, ou dans le cadre de l'étude de cas (1.4.3). Les programmes de réhabilitation correspondent formellement à des permutations de variables discrètes.

La représentation d'un individu par un génome, sous forme d'un ou plusieurs chromosomes, est particulièrement importante. En effet, c'est elle qui porte l'information nécessaire et suffisante à la caractérisation complète d'une solution donnée.

#### Représentation proposée

Dans le cas de la réhabilitation énergétique séquentielle, la représentation proposée doit donc permettre de coder le génotype de chaque solution, soit la combinaison de mesures à mettre en œuvre, ainsi que la séquence de travaux imposée par le programme.

Comme l'illustre la Figure 31, pour un programme de réhabilitation énergétique séquentielle à l'échelle du bâtiment, nous faisons le choix de représenter chaque solution par un couple de chromosomes :

- **Chromosome composition**

Ce chromosome est un ensemble de gènes, représentant chacun une variable d'action, soit une des mesures élémentaires de réhabilitation du bâtiment existant étudié.

Chaque gène porte un allèle, soit le numéro de la variante considérée pour la mesure de réhabilitation qu'il représente.

Nous avons choisi d'utiliser le codage génétique. Aussi, l'information portée par chaque gène est représentée par une chaîne de nombres binaires.

Pour rappel, le codage binaire de l'information génétique sur la composition permet d'utiliser des opérateurs de variation (croisement et mutation) opérant en interne au gène. Le croisement génétique permet alors, contrairement à la version évolution-

naire, d'engendrer des allèles enfants non présents chez les parents, ce qui contribue à la diversité génétique et à l'exploration de l'espace de recherche.

En pratique, le chromosome composition est donc un tableau de chaînes de binaires.

- **Chromosome ordre**

Les gènes du chromosome ordre représentent les positions relatives des différentes mesures élémentaires ou groupes de mesures de réhabilitation dans la séquence de mise en œuvre.

En optimisation libre, sans contrainte de financement à chaque phase, on impose arbitrairement une mesure par phase de travaux. Sinon, la solution de l'optimisation, du point de vue du phasage, est évidente et revient à mettre en œuvre toutes les mesures lors de la même phase.

Le chromosome ordre est implémenté sous la forme d'un tableau d'entiers codant, pour chaque mesure élémentaire de réhabilitation, le numéro de la phase de travaux où la mesure est implémentée.

Le nombre de gènes du chromosome composition dépend du nombre de variables de décision considérées dans l'analyse. Le code informatique implémenté laisse au concepteur le choix des mesures de réhabilitation étudiées.

Sur la Figure 31, il apparaît que la taille des chromosomes composition et ordre n'est pas nécessairement la même. En effet, plusieurs mesures élémentaires de réhabilitation peuvent être mises en œuvre lors de la même phase de travaux.

Par exemple, toutes les façades sont ici isolées thermiquement lors de la même phase. Le gène A du chromosome ordre représente ainsi la position relative dans la séquence d'implémentation de l'isolation thermique des façades Nord, Est, Sud et Ouest, dont les variantes sont respectivement codées par les gènes 01, 02, 03 et 04 du chromosome composition.

Les fenêtres sont ici également remplacées lors d'une phase unique, quelle que soit leur orientation. Enfin, la modification éventuelle de la taille des ouvrants intervient nécessairement lors du remplacement des fenêtres.

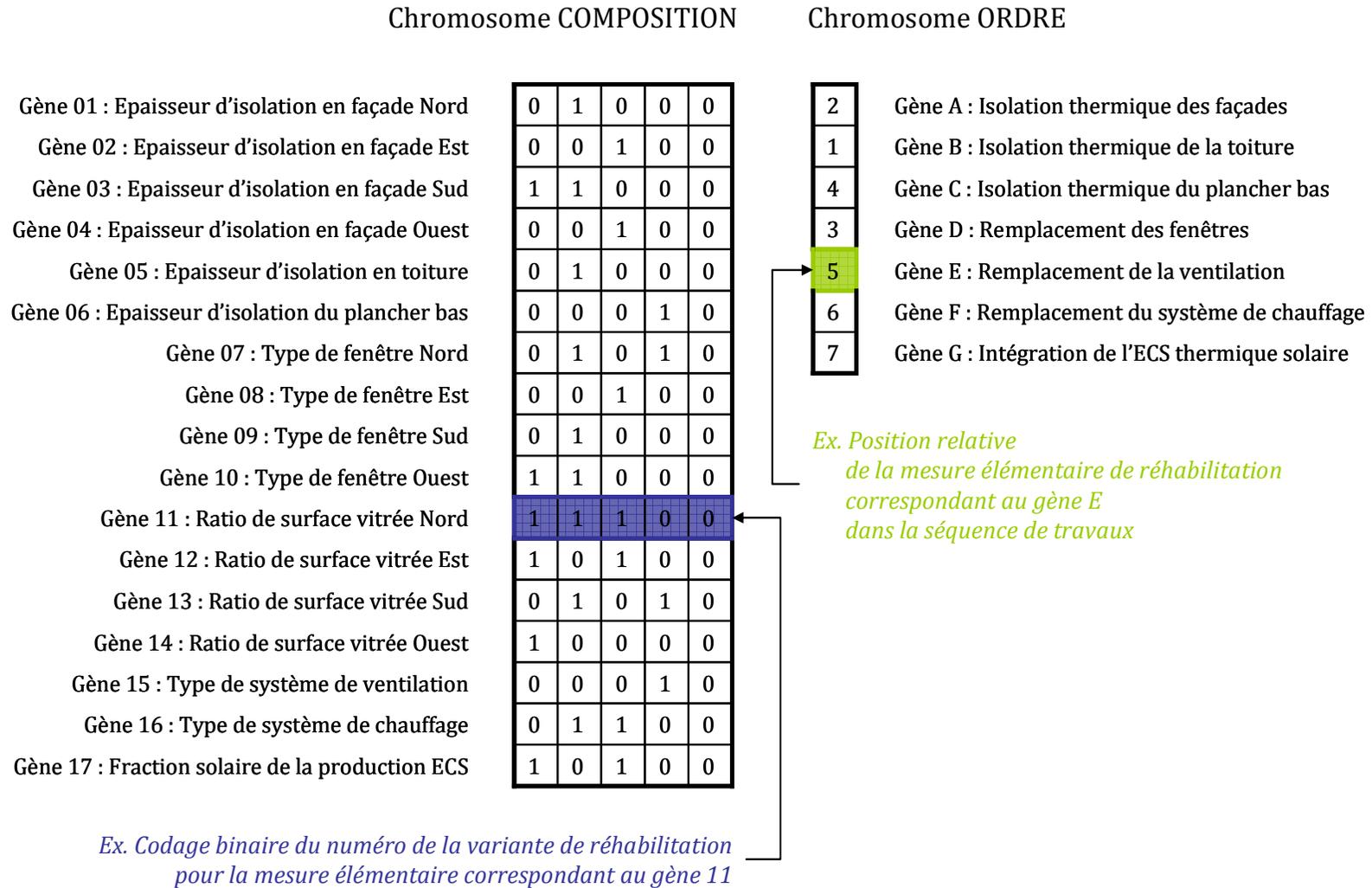


Figure 31. Représentation du génotype d'un programme de réhabilitation énergétique séquentielle

## Génotype et phénotype

Avant l'évaluation des solutions, le génotype (l'information génétique portée par les chromosomes) est traduit en phénotype, soit en programme de réhabilitation explicite, permettant d'accéder aux valeurs des paramètres physiques concernés.

### Unicité de la représentation

Si la représentation proposée suffit à décrire complètement les solutions du problème, il demeure important de signaler qu'il n'y a pas unicité sur la représentation des solutions.

Il aurait ainsi pu être proposé d'utiliser un unique chromosome. Sous la forme du chromosome composition présenté ci-dessus, la valeur des gènes coderait alors la variante considérée pour chacune des mesures de réhabilitation et l'ordre des gènes dans la séquence représenterait le phasage des travaux.

Cependant, l'implémentation pratique de l'algorithme associé et en particulier la traduction du génotype au phénotype aurait été plus laborieuse. De plus, l'utilisation de 2 chromosomes offre simplement une grande souplesse de définition des solutions : il est, par exemple, très simple d'introduire un regroupement de mesures lors de la même phase du programme.

A partir de la représentation définie pour les individus, des opérateurs de variation adaptés peuvent être identifiés. Croisements et mutations sont les moteurs de l'exploration de l'espace de recherche.

### 2.3.2 Variation par croisements

La littérature fait état de nombreux opérateurs de croisement (Spears, 1998) : croisements à un, deux ou  $n$  points de coupure, croisement uniforme, etc. Ces opérateurs induisent des degrés de liberté différents sur la modification des individus pendant la reproduction. Cependant, le bénéfice théorique du choix de tel ou tel opérateur est difficilement quantifiable. La simplicité est donc souvent la solution retenue.

Pour la réhabilitation séquentielle, les croisements implémentés utilisent le matériel génétique de deux individus parents pour créer deux individus enfants. Des croisements utilisant trois parents ou plus sont numériquement envisageables mais leur bénéfice ne semble pas évident.

Les croisements sont opérés selon une règle probabiliste. Si, suivant la probabilité de croisement, celui-ci ne se produit pas, alors le matériel génétique du parent P1 est recopié directement sur l'enfant E1 ; celui du parent P2 sur l'enfant E2.

Les variations par croisements opèrent à la fois sur le chromosome composition et sur le chromosome ordre. Sur le chromosome composition, le croisement est évolutionnaire et génétique. Les trois opérateurs de croisement suivants sont donc appliqués successivement sur le génotype des parents pour engendrer les enfants.

### 2.3.2.1 Croisement évolutionnaire sur chromosome composition

Le croisement évolutionnaire sur le chromosome composition est opéré suivant une règle de décision probabiliste (typiquement la probabilité de croisement considérée est de 0,8).

Si le croisement se produit pour une paire de parents donnée, on effectue alors le :

- Tirage aléatoire d'un point de coupure, entre les gènes du chromosome composition ;
- Echange de l'information génétique des parents, située au-delà du point de croisement défini, pour générer les enfants. L'enfant 1 reçoit alors les gènes du parent 1 situés avant le point de coupure et ceux du parent 2 pour les gènes situés après le point de coupure. Et réciproquement pour l'enfant 2.

Ce croisement évolutionnaire à un point de coupure est illustré sur la Figure 32 :

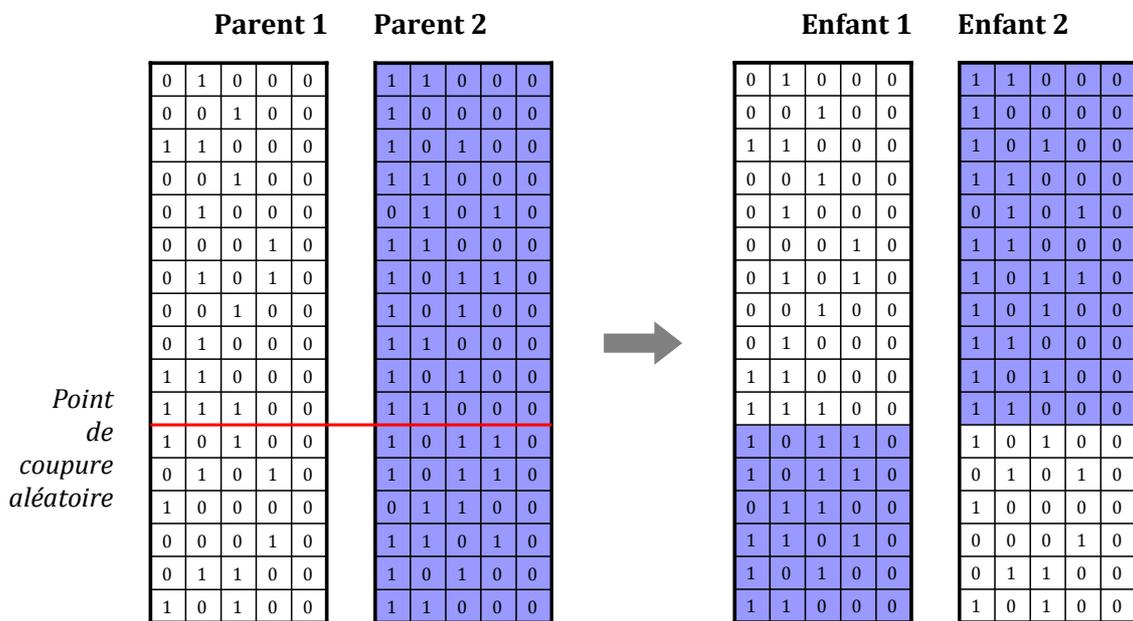


Figure 32. Croisement évolutionnaire sur le chromosome composition

### 2.3.2.2 Croisement génétique sur chromosome composition

A la différence du croisement évolutionnaire, échangeant des groupes de gènes, le croisement génétique sur le chromosome composition opère, sur chaque gène, une recombinaison des chaînes binaires.

Suivant une probabilité de croisement donnée, si celui-ci se produit, on effectue le :

- Tirage aléatoire d'un point de coupure, situé entre deux nombres binaires codant l'allèle du gène correspondant ;
- Echange de l'information génétique des gènes des parents, située au-delà du point de coupure défini, pour générer les gènes des enfants. L'enfant 1 reçoit alors le segment

binaires du parent 1 situé avant le point de coupure et celui du parent 2 situé après le point de coupure. Et réciproquement pour l'enfant 2.

Contrairement au croisement évolutif sur le chromosome composition, le croisement génétique sur les gènes du chromosome composition peut faire apparaître chez les enfants des allèles non-présents chez leurs parents.

Ce croisement génétique à un point de coupure est illustré sur la Figure 33, pour le gène X:

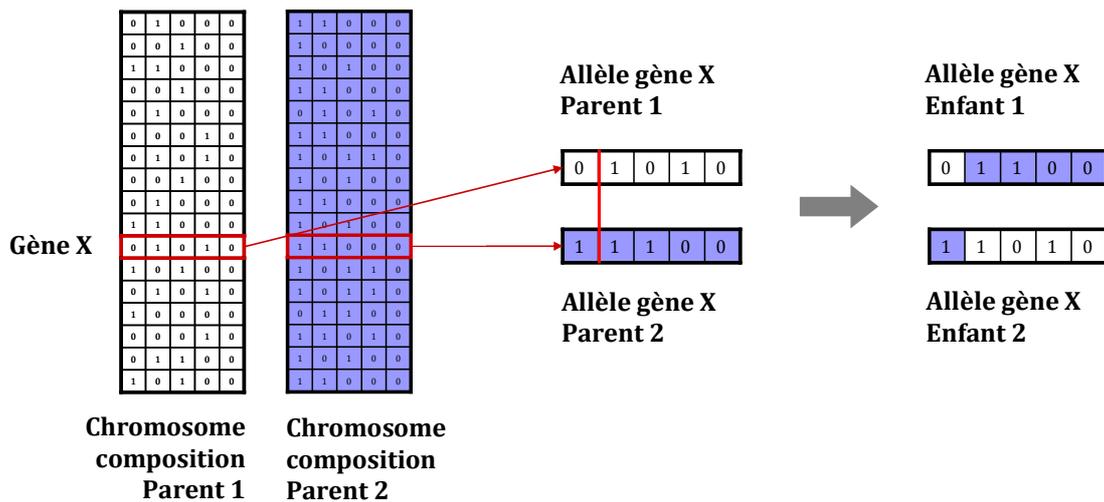


Figure 33. Croisement génétique sur un gène donné (gène X) du chromosome composition

### 2.3.2.3 Croisement sur chromosome ordre

Pour chaque individu, le chromosome ordre représente une permutation, soit la séquence des mesures de réhabilitation au sein du programme.

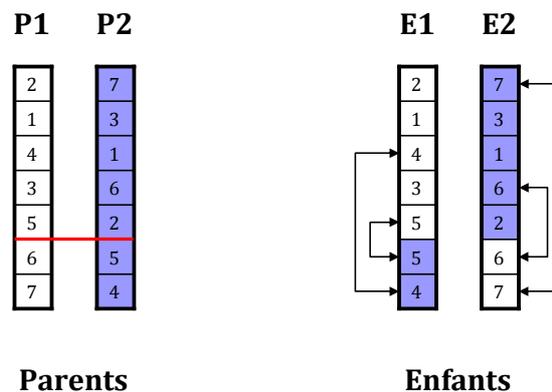


Figure 34. Exemple de permutations non-admissibles par un croisement à 1 point de coupure

Appliquer un croisement traditionnel, par exemple à un point de coupure aléatoire, ne peut être envisagé. Ce type d'opérateur génèrerait en effet de nombreux cas de permutations non valides :

plusieurs gènes recevant le même allèle. Sur la Figure 34, les enfants engendrés ne représentent pas des permutations complètes de 1 à 7 ; plusieurs de leurs gènes portent le même allèle. Or on considère à ce stade que deux groupes de mesures de réhabilitation ne peuvent être envisagés au cours de la même phase de travaux. Sinon, la solution de l'optimisation, du point de vue du phasage, est évidente et revient à mettre en œuvre toutes les mesures lors de la même phase.

On propose de mettre en œuvre le croisement de Davis (1985), qui est l'un des opérateurs les plus anciens et plus simples sur le croisement des permutations.

Suivant la donnée d'une probabilité de croisement, le croisement pour deux parents donnés se produit ou non. Si le croisement se produit, alors :

- Tirage aléatoire de 2 points de coupure, sur les chromosomes ordre des parents ;
- Les gènes du parent P1, situés entre les deux points de coupure, sont directement copiés sur l'enfant E1 ;
- A partir du second point de coupure et en retournant au début du chromosome ordre quand la fin est atteinte, on identifie les éléments du parent P2 qui n'apparaissent pas encore dans l'enfant E1. Ces éléments sont successivement copiés dans l'enfant E1, toujours en tournant à partir du second point de coupure ;
- Et réciproquement pour la construction de l'enfant E2.

Le croisement de Davis sur le chromosome ordre est illustré sur la Figure 35:

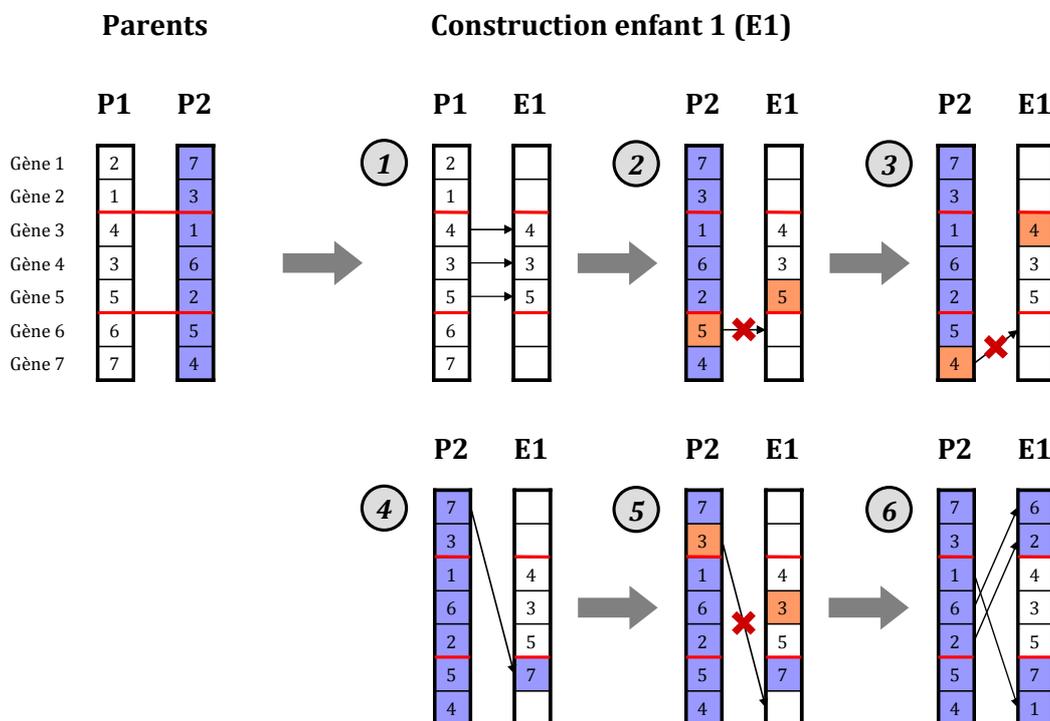


Figure 35. Croisement de Davis sur le chromosome 1 et construction de l'enfant E1

Sur cette figure, est présentée la construction séquentielle du chromosome ordre de l'enfant E1, à partir du génome de ses parents P1 et P2. Deux points de coupure sont tirés aléatoirement. L'information génétique du parent P1, située entre les deux points de coupure, est recopiée directement sur l'enfant E1 (1).

Ensuite, l'information génétique du parent P2 est exploitée pour compléter celle de l'enfant E1, au-delà du second point de croisement (2) (3). Sur l'exemple présenté, l'allèle porté par le parent P2 sur le gène 6, soit le 5, est déjà présent sur l'enfant E1, entre les deux points de croisement. Aussi, il ne peut être recopié (2). Il en va de même pour le gène 7 du parent P2 correspondant à la position 4 (3).

La fin du chromosome ordre de P2 étant atteinte, on repart alors des premiers gènes. L'allèle porté par le gène 1 du parent P2 n'étant pas présent sur l'enfant E1, il est donc recopié sur le premier gène non-renseigné de E1 à partir du second point de coupure, soit le gène 6 (4). La construction de E1 se poursuit en exploitant les gènes de P2, par ordre croissant (5) (6).

Le chromosome ordre construit est une permutation admissible ; chaque position de 1 à 7 est présente une et une seule fois.

Le croisement de Davis présente l'avantage de préserver, pour la construction de l'enfant E1, les positions absolues des gènes du parent P1 entre les points de coupure, et les positions relatives des gènes du parent P2 hors des coupures.

### 2.3.3 Variation par mutations

L'introduction des mutations vise l'exploration de l'espace de recherche au-delà du matériel génétique présent dans la population courante et donc le maintien de la diversité au sein de la population courante. Les mutations servent l'intensification de la recherche sur des régions potentiellement au voisinage d'un optimum local.

Ce sont des opérateurs de variation utilisant le matériel génétique d'un seul individu pour générer un nouvel individu. Les croisements ayant préalablement été opérés, on considère qu'elles sont appliquées sur le génome des enfants.

Les mutations sont opérées suivant une règle probabiliste, modélisée par une probabilité de mutation. Si une mutation donnée ne se produit pas, alors aucune transformation n'est appliquée sur le génome de l'enfant considéré.

Dans le cadre de la réhabilitation séquentielle, les mutations sont opérées sur le chromosome composition et sur le chromosome ordre. Pour le chromosome composition, la mutation peut être évolutionnaire sur le chromosome ou génétique sur chacun des gènes. Elle est généralement appliquée avec une probabilité très inférieure à celle des croisements.

#### 2.3.3.1 Mutations évolutionnaires sur chromosome composition

Lors de la reproduction, si la mutation évolutionnaire est appliquée à un enfant (suivant une probabilité de mutation donnée), alors on effectue le :

- Tirage aléatoire d'un gène du chromosome ordre ;
- Remplacement de l'allèle existant par un allèle admissible, tiré aléatoirement.

La mutation évolutionnaire du chromosome composition est illustrée sur la Figure 36.

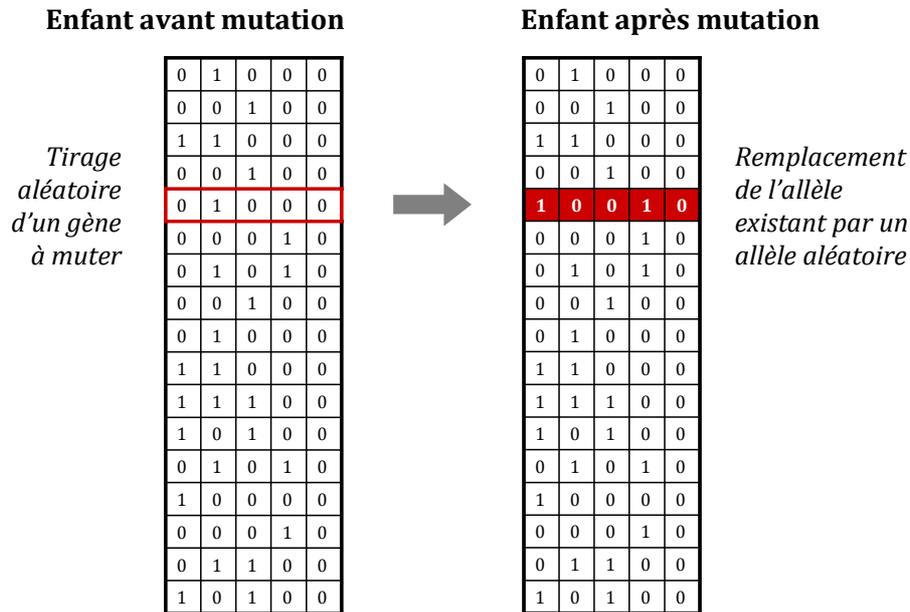


Figure 36. Mutation évolutionnaire sur le chromosome composition

### 2.3.3.2 Mutations génétiques sur chromosome composition

Pour chacun des gènes du chromosome composition, si la mutation génétique est appliquée à un enfant (suivant une probabilité de mutation donnée), alors on effectue le :

- Tirage aléatoire d'un nombre binaire dans la chaîne binaire du gène considéré ;
- Si le bit tiré vaut 0 alors il est assigné à 1. S'il vaut 1, alors il est assigné à 0.

La mutation génétique sur les gènes du chromosome composition est illustrée sur la Figure 37 :

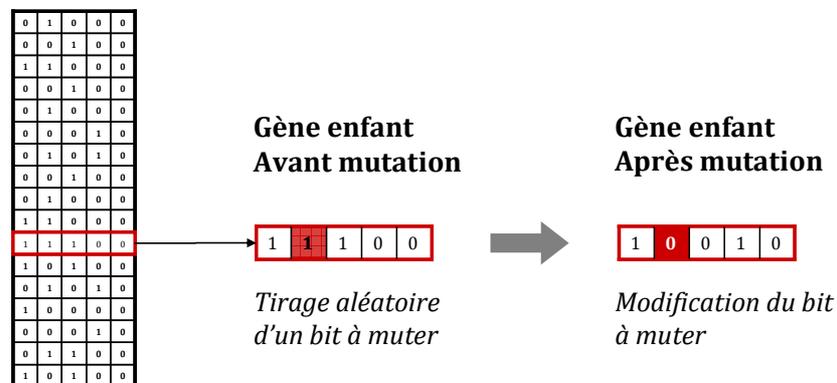


Figure 37. Mutation génétique sur un gène du chromosome composition

### 2.3.3.3 Mutations sur chromosome ordre

Suivant une probabilité de mutation donnée, si la mutation du chromosome ordre doit être opérée pour un enfant, alors on effectue successivement le :

- Tirage aléatoire de 2 gènes du chromosome ordre de l'enfant considéré ;
- Permutation des deux allèles.

La mutation sur le chromosome ordre est illustrée sur la Figure 38 :

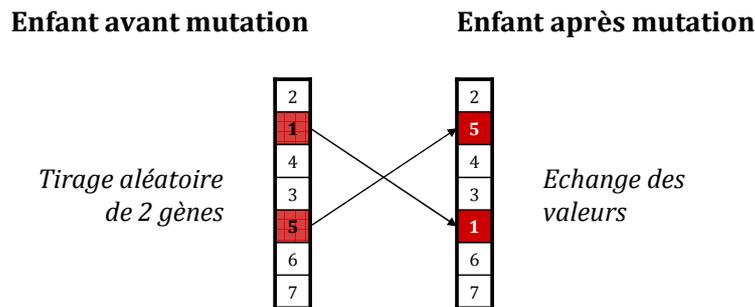


Figure 38. Mutation sur le chromosome ordre

### 2.3.4 Implémentation

Cette approche d'optimisation multicritère par algorithme génétique de type NSGA II a été implémentée en langage Delphi directement dans le logiciel de simulation thermique dynamique PLEIADES+COMFIE et couplée au modèle de cycle de vie présenté au chapitre 1 pour l'évaluation des performances des solutions.

Ce développement logiciel nous a permis alors d'envisager l'application à des cas d'étude.

En l'état actuel, le logiciel nécessite trois types d'entrées pour conduire l'optimisation génétique multicritère :

- Le modèle de bâtiment à l'état initial (avant réhabilitation) sous format .PLP tel qu'il est généré par l'interface de PLEIADES ;
- Le fichier texte .txt décrivant l'ensemble des mesures de réhabilitation pouvant être appliquées au bâtiment ainsi que les options, variantes de réhabilitation considérées pour chacune des mesures (dont un exemple est donné en annexe) ;
- Les paramètres utilisés pour l'algorithme génétique : taille de la population, taille pour la reproduction, probabilité des opérateurs de variations, etc. (porté en annexe).

Les développements suivants illustrent les potentialités en termes d'aide à la décision pour la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants, à partir de l'optimisation multicritère des programmes conduite par un algorithme génétique NSGA II.

## 2.4 Etude de cas

Nous présentons dans cette section l'application de cette approche à l'étude de la réhabilitation de la barre Grimaud (préalablement présentée en section 1.4). Il s'agit ici d'illustrer le fonctionnement et les performances de l'algorithme, ainsi que l'information qui peut être fournie aux décideurs. Des solutions efficaces sont recherchées sur l'espace de décision 1 (présenté en section 1.4.3). On rappelle que cet espace de recherche fini discret compte de l'ordre de 61 millions de solutions potentielles.

### 2.4.1 Paramètres de l'optimisation génétique

Le réglage des paramètres d'un algorithme génétique est un problème difficile et souvent mené empiriquement. Etant donnés les temps de simulation – liés à l'exécution de la simulation thermique dynamique – nous n'avons pas véritablement procédé à la recherche d'un jeu de paramètres optimal, par étude de sensibilité. Nous sommes inspirés des valeurs préconisées dans la littérature ou de l'expérience d'utilisateurs confirmés (Vincenti et al., 2010).

Les valeurs des paramètres retenues pour l'algorithme génétique sont les suivantes :

- Nombre d'individus dans la population courante : 200 ;
- Nombre d'enfants générés à chaque génération : 200 ;
- Probabilité de croisement génétique sur le chromosome composition : 80% ;
- Probabilité de croisement sur le chromosome ordre : 80% ;
- Probabilité de mutation génétique sur le chromosome composition : 1% ;
- Probabilité de mutation sur le chromosome ordre : 1%.

Une étude de cas avait été précédemment menée avec une population de 100 individus. Les résultats des simulations avec 200 individus ont montré une description plus précise des surfaces de compromis accessibles.

Une probabilité de croisement d'environ 80% correspond à l'ordre de grandeur classique des valeurs préconisées par la littérature (Vincenti et al., 2010).

La probabilité de mutation introduite est très faible, conformément aux préconisations de la littérature. Elle vise à générer statistiquement un nombre réduit d'individus mutés par génération. Il s'agit par là de contrôler les dérives vers l'exploration aléatoire de l'espace de recherche, à la manière des méthodes de Monte Carlo.

## 2.4.2 Progression vers des solutions efficaces

Avant de présenter les résultats de l'optimisation génétique en termes de programmes efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle, il nous semble intéressant d'illustrer le fonctionnement de l'algorithme et la progression dans la recherche de solutions efficaces. A défaut de convergence au sens mathématique, le lecteur intéressé pourra ainsi constater l'efficacité de la méthode dans la recherche de solutions non-dominées.

Comme l'ont souligné certains développements précédents, l'optimisation multicritère doit satisfaire au double objectif d'identification de solutions de bonne qualité et de diversification de la recherche, soit de description d'une hyper-surface représentant aussi largement que possible l'étendue des compromis accessibles.

Cependant, analyser la progression de l'algorithme vers des solutions efficaces revient à comparer les performances de l'ensemble des individus de la population courante, pour différentes générations. Cela impose de comparer des ensembles de vecteurs. Or, Zitzler et al. (2003) ont démontré que la comparaison de deux ensembles de points dans un espace multidimensionnel nécessite un nombre infini de mesures sur l'ensemble considéré.

Aussi, nous nous proposons simplement d'illustrer ici l'amélioration de la qualité des solutions et la diversification par l'évolution des performances optimales et moyennes sur chaque fonction objectif et la progression des fronts de Pareto.

### 2.4.2.1 Performance optimale et moyenne sur chaque indicateur

Nous avons choisi de caractériser l'amélioration itérative de la qualité des solutions identifiées par deux types d'indicateurs :

- La **valeur optimale**, atteinte sur chacune des fonctions objectifs, par les individus de la population courante (à chaque génération);
- La **valeur moyenne**, atteinte sur chacune des fonctions objectifs, par les individus de la population courante (à chaque génération);

Les figures suivantes représentent l'évolution de ces indicateurs sur les générations d'individus produites itérativement par l'algorithme génétique. Le comportement global de ces évolutions sur les 7 fonctions objectifs utilisées dans cette étude de cas (Figure 39) ou le détail des Figure 40 à Figure 45 suggèrent plusieurs remarques importantes.

#### Performance optimale

Il apparaît clairement que l'évolution de la performance optimale sur chaque objectif est une fonction décroissante du nombre de génération. Cette évolution répond au caractère élitiste de l'algorithme génétique implémenté ; les meilleurs individus identifiés sont conservés d'une génération sur l'autre : la meilleure performance atteinte au sein de la population est donc nécessairement une fonction décroissante du nombre de générations (problème de minimisation).

Sur la Figure 39, la performance optimale en termes d'inconfort thermique adaptatif en été est nulle pour toutes les générations. Dès la première génération, la population contient un individu,

au moins, représentant un inconfort thermique nul au sens de l'indicateur utilisé, sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment. Celui-ci est conservé par l'élitisme.

Les Figure 40, Figure 42 et Figure 44 soulignent que l'amélioration de la performance optimale est généralement rapide sur les premières générations (0 à 50). La progression relative est ensuite décroissante sur les générations suivantes.

### **Performance moyenne**

L'analyse de l'évolution, sur les générations, de la performance moyenne des individus de la population courante, pour chaque objectif, est plus complexe.

La recherche de solutions efficace doit permettre d'identifier globalement des solutions de bonne qualité et de décrire l'étendue de la surface de compromis.

Le premier de ces objectifs suggère une amélioration des performances moyennes sur les générations, sur chaque fonction objectif. C'est d'ailleurs la tendance observée sur le graphique de la Figure 41 ou pour les critères sur : la consommation cumulée d'énergie primaire, le potentiel de changement climatique, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques.

De plus, la performance moyenne sur les générations est généralement inférieure (meilleure en minimisation) à la performance moyenne sur la population initiale des individus (Figure 39). Cette remarque ne s'applique cependant pas à tous les critères de décision : inconfort thermique adaptatif en été.

On remarque que l'évolution de la performance moyenne n'est pas décroissante monotone avec les générations (Figure 39). Le second objectif visant à la diversification des solutions non-dominées identifiées, il impose de dégrader les performances de certaines solutions sur certains objectifs pour pouvoir progresser sur d'autres critères de décision.

On note ainsi, sur les générations 10 à 80, que la dégradation de la performance moyenne en termes de coûts d'investissement et de coût global sur le cycle de vie permet dans le même temps de progresser sur la moyenne des consommations cumulées d'énergie primaire (Figure 45, Figure 43 et Figure 41 respectivement). La description de la surface de compromis progresse alors vers une zone peu explorée.

Cette seconde exigence de diversification de la recherche explique donc que la moyenne puisse fluctuer et augmenter pour décrire au mieux la surface de compromis.

### **Stabilisation des évolutions**

Enfin, on note qu'une centaine de générations suffit, dans cet exemple, à stabiliser l'évolution des performances des solutions efficaces identifiées. Sur la base des indicateurs utilisés, il semble que la progression du front de Pareto identifié évolue alors relativement peu en termes de qualité des solutions identifiées et de description de la surface de compromis.

Cette dernière remarque est renforcée par l'analyse de fronts de Pareto sur les générations.

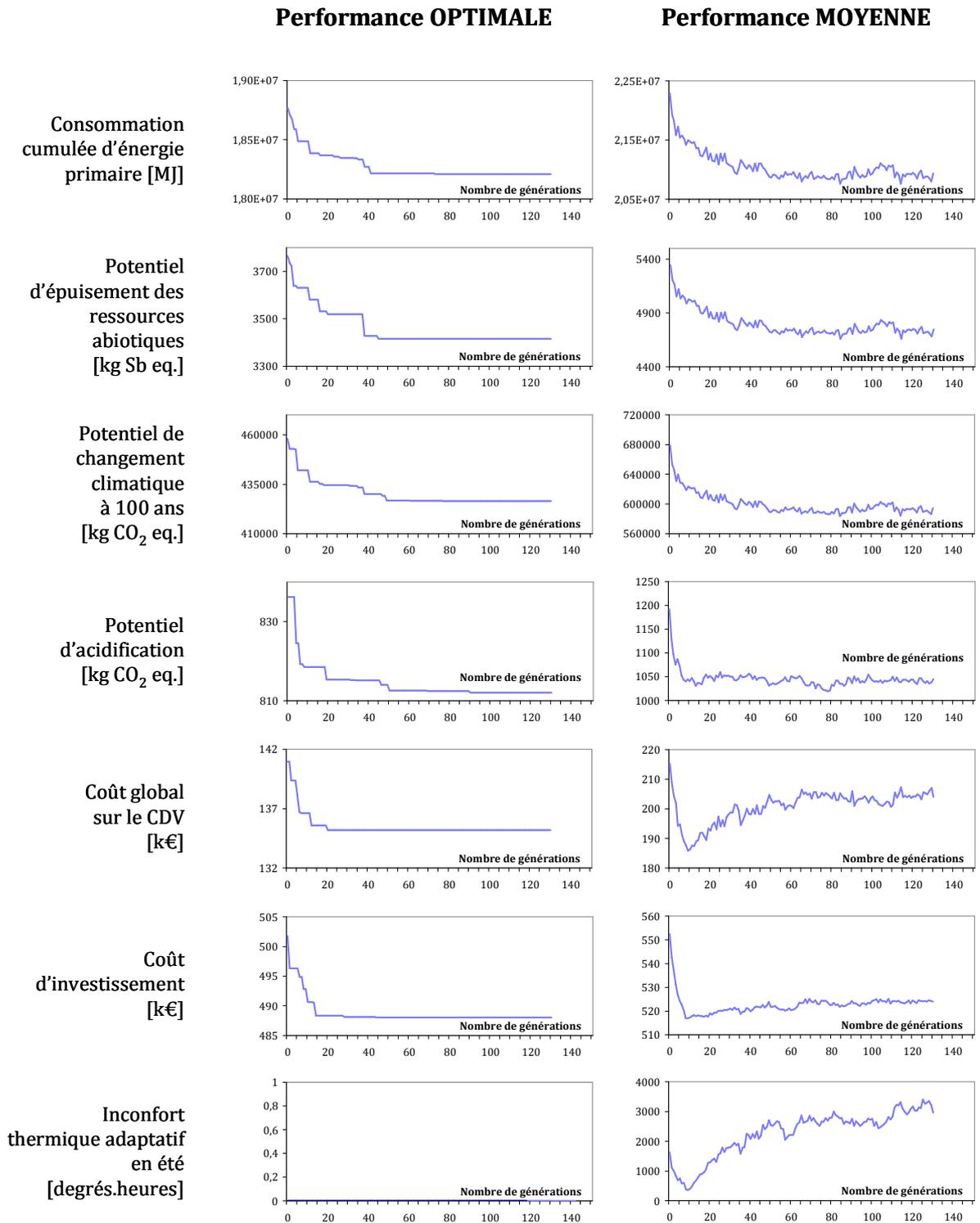


Figure 39. Evolution générationnelle des performances optimale et moyenne pour chaque objectif

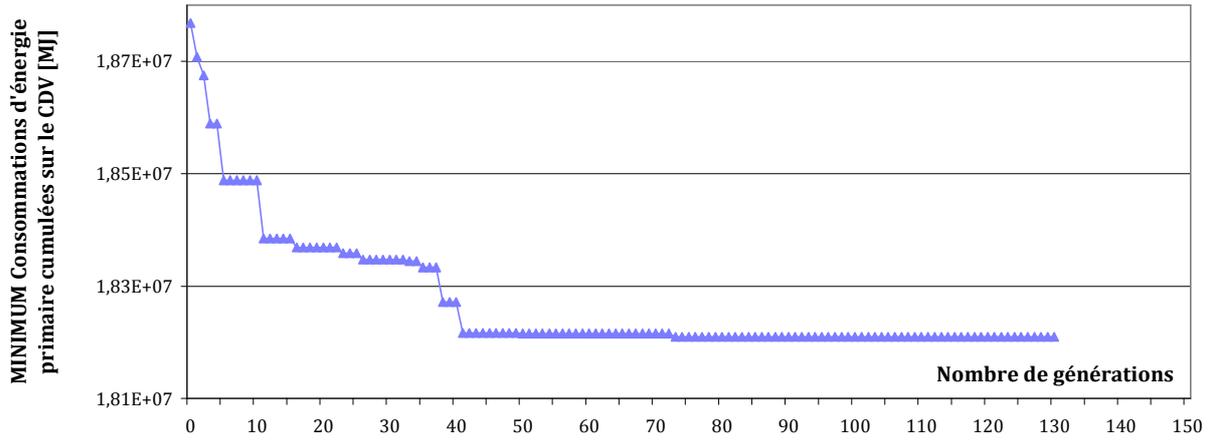


Figure 40. Evolution générationnelle de l'optimum en consommation cumulée d'énergie primaire, sur les individus de la génération courante.

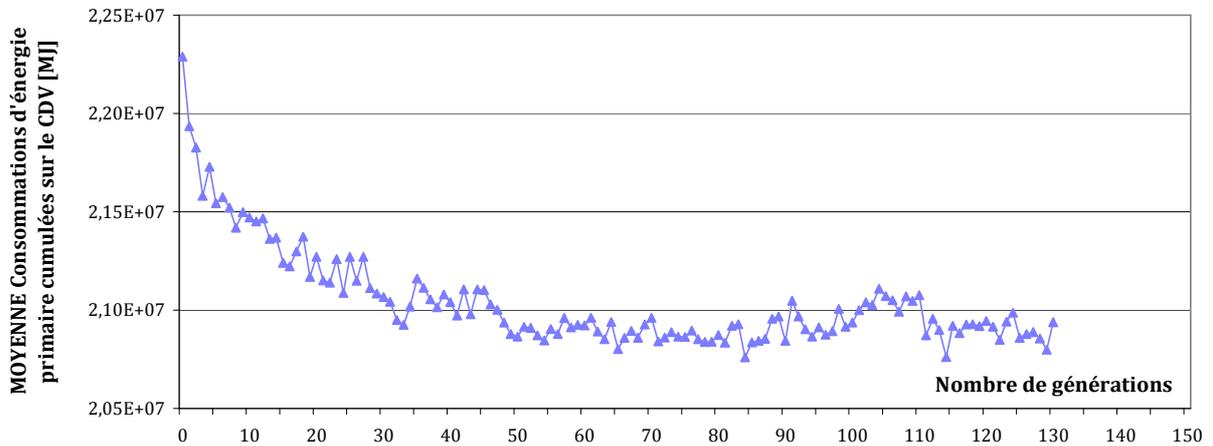


Figure 41. Evolution générationnelle de la moyenne en consommation cumulée d'énergie primaire, sur les individus de la génération courante.

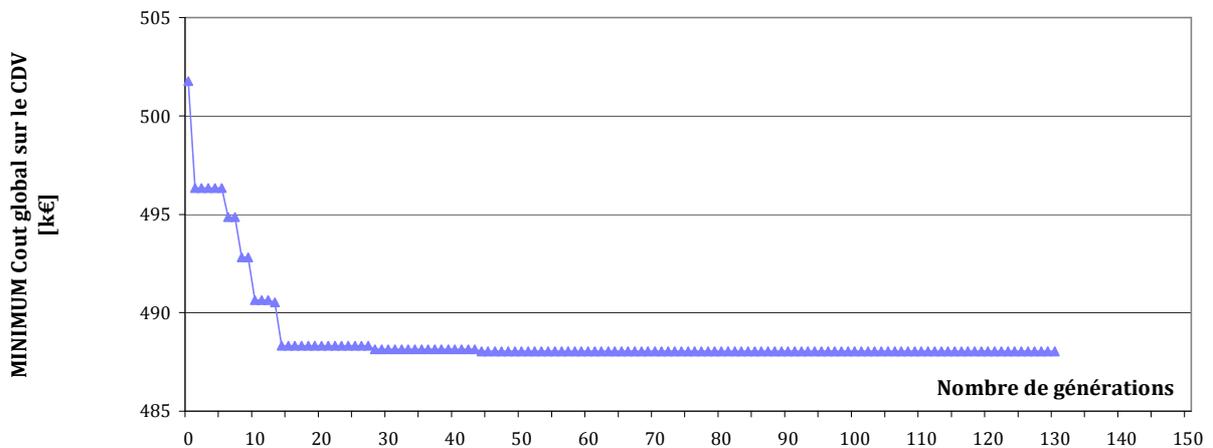


Figure 42. Evolution générationnelle de l'optimum en coût global sur le cycle de vie, sur les individus de la génération courante.

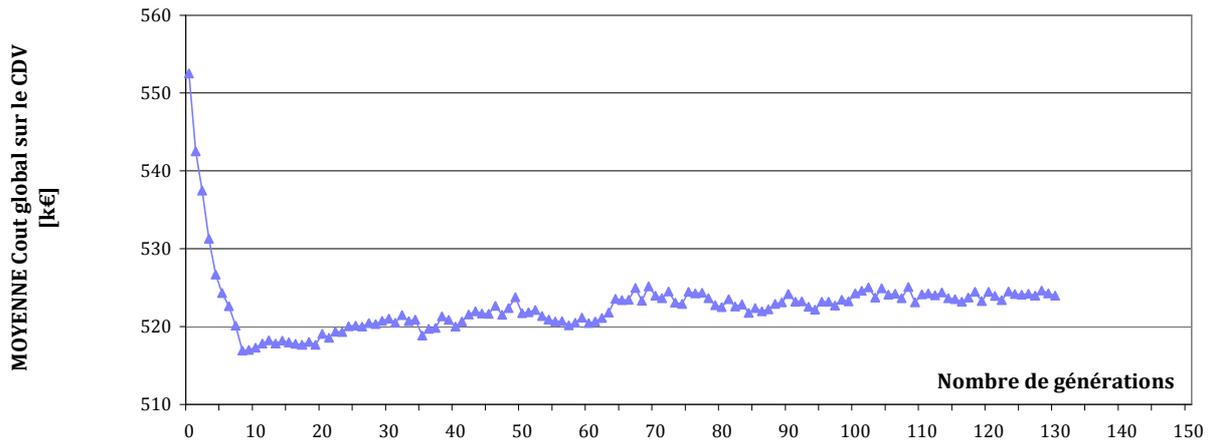


Figure 43. Evolution générationnelle de la moyenne en coût global sur le cycle de vie, sur les individus de la génération courante.

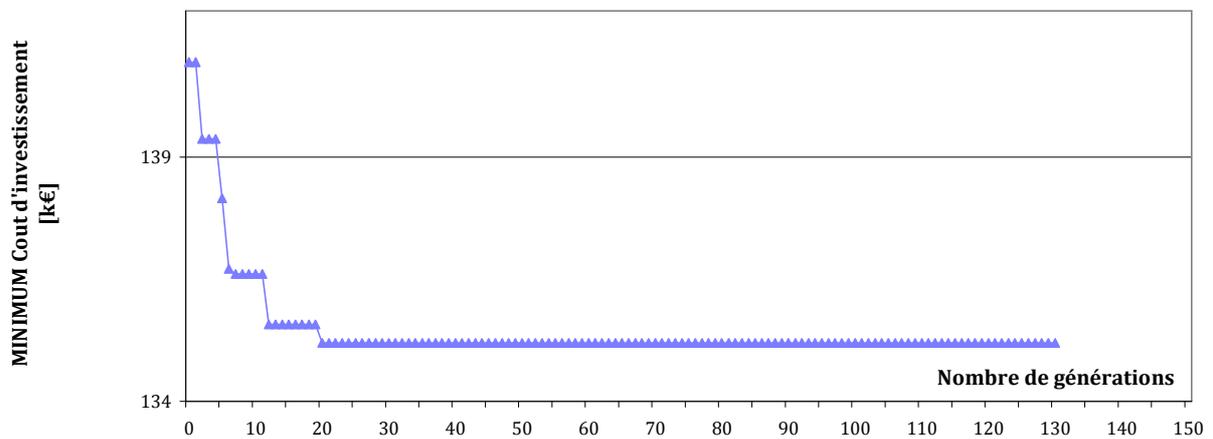


Figure 44. Evolution générationnelle de l'optimum en coût d'investissement, sur les individus de la génération courante.

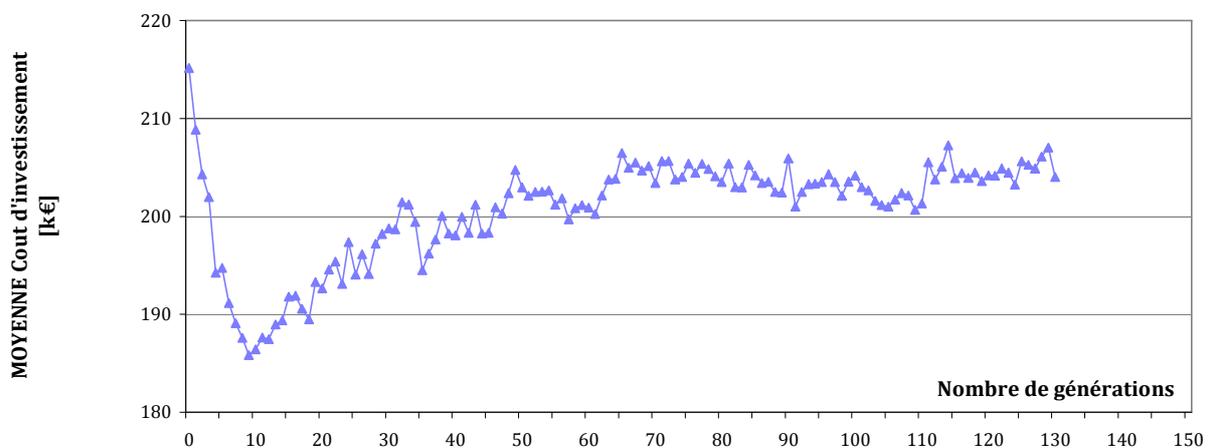
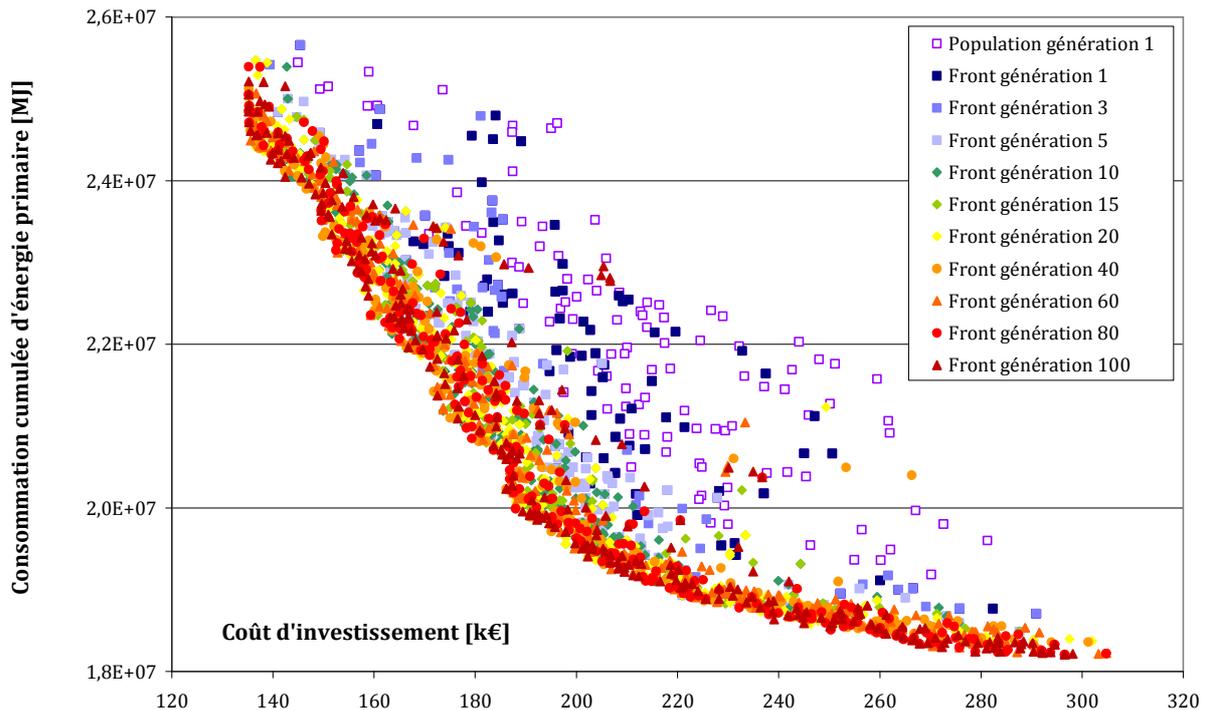


Figure 45. Evolution générationnelle de la moyenne en coût d'investissement, sur les individus de la génération courante.

### 2.4.2.2 Progression du front de Pareto

La comparaison de deux ensembles de points nécessitant une infinité de mesures, nous nous contentons ici de décrire qualitativement la progression des fronts de solutions non-dominées, sur les générations d'individus.

Avant de présenter les résultats pour une plus large diversité de critères de décision, voici l'exemple du compromis entre le coût d'investissement et la consommation cumulée d'énergie primaire sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment en réhabilitation, représenté en Figure 46.



**Figure 46. Progression des fronts de solutions non-dominées sur les générations d'individus, exemple du compromis entre coûts d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire**

Sur cette figure, sont représentés l'ensemble des solutions de la génération 1 ainsi que les solutions non-dominées de différentes générations d'individus (comprises entre 1 et 100).

On observe graphiquement que les itérations générationnelles permettent une progression effective de la surface de compromis tant en termes de qualité des solutions non-dominées que de description de l'étendue des compromis accessibles. L'amélioration de la qualité des solutions semble très nette entre les générations 1 à 10 et les suivantes. A partir de la génération 20, les progrès en termes de qualité des solutions apparaissent plus lents mais la diversification de la recherche s'intensifie.

Ainsi, même si en toute rigueur, il n'est pas possible de parler de convergence d'un algorithme génétique, l'expérience suggère une forme de « convergence exponentielle » de la méthode. Wright et Loosemore (2001) soulignent dans leurs travaux que quelques dizaines de générations suffisent à l'algorithme pour « converger » vers la « région » du front optimal théorique.

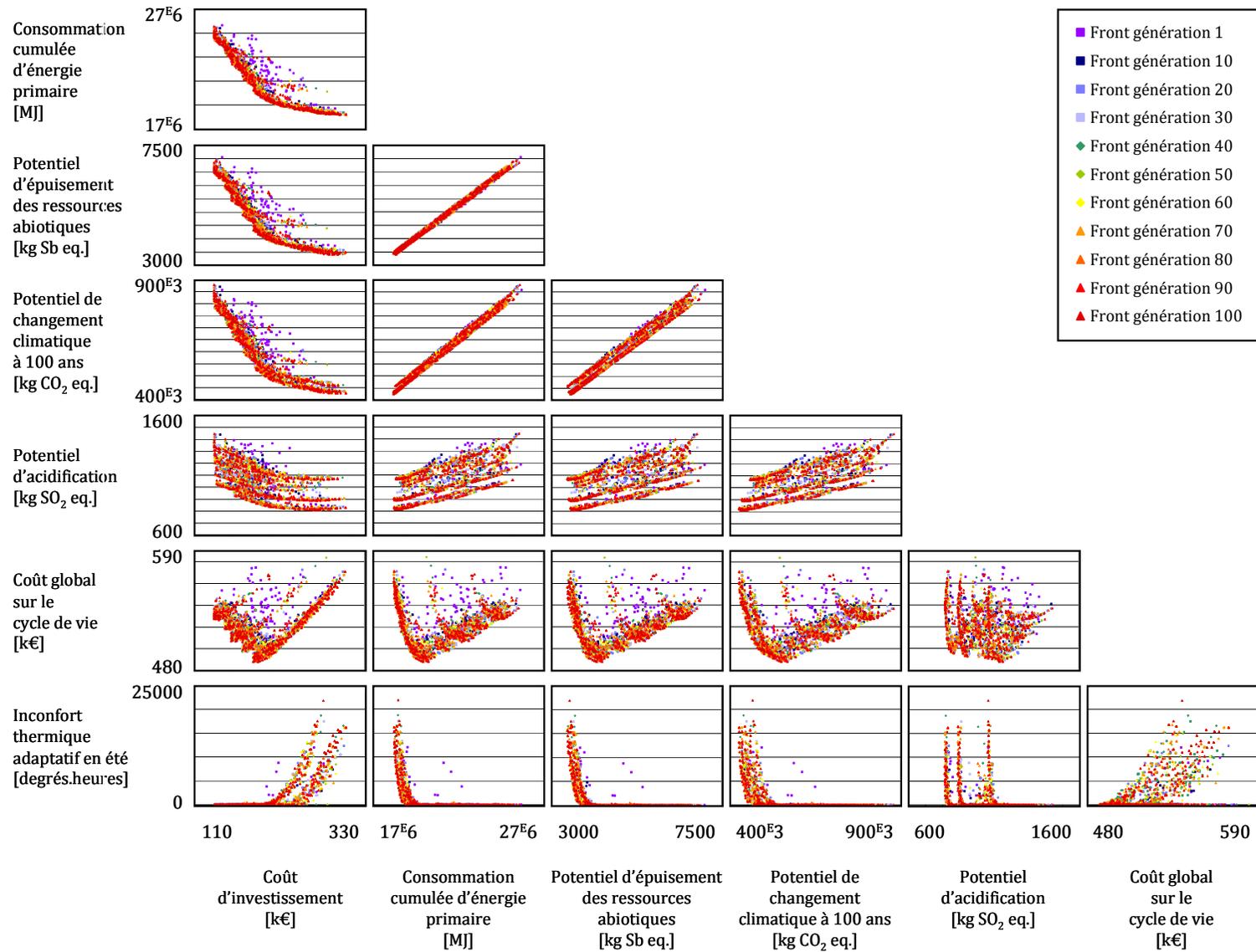


Figure 47. Evolution du front de Pareto sur différentes génération

### 2.4.3 Compromis en réhabilitation énergétique séquentielle

Les programmes de réhabilitation énergétique séquentielle de la barre Grimaud sont identifiés par l'algorithme NSGA II implémenté, à partir d'une population initiale aléatoire de solutions. Les résultats sont ici présentés sous la forme des fronts de solutions non-dominées pour différentes générations d'individus, décrivant la surface de compromis accessible à la décision.

Le résultat de l'optimisation génétique multicritère est une surface de compromis, ici en dimension 7, qu'il est difficile de visualiser et d'analyser sans recourir à ses projections. Aussi, les solutions obtenues après 100 générations sont représentées sur les 21 graphes à deux dimensions définis par les couples de fonctions objectifs parmi les 7 critères considérés (Figure 47). Sur les différents graphiques, les solutions non-dominées des générations 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 et 100 sont figurées par leur projection sur les plans définis par deux critères. Les analyses précédentes ont montré que le front de Pareto évoluait peu au-delà de la génération 100.

La Figure 47 permet d'établir différents constats sur la forme des compromis :

- Tous les graphes concernés (dont la Figure 48) soulignent le nécessaire compromis entre les coûts d'investissement et la réduction des impacts sur l'Environnement parmi : la consommation cumulée d'énergie primaire, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, le potentiel de changement climatique à 100 ans, le potentiel d'acidification. Grossièrement, plus un programme de réhabilitation contribue à la réduction de ces impacts sur l'Environnement, plus il coûte cher, sur l'espace de recherche considéré dans cette étude de cas.
- Certaines des solutions non-dominées, les moins coûteuses en investissement et représentant les impacts les plus élevés sur l'Environnement, apparaissent clairement dominées en termes de compromis entre le coût global sur le cycle de vie et les autres critères de décision. On note d'ailleurs qu'il existe une solution correspondant au minimum global en termes de coût global sur le cycle de vie (solution **B** sur la Figure 49). Ainsi, sur le cycle de vie considéré (50 ans à partir des premières opérations de réhabilitation), les solutions les plus coûteuses en investissement ou les moins efficaces énergétiquement ne représentent pas l'optimum en termes de coût global.
- Une forme de corrélation est relativement identifiable entre trois indicateurs environnementaux : la consommation cumulée d'énergie primaire, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques et le potentiel de changement climatique à 100 ans. Dans une moindre mesure, plusieurs relations linéaires semblent également caractériser les compromis de ces 3 critères de décision avec le potentiel d'acidification. Nous revenons sur l'étude de ces corrélations en section 0.
- Enfin, il apparaît également une forme de compromis entre le niveau d'inconfort thermique adaptatif en été et l'ensemble des autres critères de décision. Les solutions les plus efficaces énergétiquement représentent des niveaux d'inconfort supérieurs en degrés-heures, et ce même dans le cadre du scénario d'occupation défini intégrant l'occultation des ouvertures pendant les journées des mois de juin, juillet et août ainsi que la surventilation nocturne. Il est toutefois important de signaler que ces niveaux d'inconfort sont ici cumulés sur 50 ans et calculés par rapport à une température adaptative. Ils représentent au maximum 12 heures par an pour lesquelles les tempé-

ratures intérieures s'avèrent supérieures à 28°C. Les programmes de réhabilitation énergétique identifiés comme solutions efficaces garantissent donc le confort thermique en été. Cette dernière remarque est toutefois à considérer dans le cadre des hypothèses suivantes : conditions climatiques parisiennes, hors période de canicule, occultation des volets pendant les heures les plus chaudes et surventilation nocturne.

NB. En période de canicule, l'isolation thermique peut contribuer à limiter les surchauffes, de manière passive, à condition d'avoir stocké suffisamment de fraîcheur à l'intérieur de l'habitat. Aussi des études complémentaires pourront être menées selon ces régimes exceptionnels de sollicitation thermique.

Sur ces fronts de Pareto, trois programmes de réhabilitation particuliers peuvent être identifiées : solutions **A**, **B** et **C**, reportées systématiquement sur les Figure 48 à Figure 51. Ces trois solutions permettent d'illustrer les remarques précédentes. Elles correspondent respectivement aux programmes suivants de réhabilitation énergétique séquentielle :

	<b>Classe de mesure</b>	<b>Alternatives de réhabilitation</b>	<b>N° Phase</b>
<b>A</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 300 mm	2
	Toiture	ITE polyuréthane : 300 mm	3
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 250 mm	5
	Ouvertures	Triples vitrages basse émissivité (lame Argon)	6
	Ventilation	Double flux	7
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	1
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%	4
	<b>Classe de mesure</b>	<b>Alternatives de réhabilitation</b>	<b>N° Phase</b>
<b>B</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 120 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 100 mm	2
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	3
	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	5
	Ventilation	Double flux	6
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	7
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%	4
	<b>Classe de mesure</b>	<b>Alternatives de réhabilitation</b>	<b>N° Phase</b>
<b>C</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm	2
	Toiture	ITE polyuréthane : 100 mm	1
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	5
	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	3
	Ventilation	Hygro-B	6
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	7
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%	4

Tableau 26. Détail des programmes de réhabilitation A, B et C

Définis conformément à l'espace de recherche 1, les programmes de réhabilitation efficaces ne mettent pas nécessairement en œuvre le même type d'ouvertures (double ou triple vitrage) sur l'ensemble des façades (Nord, Est, Sud, Ouest). On note ici que les solutions **A**, **B** et **C** sont caractérisées par un unique type de vitrage, sur toutes les façades.

La Figure 48 souligne le compromis entre le coût d'investissement et la consommation cumulée d'énergie primaire sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment à réhabiliter. Les solutions les plus efficaces en termes de réduction des consommations d'énergie primaire s'avèrent également être les plus chères du point de vue des investissements (solution **A**). La solution **A** met en œuvre séquentiellement :

1. Remplacement du système de chauffage existant par une chaudière gaz à condensation ;
2. ITE des façades (laine minérale,  $R = 7,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) ;
3. ITE de la toiture (polyuréthane,  $R = 10 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) ;
4. Intégration d'une production solaire thermique d'ECS (fraction solaire : 75%)
5. ITE du plancher bas (polystyrène extrudé,  $R = 8,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ) ;
6. Remplacement des menuiseries préexistantes par des fenêtres triple vitrages ;
7. Ventilation double flux.

Ces mesures élémentaires de réhabilitation ont été définies en section 1.4.3.

Sur le même graphique, la solution **B** représente une solution de compromis, caractérisée par une réduction significative des coûts d'investissement pour une augmentation limitée de la consommation cumulée d'énergie primaire. La solution **B** se distingue de la solution **A** par :

- Un phasage différent : le système de chauffage existant est remplacé lors de la dernière phase de réhabilitation ;
- Des niveaux d'isolation bien moindres : la résistance thermique de l'enveloppe isolée par l'extérieur atteint  $2,9 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,  $3,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  et  $3,4 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  pour les façades, la toiture et le plancher bas, respectivement ;
- Le remplacement des menuiseries existantes par du double vitrage.

La solution **C** représente quant-à-elle le minimum en termes de coût d'investissement mais est caractérisée par un des plus bas niveaux de performance énergétique. Logiquement, et comme le détaille le Tableau 26, le programme de réhabilitation **C** est associé aux plus bas niveaux d'isolation, aux équipements les moins performants et à la plus faible fraction solaire de production d'ECS, parmi les variantes de réhabilitation de l'espace de recherche 1.

L'analyse des performances de ces trois solutions sur les graphiques suivantes est alors riche d'enseignements.

Les solutions les plus efficaces énergétiquement (**A**) ne sont toutefois pas optimales en termes de coût global sur le cycle de vie de 50 ans considéré à partir du début des travaux de réhabilitation (Figure 49). Au contraire, la solution intermédiaire **B** représente le minimum global en coût global ; la moindre performance énergétique en usage est compensée par la réduction des investissements en réhabilitation. Du point de vue du compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coûts global, les solutions les moins performantes énergétiquement, telles que le programme de réhabilitation **C**, ne sont pas efficaces au sens de Pareto.

Par ailleurs, on note sur la Figure 50 que la différence de performances entre les solutions **A** et **B** sur les indicateurs environnementaux (comme la consommation cumulée d'énergie primaire, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques ou le potentiel de changement climatique à 100 ans) demeure relativement faible par rapport à l'écart entre **A** et **C** ou entre **B** et **C**.

Enfin, suivant les hypothèses retenues dans cette simulation, les solutions **B** et **C** représentent 0 degrés-heures d'inconfort sur les 50 années du cycle de vie, garantissent un niveau de confort thermique en été supérieur à la solution **A**, même si le niveau de **A** demeure raisonnable.

Différant par la combinaison de mesures de réhabilitation ainsi que par le phasage des travaux, les programmes **A**, **B** et **C** représentent trois optimum locaux différents (sur au moins un des critères de décision) et donc trois formes distinctes de préférence sur les critères de décision.

Ces analyses ont permis d'exhiber les relations de compromis entre les différents critères de décision considérés dans cette étude de cas. Les programmes de réhabilitation **A**, **B** et **C** ont permis d'illustrer ces compromis et de préciser les combinaisons de mesures de réhabilitation et le phasage associés à ces trois solutions particulières. Dans la section suivante, nous proposons de revenir sur la relation entre performances, compromis et mesures élémentaires de réhabilitation.

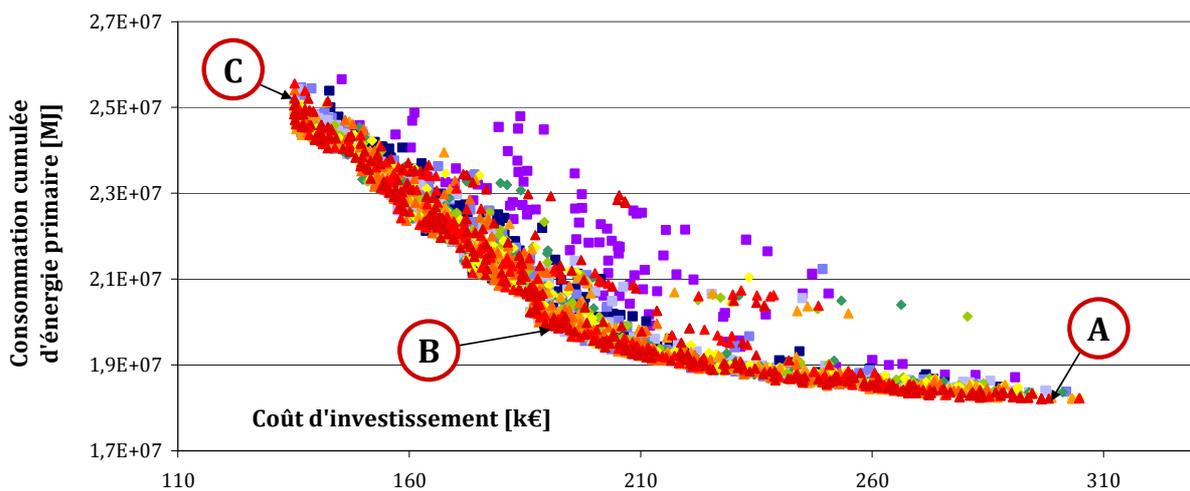


Figure 48. Fronts de Pareto entre le coût d'investissement et la consommation cumulée d'énergie primaire

■ Front génération 1	■ Front génération 10	■ Front génération 20	■ Front génération 30
◆ Front génération 40	◆ Front génération 50	◆ Front génération 60	▲ Front génération 70
▲ Front génération 80	▲ Front génération 90	▲ Front génération 100	

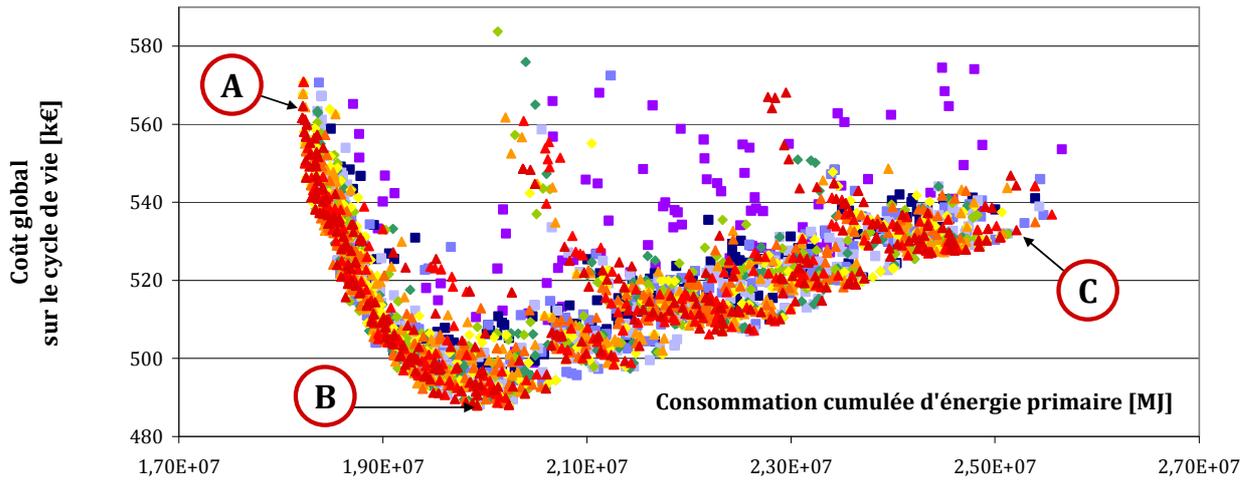


Figure 49. Fronts de Pareto entre le coût global et la consommation cumulée d'énergie primaire

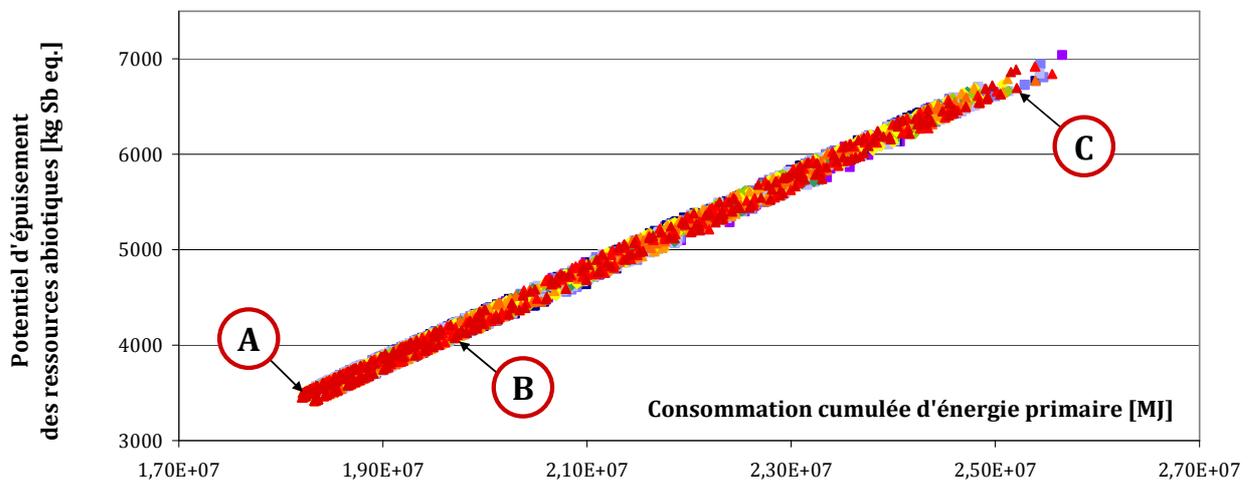


Figure 50. Fronts de Pareto entre la consommation cumulée d'énergie primaire et le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques

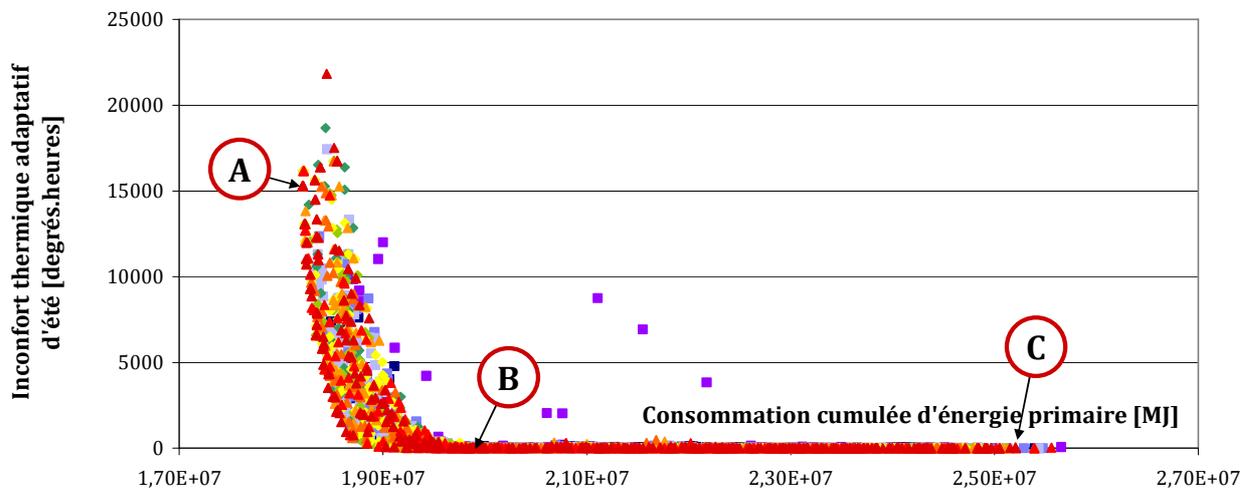


Figure 51. Fronts de Pareto entre la consommation cumulée d'énergie primaire et l'inconfort thermique adaptatif en été

#### 2.4.4 Compromis et mesures élémentaires de réhabilitation

Sur la surface de compromis décrite par les solutions non-dominées de la génération 100, nous nous proposons d'illustrer le positionnement des différentes mesures élémentaires. A chaque niveau de performance, il est alors possible d'identifier les mesures élémentaires pouvant être mise en œuvre. Ce type d'analyse contribue à l'aide à la conception en fournissant un éclairage sur la relation entre le type de variantes mise en œuvre (pour chacune des mesures de réhabilitation) et les performances des programmes constitués à partir de ces composants.

Sur les Figure 52 à Figure 56, les solutions non-dominées sont ainsi différenciées en fonction de l'épaisseur de laine de verre (LV) mise en œuvre pour l'isolation thermique par l'extérieur (ITE). Ici, l'épaisseur d'isolant varie entre 100 et 300mm.

Sur l'ensemble de ces figures, il apparaît que les solutions non-dominées performantes sur les différents critères de décision ne mettent à nécessairement en œuvre des niveaux d'isolation thermique très élevés. Au-delà de 150mm, les surcoûts économiques d'investissement ne sont d'ailleurs plus compensés en termes de coût global sur les 50 années du cycle de vie modélisé (dans le cadre des hypothèses retenues).

On remarque par ailleurs que certaines solutions efficaces, mettant en œuvre des niveaux élevés d'isolation thermique sur les façades, ont été maintenues dans la population malgré des performances moyennes sur la plupart de critères. Ce constat s'explique par les performances de ces mêmes solutions en termes de confort thermique où elles représentent l'optimum (soit un inconfort thermique de 0 degrés-heures sur 50 ans).

Les compromis ne sont pas représentés pour tous les indicateurs. Les résultats présentés sont cependant représentatifs des comportements observés sur les autres critères de décision.

Nous n'avons pas présenté ici l'étude des performances des solutions non-dominées en fonction des variantes d'isolation de la toiture ou du plancher bas, tant les conclusions sont similaires à celles de l'isolation thermique de l'enveloppe.

En ce qui concerne les types de vitrages, l'analyse des Figure 57 à Figure 59 souligne que si les solutions les plus performantes en termes de consommation cumulée d'énergie primaires mettent en œuvre le triple vitrage sur toutes les façades, ces solutions sont relativement éloignées des programmes de réhabilitation optimaux en termes de coût global. Des solutions à double vitrage sur toutes les orientations ou mixtes (utilisant le triple vitrage au nord et le double vitrage sur les autres façades, par exemple) affichent des performances environnementales élevées et un meilleur résultat en coût global sur le cycle de vie étudié.

Les conclusions pouvant être tirées des Figure 60 à Figure 62 sont assez nettes. Si la ventilation de type hygro-B permet de limiter les investissements, les solutions efficaces en termes de bilan environnemental et coût global ont recours ici à la ventilation double flux.

Un constat similaire s'applique à la fraction solaire de production de l'eau chaude sanitaire (ECS). Les Figure 63 à Figure 65 révèlent que l'installation d'une surface de capteurs solaires permettant de couvrir 75% des besoins moyens annuels en ECS coûte certes plus cher à l'investissement et en impact à la production mais que les surcoûts sont compensés en termes de coût global et de performances environnementales, sur les 50 années du cycle de vie considéré. La durée de vie du système solaire thermique est alors supposée égale à 50 ans.

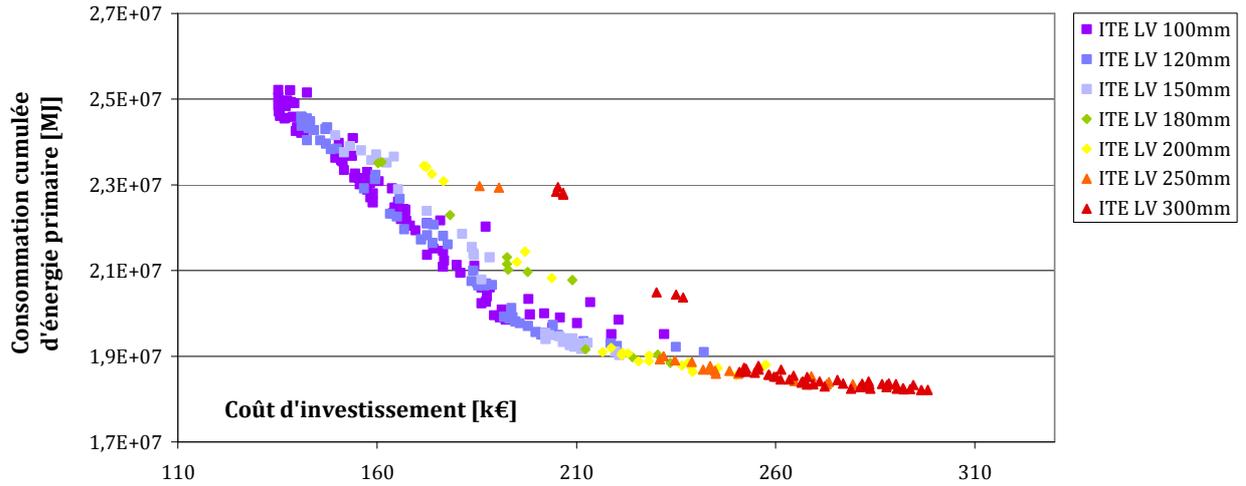


Figure 52. Isolation des façades et compromis investissement/énergie

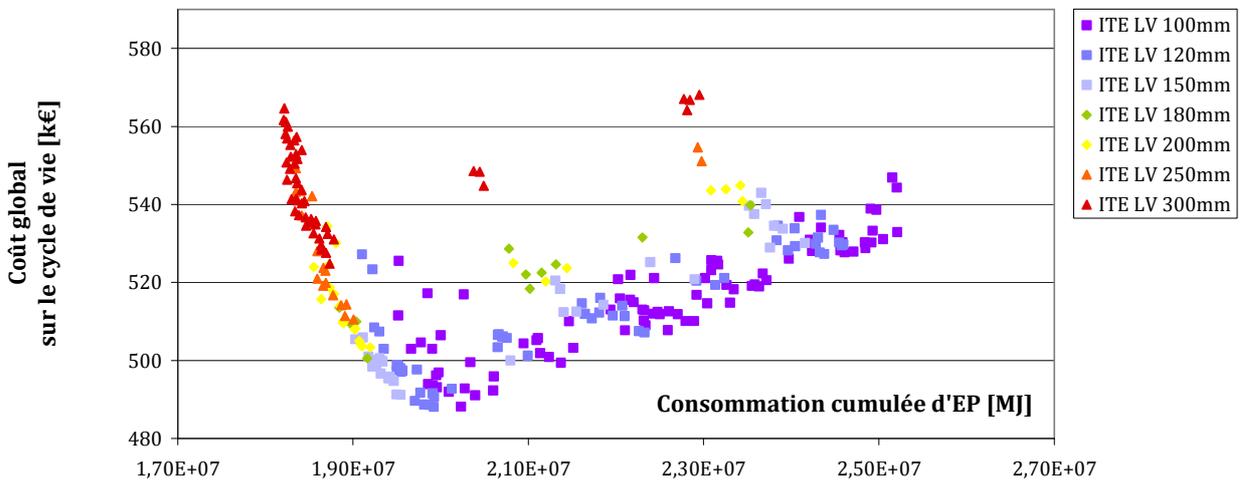


Figure 53. Isolation des façades et compromis énergie/coût global

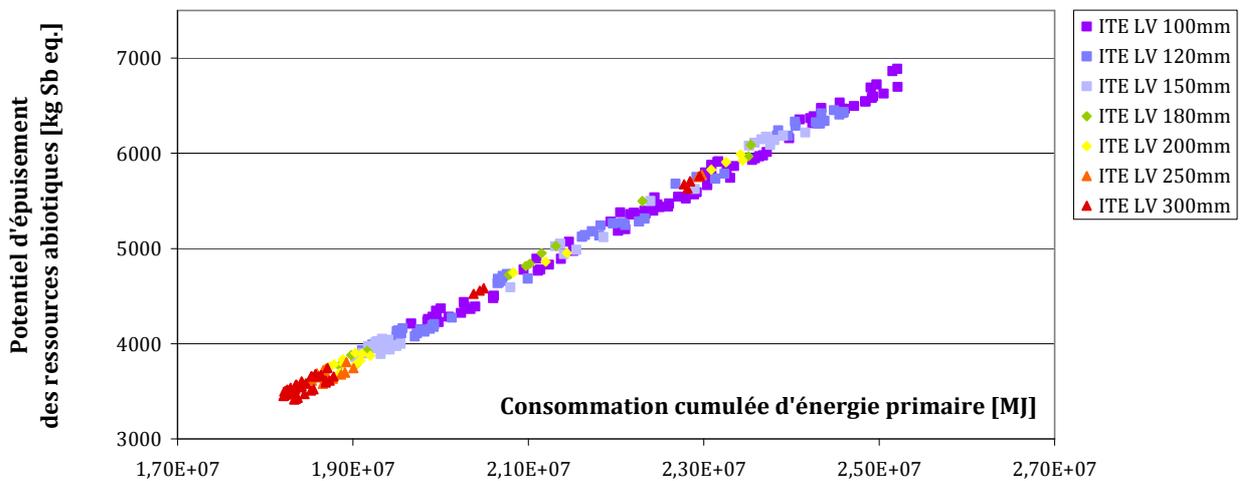


Figure 54. Isolation des façades et compromis énergie/ressources

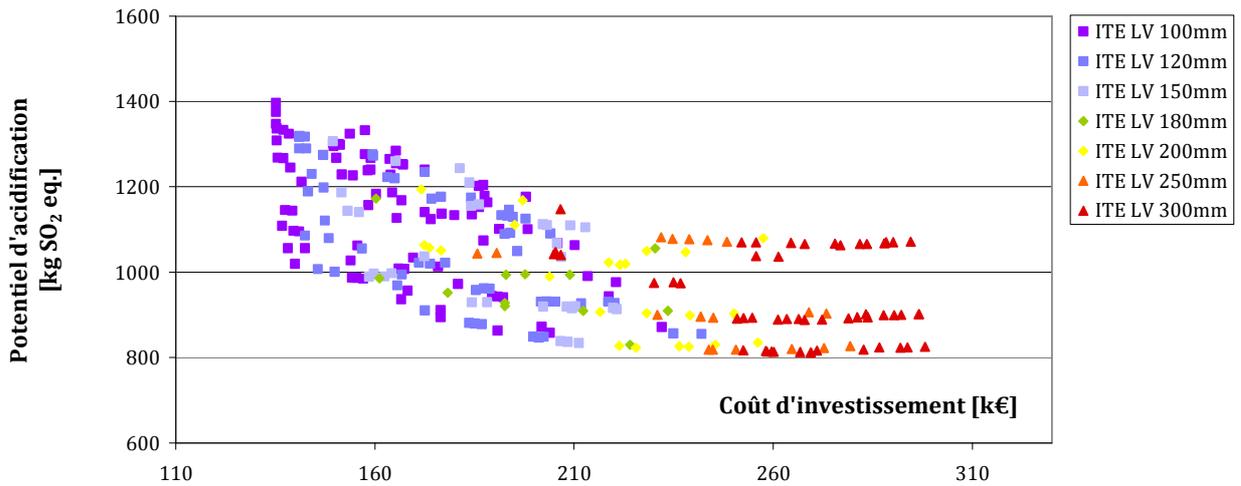


Figure 55. Isolation des façades et compromis investissement/acidification

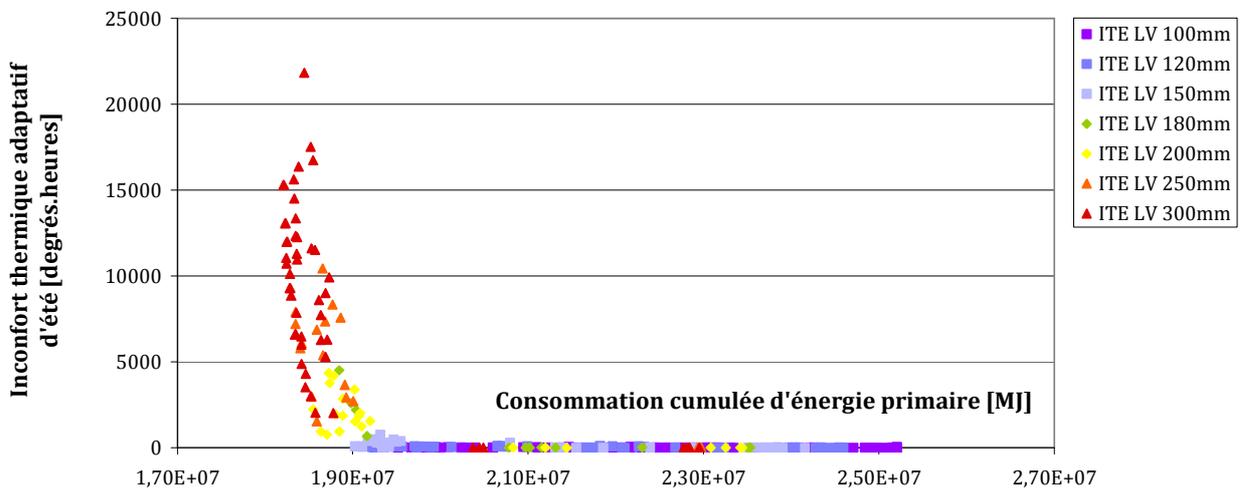


Figure 56. Isolation des façades et compromis énergie/confort thermique

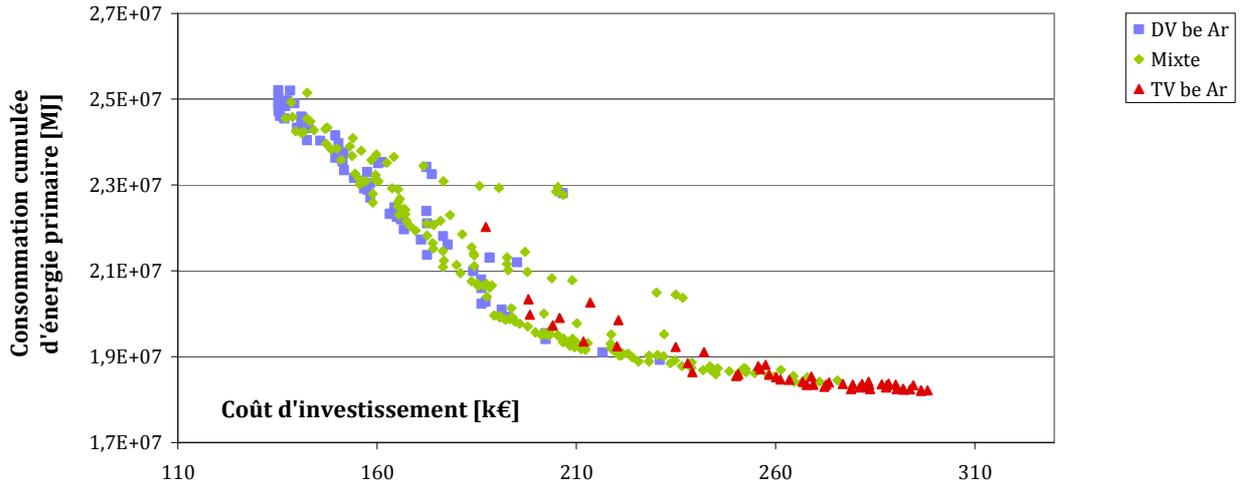


Figure 57. Types de fenêtres et compromis investissement/énergie

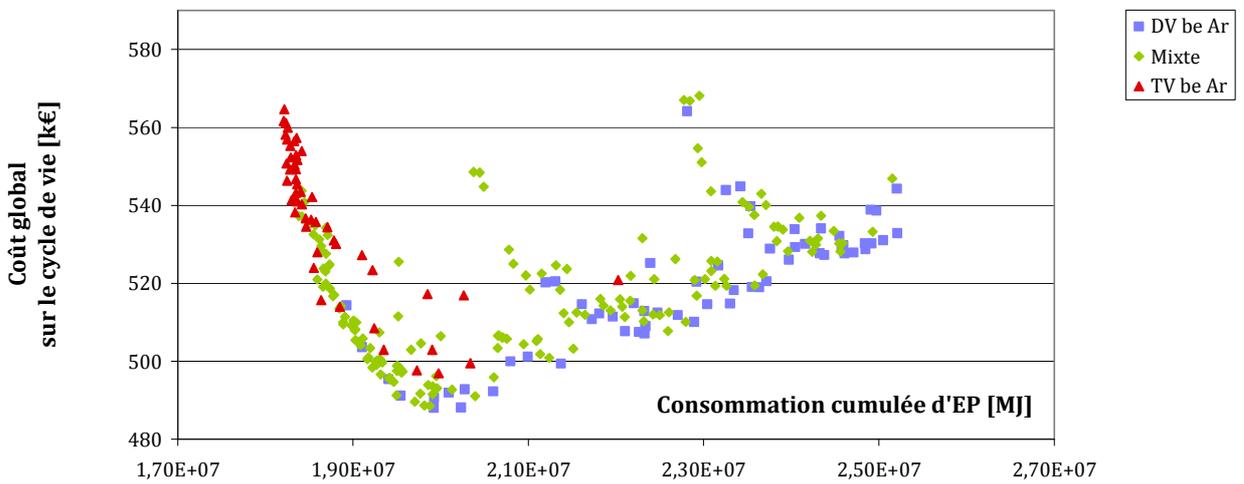


Figure 58. Types de fenêtres et compromis énergie/coût global

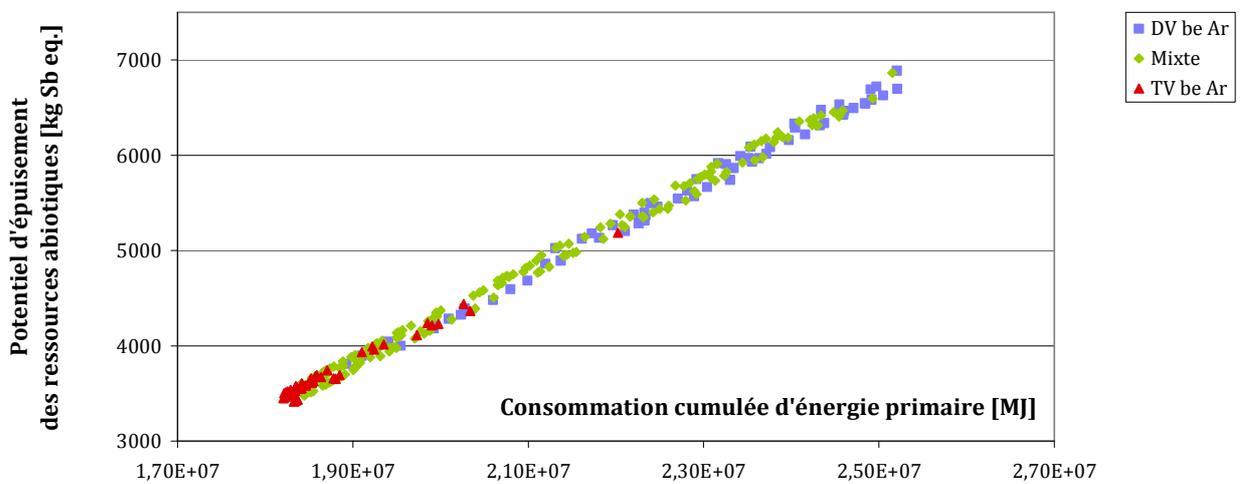


Figure 59. Types de fenêtres et compromis énergie/ressources

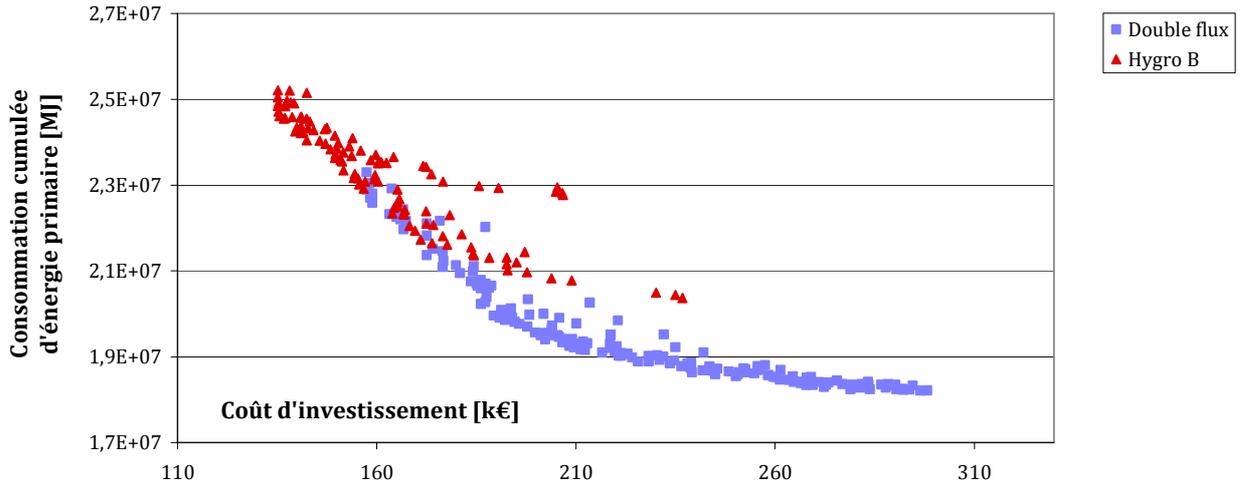


Figure 60. Système de ventilation et compromis investissement/énergie

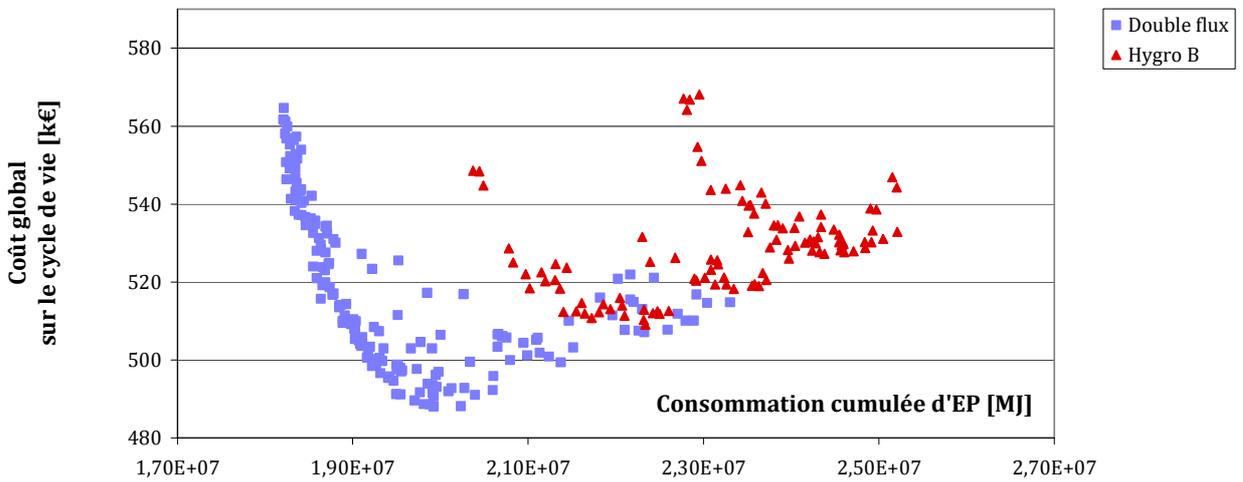


Figure 61. Système de ventilation et compromis énergie/coût global

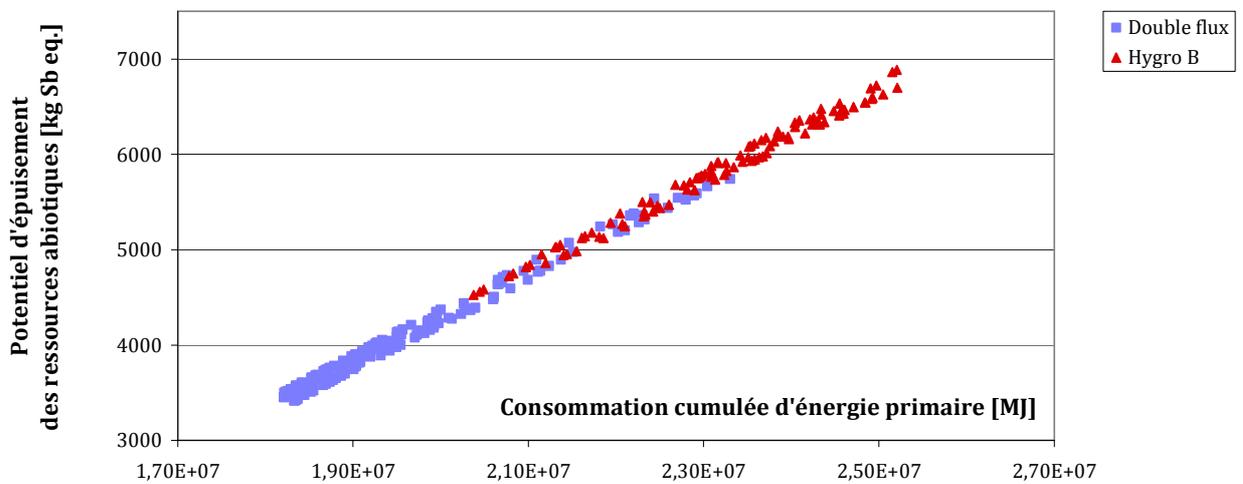


Figure 62. Système de ventilation et compromis énergie/ressources

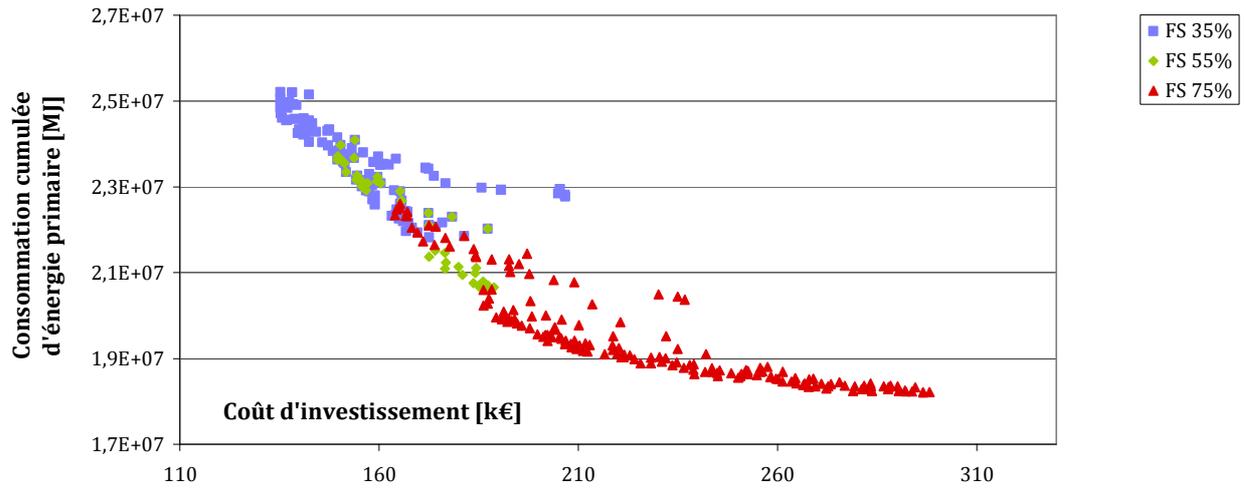


Figure 63. Fraction solaire de production de l'ECS et compromis investissement/énergie

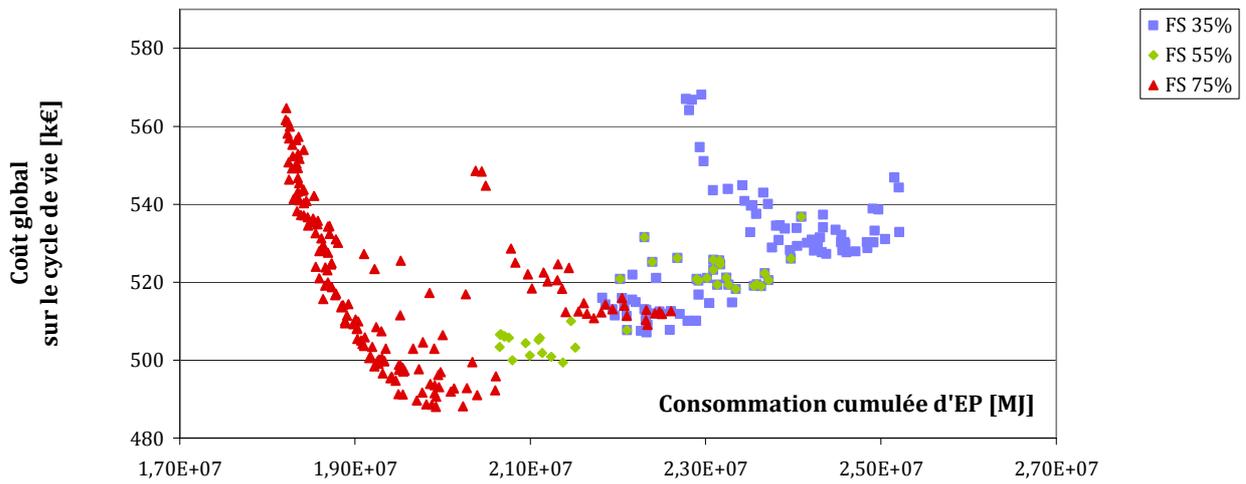


Figure 64. Fraction solaire de production de l'ECS et compromis énergie/coût global

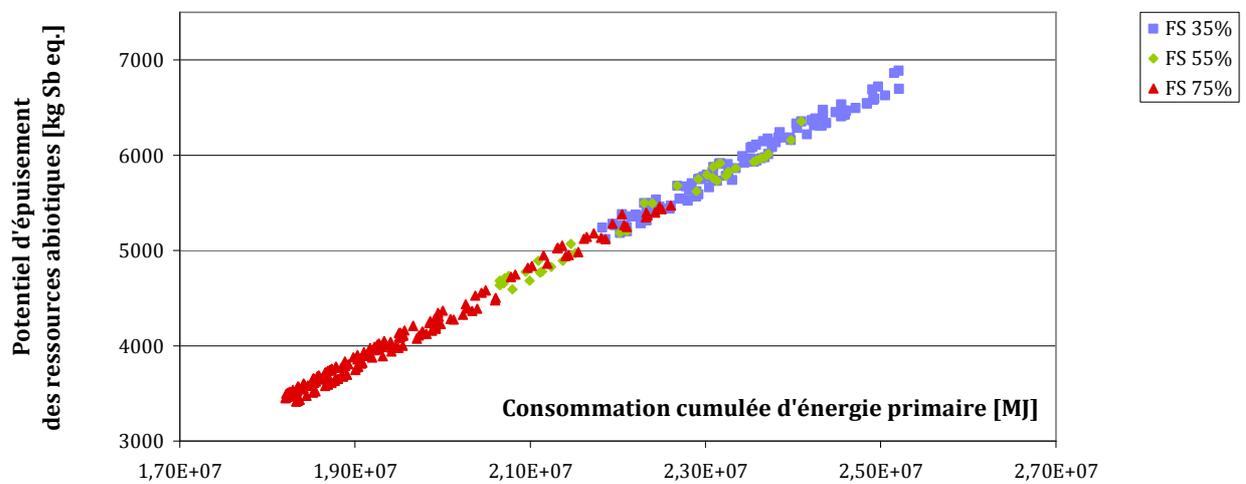


Figure 65. Fraction solaire de production de l'ECS et compromis énergie/ressources

Cette section a illustré la relation entre la composition des programmes de réhabilitation efficaces et les performances sur les différents critères. Les relations de compromis entre les critères peuvent alors être approfondies, en particulier les corrélations observées.

### 2.4.5 Corrélations critères environnementaux

Les sections précédentes ont mis en évidence une forme de corrélation linéaire entre certains indicateurs environnementaux. Nous cherchons ici à comprendre ces corrélations entre les critères suivants : consommation cumulée d'énergie primaire, potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, potentiel de changement climatique à 100 ans, et dans une moindre mesure avec le potentiel d'acidification.

On rappelle que les performances des programmes de réhabilitation sur ces objectifs sont évaluées suivant le modèle de cycle de vie présenté au Chapitre 1, et donc sur les différentes phases de la poursuite du cycle de vie du bâtiment à réhabiliter.

Nous nous intéressons alors à la contribution relative des différentes phases du cycle de vie aux performances des programmes de réhabilitation. Pour les différents critères de décision considérés dans cette étude de cas, la Figure 66 représente la contribution moyenne et les intervalles de variation (sur les solutions non-dominées de la génération 100) de deux groupes de phases du cycle de vie modélisé :

- Groupe 1 : Production et traitement en fin de vie des composants de bâtiment (pré-existants et déposés ou mis en œuvre en réhabilitation) ;
- Groupe 2 : Usage du bâtiment en exploitation.

On remarque pour la consommation cumulée d'énergie primaire, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques ou le potentiel de changement climatique à 100 ans, que la contribution des phases de cycle de vie du groupe 1 est très faible devant celle de l'usage du bâtiment. De plus, sur ces mêmes indicateurs environnementaux, l'intervalle de variation de la contribution du groupe 1, déterminé à partir de l'ensemble des solutions non-dominées de la génération 100, est également très inférieur aux variations sur la phase d'usage.

Sur ces trois indicateurs environnementaux, devant la faible contribution et variabilité des phases de cycle de vie du groupe 1, on peut considérer en première approximation que ces trois indicateurs sont globalement corrélés linéairement à la performance énergétique en usage du bâtiment réhabilité. Ils sont donc corrélés linéairement entre eux.

L'analyse plus fine de ces compromis met cependant en évidence plusieurs relations linéaires, identifiables sur les Figure 67 et Figure 68.

Sur ces mêmes graphiques, sont représentées les solutions non-dominées de la génération 100. Les programmes de réhabilitation sont alors différenciés suivant la phase de réhabilitation correspondant au remplacement de l'équipement de chauffage (comprise entre 1 et 7), au sein du programme de travaux.

Il apparaît alors que l'ordonnée à l'origine des relations affines interpolant les performances des solutions non-dominées dépend de cette phase de mise en œuvre. Le dimensionnement du système de chauffage est en effet fonction de la phase du programme de réhabilitation associée. Il conditionne le rendement de l'équipement sur la poursuite du cycle de vie, calculé à partir des

besoins de chaleur finaux, à l'issue de la mise en œuvre de l'ensemble des mesures de réhabilitation du programme.

Par ailleurs, on note sur la Figure 69 que l'impact sur le potentiel d'acidification est également lié à la phase de remplacement de l'équipement de chauffage. Dans cette étude de cas, les consommations énergétiques élevées, consenties avant remplacement de la chaudière fioul préexistante et peu performante, impactent notablement le potentiel d'acidification.

Dans une perspective d'aide à la décision, l'identification des corrélations est importante. Elle permet de réduire le nombre de critères de décision et donc la complexité du problème multicritère en ne considérant qu'un seul des critères corrélés, par exemple.

Nous rappelons cependant que dans cette étude un seul type d'énergie est considéré pour le chauffage après réhabilitation (le gaz). Les corrélations reposant largement sur la phase d'usage, il serait intéressant de poursuivre l'analyse des relations entre ces critères en proposant différents systèmes de chauffage, consommant différents types d'énergies.

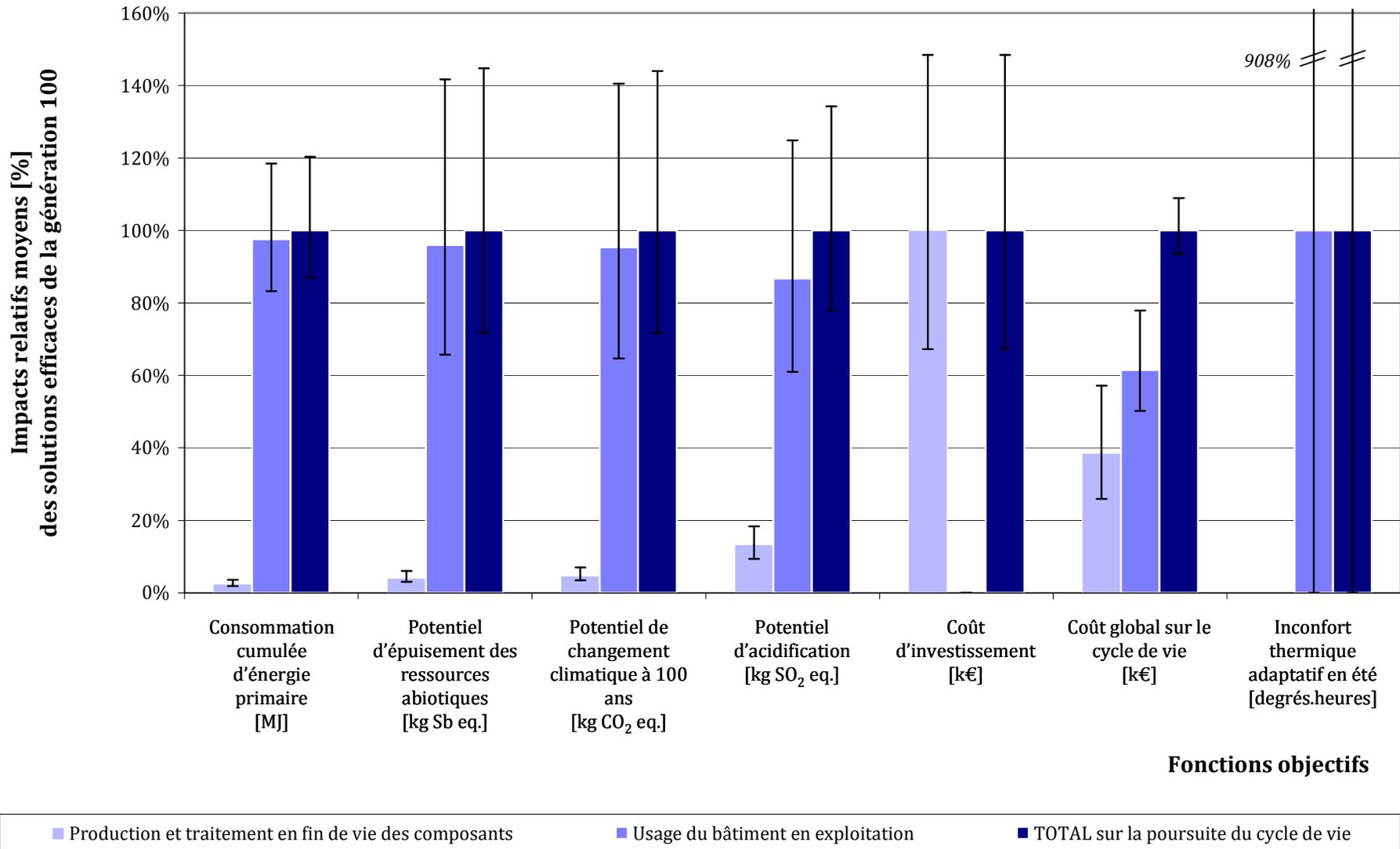


Figure 66. Impacts relatifs des différentes phases du cycle de vie et intervalles de variation.

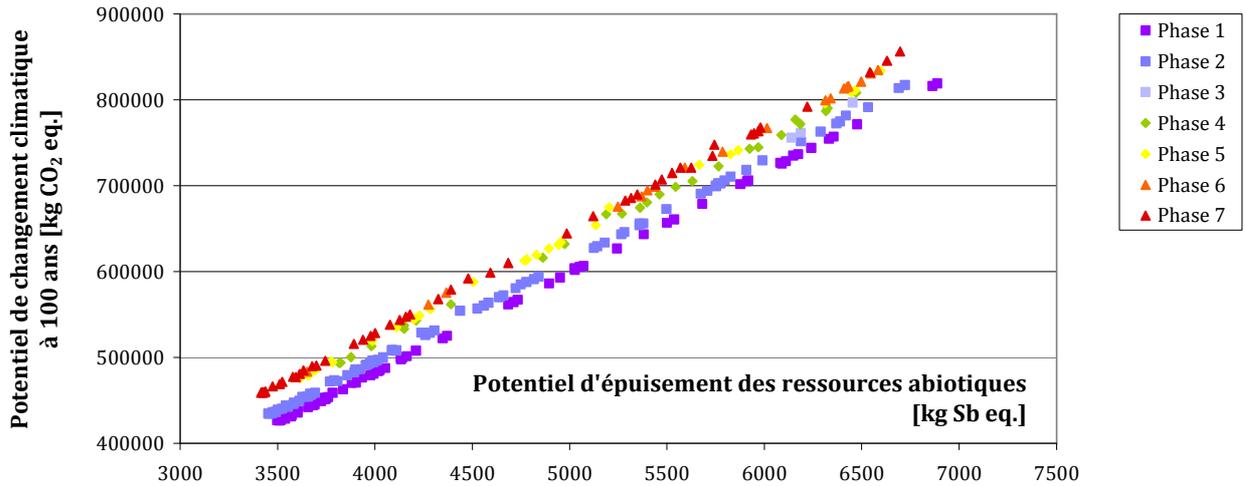


Figure 67. Phase de remplacement du chauffage et compromis ressources/changement climatique

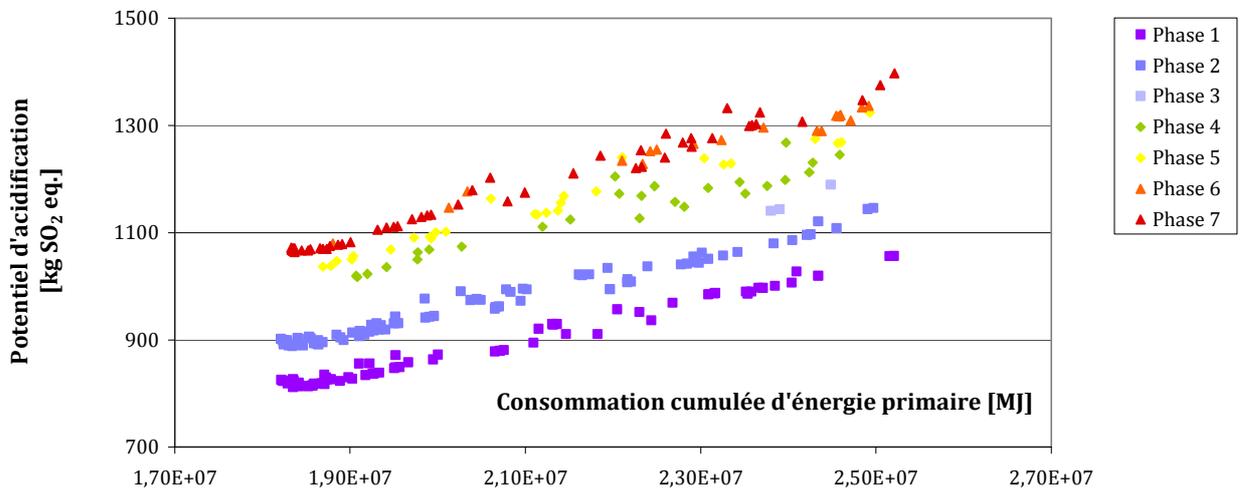


Figure 68. Phase de remplacement du chauffage et compromis énergie/acidification

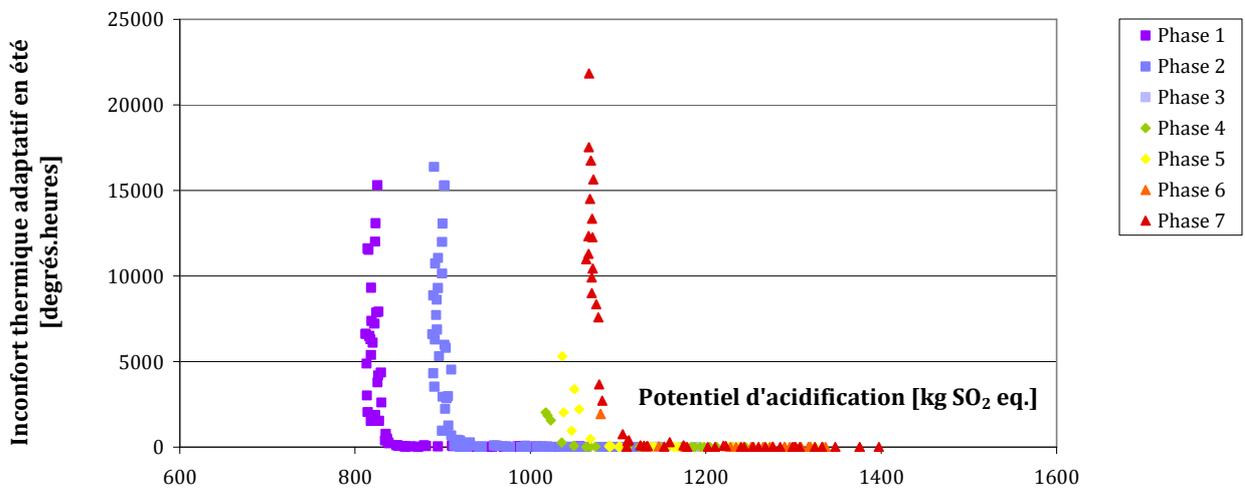


Figure 69. Phase de remplacement du chauffage et compromis acidification/confort thermique

### 2.4.6 Phasage et évolution temporelle des impacts cumulés

L'étude des solutions efficaces **A**, **B** et **C** (section 2.4.3) a mis en évidence des différences en termes de phasage des travaux de réhabilitation énergétique. Les performances des programmes de réhabilitation peuvent être visualisées sur les différentes phases de réhabilitation (correspondant ici chacune à une année), puis sur les années de poursuite du cycle de vie, sous la forme de leur évolution dans le temps. Il est alors possible d'analyser la comparaison entre deux ou plusieurs alternatives et ainsi d'observer l'effet de certaines interactions.

En particulier, nous nous intéressons ici à la solution **B**, mise en évidence précédemment, qui représente le programme de réhabilitation correspondant au minimum global en termes de coût global sur le cycle de vie. Plus précisément, nous nous proposons d'analyser l'effet du phasage des mesures et de comparer deux solutions **B** et **B'**, caractérisées par la même combinaison de mesures mais différenciées par le phasage des travaux. Alors que le système de chauffage existant est remplacé en dernier pour la solution **B**, il l'est en premier pour **B'**, comme le souligne le Tableau 27. Entre ces deux solutions, seul le dimensionnement du système de chauffage (fonction du phasage des travaux) diffère en termes de mesures de réhabilitation.

Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	Phasage B	Phasage B'
Murs de façades	ITE laine minérale : 120 mm	1	2
Toiture	ITE polyuréthane : 100 mm	2	3
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	3	4
Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	5	6
Ventilation	Double flux	6	7
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	7	1
Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%	4	5

**Tableau 27. Détail des programmes de réhabilitation B et B'**

Les figures suivantes présentent l'évolution temporelle des performances cumulées des deux solutions, pour différents critères de décision. Les impacts (en production, usage et traitement en fin de vie) générés chaque année sont additionnés à ceux générés les années précédentes.

Dans le cadre des hypothèses présentées précédemment, le programme de réhabilitation conduisant au remplacement du système de chauffage en dernière phase (B) présente les meilleures performances sur le cycle de vie considéré en termes de : potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, coût d'investissement ou coût global. En revanche, le remplacement du chauffage dès la première phase de réhabilitation semble bénéfique du point de vue de la consommation cumulée d'énergie primaire, du potentiel de changement climatique à 100 ans ou encore du potentiel d'acidification, sur le cycle de vie de 50 ans considéré.

De plus, si les performances globales des deux programmes **B** et **B'** sont proches ou du même ordre de grandeur sur la plupart des critères de décision, il apparaît que le phasage des travaux influence l'évolution et la comparaison dans le temps des performances du bâtiment réhabilité. L'écart entre les performances des deux solutions **B** et **B'** évolue ainsi avec le temps.

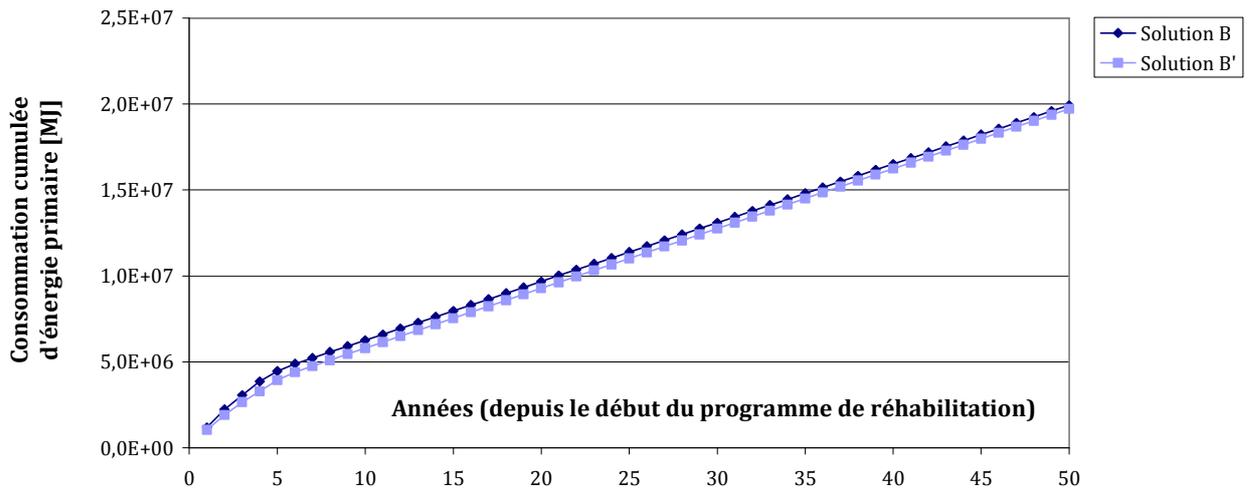


Figure 70. Evolution temporelle cumulée des consommations cumulées d'énergie primaire

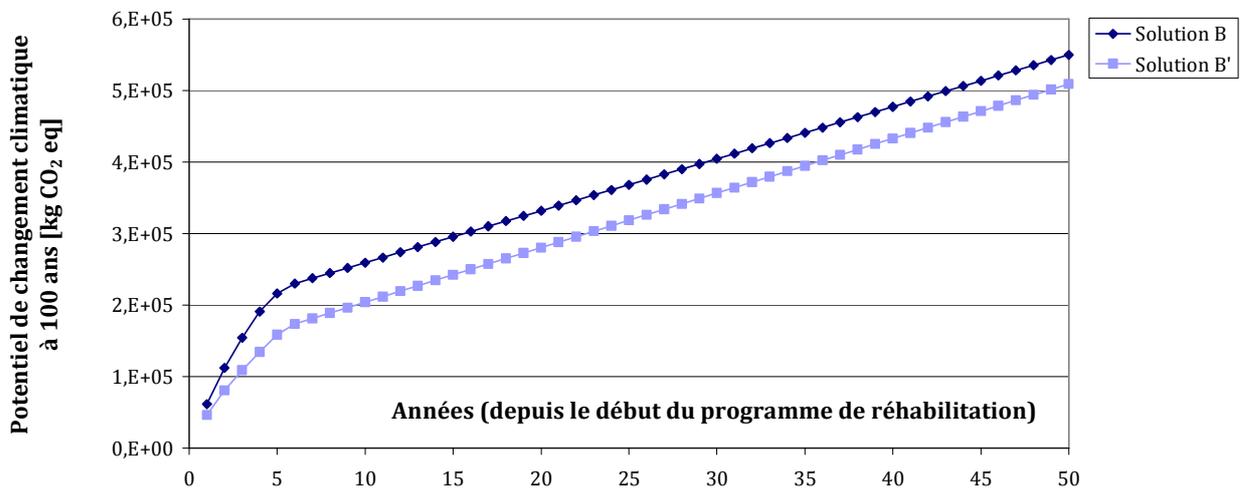


Figure 71. Evolution temporelle cumulée du potentiel de changement climatique à 100 ans

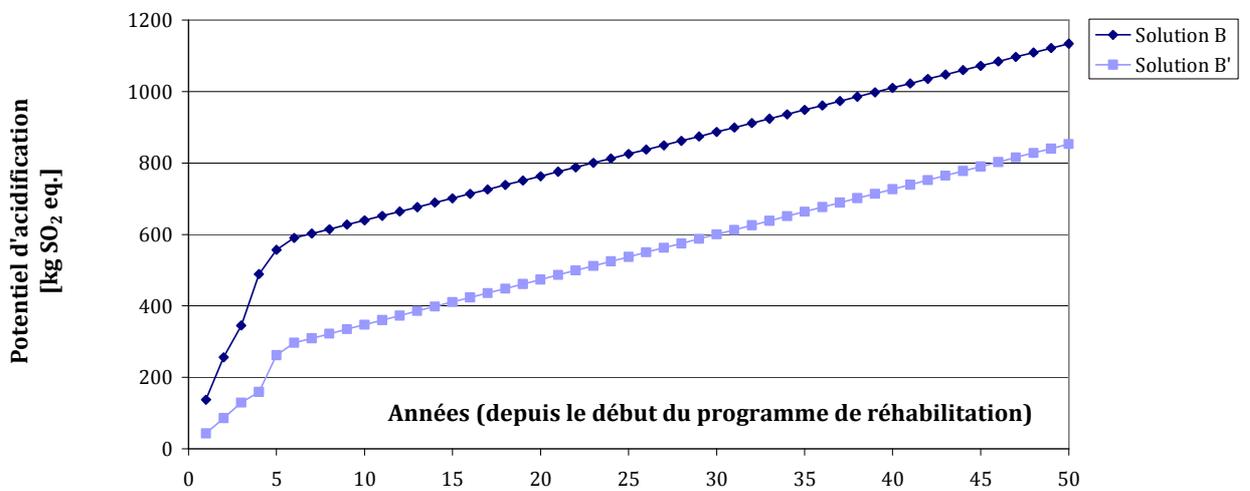


Figure 72. Evolution temporelle cumulée du potentiel d'acidification

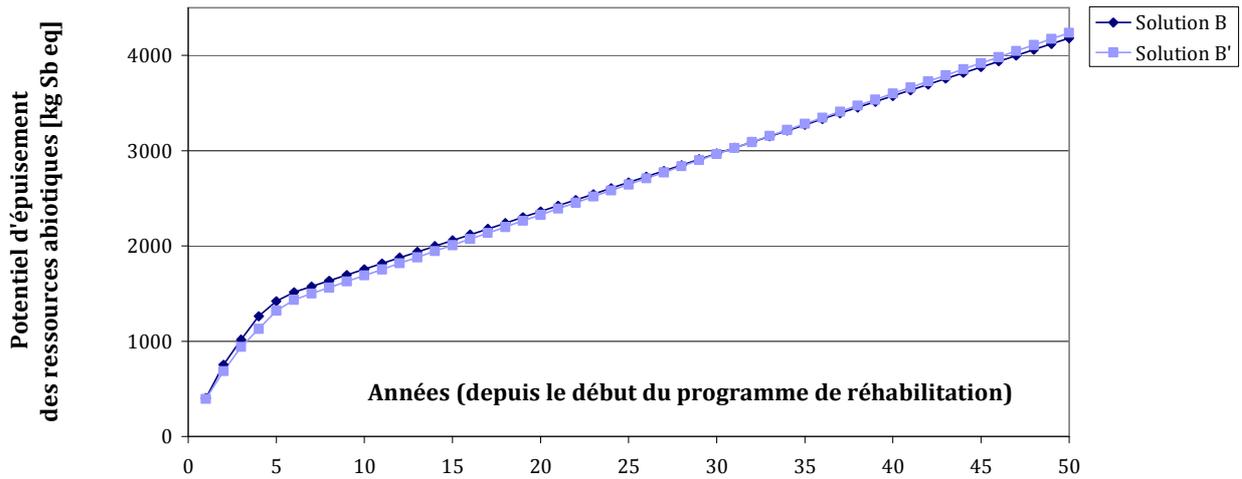


Figure 73. Evolution temporelle cumulée du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques

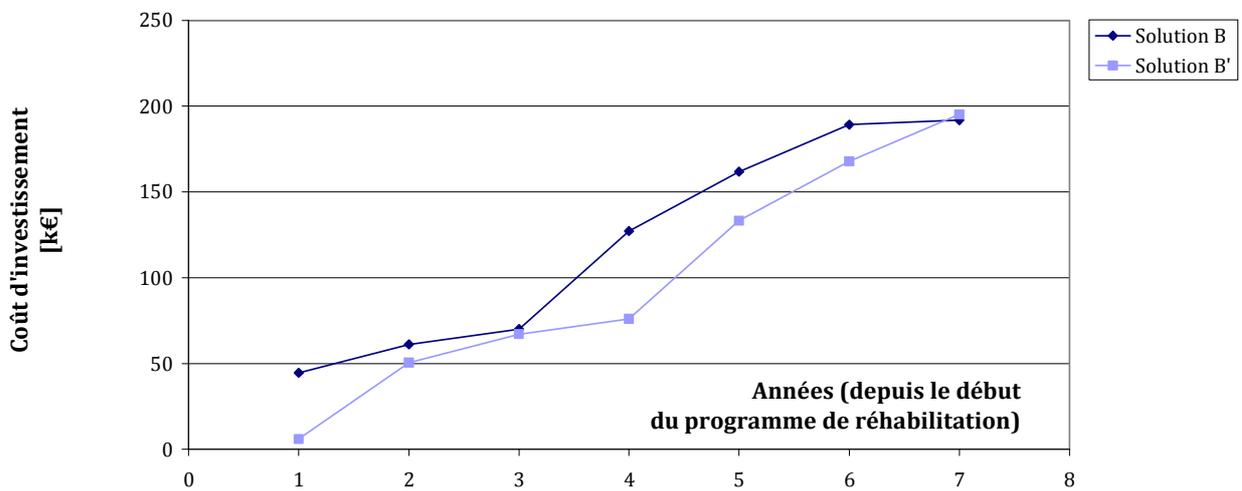


Figure 74. Evolution temporelle cumulée des coûts d'investissement

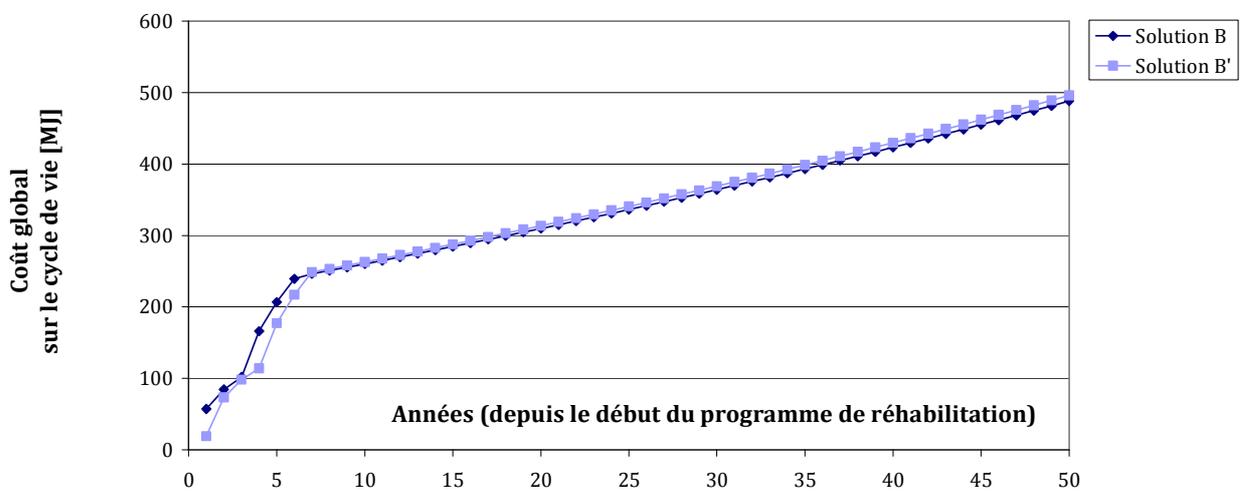


Figure 75. Evolution temporelle du coût global sur la poursuite du cycle de vie

En effet, le remplacement du système de chauffage existant, en première ou dernière phase du programme de réhabilitation (respectivement solution **B'** et **B**), a plusieurs conséquences :

- En première phase de réhabilitation, le remplacement du système de chauffage permet ici d'améliorer les performances à court terme, en substituant immédiatement au système existant un équipement à haut rendement.

Le bénéfice apparaît nettement sur les premières phases de réhabilitation (années 1 à 6, soit avant que le chauffage ne soit remplacé dans le programme **B**). Ainsi sur les figures précédentes, les impacts cumulés de la solution **B** sont systématiquement supérieurs à ceux de la solution **B'**.

De plus, plus les besoins de chauffage diminuent (par la mise en œuvre séquentielle de mesures de réhabilitation), plus le rendement du système de chauffage existant chute, ce qui explique l'écart relatif croissant entre les performances de **B** et **B'** sur les années 1 à 6, pour les objectifs largement corrélés à l'usage. Cette chute de rendement est particulièrement visible sur la Figure 71 pour le potentiel de changement climatique qui dépend largement de la performance énergétique en usage, comme l'a précisé la section précédente.

- Cependant, remplacer le système de chauffage à l'issue des phases de réhabilitation ciblant la réduction des besoins de chaleur permet de dimensionner l'équipement en fonction des besoins finaux du bâtiment réhabilité, ce qui induit une réduction des coûts d'investissement. Ainsi, la Figure 74 souligne que l'investissement cumulé sur les phases de réhabilitation du programme **B** (remplaçant le chauffage lors de la dernière phase) est inférieur à celui de la solution **B'**.
- Enfin, le dimensionnement de l'équipement de chauffage, adapté aux besoins de chaleur finaux du bâtiment réhabilité (**B**), permet ici d'atteindre des niveaux de rendement supérieurs à ceux des systèmes surdimensionnés (**B'**), en génération de chaleur, sur la poursuite du cycle de vie (années 8 à 50).

On note ainsi sur les figures précédentes une moindre croissance relative des impacts pour le programme **B** par rapport à la solution **B'**, sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment réhabilité en exploitation.

Cette réduction de l'augmentation relative des impacts cumulés permet dans certains cas de compenser les impacts consentis avant remplacement du système de chauffage (Figure 73, Figure 75) mais pas nécessairement sur l'ensemble des critères de décision (Figure 70, Figure 71, Figure 72).

Dans le cadre de la réhabilitation séquentielle, il apparaît donc que le phasage des travaux est une problématique complexe. Le remplacement du système de chauffage à l'issue de la réduction des besoins de chaleur permet un dimensionnement de l'équipement adapté aux besoins du bâtiment réhabilité, ce qui améliore sensiblement le rendement de génération sur la poursuite du cycle de vie et contribue à maîtriser les coûts d'investissement. Cependant, les impacts consentis lors des premières années de réhabilitation, avant remplacement de l'équipement préexistant ne sont pas nécessairement compensés, sur la poursuite du cycle de vie, sur l'ensemble des critères de décision.

### 2.4.7 Reproductibilité des résultats

Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation approchée. Les théorèmes de convergence étant inexistant, il demeure important d'analyser la reproductibilité des résultats. Pour ce faire, nous nous proposons d'étudier les solutions non-dominées de trois optimisations distinctes, conduites avec les mêmes valeurs de paramètres génétiques et lancées à partir de trois populations initiales aléatoires différentes.

Une infinité de métriques étant nécessaire pour comparer deux ensembles de points dans un espace multidimensionnel (Zitzler et al., 2003), à la manière de la section 2.4.2, nous caractérisons les fronts de solutions obtenus par :

- L'évolution, sur les générations d'individus, des performances optimales et moyennes sur chaque fonction objectif ;
- La comparaison graphique et qualitative des fronts de Pareto identifiés.

Cette approche ne constitue pas une démonstration mathématique de la robustesse de la méthode mais peut simplement suggérer une forme de reproductibilité des conclusions.

Les Figure 76 à Figure 79 représentent respectivement les évolutions, sur les générations, des performances optimale et moyenne des individus de la génération courante, en termes de consommation cumulée d'énergie primaire ou de coût d'investissement, pour les trois optimisations exécutées. La Figure 80 rassemble l'évolution des performances optimales et moyenne pour les 7 fonctions objectifs utilisées et sur les trois optimisations conduites.

Les résultats de trois optimisations conduites soulignent globalement que si les évolutions sur les premières générations peuvent être sensiblement différentes, quelques dizaines de générations suffisent pour que les tendances se rapprochent. Les indicateurs sur la performance optimale et moyenne prennent alors des valeurs égales ou du même ordre de grandeur, pour toutes les fonctions objectifs considérées.

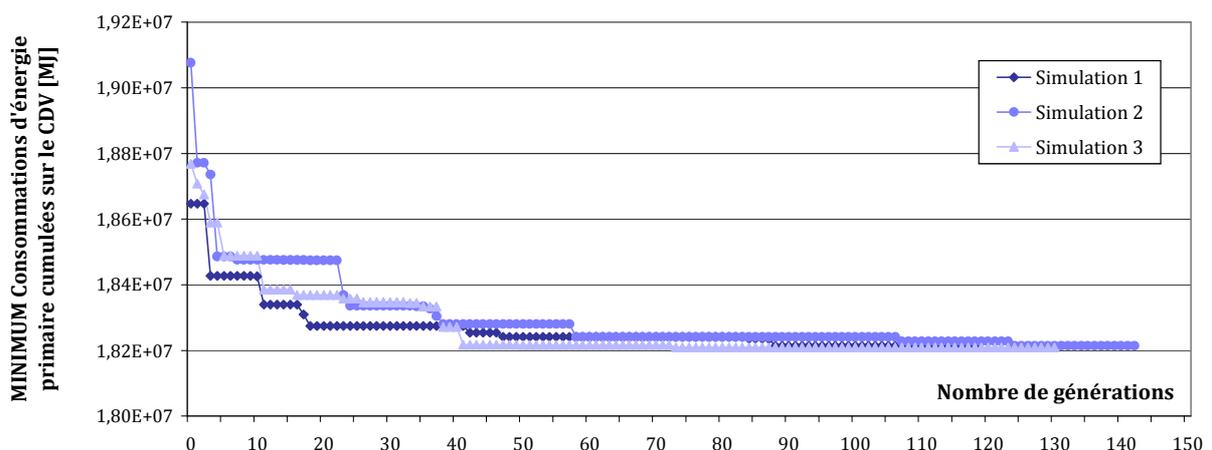


Figure 76. Evolution générationnelle de l'optimum en consommation cumulée d'énergie primaire, sur les individus de la génération courante, pour les 3 optimisations conduites.

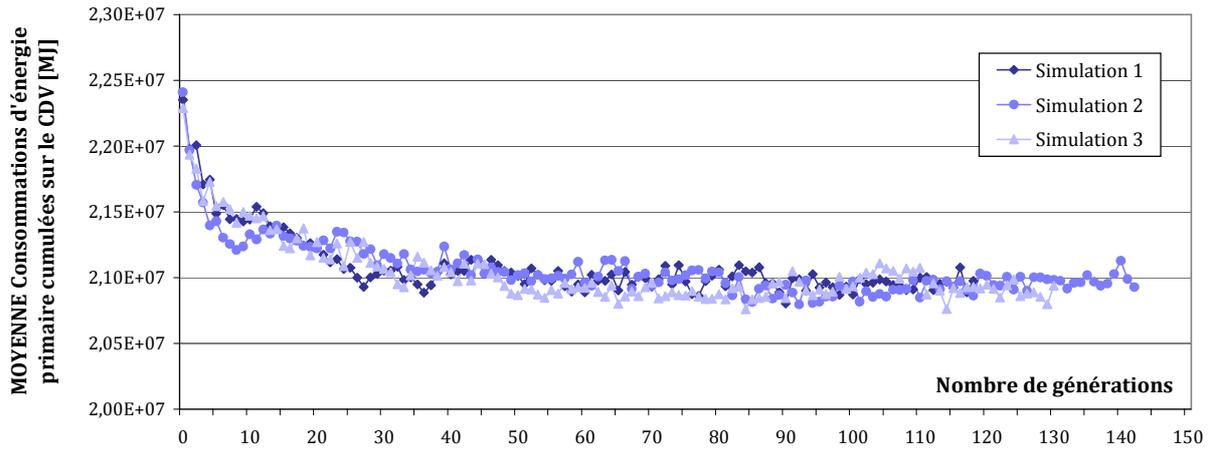


Figure 77. Evolution générationnelle de la moyenne en consommation cumulée d'énergie primaire, sur les individus de la génération courante, pour les 3 optimisations conduites.

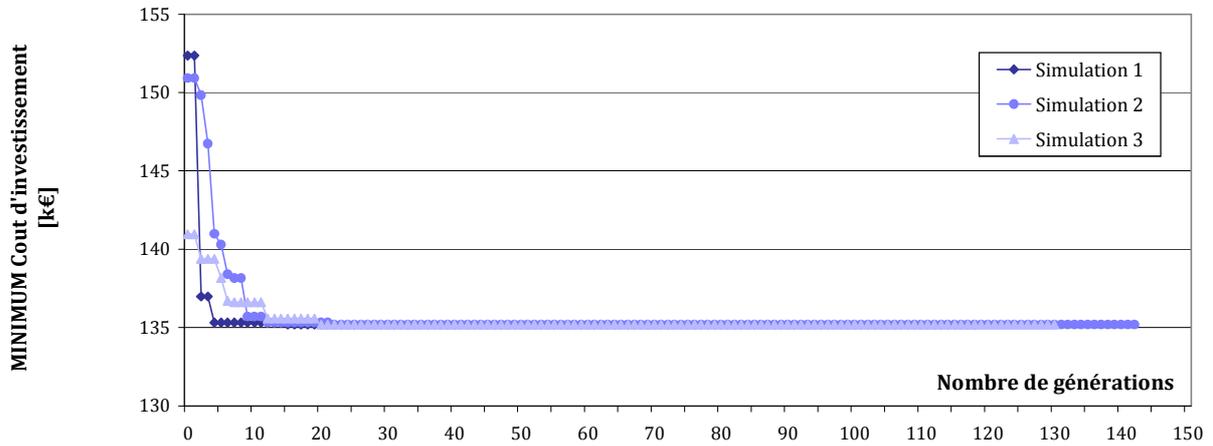


Figure 78. Evolution générationnelle de l'optimum en coût d'investissement, sur les individus de la génération courante, pour les 3 optimisations conduites.

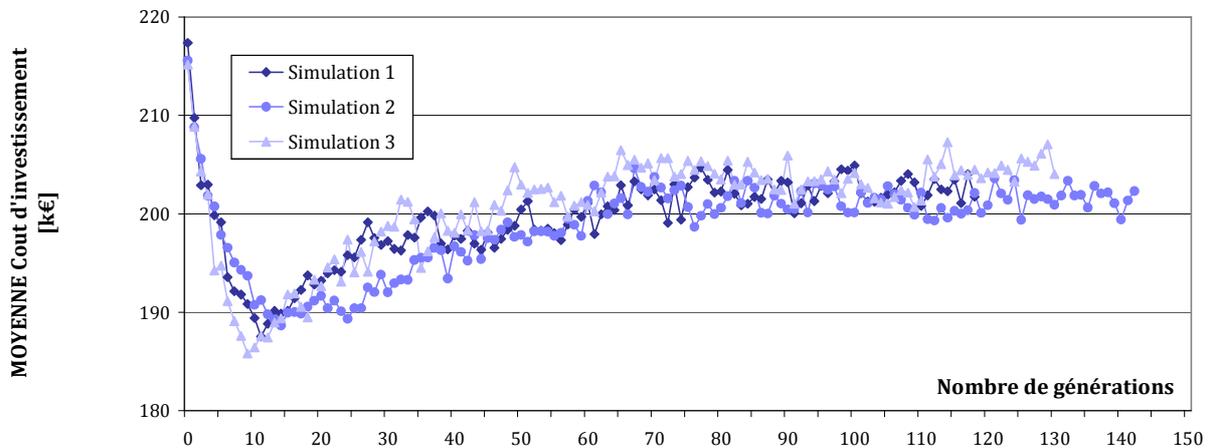


Figure 79. Evolution générationnelle de la moyenne en coût d'investissement, sur les individus de la génération courante, pour les 3 optimisations conduites.

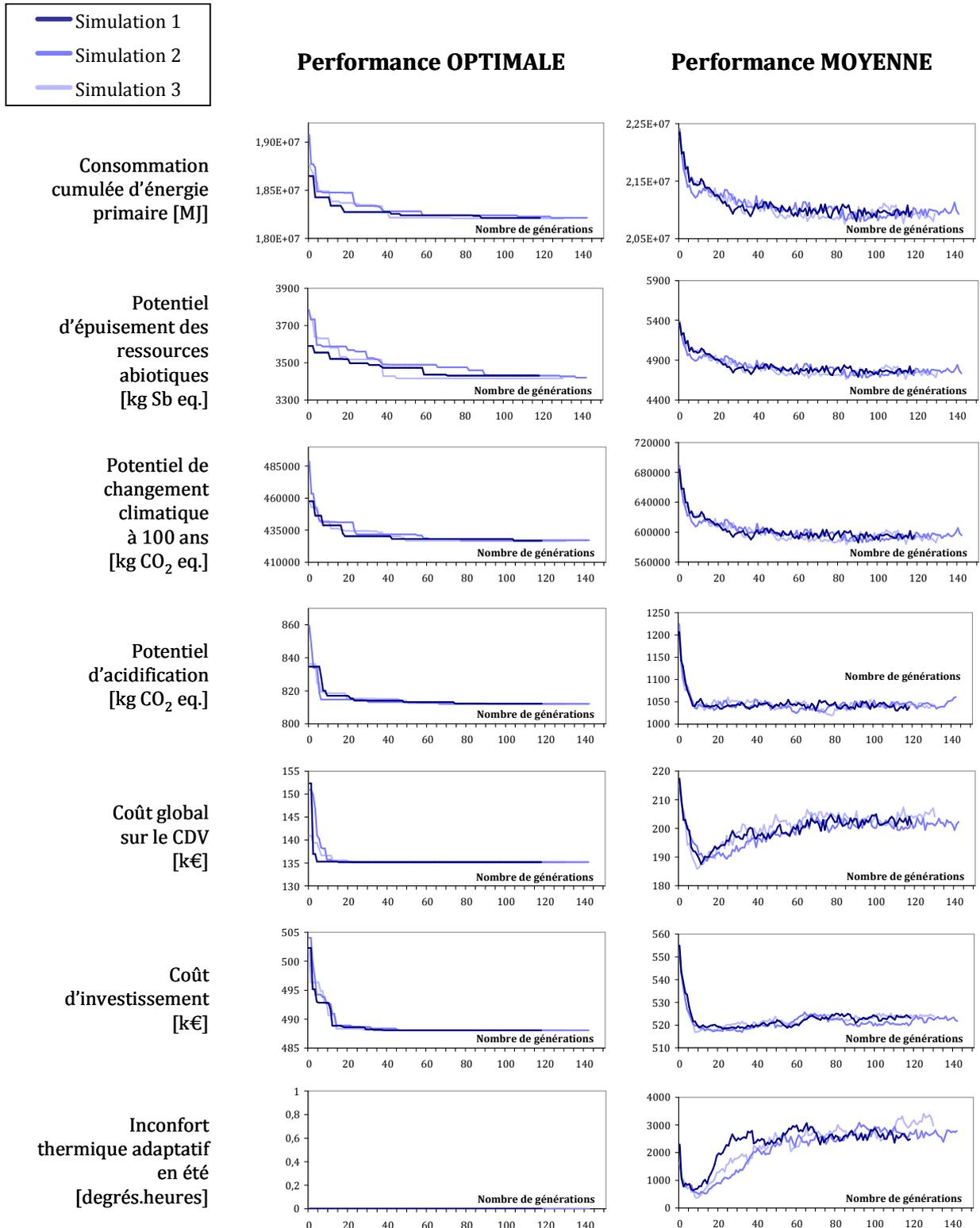


Figure 80. Evolution sur les générations d'individus des performances optimale et moyenne, pour chaque objectif, pour 3 optimisations différentes (simulation 1, 2 et 3)

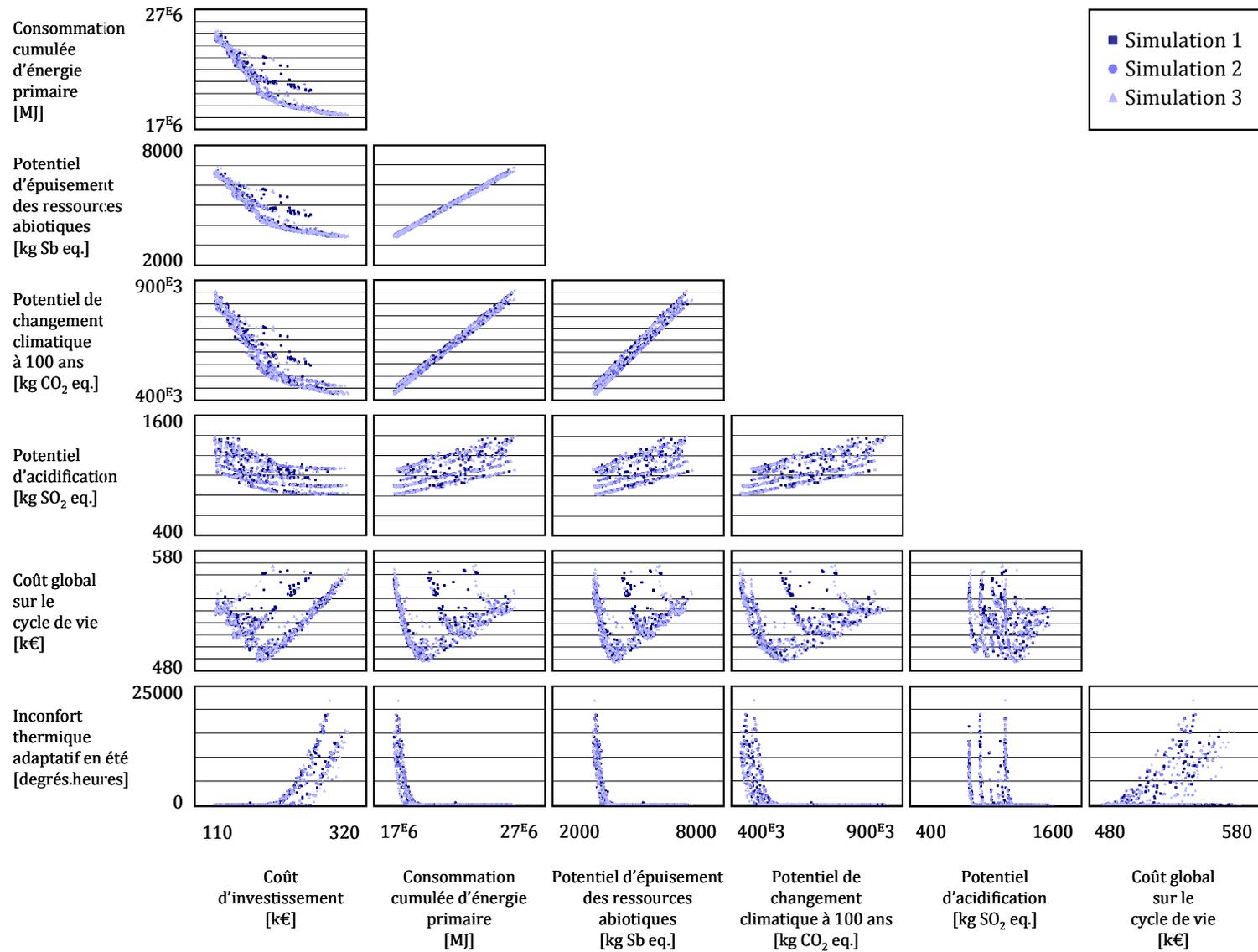


Figure 81. Comparaison des fronts de Pareto obtenus à la génération 100 pour les 3 simulations.

Enfin, la Figure 81 représente l'ensemble des solutions non-dominées obtenu à la génération 100 de chacune des optimisations conduites. Les fronts de Pareto sont projetés dans les 21 plans définis par les couples de critères de décision.

La comparaison graphique qualitative des fronts de Pareto souligne le large recouvrement des trois ensembles de solutions identifiés, qui atteignent des performances comparables et décrivent de manière relativement équivalente l'étendue de la surface de compromis.

Ces quelques résultats ne sont pas une démonstration mathématique de la robustesse de la méthode d'optimisation mise en œuvre. Néanmoins, le test mené sur 3 optimisations différentes, à partir de trois populations initiales aléatoires distinctes et avec les mêmes paramètres, suggère une forme de reproductibilité des résultats.

## 2.5 Conclusion

Le présent chapitre a permis de montrer comment et en quoi les algorithmes génétiques multicritères peuvent contribuer à l'aide à la décision pour l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle. A partir de la présentation des principes généraux, une approche fondée sur l'algorithme génétique NSGA II et sur une représentation particulière des solutions, sur deux chromosomes, a été proposée. Des opérateurs adaptés de croisement et de mutation ont ensuite été sélectionnés. L'application à une étude de cas a démontré la possibilité d'exhiber un ensemble de solutions non-dominées, sur une base multicritère et sur le cycle de vie du bâtiment à réhabiliter. Cet ensemble de solutions fournit une description des compromis accessibles à la décision.

L'étude de cas a aussi permis de souligner la richesse de l'information issue de l'optimisation. Le nécessaire compromis entre réduction des impacts sur l'Environnement et investissements a été mis en évidence ainsi que les corrélations linéaires entre certains critères environnementaux. L'introduction de différentes variantes de réhabilitation sur le système de chauffage, exploitant des énergies différentes, est cependant de nature à modifier ce constat. Les stratégies identifiées assurent de bonnes conditions de confort thermique en été, dans le cadre du scénario d'occupation défini et en dehors des épisodes de très fortes chaleurs. Une solution correspondant au minimum global en termes de coût global sur le cycle de vie a été identifiée. Distincte des programmes maximisant la performance énergétique en usage, elle suggère une réduction mesurée des besoins énergétiques avant de considérer le remplacement du système de chauffage préexistant. La problématique du phasage des travaux est complexe ; l'analyse des performances temporelles a fait ressortir les interactions entre les mesures. Elle a montré que des séquences différentes peuvent conduire à différentes solutions non-dominées et donc non comparables. Ces différentes remarques demeurent à analyser au regard des hypothèses de modélisation retenues. Des études de cas complémentaires pourront ainsi éclairer la sensibilité des résultats à certains paramètres de modélisation.

Enfin, si les quelques optimisations conduites ont montré une forme de reproductibilité des résultats, il demeure que les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation approchées, ne garantissant pas l'atteinte du front de Pareto optimal théorique. L'identification de ce front réclame alors une méthode exacte. Le Chapitre 3 propose une approche multicritère par programmation dynamique.



## Chapitre 3

# Optimisation multicritère et programmation dynamique pour la réhabilitation énergétique des bâtiments existants

---

*Ce chapitre se concentre sur l'application de la programmation dynamique, méthode d'optimisation multicritère exacte, à l'identification des stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle.*

*A partir de la présentation des principes généraux de la programmation dynamique, une approche est proposée pour répondre à la problématique de réhabilitation.*

*La connaissance des solutions exactes permet alors, sur une étude de cas, de qualifier celles des méthodes approchées, comme les algorithmes génétiques, ou de mener des études de sensibilité sur certains paramètres de modélisation comme les consignes de température pour le chauffage, les scénarios d'évolution du prix des énergies ou la maintenance et le remplacement des composants de réhabilitation.*

---

## Plan du chapitre 3

3.1	Introduction	173
3.2	La programmation dynamique	173
3.2.1	Généralités	173
3.2.2	Rappels sur les graphes	174
3.2.3	Processus séquentiels discrets en avenir certain	175
3.2.4	Théorème de Bellman en monocritère	176
3.2.5	Exemple	177
3.2.6	Extension au multicritère	180
3.2.7	Applications à la conception de bâtiments	183
3.3	Application à la réhabilitation énergétique	184
3.3.1	Un processus fini discret de décisions séquentielles	184
3.3.2	Graphe séquentiel et réhabilitation énergétique	184
3.3.3	Vérification des hypothèses du théorème de Bellman	187
3.4	Etude de cas et comparaison aux méthodes approchées	189
3.4.1	Algorithme génétique et solutions exactes	189
3.4.2	Algorithme glouton et solutions exactes	195
3.4.3	Réhabilitations énergétiques et scénario de l'inaction	202
3.5	Etude de cas et analyse de sensibilité	205
3.5.1	Comportement de l'occupant et consignes de chauffage	206
3.5.2	Evolution du coût de l'énergie en exploitation	220
3.5.3	Durée de vie des composants	227
3.6	Conclusion	244

## 3.1 Introduction

Contribution à l'aide à la décision pour la réhabilitation énergétique des bâtiments existants, le chapitre 2 a proposé une approche par algorithme génétique NSGA II. Cette métaheuristique d'optimisation multicritère est une méthode approchée qui, appliquée à la réhabilitation énergétique séquentielle, a permis l'identification de stratégies efficaces et la description des compromis accessibles à la décision.

Dans de nombreux cas d'applications industrielles, les métaheuristiques ont démontré leur efficacité à explorer des espaces de recherche parfois très vastes, et à identifier des solutions améliorant significativement les performances des systèmes ou procédés existants.

Cependant, l'absence de théorèmes de convergence ne permet pas de qualifier la qualité des solutions obtenues, à l'issue d'un nombre donné de générations. Aussi, le développement d'une méthode d'optimisation exacte constitue une approche complémentaire pour comparer les solutions de l'algorithme génétique à celles du front de Pareto global, pour étudier la sensibilité des solutions identifiées à différents paramètres de modélisation.

L'application d'une méthode d'optimisation purement énumérative, consistant à évaluer toutes les solutions de l'espace de recherche fini discret, est illusoire étant donné la cardinalité des espaces de décision considérés (au moins plusieurs millions de solutions potentielles).

La méthode d'optimisation exacte étudiée ici est la programmation dynamique.

## 3.2 La programmation dynamique

Cette partie d'introduction à la programmation dynamique présente les concepts de base et le principe d'optimalité, utiles à l'application de la technique à la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments. Elle n'expose pas le détail de l'étude mathématique de la méthode. Nous nous intéressons ici uniquement au cas des processus finis discrets de décisions séquentielles ; le problème d'aide à la décision ayant été posé à partir de variables discrètes. Le formalisme général, les hypothèses et propriétés dans le cas général sont exposés plus avant dans la littérature de référence (Bellman, 1957 ; Karlin, 1955 ; Nemhauser, 1966).

### 3.2.1 Généralités

Rendue célèbre par les travaux de R. Bellman (1957), la programmation dynamique est une méthode d'optimisation exacte, particulièrement adaptée à l'identification de solutions efficaces pour les processus de décisions séquentielles. Soulignons que le terme de « programmation » renvoie ici davantage à des notions de planification ou d'ordonnancement qu'au développement d'un code informatique.

Servant la recherche de plus court chemin, la programmation dynamique s'appuie sur l'équation récursive de Bellman, traduisant le principe d'optimalité, pour identifier des solutions efficaces. L'exploitation de cette équation sur le graphe séquentiel associé au problème de décisions sé-

quentielles (supposé discret) permet de rechercher le chemin de valeur optimale, en temps polynomial. L'intérêt de l'algorithme, par rapport aux méthodes énumératives, devient donc évident dans le cas de problèmes combinatoires imposant de comparer un très grand nombre de solutions potentielles.

La représentation du problème sous la forme d'un graphe séquentiel est particulièrement fructueuse pour l'étude des processus discrets finis de décisions séquentielles. La section suivante revient donc sur la notion de graphe séquentiel.

## 3.2.2 Rappels sur les graphes

### 3.2.2.1 Définitions de base

L'optimisation discrète par programmation dynamique s'appuie sur une représentation du problème sous la forme d'un graphe séquentiel. Aussi, quelques définitions sont ici rappelées.

Soit  $X$  un ensemble fini de  $m$  objets :

$$X = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{m-1}\}$$

Soit  $U$  un ensemble de couples ordonnés  $(x_p, x_q)$  d'éléments de  $X$  :

$$U = \left\{ (x_p, x_q) / (p, q) \in [0..(m-1)]^2 \right\}$$

Alors on dit que  $G = (X, U)$  est un graphe fini d'ordre  $m$ .

$X$  est l'ensemble des sommets du graphe  $G$ . Graphiquement, les graphes sont fréquemment représentés par des diagrammes sur lesquels les sommets sont figurés par des points.

Les éléments de  $U$  sont les arcs orientés du graphe  $G$ . Le graphe est dit orienté si on tient compte du sens de parcours des arcs. Les sommets  $x_p$  et  $x_q$  sont respectivement les extrémités initiale et terminale de l'arc  $(x_p, x_q)$ . Graphiquement, les arcs sont représentés par des flèches.

Un chemin est une séquence d'arcs telle que l'extrémité terminale de chacun coïncide avec l'extrémité initiale du suivant. On dit qu'un chemin est simple s'il n'emprunte pas deux fois le même arc ; qu'il est élémentaire s'il ne passe pas deux fois par le même sommet.

Un circuit est un chemin dont les extrémités initiale et terminale sont confondues. Une boucle est un circuit de longueur 1 : l'arc  $(x_I, x_I)$  par exemple est une boucle.

### 3.2.2.2 Graphe séquentiel

Soit  $G = (X, U)$  un graphe orienté.  $G$  est un graphe séquentiel s'il satisfait aux deux conditions suivantes (Duharcourt, 1969) :

- L'ensemble  $X$  des sommets est partitionné en  $N$  sous ensembles  $X_0, X_1, \dots, X_{N-1}$  disjoints, totalement et strictement ordonnés :  
 $X_0$  précède  $X_1, X_1$  précède  $X_2, \dots, X_{N-2}$  précède  $X_{N-1}$ .

Le sous ensemble  $X_0$  est dit entrée du graphe,  $X_{N-1}$  est dit sortie du graphe. Ces deux sous-ensembles ne contiennent donc pas nécessairement un unique élément.

- Un arc ne peut joindre que deux sommets appartenant à deux sous ensembles  $X_i, X_{i+1}$  consécutifs.

Un graphe séquentiel est donc nécessairement ordonné. Il ne peut contenir ni boucle, ni circuit. Remarquons aussi qu'il ne peut exister d'arc entre deux sommets d'un même sous ensemble.

Un tel graphe peut être représenté comme sur la Figure 82. Les points figurent les sommets du graphe séquentiel, les flèches représentent les arcs :

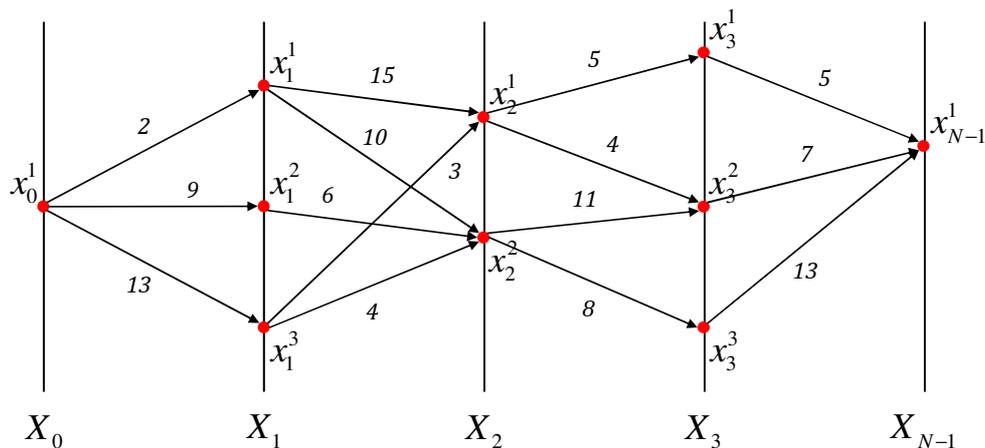


Figure 82. Représentation d'un graphe séquentiel

L'analogie avec un processus fini discret de décisions séquentielles est alors relativement directe. Aux « chemin optimal, sommets et arcs » du graphe séquentiel correspondent respectivement les « stratégie efficace, état du système étudié et décisions potentielles ponctuelles ».

### 3.2.3 Processus séquentiels discrets en avenir certain

En avenir certain, les processus de décision séquentiels peuvent être définis à partir des caractéristiques suivantes (Duharcourt, 1969) :

- Les décisions à prendre se présentent par étapes ou phases successives ;
- A l'instant  $n$ , soit au début de la phase  $(n+1)$ , le système étudié dans le problème se trouve dans un certain état connu, déterminé par les décisions antérieures :

$$x_n^r \in X_n$$

- Une décision  $d$  l'amène alors sur un état suivant :

$$d(x_n^r, x_{n+1}^s) \Rightarrow x_{n+1}^s \in X_{n+1}(x_n^r)$$

- Une séquence de décisions constitue une politique ou une stratégie dans le temps.

La séquence des états et la dépendance des décisions potentielles et de leurs performances aux états souligne le fait que chaque décision ne peut être prise isolément. Elle dépend des choix antérieurs et oriente la poursuite de la construction d'une stratégie.

On peut alors associer au processus d'évolution du système un graphe séquentiel. Sur celui-ci, la recherche d'une stratégie efficace peut alors être effectuée suivant le théorème de Bellman.

### 3.2.4 Théorème de Bellman en monocritère

Soit un graphe  $G = (X, U)$  un graphe séquentiel. On se place provisoirement en monocritère pour simplifier l'explication ; l'extension au multicritère est ensuite immédiate (3.2.6).

#### Hypothèses

On suppose qu'au début de chaque phase, le décideur connaît explicitement l'éventail des décisions envisageables à partir de chacun des états ainsi que leurs conséquences. Le choix d'une décision détermine donc parfaitement les conditions initiales de la suivante.

On suppose également qu'il est possible d'associer à chaque décision – soit chaque arc du graphe séquentiel sous-jacent – une valeur réelle (en monocritère) représentant le résultat ou la performance de la décision  $d$  :

$$v(u) = v(x_n^r, x_{n+1}^s)$$

Cette valeur ne dépend que des extrémités initiale et finale de l'arc, soit des états du système avant et après une prise de décision. Elles sont donc définies indépendamment des arcs précédents ou suivants dans un chemin.

La valeur d'une politique (d'un chemin global) est alors obtenue par sommation des performances des décisions successives.

#### Théorème

D'après le principe d'optimalité ou théorème de Bellman : « un chemin global optimal ne peut être formé que de chemins partiels optimaux ».

La démonstration par l'absurde de ce théorème est aisée.

Soit  $C$  un chemin de longueur minimale de  $x$  à  $z$ , passant par l'état  $y$ . On suppose que le chemin partiel de  $x$  à  $y$  n'est pas optimal. Dans ce cas, il existe un chemin partiel de longueur inférieure entre  $x$  et  $y$ , ce qui contredit l'optimalité de  $C$ .

Ce théorème fournit explicitement un algorithme récursif de recherche de chemin optimal dans un graphe quelconque, muni de l'ensemble  $V$  des valeurs des arcs.

$$V = \left\{ v(u) = v(x_n^r, x_{n+1}^s) / n \in [0; N-1], (x_n^r, x_{n+1}^s) \in X_n \times X_{n+1} \right\}$$

La mise en œuvre de cet algorithme est particulièrement aisée dans le cas des graphes séquentiels. Il peut être implémenté en remontant ou en descendant le temps.

### Algorithme remontant le temps

Sur la base des notations précédentes et sur un graphe séquentiel, le théorème de Bellman peut se traduire ainsi : « un chemin optimal de  $X_n$  à  $X_N$  ne peut être formé que de chemins partiels optimaux de  $X_{n+1}$  à  $X_N$  ». Soit :

$$OPT\left(v\left(x_n^r, -\right)\right) = OPT_{x_{n+1}^s \in X_{n+1}\left(x_n^r, -\right)} \left[ v\left(x_n^r, x_{n+1}^s\right) + OPT\left(v\left(x_{n+1}^s, -\right)\right) \right]$$

Avec les notations suivantes :

- Le signe **OPT** signifie optimum, soit minimum ou maximum, suivant les cas ;
- L'ensemble des sommets  $x_{n+1}$  qui sont à la fois extrémité terminale d'un arc issu de  $x_n^r$  et extrémité initiale d'un chemin aboutissant à la sortie  $X_N$  est noté :

$$X_{n+1}\left(x_n^r, -\right)$$

Cette dernière notation fait apparaître que le domaine de variation des sommets  $x_{n+1}^s$  à envisager pour le calcul d'optimisation à partir de  $x_n^r$  dépend de ce sommet  $x_n^r$  et de la disposition des arcs de décision des phases  $(n+1)$  à  $N$ .

### Algorithme descendant le temps

De la même manière, on peut écrire le théorème de Bellman en descendant le temps fictif – soit vers les valeurs croissantes de  $n$  – en se basant sur la propriété suivante : « un chemin optimal de  $X_0$  à  $X_n$  ne peut être formé qu'à partir de chemins partiels optimaux de  $X_0$  à  $X_{n-1}$  ».

$$OPT\left(v\left(-, x_n^r\right)\right) = OPT_{x_{n-1}^s \in X_{n-1}\left(-, x_n^r\right)} \left[ OPT\left(v\left(-, x_{n-1}^s\right)\right) + v\left(x_{n-1}^s, x_n^r\right) \right]$$

#### 3.2.5 Exemple

En guise d'illustration, nous appliquons le théorème de Bellman à la recherche du plus court chemin sur le graphe séquentiel de la Figure 82. On suppose que ce graphe séquentiel représente un problème de minimisation monocritère.

Ce graphe séquentiel vérifie les hypothèses du théorème de Bellman. Alors, nous comparons séquentiellement les sous-chemins partiels, en descendant le temps. Cette recherche séquentielle est illustrée par les graphiques de la Figure 83.

A la première phase de décision (Figure 83 (1)), tous les arcs mènent chacun à un unique sommet de l'ensemble  $X_1$ . Aussi, aucun chemin partiel ne peut être éliminé à ce stade.

A la deuxième étape de décision (Figure 83 (2)), les chemins partiels optimaux menant aux différents sommets de  $X_2$  doivent être déterminés.

On remarque que trois chemins partiels **CP** conduisent au sommet  $x_2^2$  de  $X_2$ , respectivement :

$$CP_1 = \{(x_0^1, x_1^1); (x_1^1, x_2^2)\}$$

$$CP_2 = \{(x_0^1, x_1^2); (x_1^2, x_2^2)\}$$

$$CP_3 = \{(x_0^1, x_1^3); (x_1^3, x_2^2)\}$$

Or, ces différents chemins partiels n'ont pas la même performance :

$$v(CP_1) = 2 + 10 = 12$$

$$v(CP_2) = 9 + 6 = 15$$

$$v(CP_3) = 13 + 4 = 16$$

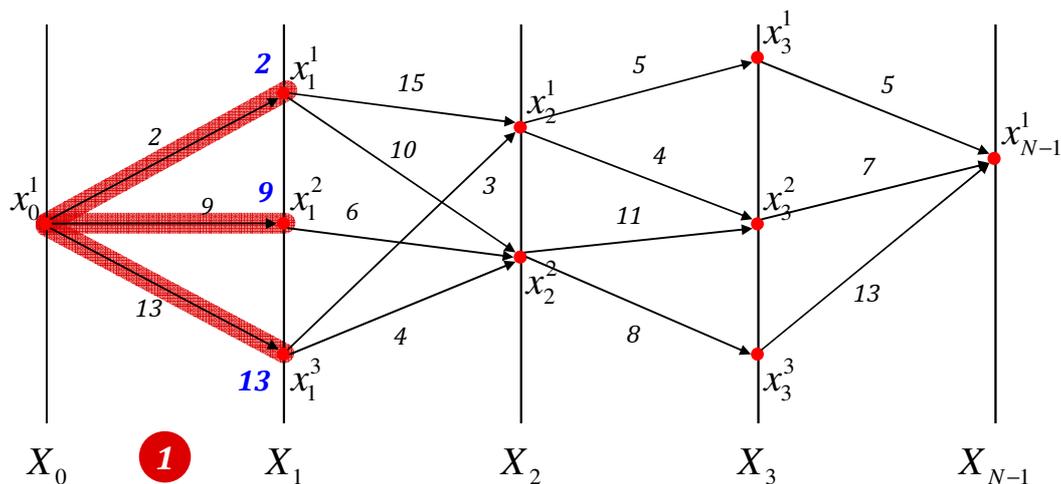
On en déduit que le chemin partiel optimal est  $CP_1$  (problème de minimisation).

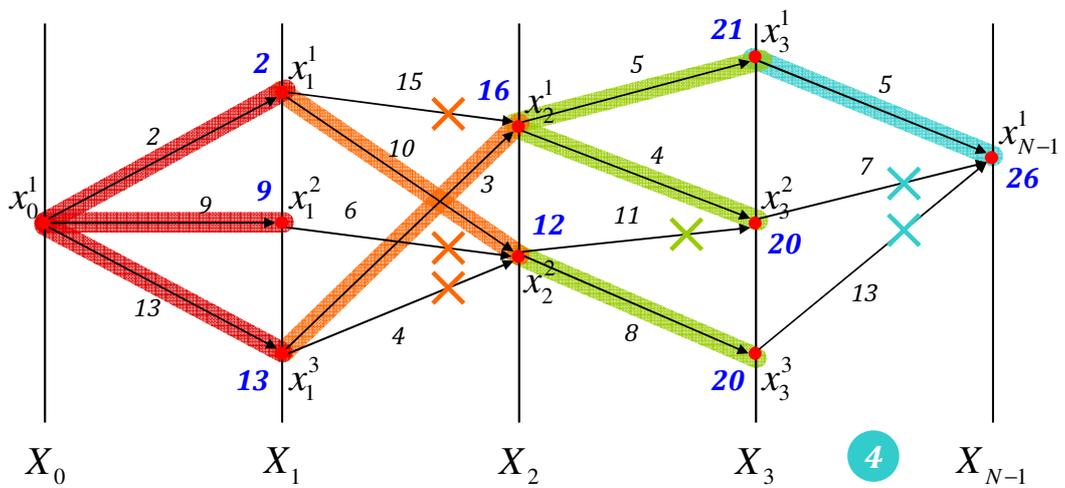
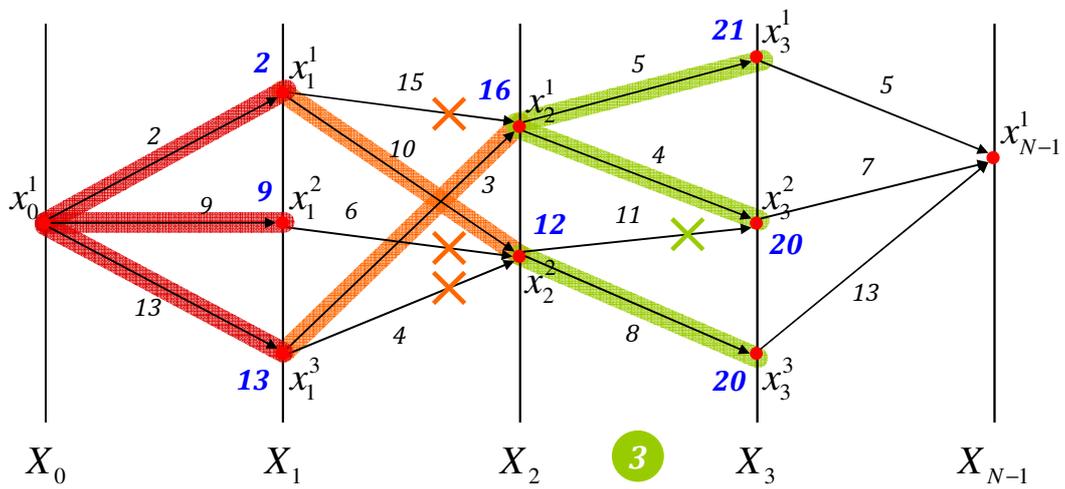
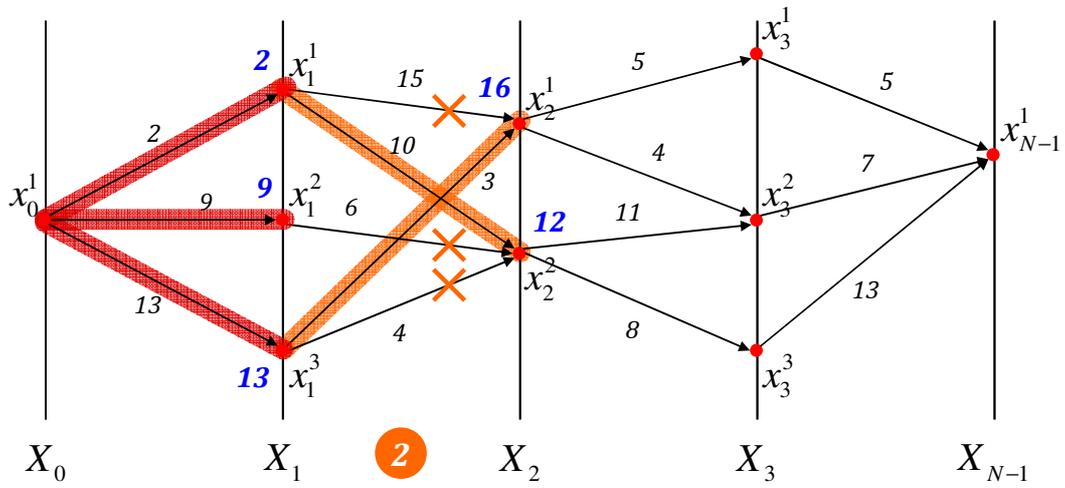
Selon le théorème de Bellman, un chemin optimal global ne peut être constitué que de chemins partiels optimaux. Aussi, la recherche récursive du plus court chemin dans le graphe séquentiel se poursuit donc uniquement pour ce chemin partiel  $CP_1$ , à partir du sommet  $x_2^2$ .

Le même principe est appliqué pour identifier le chemin partiel optimal menant à l'état  $x_2^1$ .

Par récursivité, les chemins partiels des étapes (3) et (4) (menant aux différents sommets des sous-ensembles  $X_3$  et  $X_4$  respectivement) sont également déterminés, ce qui permet finalement d'exhiber le chemin global optimal sur la Figure 83 (5) :

$$\text{Chemin}_{optimal} = \{(x_0^1, x_1^1); (x_1^1, x_2^1); (x_2^1, x_3^1); (x_3^1, x_{N-1}^1)\}$$





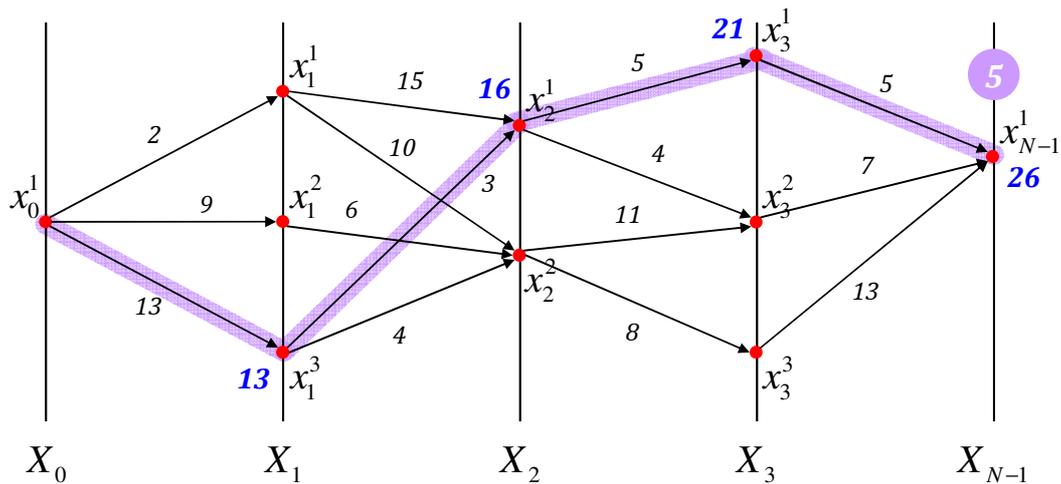


Figure 83. Recherche de plus court chemin sur un graphe séquentiel, à partir du théorème de Bellman

Sur ce graphe très simple, il existe 10 chemins différents entre  $X_0$  et  $X_{N-1}$ . L'évaluation de chaque chemin implique quatre opérations (additions), soit 40 opérations au total. Par la programmation dynamique, 15 additions suffisent à identifier le chemin optimal global. L'intérêt de la programmation dynamique est bien entendu d'autant plus évident lorsque la complexité du graphe et le nombre de possibilités augmentent.

### 3.2.6 Extension au multicritère

Dans le cadre des hypothèses énoncées précédemment, le théorème de Bellman ou principe d'optimalité est étendu à l'optimisation multicritère, en mobilisant la relation de dominance de Pareto pour discriminer les chemins partiels (Carraway et al., 1990).

#### Principe de Bellman en multicritère

Le principe d'optimalité s'énonce alors :

« Un chemin global efficace ne peut être formé que de chemins partiels non-dominés ».

Ou encore « tout chemin partiel d'un chemin efficace doit être efficace » (Vanderpooten, 2011).

Aussi, parmi les chemins partiels arrivant à un même sommet du graphe, seuls les chemins partiels non-dominés sont conservés pour la recherche récursive de la stratégie optimale globale, dans le cas d'un algorithme descendant le temps.

#### Exemple d'illustration

A la manière du cas monocritère, la recherche – ici multicritère – de plus court chemin sur un graphe séquentiel est illustrée sur un exemple simplifié (problème de minimisation à deux objectifs). Le graphe étudié, représenté en Figure 84, correspond à une réduction du graphe précédent, pour la simplicité de l'exposé.

Sur ce graphe, il apparaît que chaque décision présente une performance multicritère : à chaque arc du graphe correspond un vecteur ou couple de valeurs.

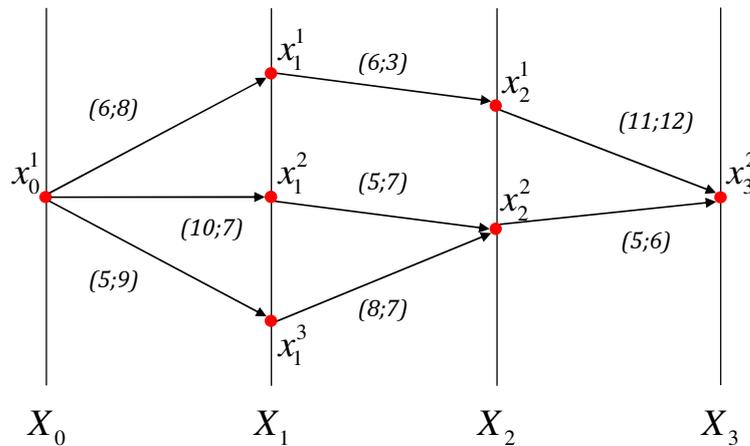


Figure 84. Graphe séquentiel multicritère (étudié en exemple)

La Figure 85 illustre alors la recherche multicritère de plus court chemin.

A la première phase de décision (Figure 85 (1)), tous les arcs mènent chacun à un unique sommet de l'ensemble  $X_1$ . Aussi, aucun chemin partiel ne peut être éliminé à ce stade.

A la deuxième étape de décision (Figure 85 (2)), les chemins partiels efficaces menant aux différents sommets de  $X_2$  doivent être déterminés. Si l'identification du chemin partiel non-dominé menant à l'état  $x_2^1$  est immédiate (1 unique possibilité), on remarque néanmoins que deux chemins partiels  $CP$  conduisent au sommet  $x_2^2$  de  $X_2$ , respectivement :

$$CP_1 = \{(x_0^1; x_1^2); (x_1^2; x_2^2)\}$$

$$CP_2 = \{(x_0^1; x_1^3); (x_1^3; x_2^2)\}$$

On évalue alors la performance multicritère de ces deux chemins partiels :

$$v(CP_1) = (15; 14)$$

$$v(CP_2) = (13; 16)$$

On en déduit que les chemins partiels  $CP_1$  et  $CP_2$  sont non-dominés, au sens de Pareto. Ce cas de figure est évidemment propre au multicritère. La recherche récursive à partir de  $x_2^2$  doit donc être poursuivie pour ces deux chemins partiels.

A la troisième et dernière étape de décision (Figure 85 (3)), trois chemins partiels permettent d'atteindre la sortie du graphe soit  $x_3^2$  : un chemin depuis le sommet  $x_2^1$  et deux depuis  $x_2^2$ . On évalue alors la performance multicritère des chemins constitués :

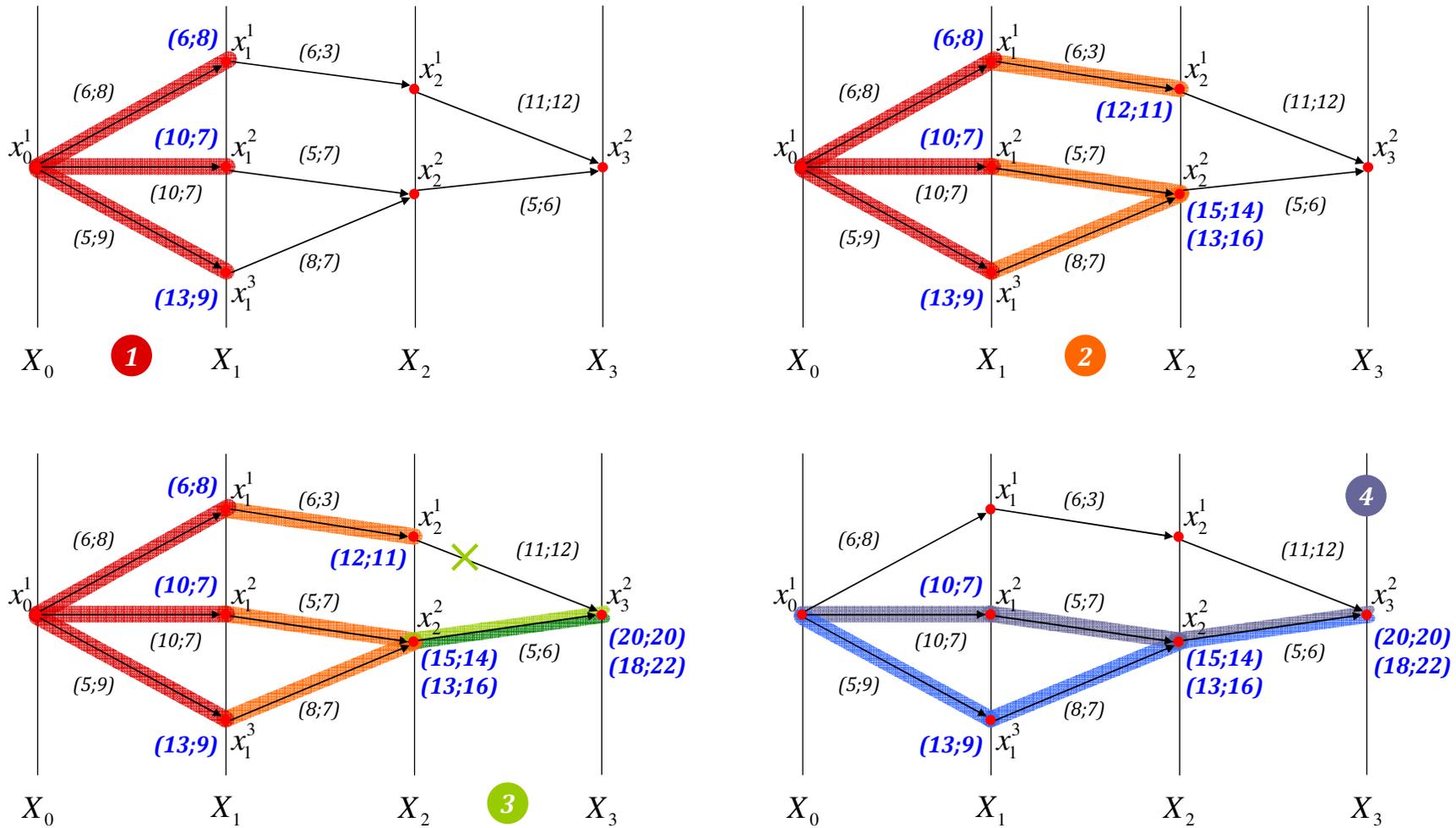


Figure 85. Recherche de plus court chemin sur un graphe séquentiel, à partir du théorème de Bellman, en **MULTICRITERE**

$$v(CP_A) = v\left(\{(x_0^1; x_1^1); (x_1^1; x_2^1); (x_2^1; x_3^2)\}\right) = (23; 23)$$

$$v(CP_B) = v\left(\{(x_0^1; x_1^2); (x_1^2; x_2^2); (x_2^2; x_3^2)\}\right) = (20; 20)$$

$$v(CP_C) = v\left(\{(x_0^1; x_1^3); (x_1^3; x_2^2); (x_2^2; x_3^2)\}\right) = (18; 22)$$

On en déduit que les chemins partiels  $CP_B$  et  $CP_C$  sont des solutions efficaces mais que  $CP_A$  est une solution dominée.

La Figure 85 (5) illustre le résultat de la programmation dynamique multicritère : ce graphe séquentiel multicritère admet deux solutions, soit deux chemins non dominés :  $CP_B$  et  $CP_C$ .

$$CP_B = \{(x_0^1; x_1^2); (x_1^2; x_2^2); (x_2^2; x_3^2)\}$$

$$CP_C = \{(x_0^1; x_1^3); (x_1^3; x_2^2); (x_2^2; x_3^2)\}$$

Le résultat de la programmation dynamique multicritère est donc un ensemble de solutions efficaces. En multicritère, l'algorithme récursif doit mener la recherche à partir de chaque sommet pour l'ensemble des chemins partiels non-dominés qui permettent de l'atteindre.

### 3.2.7 Applications à la conception de bâtiments

D'Cruz et Radford (1987) ont utilisé la programmation dynamique multicritère pour optimiser la conception, au stade de l'esquisse, de bâtiments parallélépipédiques.

Les variables de décision portent sur la forme, l'orientation, la composition de l'enveloppe, la distribution intérieure. Les critères de décision ciblent le besoin d'énergie pour le chauffage et la climatisation, le facteur de lumière du jour, les coûts d'investissements et la surface habitable hors couloirs de circulations.

La modélisation de la conception comme un processus de décisions séquentielles correspond à la séquence des choix sur les différentes variables de décision.

Les fonctions objectifs (par exemple le calcul des besoins énergétiques) ne se présentant pas sous une forme additive sur les pseudo-étapes, le graphe séquentiel est construit pour satisfaire aux hypothèses de séparabilité et monotonie nécessaires à la mise en œuvre de la programmation dynamique dans ce cas et permettre la construction d'un algorithme récursif. Les états séquentiels du système décrivent ainsi les sous-ensembles suivants : orientation, composition des murs, composition de la toiture, forme, distribution intérieure.

## 3.3 Application à la réhabilitation énergétique

### 3.3.1 Un processus fini discret de décisions séquentielles

L'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique est un processus fini discret de décisions séquentielles (dans le cadre du problème posé dans ces travaux), comme le soulignent les éléments suivants.

La planification dans le temps des différentes phases de travaux impose le caractère séquentiel de la décision. A chaque nouvelle phase de réhabilitation, une mesure élémentaire doit être mise en œuvre, en fonction de la configuration courante du bâtiment à réhabiliter ainsi que du potentiel des actions suivantes de réhabilitation.

A une phase de réhabilitation donnée, la configuration courante du bâtiment à réhabiliter est un état connu, entièrement déterminé par les mesures mises en œuvre depuis l'état initial (avant réhabilitation), soit par la séquence des décisions antérieures.

Une nouvelle décision, la mise en œuvre d'une mesure de réhabilitation additionnelle, amène le bâtiment dans un nouvel état, soit une nouvelle configuration courante. Le nombre des décisions possibles est fini, compte tenu du nombre donné de variantes sur les mesures de réhabilitation.

A une phase donnée du programme séquentiel, le choix d'une mesure de réhabilitation énergétique doit être posé en termes dynamiques.

Certes, les fonctions objectifs définies, sur la limitation des impacts environnementaux, les coûts économiques ou l'inconfort thermique, sont évaluées sur le cycle de vie, ce qui permet de mesurer les performances des programmes au-delà des seuls effets immédiats.

Cependant, à l'issue d'une phase de réhabilitation, il sera nécessaire de prendre de nouvelles décisions et l'éventail des possibilités ainsi que les performances des mesures potentielles dépendront alors des choix précédents (cf. interactions entre les mesures, Chapitre 1).

L'aide à la décision doit donc se préoccuper de la cohérence temporelle des interventions, dont les conditions et les conséquences sont mutuellement dépendantes.

La séquence des décisions prises, soit la mise en œuvre des mesures de réhabilitation séquentielles permet de construire un programme de réhabilitation dans le temps. Les étapes de décision sont certes planifiées en conception du programme mais demeurent bien réelles et correspondent au temps physique entre la mise en œuvre de deux mesures successives.

### 3.3.2 Graphe séquentiel et réhabilitation énergétique

Comme l'illustre la Figure 86, le processus de décisions séquentielles, sous-jacent à la réhabilitation énergétique, peut être représenté par un graphe pour lequel :

- Chaque sommet, soit chacun des états séquentiels du système, correspond à une combinaison de mesures de réhabilitation mise en œuvre.

(Exemple : ITE Façades laine minérale 200mm + Remplacement des fenêtres par des ouvertures double vitrage + Installation d'une ventilation double flux).

La combinaison ne tient pas compte de la séquence des travaux ;

- Chaque arc, soit chaque décision, représente la mise en œuvre d'une nouvelle mesure de réhabilitation élémentaire.  
(Exemple : ITE Toiture polyuréthane 150mm).

Les mesures élémentaires incluent les différentes variantes sur un même type de mesure de réhabilitation. Une isolation thermique par l'extérieur (ITE) de 150mm de laine minérale est ainsi une variante de mesures élémentaires du type « isolation thermique des façades ». Les différentes variantes conduisent à des états différents. Seules les mesures appartenant à des types différents peuvent être associées pour former des combinaisons.

Sur ce graphe de la Figure 86, on note :

- $N$  représente le nombre de type de mesures élémentaires de réhabilitation ;
- $X_i$  est l'ensemble des sommets de l'étape de réhabilitation  $i$  ;
- $x_i^j$  est l'état  $j$  de la phase de réhabilitation  $i$ .

L'entrée du graphe est l'état initial du bâtiment, avant réhabilitation. Le sous-ensemble d'entrée ne comprend par conséquent qu'un unique sommet  $x_0^1$ .

A partir d'un état donné, l'ensemble des décisions potentielles est défini comme l'ensemble des mesures élémentaires de réhabilitation n'appartenant à aucun des types précédemment mis en œuvre. Aussi, l'ensemble des mesures élémentaires considérées définit directement celui des décisions potentielles à partir de  $x_0^1$  et celui des états de  $X_1$ .

Par construction, les états de la phase  $i$  de réhabilitation (sommets appartenant au sous-ensemble  $X_i$ ) sont des combinaisons de  $i$  mesures de réhabilitation ; une mesure ayant été mise en œuvre à chaque phase précédente. On en déduit donc que le nombre d'étapes décisionnelles du graphe séquentiel est égal au nombre de types de mesures élémentaires.

Sur la Figure 86, seuls quelques exemples de sommets de  $X_2$ , atteints à partir du sommet  $x_1^{21}$  de  $X_1$  ont été représentés, par souci de lisibilité. Ces états correspondent à la mise en œuvre d'une combinaison de deux mesures de réhabilitation, appartenant à deux types différents.

A partir d'un sommet de l'ensemble  $X_i$ , tous les sommets  $X_{i+1}$  ne peuvent être atteints.

En effet, un état donné  $x_{i+1}^j$  de  $X_{i+1}$  ne peut être atteint qu'à partir d'états de  $X_i$  qui soient combinaisons de toutes les mesures de  $x_{i+1}^j$  sauf une.

De plus, seules les décisions n'appartenant pas aux types de mesures de réhabilitation précédemment mises en œuvre peuvent être considérés pour transformer la configuration courante.

$x_1^{21}$  et  $x_1^{22}$  sont deux sommets issus de décisions relevant du même type de mesures élémentaires de réhabilitation. Aussi, il n'existe aucun chemin permettant, à partir de  $x_1^{22}$ , d'atteindre un état construit à partir de  $x_1^{21}$ .

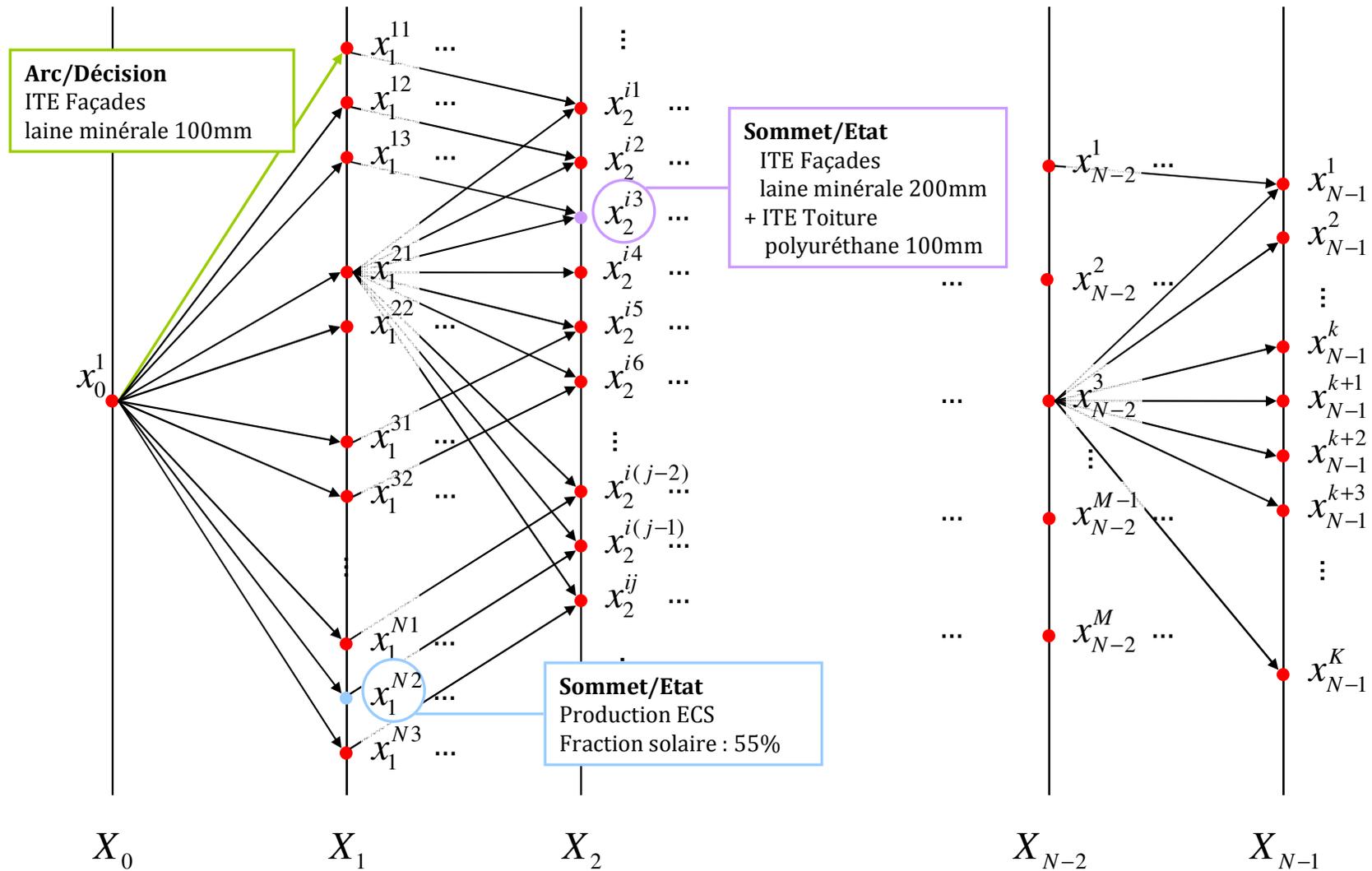


Figure 86. Graphe séquentiel pour la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments

Par construction également, les chemins partiels menant à un sommet donné représentent toutes les permutations d'une même combinaison de mesures élémentaires de réhabilitation. La recherche du chemin partiel optimal conduit donc à discriminer les solutions partielles (par la relation de dominance) sur la base de la séquence de mise en œuvre.

On remarque ainsi sur la Figure 86 que chacun des états de  $X_2$  est systématiquement atteint par deux chemins partiels ; soient les deux permutations possibles d'une même combinaison de deux mesures de réhabilitation.

Le graphe proposé ne présente pas un unique état mais un ensemble d'états terminaux. Le sous-ensemble de sortie contient différents sommets, correspondant à toutes les combinaisons potentielles de mesures élémentaires définissant les programmes de réhabilitation.

### 3.3.3 Vérification des hypothèses du théorème de Bellman

Pour pouvoir appliquer le principe d'optimalité à la recherche des solutions efficaces sur le graphe défini, nous vérifions qu'il s'agit bien d'un graphe séquentiel et que les hypothèses du théorème de Bellman sont vérifiées.

#### Graphe séquentiel

L'ensemble  $X$  des sommets (ou états partiels du système) est partitionné en  $N$  sous-ensembles  $X_i$ , correspondant respectivement à l'ensemble des combinaisons de  $i$  mesures de réhabilitation. Par conséquent, ces sous-ensembles sont nécessairement disjoints.

De plus, le sous-ensemble  $X_{i+1}$  est obtenu à partir de l'application d'une nouvelle mesure (décision) aux éléments de  $X_i$  (l'ensemble des décisions à partir d'un état de  $X_i$  dépendant lui-même de l'état considéré) Les sous ensembles  $X_i$  sont donc totalement et strictement ordonnés.

Par ailleurs, un arc correspondant à la mise en œuvre d'une nouvelle mesure de réhabilitation, les arcs du graphe défini relient nécessairement une combinaison de  $i$  mesures à une combinaison de  $(i+1)$  mesures soit les sommets de deux sous-ensembles  $X_i$  et  $X_{i+1}$  consécutifs.

Le graphe défini ci-dessus est donc un graphe séquentiel.

#### Hypothèses du théorème de Bellman

L'ensemble des mesures élémentaires considéré pour la réhabilitation énergétique d'un bâtiment est une donnée du problème d'identification de stratégies efficaces ; il est donc connu. De plus, à partir d'un état donné, soit à partir d'une étape du programme de réhabilitation, l'ensemble des décisions potentielles est défini comme l'ensemble des mesures de réhabilitation n'appartenant à aucun des types de mesures précédemment mis en œuvre. Celui-ci est connu à partir de la combinaison de mesures définissant l'état considéré.

On en conclut qu'au début de chaque phase, le décideur connaît explicitement l'ensemble des décisions envisageables.

Il nous faut à présent démontrer que la performance d'une décision donnée ne dépend que de l'état initial et de l'état final sous-jacents, et est donc indépendante des décisions précédentes.

A chaque phase de réhabilitation, une décision représente la mise en œuvre d'une mesure de réhabilitation donnée, à partir de la configuration courante (partiellement réhabilitée) du bâtiment considéré. Sa performance multicritère est évaluée à partir du modèle de cycle de vie exposé au Chapitre 1, suivant la formule :

$$FO_{\alpha} = \sum_j f_{PRODr,\alpha,i}(q_j) + \sum_k f_{EOLd,\alpha,i}(p_k) + f_{USE,\alpha,i}(C_h, C_{DHW}, C_e) + \sum_j f_{EOLr,\alpha,i}(q_j)$$

Les notations adoptées sont celles du Chapitre 1.

Sur la phase de réhabilitation, le premier terme est fonction de la production des composants mis en œuvre ; le deuxième du traitement en fin de vie des composants déposés ; le troisième des consommations énergétiques en exploitation ; le quatrième du traitement en fin de vie des composants produits pour la réhabilitation.

Par conséquent, dans un contexte donné (climat, environnement urbain, scénario d'occupation), la performance multicritère de toute décision ne dépend que de la donnée des : composants de bâtiments préexistants déposés et de ceux mis en œuvre en réhabilitation.

Ces ensembles de composants sont entièrement déterminés à partir de la combinaison de mesures précédemment mise en œuvre et choisie pour une phase de réhabilitation donnée. Elle est directement identifiée par la définition des états initiaux et finaux de toute décision.

La performance d'une décision du graphe séquentiel ne dépend donc que des états initiaux et finaux, pour toute décision donnée.

On pouvait également remarquer que les chemins partiels atteignant un état donné correspondent uniquement aux différentes séquences de mise en œuvre (permutations) d'une même combinaison de mesures de réhabilitation. Or, la performance multicritère évaluée, en un état donné, ne dépend pas de l'ordre des mesures précédemment mises en œuvre. Elle est donc indépendante des décisions précédentes.

Enfin il est important de souligner que la distinction, sur des états différents, des variantes de mesures de réhabilitation appartenant à un même type, demeure essentielle. Sinon, l'indépendance des performances aux décisions précédentes n'est plus garantie. L'analyse des interactions entre les mesures a en effet permis de montrer que les combinaisons sur des variantes d'une même type de mesure de réhabilitation (ex. ITE laine de verre de 15 ou 20 cm) ne peuvent constituer un état unique car ils ont une influence sur les performances des mesures suivantes. Par exemple, en fonction du niveau d'isolation mis en œuvre sur la paroi, les potentiels des mesures de réhabilitation séquentielles peuvent être affectés (ex. besoin de chauffage pour le dimensionnement de la chaudière).

Les hypothèses du théorème de Bellman sont donc vérifiées ; le principe d'optimalité peut être utilisé sur le graphe séquentiel présenté pour conduire la recherche de stratégies efficaces. Cette méthode d'optimisation a donc été implémentée dans le code du logiciel PLEIADES+COMFIE, dans le cas général (indépendamment du bâtiment préexistant). Ce développement logiciel nous permet à présent d'envisager l'application à différentes études de cas.

## 3.4 Etude de cas et comparaison aux méthodes approchées

Méthode d'optimisation exacte, la programmation dynamique permet d'identifier le front de Pareto du problème et non pas simplement un ensemble de solutions, non-dominées entre elles, s'en approchant.

Nous nous proposons ainsi d'exploiter, sur une étude de cas, la connaissance des solutions exactes pour qualifier la qualité de méthodes d'optimisation approchées, telles les algorithmes génétiques utilisés au Chapitre 2, ou encore l'algorithme glouton. Les solutions exactes permettent également de quantifier l'intérêt de la réhabilitation énergétique par rapport au scénario de l'inaction. Les sections suivantes reviennent sur ces trois comparaisons.

L'étude de cas de la barre Grimaud est ici menée sur l'espace de recherche 2, défini au Chapitre 1. Pour rappel, cet espace de décision présente les variantes détaillées sur le Tableau 28, pour chacune des mesures de réhabilitation. Le type d'ouvrants et l'épaisseur d'isolation mis en œuvre ne sont pas différenciés suivant l'orientation des façades.

Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation
Murs de façades	ITE laine minérale : 100, 150 ou 200 mm
Toiture	ITE polyuréthane : 150, 200 ou 300 mm
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100, 150 ou 200 mm
Ouvertures	Double ou triple vitrages basse émissivité, menuiseries bois
Ventilation	Double flux ou ventilation de type Hygro-B
Chauffage	Chaudière gaz à condensation
Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%, 55% ou 75%

**Tableau 28. Mesures élémentaires de réhabilitation pour la barre Grimaud (espace de recherche 2)**

Cet espace de recherche est préféré ici à l'espace de recherche 1, du fait de sa moindre cardinalité permettant de réduire les temps de calcul en programmation dynamique.

### 3.4.1 Algorithme génétique et solutions exactes

La première étude comparative s'intéresse aux solutions respectives des approches par algorithme génétique et programmation dynamique. Il s'agit ici de caractériser la qualité des solutions approchées de l'algorithme génétique par rapport au front de Pareto exact, identifié par la programmation dynamique.

Aussi, deux calculs d'optimisation multicritère sont lancés : le premier par programmation dynamique, le second par algorithme génétique. Tous deux sont menés sur le même espace de décision (espace de recherche 2), et visent l'identification des stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle pour la barre Grimaud.

Les paramètres utilisés pour l'optimisation par algorithme génétique sont ceux du Chapitre 2 :

- Nombre d'individus dans la population courante : 200 ;

- Nombre d'enfants générés à chaque génération : 200 ;
- Nombre de générations : 100 ;
- Probabilité de croisement sur les chromosomes composition et ordre : 80% ;
- Probabilité de mutation sur les chromosomes composition et ordre : 1%.

L'espace de recherche compte 1 632 960 solutions potentielles. Moins de 1,3% de ces solutions (20,000 individus) sont donc évalués au cours des 100 générations de l'algorithme génétique.

### Résultats et comparaisons des fronts de solutions non-dominées

Les Figure 87 à Figure 92 représentent, dans l'espace des objectifs, les deux ensembles de solutions non-dominées, identifiés respectivement par les approches par programmation dynamique et algorithme génétique. La comparaison des solutions est considérée uniquement dans l'espace des objectifs, il s'agit de comparer les performances des solutions identifiées.

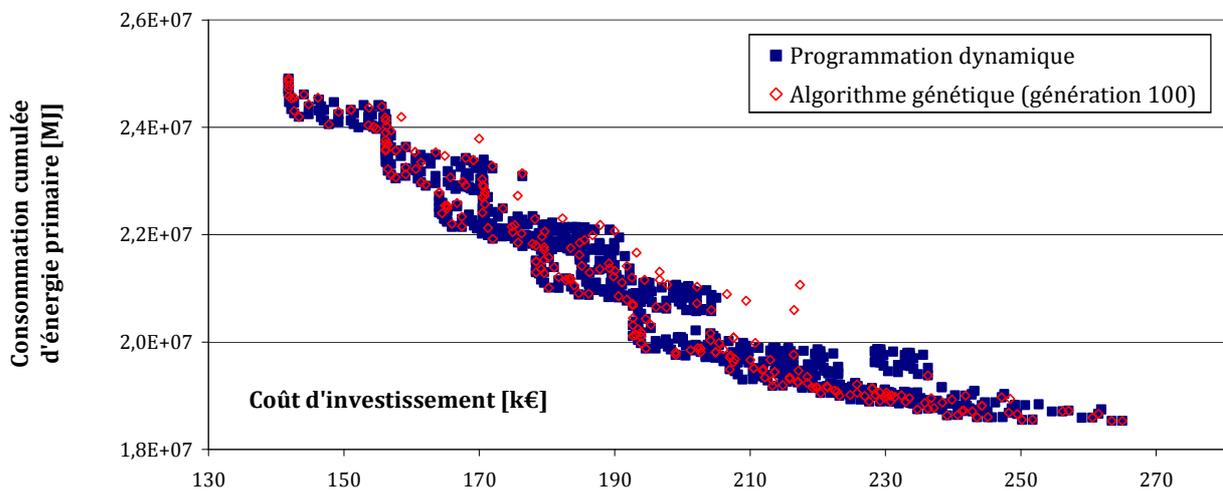


Figure 87. Comparaison des fronts de Pareto pour le compromis entre investissement et énergie

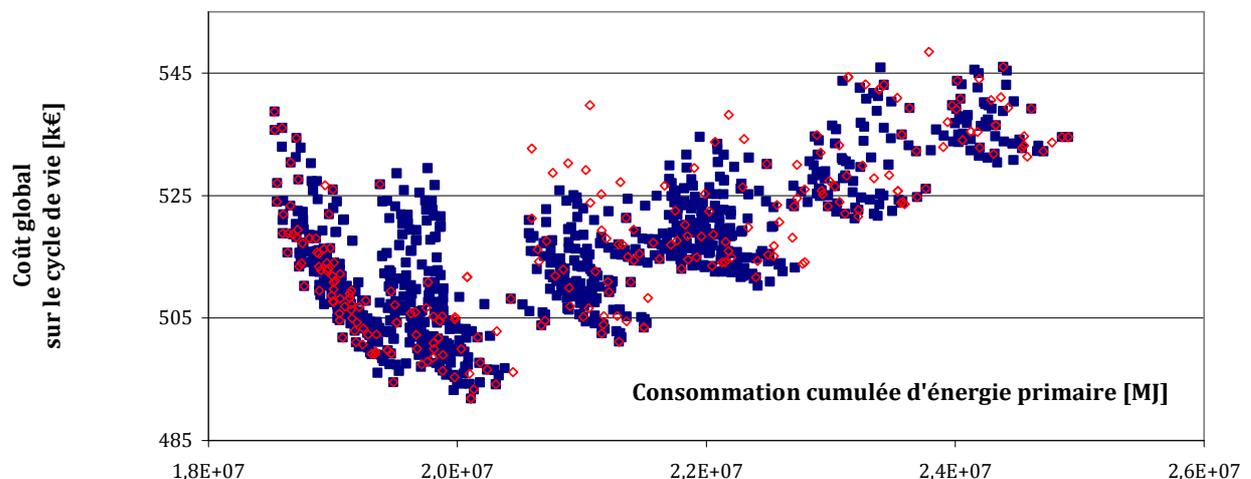


Figure 88. Comparaison des fronts de Pareto pour le compromis entre énergie et coût global

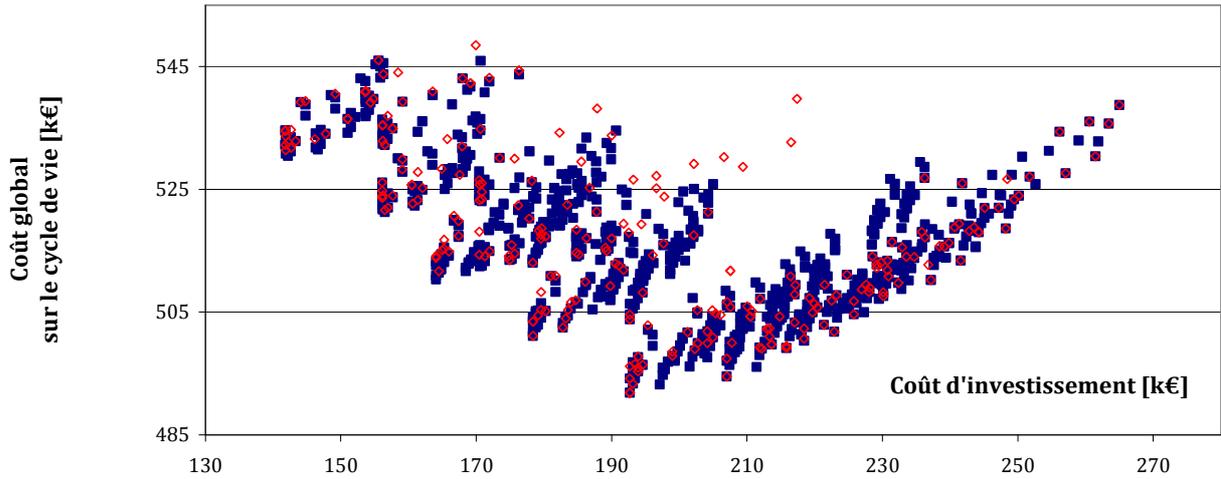


Figure 89. Comparaison des fronts de Pareto pour le compromis entre investissement et coût global

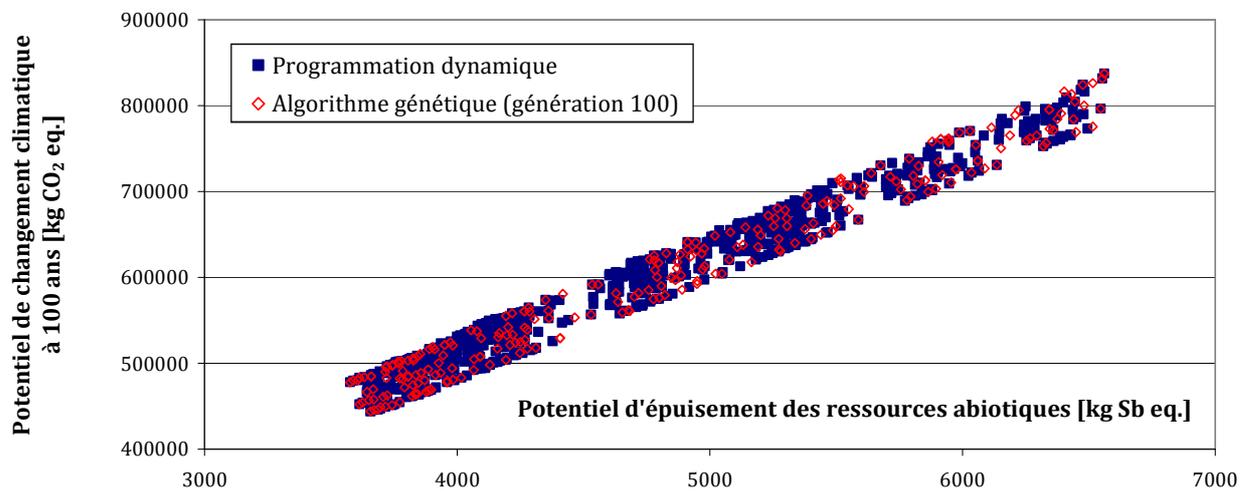


Figure 90. Comparaison des fronts pour le compromis entre ressources et changement climatique

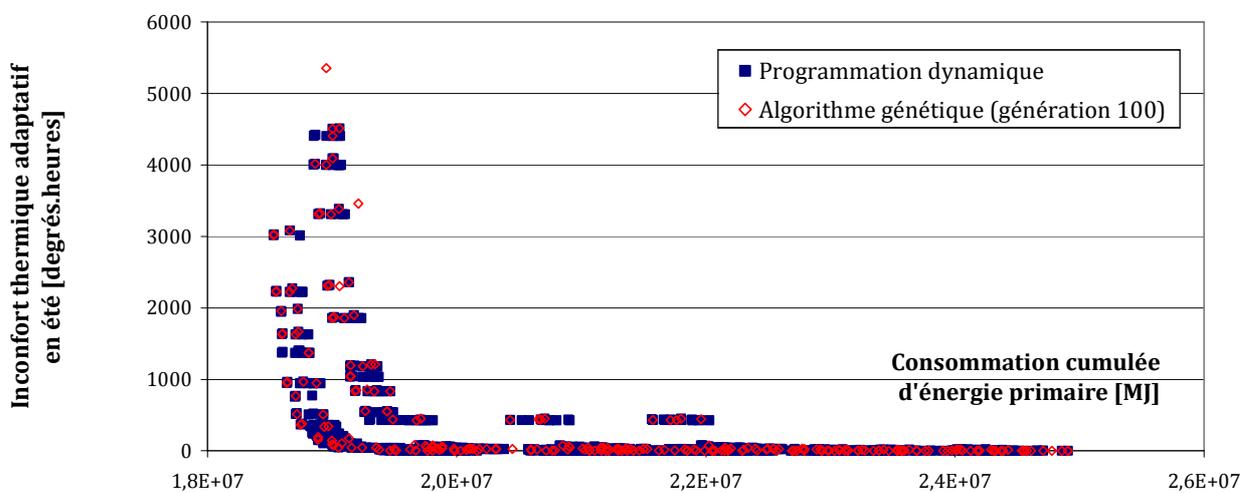


Figure 91. Comparaison des fronts pour le compromis entre énergie et confort thermique

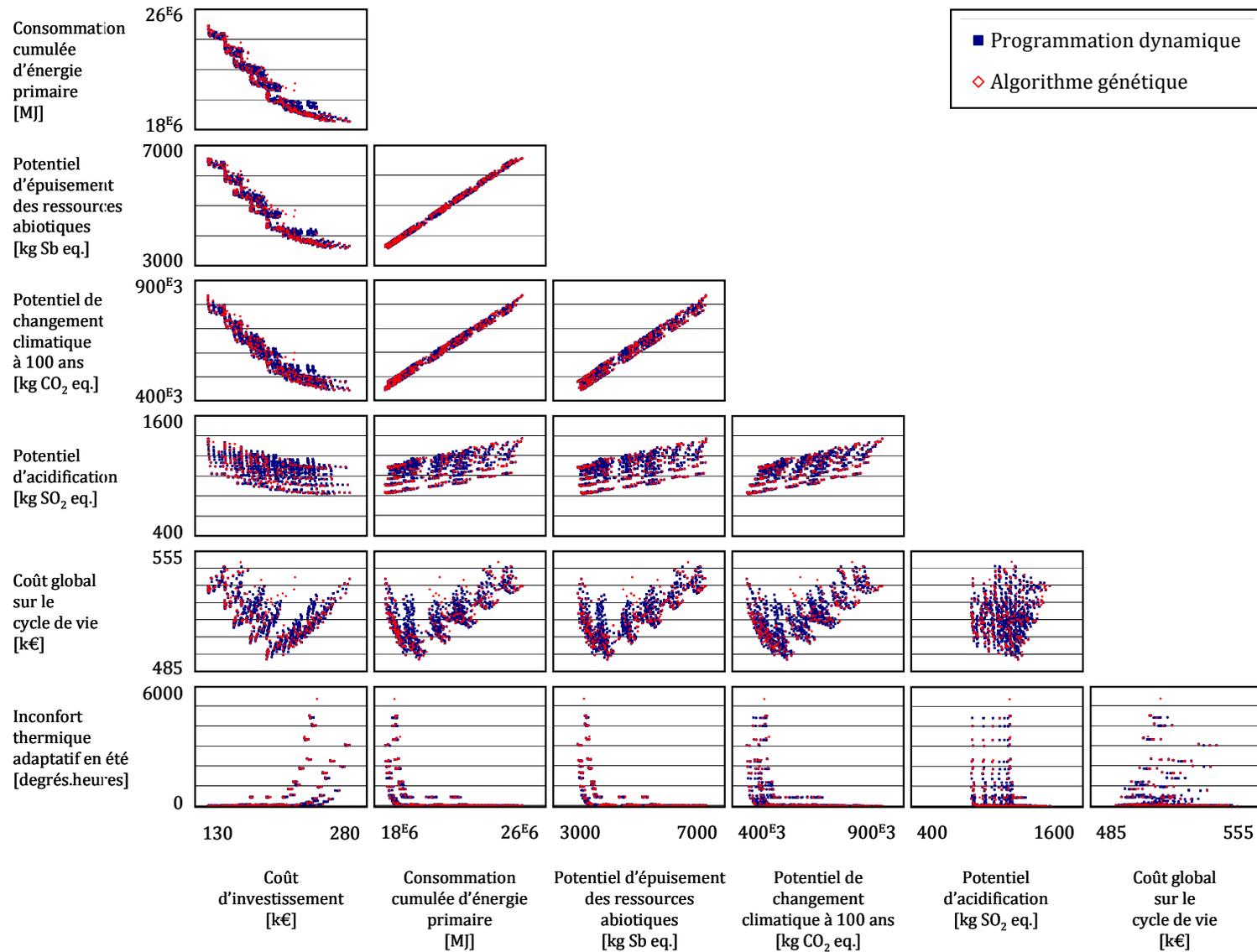


Figure 92. Comparaison des fronts de Pareto approché par algorithme génétique (génération 100) ou exact par programmation dynamique

La Figure 92 expose la projection des solutions obtenues sur les 21 plans définis par les 7 critères de décision utilisés ici. Les Figure 87 à Figure 91 permettent de visualiser plus précisément les surfaces de compromis pour certains couples de critères.

L'analyse de l'ensemble de ces figures permet de dresser quelques constats intéressants :

- On observe un net recouvrement de l'ensemble des solutions exactes par le front de l'algorithme génétique, ce qui souligne la qualité des solutions approchées obtenues. De plus, celles-ci se répartissent sur l'ensemble de l'étendue du front exact. Les ensembles de solutions identifiés décrivent ainsi globalement les mêmes comportements, pour la surface de compromis. Les compromis inter-critères ont été précédemment décrits au Chapitre 2 ;
- Certaines des solutions approchées ne correspondent cependant à aucune des solutions exactes. Sur les Figure 87 à Figure 91, il est aisé d'identifier quelques points pour lesquels la solution approchée (losange à bords rouges) ne recouvre aucune solution exacte (carré bleu). Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation approchées pour lesquelles aucune convergence des solutions n'est garantie. L'évolution de la population sur 100 générations n'a pas suffi à remplir la population courante uniquement par des solutions efficaces appartenant au front exact.
- Enfin, on remarque qu'un nombre significatif de solutions exactes n'a pas été identifié par l'algorithme génétique (carrés bleu non recouverts d'un losange rouge sur les figures précédentes). Cette remarque trouve une explication simple. Le nombre de solutions efficaces identifiables par un algorithme génétique est nécessairement conditionné par les paramètres fixant la taille de la population courante et le nombre d'enfants générés à chaque génération. Il est souvent inférieur au nombre total de solutions efficaces d'un problème. Par exemple, 258 solutions non-dominées sont ici identifiées parmi les 200 individus de la population courante et les 200 enfants générés, à la génération 100. Au total, on dénombre 827 solutions efficaces exactes, par la programmation dynamique. Aussi, le front non-dominé approché représente souvent un sous-ensemble du front de Pareto du problème, identifié par une méthode exacte comme la programmation dynamique. La description de la surface de compromis est donc nécessairement partielle dans ce cas.

### Performances moyennes et optimales sur chaque critère

Nous poursuivons la comparaison des deux ensembles de solutions par l'analyse des valeurs moyennes et optimales, sur chaque critère, obtenues par chacun des fronts de solutions.

Le Tableau 29 met ainsi en évidence que les solutions correspondant aux optimums locaux exacts, sur chacune des fonctions objectifs, sont également identifiés par l'algorithme génétique, parmi les solutions non-dominées de la génération 100.

De plus, il est intéressant d'observer que l'indicateur portant sur la moyenne des performances des solutions non-dominées, pour chaque fonction objectif, permet d'identifier une différence dans la description de la surface de compromis.

Fonctions objectifs	Programmation dynamique Optimisation multicritère exacte		Algorithme génétique (Génération 100) Optimisation multicritère approchée	
	Minimum	Moyenne	Minimum	Moyenne
Consommation cumulée d'énergie primaire [MJ]	18531336,80	20883359,2	18531336,80	21161168,1
Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques [kg Sb eq.]	3575,74	4706,82	3575,74	4851,69
Potentiel de changement climatique à 100 ans [kg CO <sub>2</sub> eq.]	443913,59	593184,22	443913,59	607261,21
Potentiel d'acidification [kg SO <sub>2</sub> eq.]	821,54	1064,82	821,54	1059,15
Coût d'investissement [k€]	141,82	197,54	141,82	193,49
Coût global sur le cycle de vie [k€]	491,86	515,67	491,86	517,79
Inconfort thermique adaptatif d'été [°C.heures]	0	316,17	0	483,19

**Tableau 29. Performances optimales et moyennes des ensembles de solutions non-dominées**

La moyenne des performances des individus non-dominés de l'algorithme génétique est inférieure à celle des solutions exactes pour deux des fonctions objectifs : potentiel d'acidification et coût d'investissement. Pour les autres critères considérés, le constat inverse s'impose. Ainsi, les solutions non-dominées identifiées par l'algorithme génétique (à la génération 100) constituent globalement un sous-ensemble du front exact, caractérisé en moyenne par des solutions performantes sur le potentiel d'acidification et le coût d'investissement. Néanmoins les différences observées sont très faibles.

### **Conclusion sur la comparaison des solutions de l'algorithme génétique au front exact**

En conclusion, au regard des résultats précédents, il apparaît que des méthodes approchées telles que les algorithmes génétiques permettent d'identifier efficacement (en évaluant moins de 1,3% des solutions de l'espace de recherche) un ensemble de solutions non-dominées performantes et décrivant relativement fidèlement les surfaces de compromis exactes. Cette conclusion demeure cependant issue d'une étude de cas, pour laquelle l'espace de recherche compte environ 1,6 million de solutions potentielles. Aussi, il demeure intéressant de mener des études complémentaires sur des espaces de recherche plus vastes.

### **3.4.2 Algorithme glouton et solutions exactes**

La connaissance des solutions exactes du problème, issue de l'approche par programmation dynamique, peut également être exploitée pour remettre en cause certaines méthodes approchées simplifiées, parfois utilisées en contexte opérationnel. Les solutions exactes du problème peuvent alors servir à qualifier la qualité et les implications de certaines stratégies approchées et court-termistes, comme les approches par algorithme glouton.

#### **Principe de l'algorithme glouton**

Parfois retenu par les équipes opérationnelles, l'algorithme glouton est très simple à mettre en œuvre. Son principe consiste à sélectionner à chaque phase de décision, la ou les solution(s) offrant les bénéfices immédiats les plus intéressants. L'approche par algorithme glouton est donc intrinsèquement court-termiste. Elle ignore les conséquences d'une décision particulière sur le processus global de décisions séquentielles, sur les performances globales et les interactions avec les décisions potentielles suivantes.

#### **Application à la réhabilitation énergétique séquentielle**

Appliqué au cas de la réhabilitation énergétique séquentielle, l'algorithme glouton consiste à sélectionner, à chaque phase de travaux, la ou les mesures de réhabilitation permettant de constituer des sous-programmes de réhabilitation aux performances non-dominées.

A chaque phase de décision, ces performances sont calculées sur la base de la production et du traitement en fin de vie des composants mis en œuvre en réhabilitation ainsi que du traitement en fin de vie des composants déposés, lors de l'ensemble des phases de travaux précédentes jusqu'à la phase de décision courante, incluse. Les impacts liés à l'exploitation du bâtiment sont également intégrés jusqu'à la phase de réhabilitation suivante.

## Résultats et comparaison des solutions gloutonnes au front exact

L'algorithme glouton a été appliqué à l'étude de cas sur la réhabilitation de la barre Grimaud, sur l'espace de recherche 2. Nous comparons tout d'abord les solutions sur la base de leurs performances, dans l'espace des objectifs. Les résultats sont présentés ci-après.

La Figure 93 représente les fronts approché et exact de solutions non-dominées, identifiés respectivement par l'algorithme glouton ou par la programmation dynamique. De même que précédemment, la surface de compromis en dimension 7 a été projetée sur les 21 plans définis par les couples de critères de décision, pour rendre possible la lecture graphique.

Les Figure 94 à Figure 97 donnent une vision plus détaillée des compromis entre quelques couples de critères. Les solutions **B** et **G** portées sur ces graphiques sont exploitées dans les développements suivants.

L'analyse de ces figures est riche de plusieurs enseignements :

- L'approche gloutonne offre une description très partielle de la surface de compromis du problème. Alors que 827 solutions efficaces sont identifiées par l'optimisation exacte, seulement 22 solutions efficaces décrivent la surface de compromis obtenue par l'algorithme glouton. Pourtant, le nombre de solutions de l'algorithme glouton n'est contraint par aucun paramètre d'optimisation. De plus, ces solutions approchées se concentrent dans certaines régions du front de Pareto exact du problème ;
- Aucune des solutions identifiées par l'algorithme glouton n'appartient au front de Pareto exact du problème, même si elles demeurent voisines de certaines des solutions du front. A minima, les solutions de l'algorithme glouton diffèrent de celles de la programmation dynamique du point de vue du phasage des travaux ;
- Enfin, l'algorithme glouton ne permet pas d'identifier les solutions les plus efficaces en termes de réduction des impacts environnementaux (ici : consommation cumulée d'énergie primaire, potentiel de changement climatique à 100 ans, potentiel d'épuisement des ressources naturelles abiotiques et potentiel d'acidification) ou de limitation du coût global sur le cycle de vie.

A titre d'information, les solutions de l'algorithme glouton mettent en œuvre :

- L'isolation thermique des façades, lors des phases de travaux 1 à 3 ;
- Le niveau minimum (sur l'espace de recherche considéré) d'isolation thermique en toiture, lors des phases 1 à 3 ;
- Le niveau minimum d'isolation thermique du plancher bas, en phase 4 ;
- Des fenêtres double vitrage, lors des phases 5 ou 6 ;
- Le remplacement de la ventilation (double flux ou hygro-B), lors des phases 5 ou 6 ;
- Le remplacement du système de chauffage, entre les phases 1 à 3 ;
- Une fraction solaire minimale (35%) pour la production d'ECS, en phase 7 ;

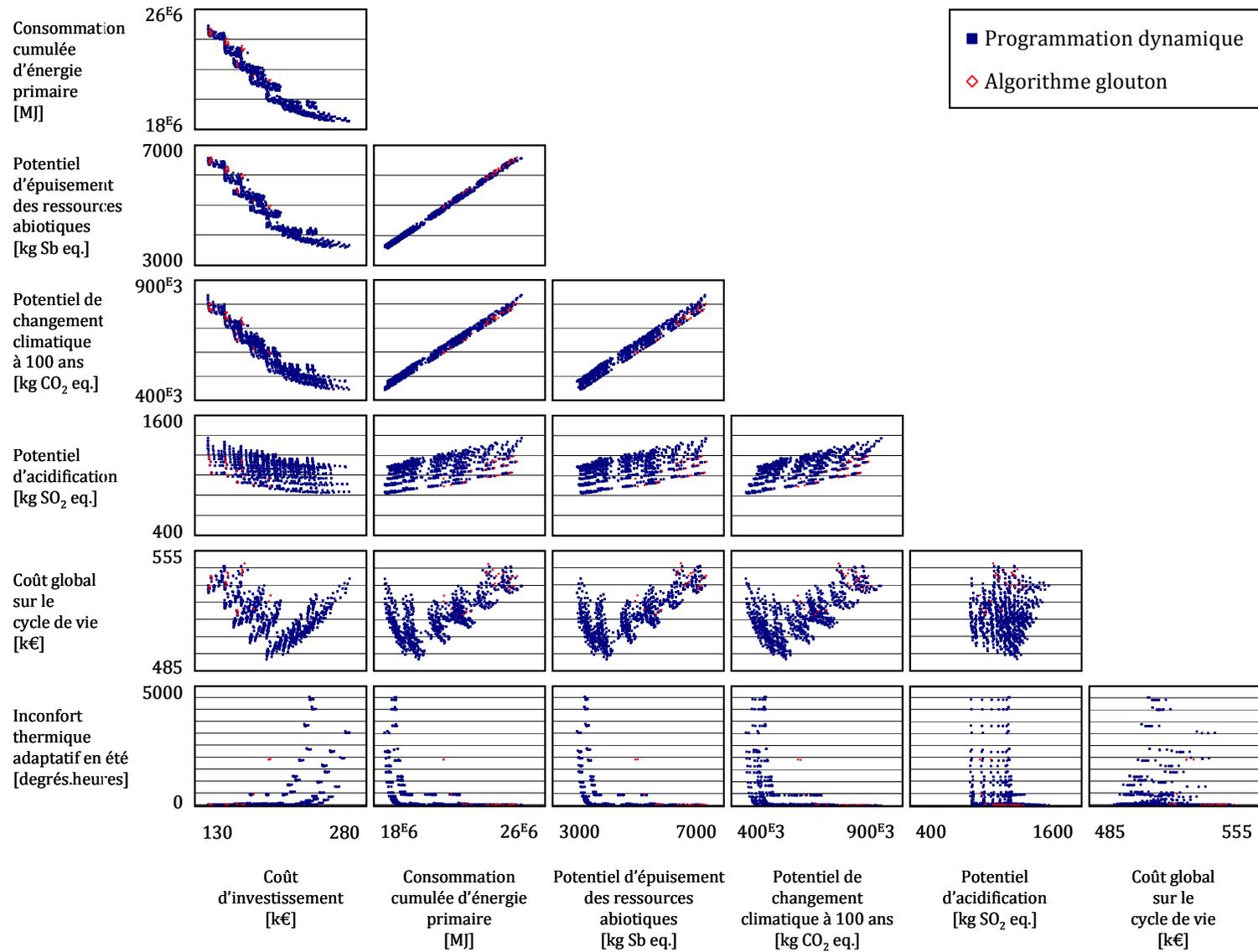


Figure 93. Comparaison des fronts de Pareto approché par algorithme glouton ou exact par programmation dynamique

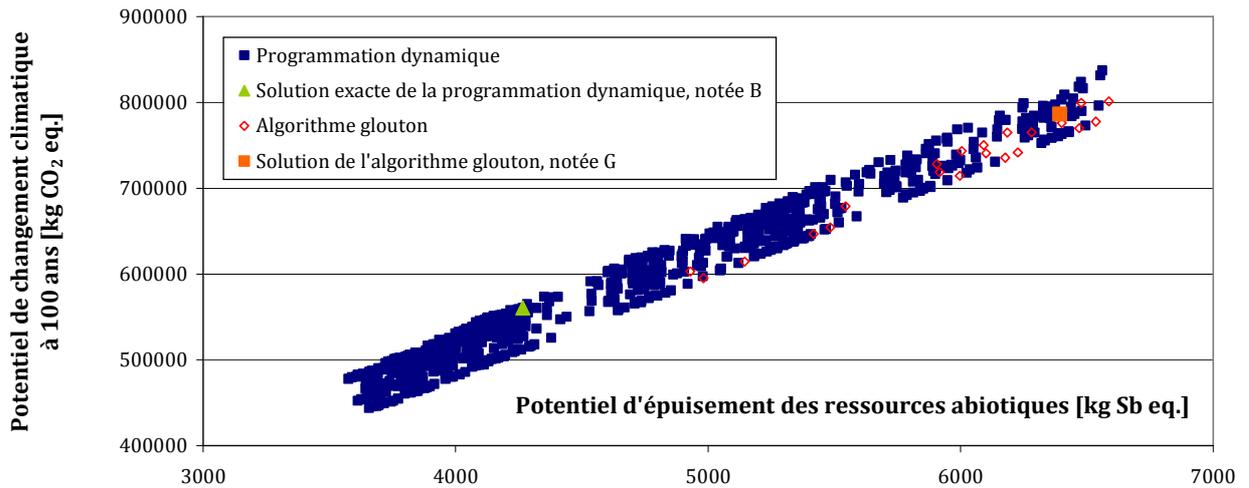


Figure 94. Algorithme glouton et solutions exactes, compromis ressources/changement climatique

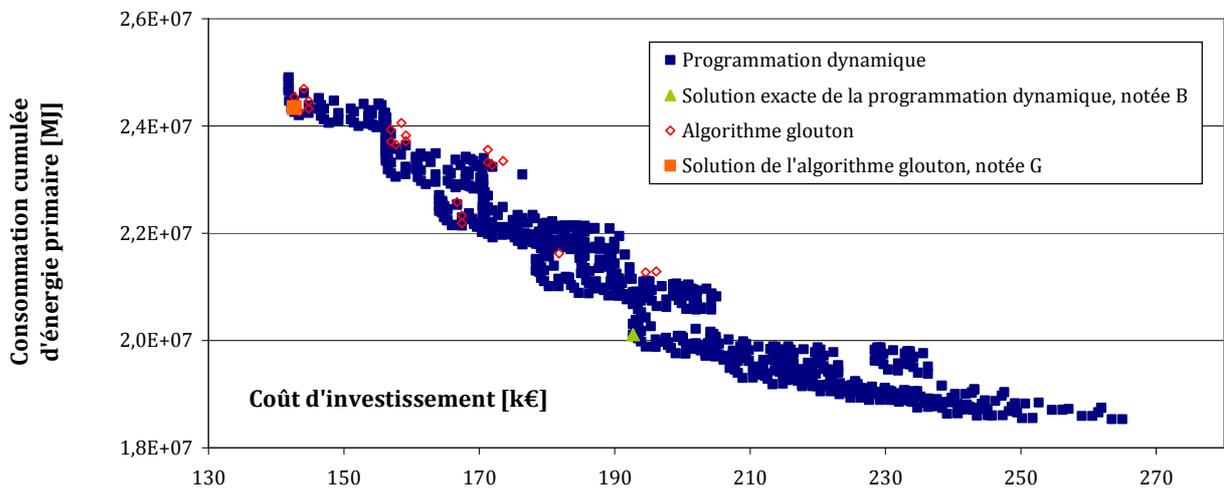


Figure 95. Algorithme glouton et solutions exactes, compromis investissement énergie

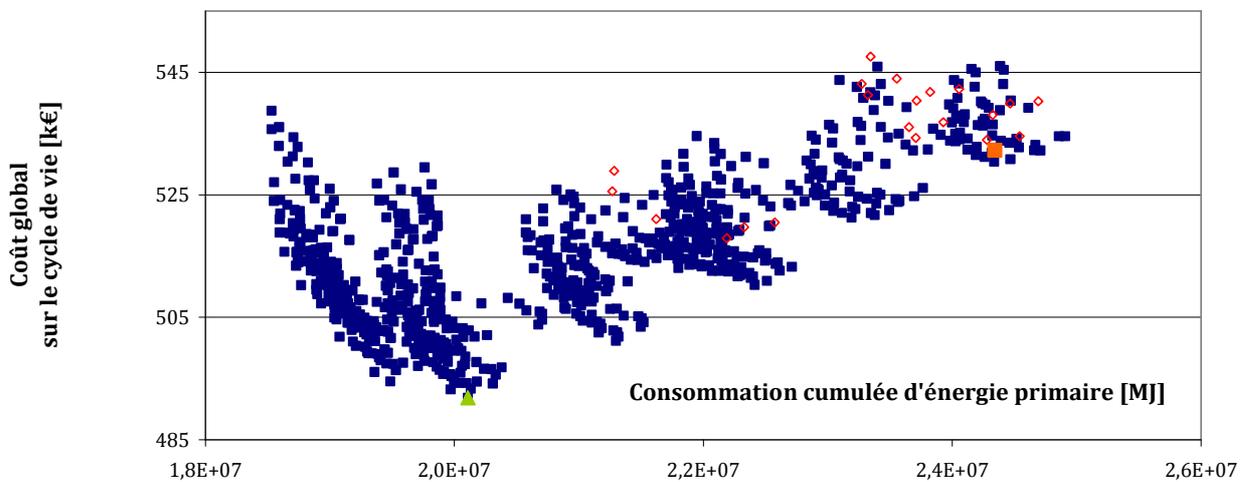


Figure 96. Algorithme glouton et solutions exactes, compromis énergie/coût global

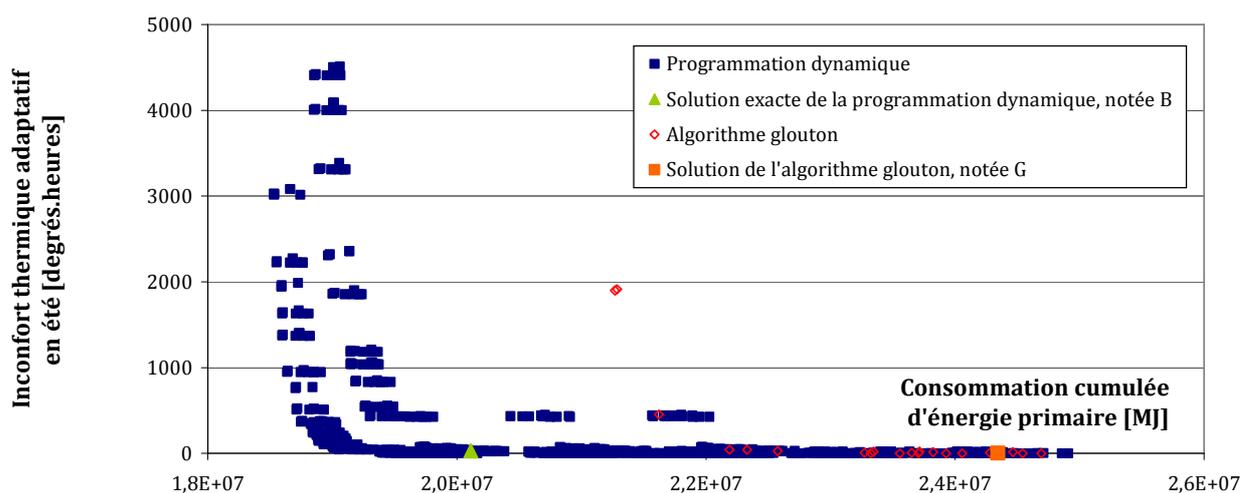


Figure 97. Algorithme glouton et solutions exactes, compromis énergie/confort thermique

### Comparaison de deux solutions particulières B et G

Les figures précédentes ont révélé que les solutions exactes du problème n'appartiennent pas à l'ensemble des solutions de l'algorithme glouton. Ainsi la recherche gloutonne conduit à éliminer prématurément des solutions se révélant appartenir finalement au front exact.

Pour tenter de comprendre ce constat, nous nous intéressons alors à deux solutions particulières, l'une identifiée par programmation dynamique (B), l'autre issue de l'approche gloutonne (G). Elles sont représentées sur les Figure 94 à Figure 97. Les Tableaux suivants détaillent les programmes de réhabilitation énergétique séquentielle, relatifs aux deux solutions étudiées :

	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	N° Phase
<b>B</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 100 mm	2
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	3
	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	5
	Ventilation	Double flux	6
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	7
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%	4
	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	N° Phase
<b>G</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 100 mm	2
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	4
	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	6
	Ventilation	Hygro-B	5
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	3
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%	7

Tableau 30. Détail des programmes de réhabilitation B et G

Il apparaît ainsi que ces deux programmes de réhabilitation diffèrent tant par leur composition que par leur phasage. La solution **G** met en œuvre la ventilation hygro-B et une fraction solaire de 35% pour la production d'ECS alors que la ventilation double flux et une fraction solaire de 75% sont à la base de la solution **B**. En termes de phasage, on retiendra notamment que la solution gloutonne **G** conduit à remplacer le système de chauffage lors de la 3<sup>ème</sup> phase de travaux de réhabilitation. Au contraire, le programme de réhabilitation **B**, minimum en coût global, planifie le remplacement de l'équipement de chauffage préexistant en dernière phase de réhabilitation, soit après réduction complète des besoins de chaleur.

La solution **B**, minimum en coût global sur 50 ans (dans le cadre des hypothèses du modèle construit), n'est pas solution de l'algorithme glouton. Pourtant, cette solution présente des performances bien supérieures à celles des stratégies de réhabilitation efficaces identifiées par l'algorithme glouton, en termes de réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire, du potentiel de changement climatique à 100 ans, du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, du potentiel d'acidification et du coût global sur le cycle de vie. Nous voulons comprendre pourquoi elle a été éliminée de la recherche gloutonne.

L'évolution des performances cumulées dans le temps des deux solutions **B** et **G**, sur les différents critères de décision considérés, est représentée en Figure 98.

Sur cette figure, les zones colorées (rosées) correspondent aux années pour lesquelles la solution **G** de l'algorithme glouton présente de meilleures performances que le minimum en coût global **B**, identifié par la programmation dynamique (solution exacte du problème), pour chacun des critères de décision. La zone encadrée en rouge représente la période de temps pendant laquelle la solution gloutonne **G** domine celle de la programmation dynamique **B**.

L'analyse de la Figure 98 permet de formuler plusieurs remarques importantes :

- Les impacts, consentis sur certaines phases de réhabilitation, peuvent être nettement compensés sur la poursuite du cycle de vie. Par exemple, on constate que la solution exacte **B** considérée permet des réductions d'impacts d'environ 17%, 33%, 29% et 7,5% par rapport à la solution gloutonne étudiée, en termes de consommation cumulée d'énergie primaire, de potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, de potentiel de changement climatique à 100 ans et de coût global, respectivement.
- Il apparaît aussi que la solution gloutonne **G** domine la solution exacte **B** à partir de l'année 3 et ce jusqu'à l'année 7 (zone encadrée en rouge). Ces années correspondent à certaines des phases de travaux des deux programmes de réhabilitation énergétique séquentielle étudiés. Avant l'année 3, les deux solutions adoptent les mêmes mesures de réhabilitation et dans le même ordre ; elles ont donc nécessairement les mêmes performances.
- En revanche, à partir de l'année 7 et sur la poursuite du cycle de vie (50 ans), les deux solutions sont non-comparables, au sens de Pareto. En effet, aucune ne domine l'autre sur l'ensemble des critères.

Contrairement à la solution **B**, le programme de réhabilitation **G** se traduit par le remplacement du système de chauffage existant, lors de l'année 3 (contre l'année 7). L'intégration d'une chaudière à haut rendement offre alors un bénéfice immédiat important, supérieur à celui apporté par l'isolation thermique du plancher bas, par 100mm de polystyrène extrudé (solution **B**).

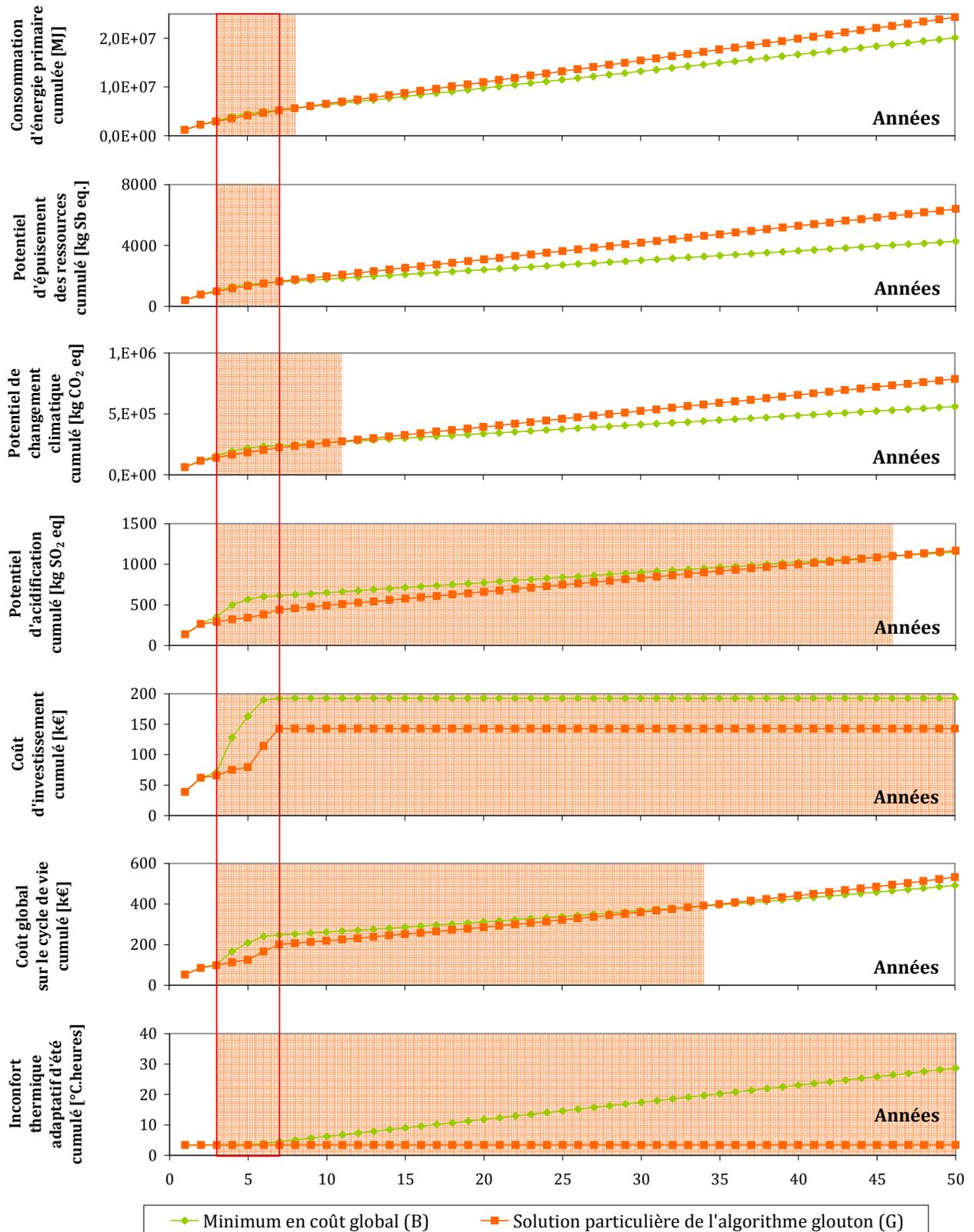


Figure 98. Comparaison des performances cumulées dans le temps d'une solution de l'algorithme glouton et de la solution exacte de la programmation dynamique correspondant à l'optimum en coût global

La solution **B** est alors dominée, à ce stade, et éliminée de la recherche par algorithme glouton, ce qui explique pourquoi elle n'apparaît pas dans l'ensemble final des solutions gloutonnes.

En revanche, l'installation prématurée du système de chauffage, avant la réhabilitation complète de l'enveloppe, conduit à un moindre rendement de l'installation sur la poursuite du cycle de vie. Les consommations énergétiques résultantes, supérieures en exploitation, sont encore amplifiées par l'intégration d'une moindre surface de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS. La solution **B** trouve alors pleinement son intérêt sur la base des décisions suivantes et sur la poursuite du cycle de vie. Elle parvient sur différents critères à largement compenser les impacts initiaux.

Ces deux solutions sont finalement non-comparables. Notons cependant que la solution **G** est dominée par une solution exacte du problème, différente de **B**.

### Conclusion sur l'approche gloutonne

Ainsi, l'approche par algorithme glouton, court-termiste, conduit à éliminer prématurément des solutions, sur la base de leurs performances à un instant donné, sans considération des conséquences des choix présents sur les décisions suivantes et les performances à long terme. Pourtant, dans le problème étudié, une solution dominée à un instant donné ne l'est pas nécessairement sur l'ensemble du cycle de vie, en fonction des interactions et des décisions suivantes.

Ce résultat est très important car il marque les limites des approches trop simplifiées et justifie la mise en œuvre, dans ces travaux, de techniques d'optimisation plus élaborées.

### 3.4.3 Réhabilitations énergétiques et scénario de l'inaction

Les approches par algorithme génétique ou par programmation dynamique ont permis d'identifier des ensembles de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique, sur les critères de décision considérés. Les performances de ces solutions peuvent alors être avantageusement comparées aux « coûts » de l'inaction, sur la poursuite du cycle de vie. Ce type d'approche a notamment été rendu célèbre par les travaux de Nicholas Stern sur l'économie du changement climatique (Stern, 2006).

#### Définition du scénario de l'inaction

Le scénario de l'inaction correspond ici à un modèle de cycle de vie dans lequel aucun des composants de réhabilitation énergétique n'est mis en œuvre pendant les cinquante années de poursuite du cycle de vie du bâtiment existant.

Ce scénario prend en compte les consommations d'énergie du bâtiment en exploitation, sur 50 ans, suivant la performance énergétique de l'existant. Le traitement en fin de vie des composants existants – qui auraient été déposés dans le cas d'une réhabilitation énergétique – est considéré, par souci d'équité dans la comparaison avec les performances des programmes de réhabilitation. Les performances de ce scénario de l'inaction sont évaluées selon les mêmes fonctions objectifs.

## Résultats et comparaison des performances

Les Figure 99 à Figure 102 représentent les performances du scénario de l'inaction par rapport à celles des programmes de réhabilitation non-dominés, identifiés par la programmation dynamique. Les valeurs sont ici normalisées par rapport au maximum (performance la moins optimale) sur chaque critère, parmi les performances du scénario de l'inaction et des solutions efficaces de l'optimisation multicritère. La comparaison est représentée suivant les projections dans quatre plans de compromis, jugés représentatifs de l'ensemble des résultats.

Quel que soit le programme de réhabilitation efficace considéré, il apparaît alors que les mesures mises en œuvre permettent de réduire considérablement les impacts environnementaux ou le coût global sur le cycle de vie, par rapport au scénario de l'inaction. On constate ainsi une réduction au moins égale à :

- 65% de la consommation cumulée d'énergie primaire ;
- 75% du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques ;
- 79% du potentiel de changement climatique à 100 ans ;
- 84% du potentiel d'acidification ;
- 52% du coût global du cycle de vie ;

Dans la cadre des hypothèses utilisées, le coût d'investissement ou les impacts environnementaux relatifs aux opérations de réhabilitation sont toujours largement compensés par les économies d'énergie en usage, sur la poursuite de cycle de vie.

En revanche, en termes de coût d'investissement, le scénario de l'inaction représente logiquement un engagement financier bien moindre. Celui-ci n'est ici pas nul en raison du coût du traitement en fin de vie des composants existants.

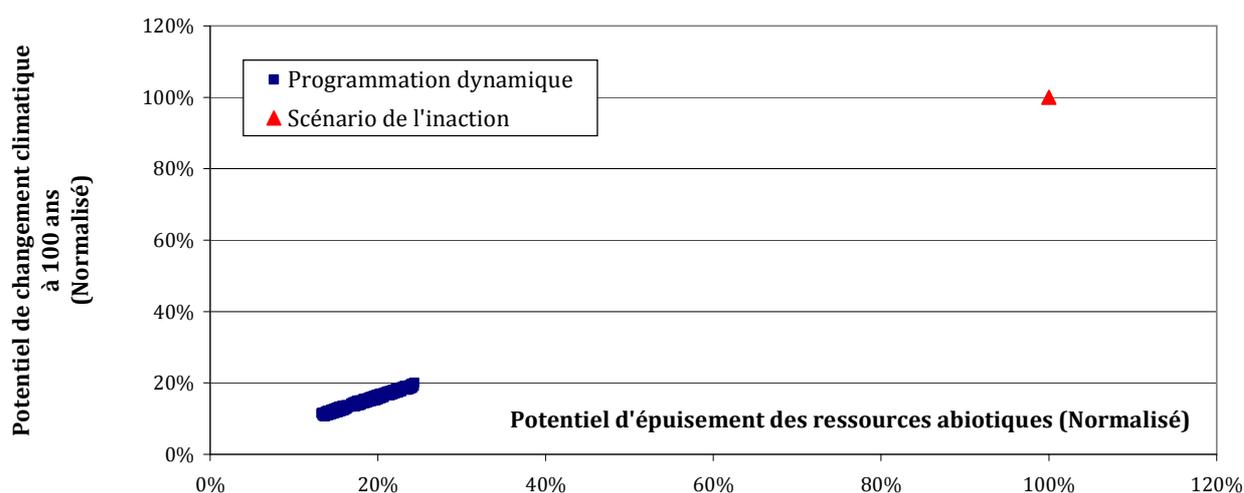


Figure 99. Scénario de l'inaction face au compromis ressources/changement climatique

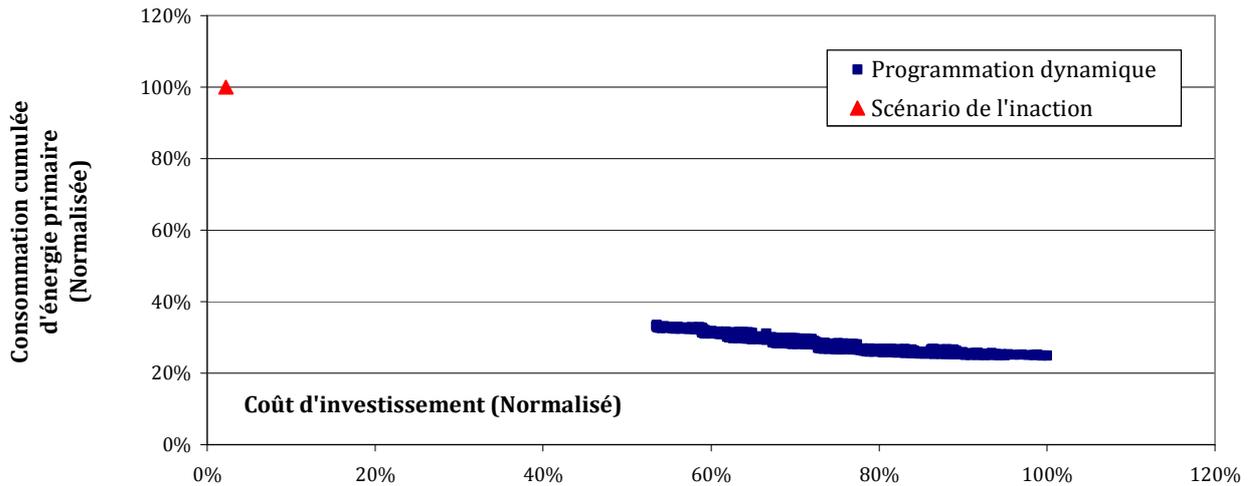


Figure 100. Scénario de l'inaction face au compromis investissement/énergie

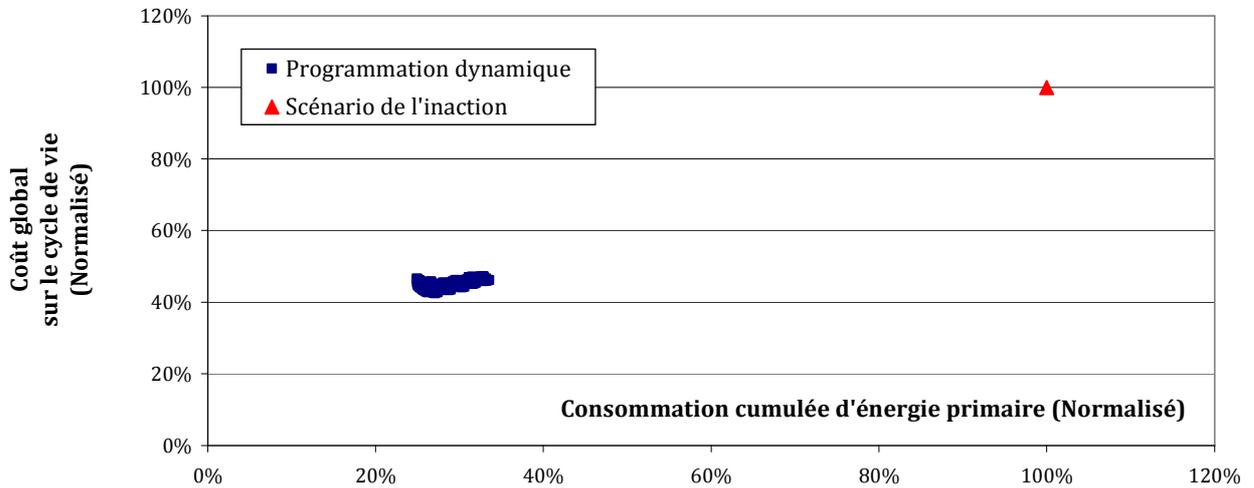


Figure 101. Scénario de l'inaction face au compromis énergie/coût global

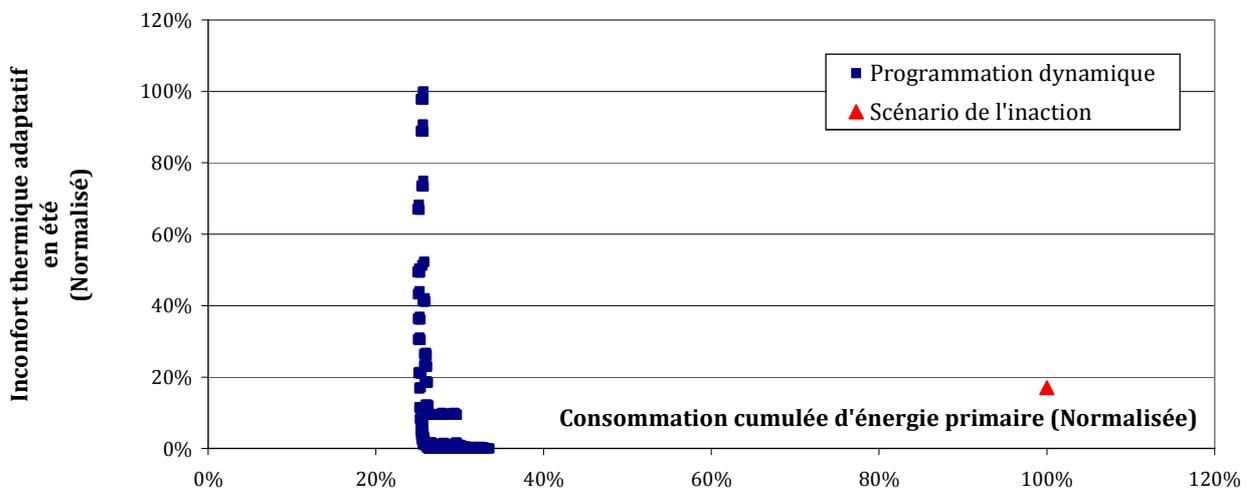


Figure 102. Scénario de l'inaction face au compromis énergie/inconfort thermique adaptatif

De plus, du point de vue du confort thermique, la performance atteinte est certes inférieure à celle des programmes de réhabilitation les plus efficaces sur ce critère mais demeure meilleure que celle des programmes mobilisant une isolation très importante de l'enveloppe du bâtiment. En tout état de cause, et comme l'a souligné le Chapitre 2, les niveaux d'inconfort thermique en été demeurent très modérés, dans la présente étude de cas.

### **Conclusion sur la comparaison au scénario de l'inaction**

Cette brève étude souligne l'intérêt environnemental et financier de la réhabilitation énergétique, sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment existant, par rapport à l'inaction.

Les remarques précédentes sont néanmoins à nuancer. En effet, il est peu vraisemblable que le cycle de vie réel d'un bâtiment existant se poursuive, sur cinquante années, selon le scénario de l'inaction précédemment défini. Les opérations traditionnelles de rénovation (ravalement des façades, reprise de l'étanchéité à l'eau des toitures, remplacement des ouvrants, etc.) conduiraient certainement à isoler progressivement l'enveloppe, à remplacer les ouvrants et les systèmes existants par des composants plus performants, au rythme de l'obsolescence des matériaux et systèmes en œuvre sur le bâtiment existant. Dans ce cas, les impacts environnementaux et les investissements liés à la production et au traitement en fin de vie des composants intégrés seraient à prendre en considération. Une étude de sensibilité, en fonction des fréquences et des plans de rénovation, constituerait alors un prolongement intéressant.

## **3.5 Etude de cas et analyse de sensibilité**

Le deuxième avantage évident des méthodes d'optimisation exactes tient à la possibilité de mener des études de sensibilité, sur les paramètres de modélisation (du modèle de cycle de vie). Indépendamment de la méthode d'optimisation utilisée et des paramètres qui y sont relatifs, il est alors possible de comparer les solutions et leurs performances, en fonction de paramètres du modèle de cycle de vie.

Comme l'a signalé le Chapitre 2, le caractère stochastique des algorithmes génétiques conduit intrinsèquement à des différences potentielles entre les ensembles de solutions identifiés, pour un nombre de générations d'individus donné et indépendamment de toute variation paramétrique. De plus, l'influence des paramètres de l'algorithme demeure difficile à appréhender.

Au contraire, dans le cas des méthodes exactes, les différences potentielles entre les fronts de Pareto identifiés tiennent uniquement aux valeurs des paramètres de modélisation étudiés et non à la méthode d'optimisation en elle-même.

Nous nous proposons ainsi d'étudier la sensibilité des résultats à quelques paramètres du modèle de cycle de vie dont : l'évolution du coût de l'énergie en exploitation du bâtiment, la durée de vie des composants de réhabilitation, la température de consigne pour le chauffage. Bien d'autres études de sensibilité pourraient être envisagées sur les paramètres du modèle de cycle de vie. Les trois facteurs choisis sont caractérisés par une incertitude importante et sont au cœur d'enjeux fondamentaux pour la réhabilitation énergétique.

### 3.5.1 Comportement de l'occupant et consignes de chauffage

Le comportement des occupants est à la fois une problématique complexe et un enjeu fondamental de la réhabilitation énergétique. En effet, le financement des opérations de réhabilitation repose bien souvent sur une projection des économies qui seront réalisées en usage. Or, dans de nombreux cas, on note d'importantes différences entre la performance énergétique, simulée en conception, et les consommations réelles, relevées en exploitation. Les conditions d'usage sont pour partie responsables de ces différences.

Les études de terrain montrent ainsi que les occupants se chauffent généralement à des températures bien supérieures à 19°C (projet CIBLE, Fondation Bâtiment Energie), consigne généralement utilisées dans les simulations. Aussi, il est important de prendre en compte les conditions d'usage réelles et de mesurer leur influence sur les solutions de réhabilitation.

De plus, les retours d'expérience suggèrent que les économies de chauffage générées par la performance énergétique du logement sont souvent réinvesties dans l'augmentation du confort thermique et des consignes de chauffage : c'est l'effet rebond. Greening et al. (2000) estiment que l'effet rebond conduit à une augmentation de 10% à 30% des consommations de chauffage aux Etats-Unis. Hass et Biermayr (2000) évaluent l'effet rebond sur le chauffage de 20% à 30% en Autriche, sur la base de multiples retours d'expérience.

Ainsi, l'évolution des comportements des usagers des bâtiments, vers une forme d'occupation plus économe en énergie, doit être encouragée et soutenue. Néanmoins, devant la difficulté à imposer de manière dirigiste des niveaux de consigne pour le chauffage, il demeure primordial d'intégrer la variabilité des comportements dans l'analyse et d'étudier l'influence des consignes de températures sur le type et les performances des solutions de réhabilitation.

#### Scénarios de consignes de chauffage

Nous proposons ici de comparer les surfaces de compromis obtenues pour des températures de consignes de 19°C, 22°C et 24°C. L'approche par programmation dynamique est mobilisée pour identifier des solutions exactes dans les 3 cas de figure. L'introduction d'un scénario de consigne de température de chauffage à 24°C, à tout instant et dans toutes les pièces, d'octobre à juin, ne correspond heureusement pas à la moyenne des usages. Il vise à identifier l'influence sur les stratégies de réhabilitation de scénarios d'occupation plus extrêmes.

#### Performances des solutions non-dominées

En premier lieu, les ensembles de stratégies de réhabilitation non-dominées sont identifiés, pour chacune des consignes de chauffage considérées. Elles sont alors comparées en termes de surface de compromis et de performances, dans l'espace des objectifs.

Les Figure 103 à Figure 106 représentent ainsi les surfaces de compromis obtenues. Les solutions sont projetées dans 4 plans de compromis, définis chacun par deux critères, pour visualiser les performances des solutions, la forme et le positionnement des surfaces de compromis. Les solutions particulières identifiées sur ces graphiques sont exploitées dans la sous-partie suivante.

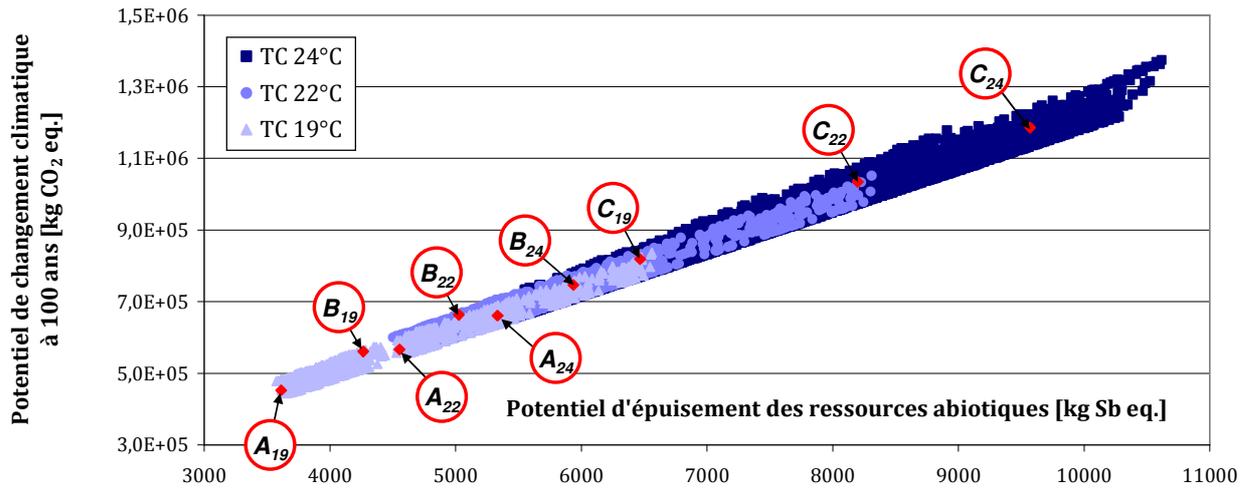


Figure 103. Compromis ressources / changement climatique et consigne de chauffage

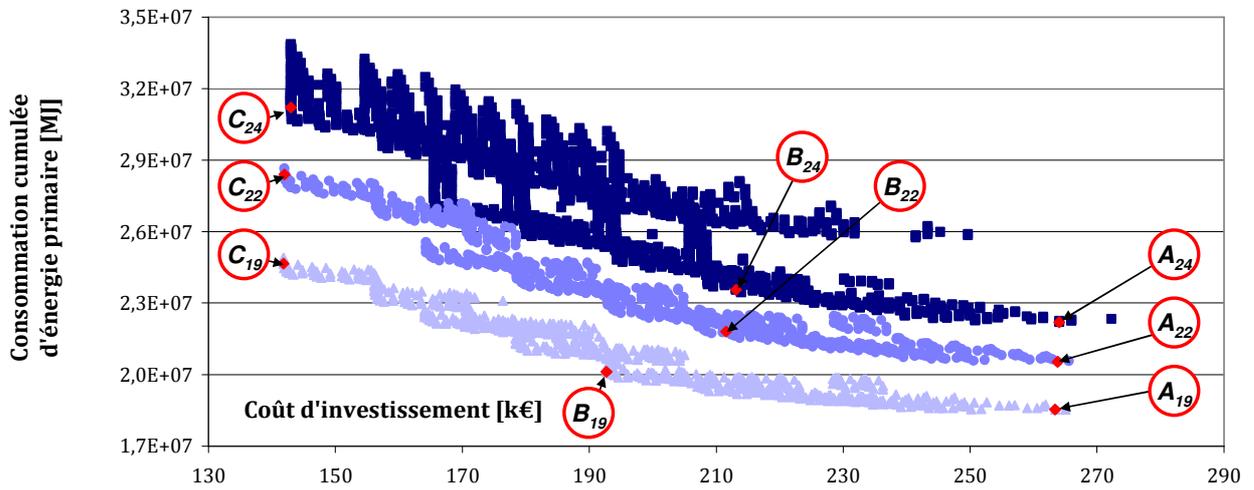


Figure 104. Compromis investissement / énergie et consigne de chauffage

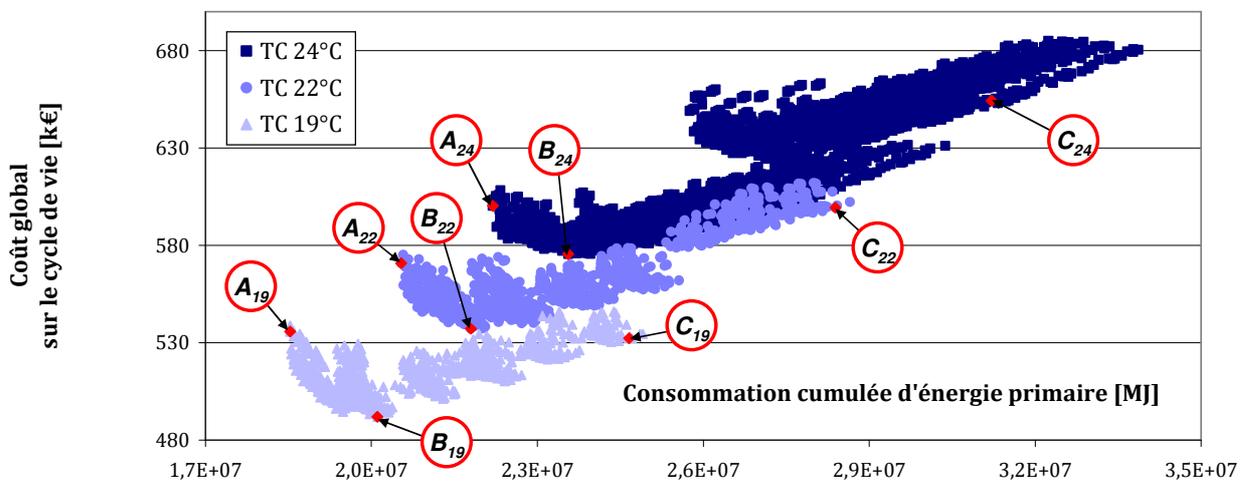


Figure 105. Compromis énergie / coût global et consigne de chauffage

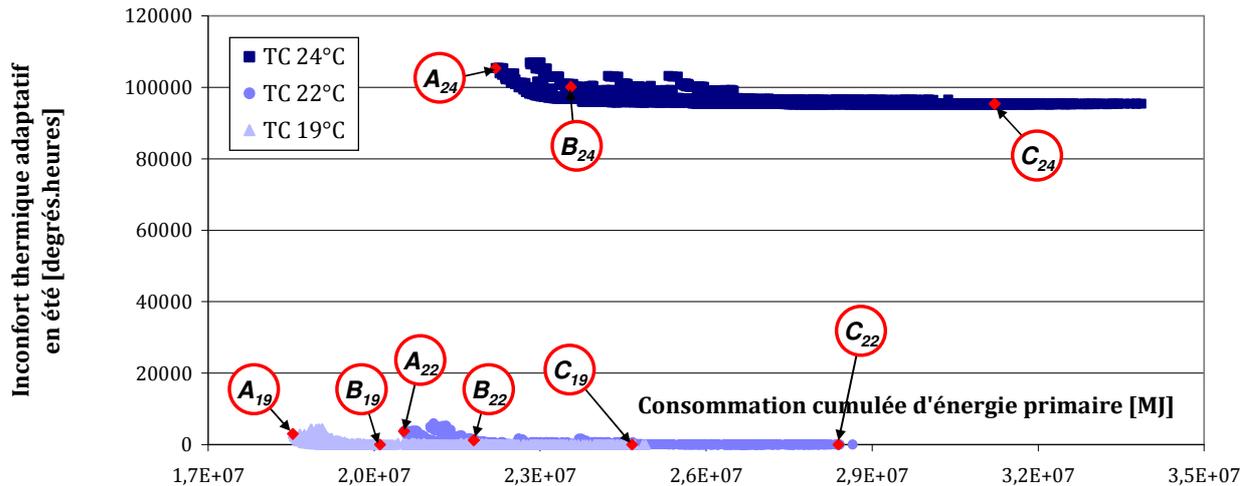


Figure 106. Compromis énergie / confort thermique en été et consigne de chauffage

Si les surfaces de compromis adoptent une forme globalement similaire, on note néanmoins la présence de deux ensembles de points relativement distincts, dans le cas d'une consigne de chauffage à 24°C (ils sont liés à la composition des programmes de réhabilitation, comme nous l'identifierons ci-après). De plus, les différentes surfaces de compromis ne se recouvrent que très partiellement (Figure 104), même si certains niveaux de performances peuvent être atteints dans les différents cas, sur quelques critères au moins.

Par ailleurs, ces graphiques confirment que, plus les températures de consigne sont élevées, plus les impacts sur l'environnement et le coût global sur le cycle de vie sont importants (Figure 103 et Figure 105). Les différentiels de performances peuvent être évalués entre des solutions particulières. Par exemple, on note que la transition d'une consigne de 19°C à une consigne de 22°C conduit à une augmentation de près de 10% de la consommation cumulée en énergie primaire, entre les points représentant les minimums en coût global, soient respectivement **B<sub>19</sub>** et **B<sub>22</sub>**.

A partir de la Figure 106, on note que le cas des températures de consigne élevées pour le chauffage (ex : 24°C) conduit à une dégradation du confort thermique en été par rapport à des consignes plus modérées. L'interprétation de cette différence demeure difficile à ce stade. Cependant, les niveaux d'inconfort thermiques identifiés représentent au total, soit sur les 50 années de poursuite du cycle de vie, entre 0 et 62 heures pour lesquelles la température intérieure d'une zone thermique, au moins, est supérieure à 28°C (moins de 2 heures par an).

Enfin, sur la Figure 104, il est intéressant de remarquer que les niveaux d'investissement, dans les trois cas sont globalement similaires, ce qui suggère que les solutions efficaces extrêmes mettent en œuvre le même type de mesures de réhabilitation.

### Analyse de solutions particulières

Les comparaisons précédentes se sont limitées aux performances des solutions, nous nous proposons alors de compléter l'analyse en détaillant des programmes de réhabilitation relatifs à quelques solutions particulières, permettant une interprétation des performances sur la base de la nature des solutions.

Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	VARIANTES DE REHABILITATION								
		A <sub>19</sub>	A <sub>22</sub>	A <sub>24</sub>	B <sub>19</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>24</sub>	C <sub>19</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>24</sub>
Murs de façades	ITE laine minérale [mm]	200	200	200	100	150	150	100	100	100
Toiture	ITE polyuréthane [mm]	300	300	300	150	150	150	150	150	150
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé [mm]	200	200	200	100	150	150	100	100	100
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	TV	TV	TV	DV	DV	DV	DV	DV	DV
Ventilation	Type de système de ventilation	DF	DF	DF	DF	DF	DF	HB	HB	HB
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Production ECS	Fraction solaire de la production [%]	75	75	75	75	75	75	35	35	35

Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	PHASAGE DES TRAVAUX								
		A <sub>19</sub>	A <sub>22</sub>	A <sub>24</sub>	B <sub>19</sub>	B <sub>22</sub>	B <sub>24</sub>	C <sub>19</sub>	C <sub>22</sub>	C <sub>24</sub>
Murs de façades	ITE laine minérale [mm]	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Toiture	ITE polyuréthane [mm]	3	3	3	2	2	2	2	2	2
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé [mm]	5	4	4	3	3	4	3	3	6
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	6	6	6	5	5	6	4	4	3
Ventilation	Type de système de ventilation	7	7	7	6	6	7	5	5	5
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	2	2	2	7	7	3	6	6	4
Production ECS	Fraction solaire de la production [%]	4	5	5	4	4	5	7	7	7

**Tableau 31. Détails des programmes de réhabilitation A<sub>19</sub>, A<sub>22</sub>, A<sub>24</sub>, B<sub>19</sub>, B<sub>22</sub>, B<sub>24</sub>, C<sub>19</sub>, C<sub>22</sub>, C<sub>24</sub> en termes de variantes de mesures de réhabilitation et de phasage des travaux**

DV = double vitrage ; TV = triple vitrage ;  
 HB = ventilation de type hygro-B ; DF = ventilation double flux ;

Sur les figures précédentes, les points A, B et C représentent respectivement, pour les différents cas de consigne de température de chauffage (19°C, 22°C et 24°C), les solutions correspondant aux minimums locaux en :

- Consommation cumulée d'énergie primaire : points  $A_{19}$ ,  $A_{22}$  et  $A_{24}$  ;
- Coût global sur le cycle de vie : points  $B_{19}$ ,  $B_{22}$  et  $B_{24}$  ;
- Coût d'investissement : points  $C_{19}$ ,  $C_{22}$  et  $C_{24}$ .

Le détail des programmes de réhabilitation (composition et de phasage des travaux) est spécifié sur le Tableau 31. Ces points renseignent sur l'évolution de solutions remarquables, pour les différentes consignes de chauffage, tant en termes de performances que de définition des programmes de réhabilitation.

Le Tableau 31 permet de constater qu'ils représentent des stratégies de réhabilitation différentes, se distinguant tant du point de vue de la composition que du phasage (zones rouges).

Ainsi, suivant la consigne de chauffage, on observe par exemple une variation, tant en termes de combinaisons de mesures que de phasage des travaux, pour atteindre le coût global minimum sur le cycle de vie. Dans ce cas, plus la consigne de température est élevée, plus le niveau d'isolation thermique des façades et du plancher bas augmente et plus le système de chauffage préexistant est remplacé rapidement dans le programme.

A titre d'information nous portons sur la figure suivante les performances du programme de réhabilitation correspondant au point  $B_{19 \rightarrow 22}$ , minimum en coût global pour une consigne de 19°C, dans le cas d'une consigne de chauffage de 22°C.

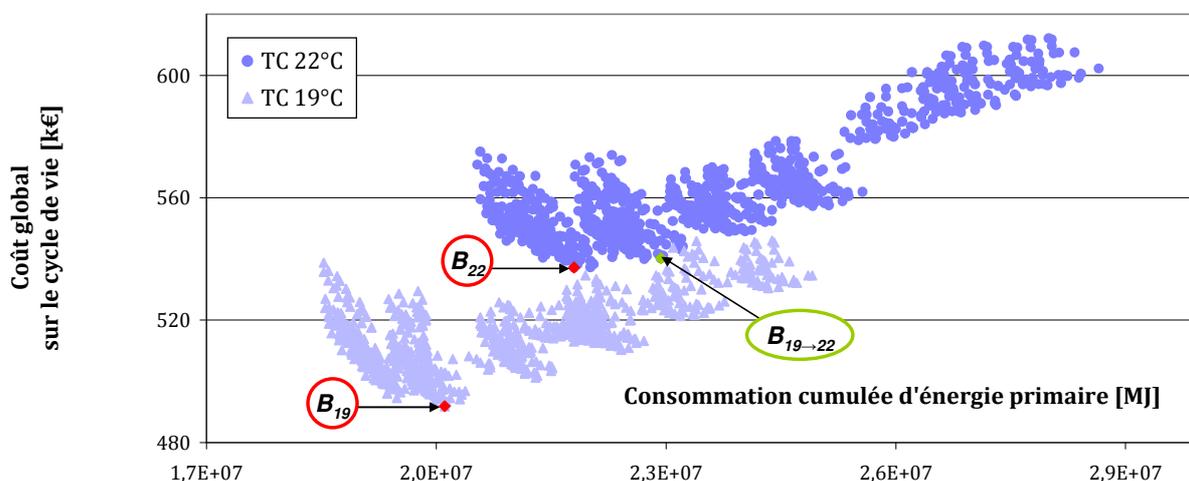


Figure 107. Influence d'une augmentation de la consigne de chauffage, sur une solution optimale à 19°C

Ainsi, supposons que la stratégie de réhabilitation énergétique mise en œuvre corresponde au point  $B_{19}$ , minimum en coût global pour une consigne de 19°C, mais que l'occupant choisit finalement de se chauffer à 22°C (effet rebond), on constate alors par rapport à  $B_{19}$  :

- Une augmentation de 14% de la consommation cumulée d'énergie primaire ;
- Une augmentation de 30% du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques ;
- Une augmentation de 30% du potentiel de changement climatique à 100 ans ;
- Une augmentation de 18% du potentiel d'acidification ;
- Une augmentation de 10% du coût global sur le cycle de vie.

L'écart par rapport à la solution **B<sub>22</sub>**, minimum en coût global pour une consigne de 22°C, atteint 5%, 10%, 10% et 5% respectivement en termes de consommation cumulée d'énergie primaire, potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, potentiel de changement climatique à 100 ans, potentiel d'acidification. Le surcoût d'investissement (entre **B<sub>22</sub>** et **B<sub>19</sub>**), d'environ 10% est légèrement compensé, en termes de coût global sur la poursuite du cycle de vie (-0,6%).

Ainsi, il est primordial d'adopter un comportement économe en énergie et de concevoir les stratégies de réhabilitation en fonction de l'occupation réelle pour éviter une dégradation considérables des performances évaluées en simulation.

### Réductions d'impacts et consignes de chauffage

Au-delà des performances intrinsèques des programmes, les solutions dans les différents cas peuvent être comparées sur la base des réductions d'impacts qu'elles permettent, par rapport au scénario de l'inaction (tel qu'il a été défini dans la partie 3.4.3). Dans chacun des cas, le scénario de l'inaction est adapté à la consigne de chauffage considéré, soit 19, 22 ou 24°C.

Les Figure 108, Figure 109 et Figure 110 représentent ainsi les surfaces de compromis identifiées précédemment, du point de vue des réductions d'impacts, en termes de consommation cumulée d'énergie primaire, de potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, de potentiel de changement climatique, de coût global sur le cycle de vie. Les solutions particulières identifiées sur ces graphiques ont été présentées précédemment. La réduction des impacts est représentée en valeur absolue, de manière à montrer qu'elle est plus importante dans le cas d'une consigne de température élevée.

Ces graphiques permettent alors de remarquer une distinction très nette entre les surfaces de compromis obtenues pour les différentes consignes de chauffage. Ces surfaces ne se recouvrent pas. Les réductions d'impacts potentielles sont évidemment d'autant plus importantes que les consignes de chauffage sont élevées.

Les solutions représentées ci-dessus n'imposent aucun changement de comportement : les occupants qui se chauffaient dans le bâtiment existant à 22°C continuent d'imposer une régulation de chauffage à 22°C. Par conséquent, les potentiels de réduction seraient encore plus élevés en cas de transition comportementale depuis une température de consigne de 24°C vers une régulation du chauffage à 22°C ou mieux encore à 19°C.

Il est donc particulièrement important de réhabiliter les logements pour lesquels les occupants se chauffent à des températures élevées, par choix individuel ou du fait d'une régulation collective du système de chauffage.

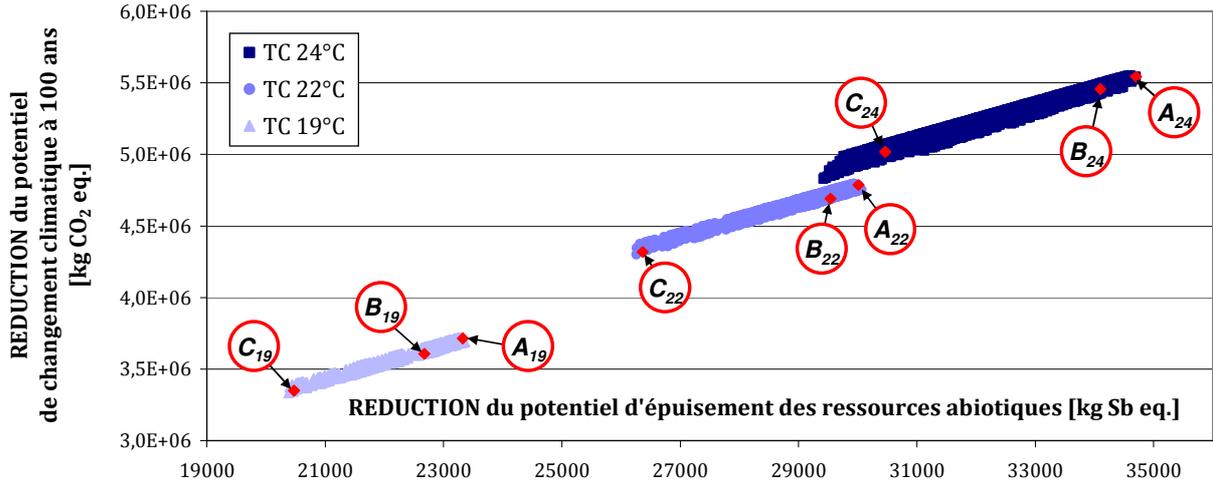


Figure 108. Températures de consigne et compromis entre ressources et changement climatique

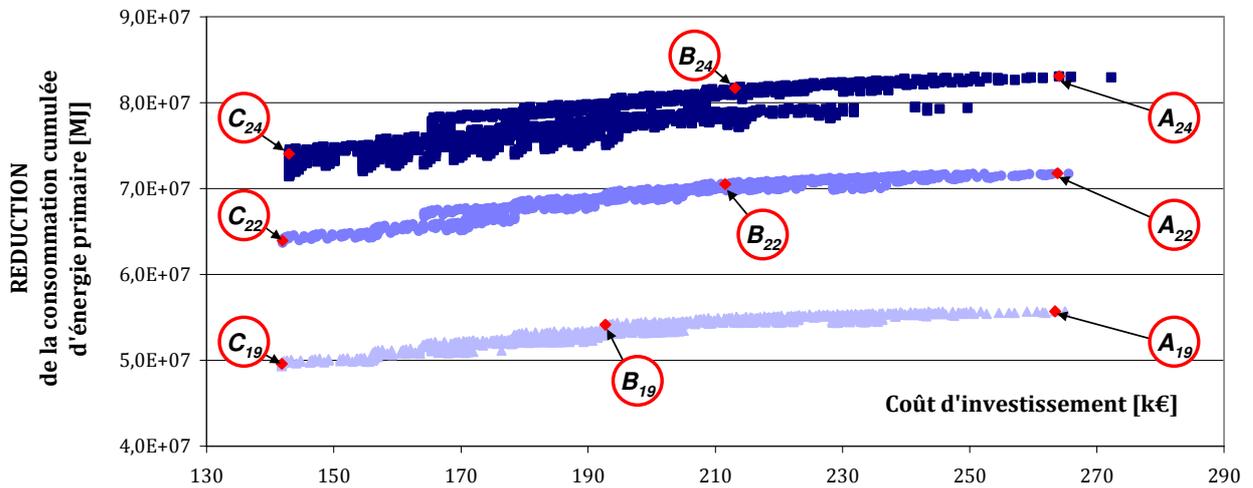


Figure 109. Températures de consigne et compromis entre investissement et énergie

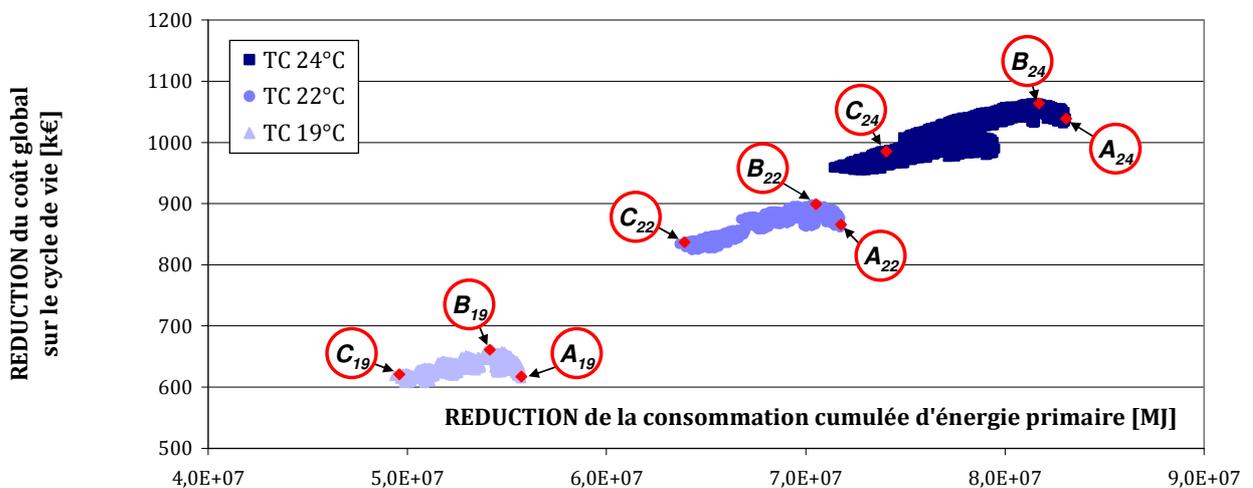


Figure 110. Températures de consigne et compromis entre énergie et coût global

### **Solutions efficaces et variantes de réhabilitation**

Enfin, pour éclairer l'influence des températures de consigne sur la nature des solutions de réhabilitation (en termes de composition), les figures suivantes différencient les solutions sur la base des variantes mises en œuvre, sur chacune des mesures de réhabilitation considérées.

Ces figures ne doivent pas être confondues avec une analyse de la sensibilité des solutions aux variantes de mesures de réhabilitation mises en œuvre. En effet, il s'agit simplement de différencier les solutions non-dominées, identifiées par la programmation dynamique multicritère, sur la base des variantes en œuvre pour chacune des mesures de réhabilitation considérées, sans considération pour les autres mesures de la combinaison, ni pour le phasage associé à chacun des programmes de réhabilitation représentés.

Les figures des pages suivantes illustrent la segmentation des solutions sur la base des variantes d'isolation thermique des façades, de la toiture, du plancher bas, de remplacement des fenêtres, du système de ventilation, de la fraction solaire de production de l'ECS.

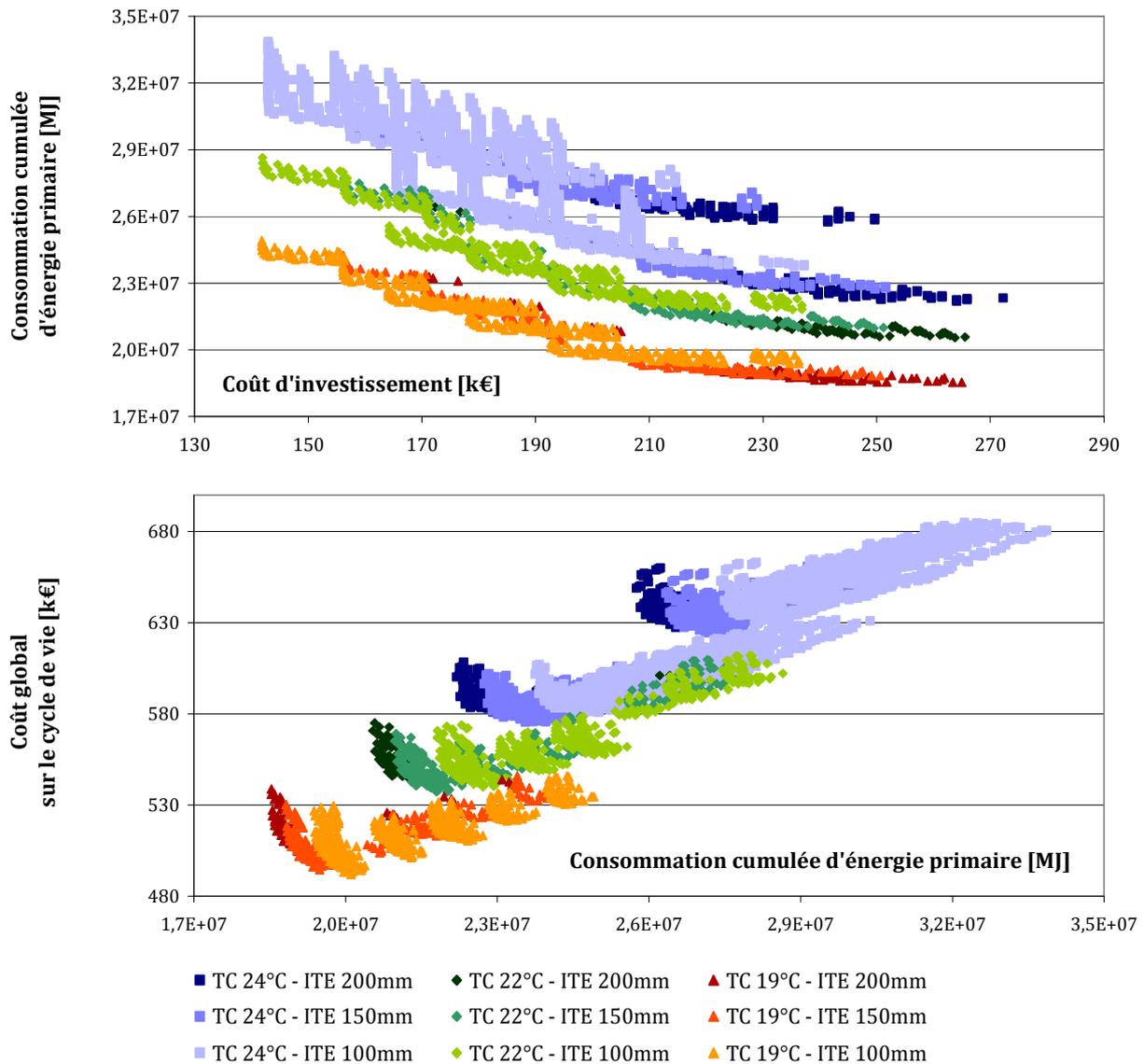


Figure 111. Solutions, variantes de réhabilitation des **FACADES** et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global

Sur la Figure 111, il apparaît que les solutions les plus efficaces du point de vue des consommations cumulées d'énergie primaire sont nécessairement constituées à partir des épaisseurs d'isolation thermique maximales sur l'espace de recherche (200mm de laine minérale), quelle que soit la consigne de chauffage.

En revanche, le minimum en termes de coût global sur le cycle de vie est atteint pour le niveau minimum d'isolation (100mm de laine minérale) pour une régulation à 19°C, pour le niveau moyen d'isolation (150mm de laine minérale) pour les consignes de chauffage à 22°C ou 24°C. Plus la consigne de chauffage est élevée, plus la résistance thermique de l'enveloppe doit logiquement être importante.

La répartition des solutions, entre les variantes de réhabilitation des façades, sur l'étendue des surfaces de compromis, demeure relativement nette.

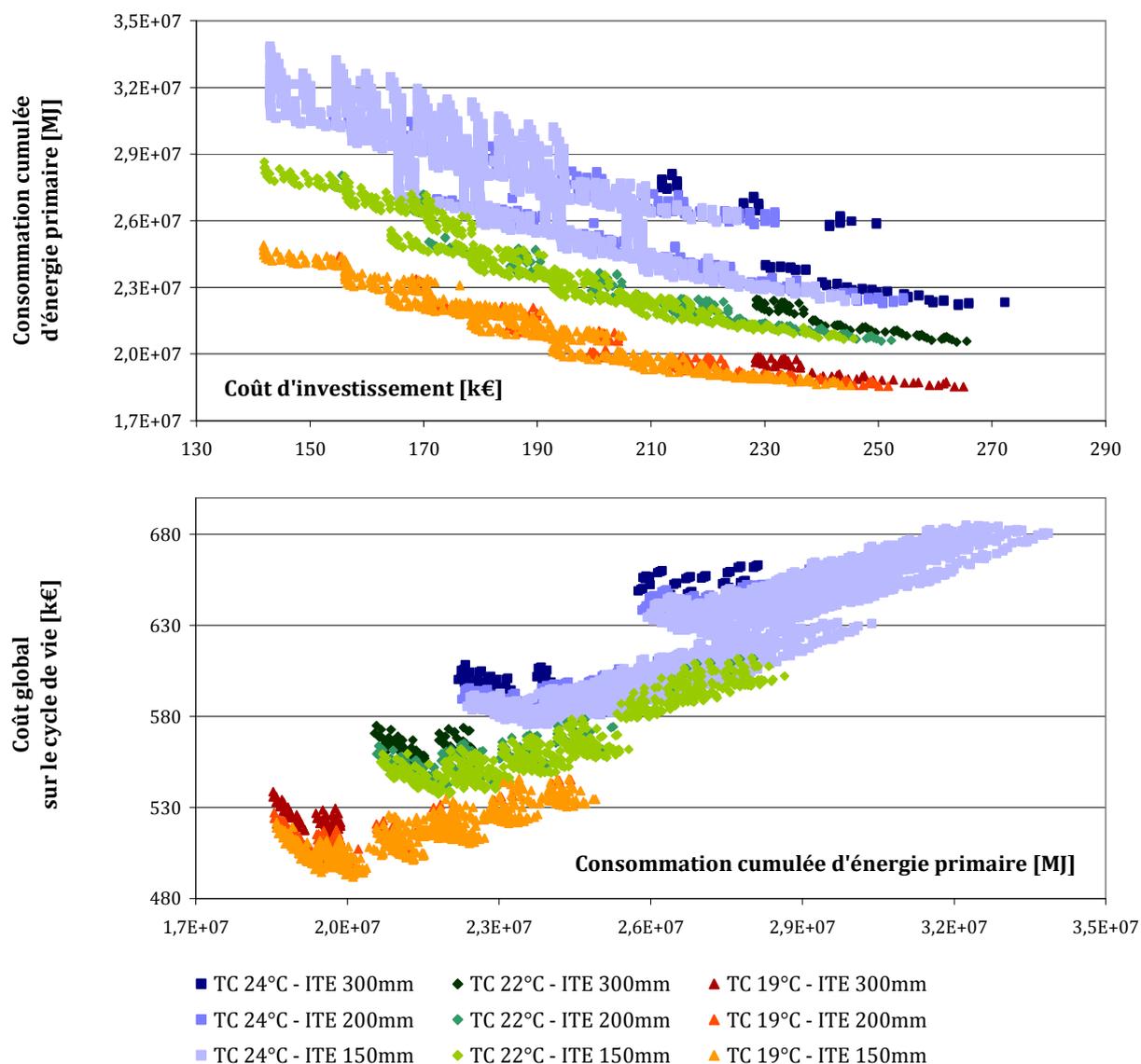


Figure 112. Solutions, variantes de réhabilitation de la **TOITURE** et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global

A la différence du cas des façades, il apparaît que pour l'isolation thermique des toitures, la variante correspondant au niveau minimum sur l'espace de recherche (150mm de polyuréthane) permet d'atteindre les meilleures performances en termes de consommation cumulée d'énergie primaire ainsi que de coût global sur le cycle de vie. Les solutions mettant en œuvre cette variante couvrent l'essentiel de la surface de compromis, en dehors des segments correspondant aux niveaux élevés d'investissement.

Les solutions mettant en œuvre les niveaux moyens et supérieurs d'isolation thermique (respectivement 200mm ou 300mm de polyuréthane) sont responsables de surcoûts d'investissement importants, pour une amélioration marginale de la performance énergétique. Ces solutions ne correspondent pas à l'optimum en termes de coût global.

Les remarques précédentes s'appliquent indifféremment aux trois cas considérés pour les températures de consigne de chauffage.

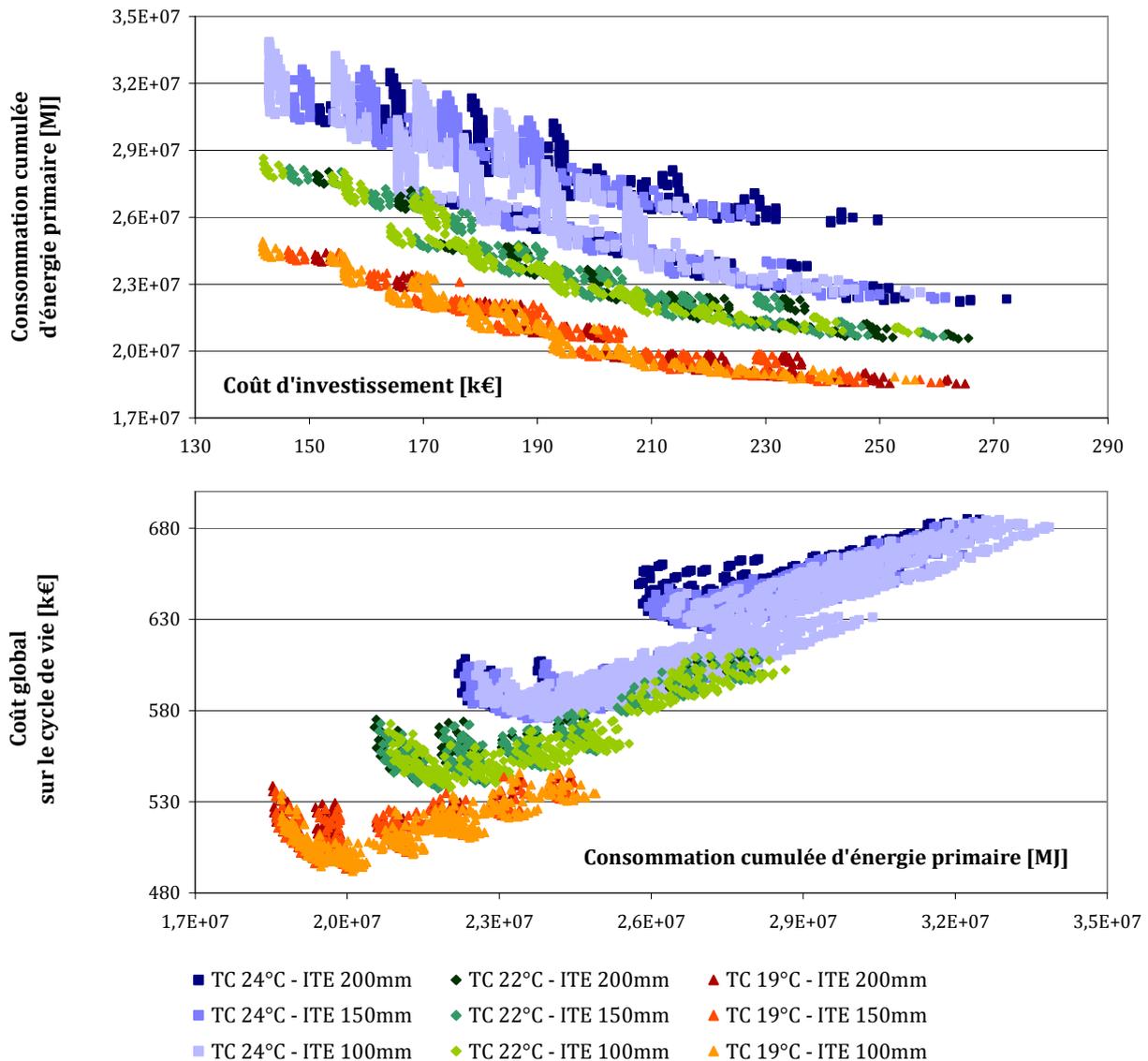
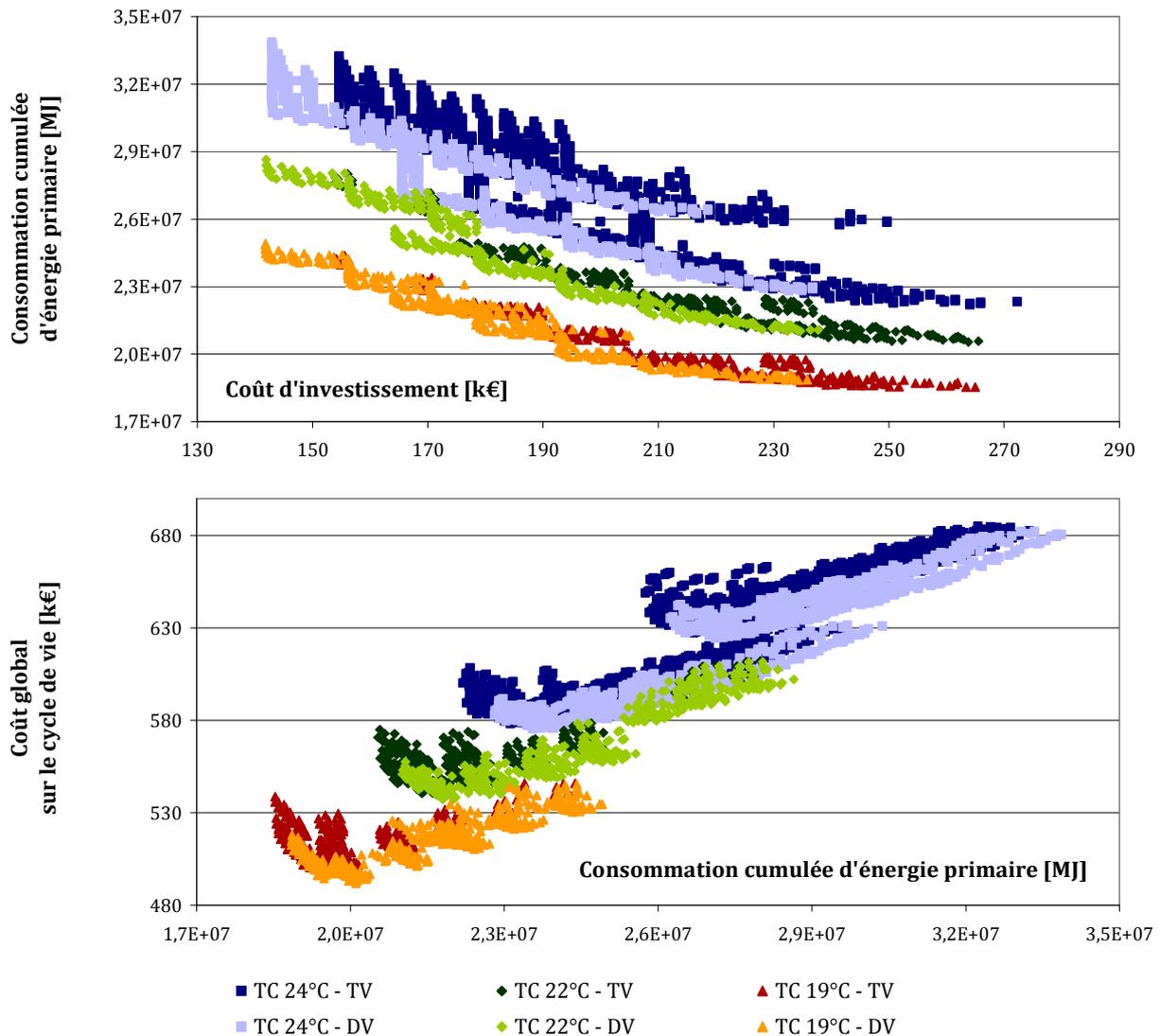


Figure 113. Solutions variantes de réhabilitation du **PLANCHER BAS** et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global

L'étude de la répartition des solutions non-dominées sur les différents niveaux d'isolation thermique du plancher bas révèle la dispersion des niveaux d'isolation sur l'étendue du compromis entre investissement et consommation cumulée d'énergie primaire. Ainsi, ce n'est pas tant le niveau d'isolation du plancher bas que la combinaison de mesures complémentaires qui influence les performances énergétique et en investissement.

Par ailleurs, il est important de remarquer que le minimum en coût global est atteint pour le niveau minimum d'isolation thermique sur l'espace de recherche (100mm de polystyrène extrudé), pour une consigne à 19°C. En revanche dans le cas de régulation à 22°C ou 24°C, c'est le niveau moyen (150mm) qui permet d'atteindre le minimum.

Enfin, si le niveau minimum d'isolation est mis en œuvre par certaines des solutions les plus performantes énergétiquement pour la consigne à 19°C, ce constat est de moins en moins vrai pour les températures de régulation supérieures, où les niveaux moyen et supérieur trouvent progressivement leur intérêt.



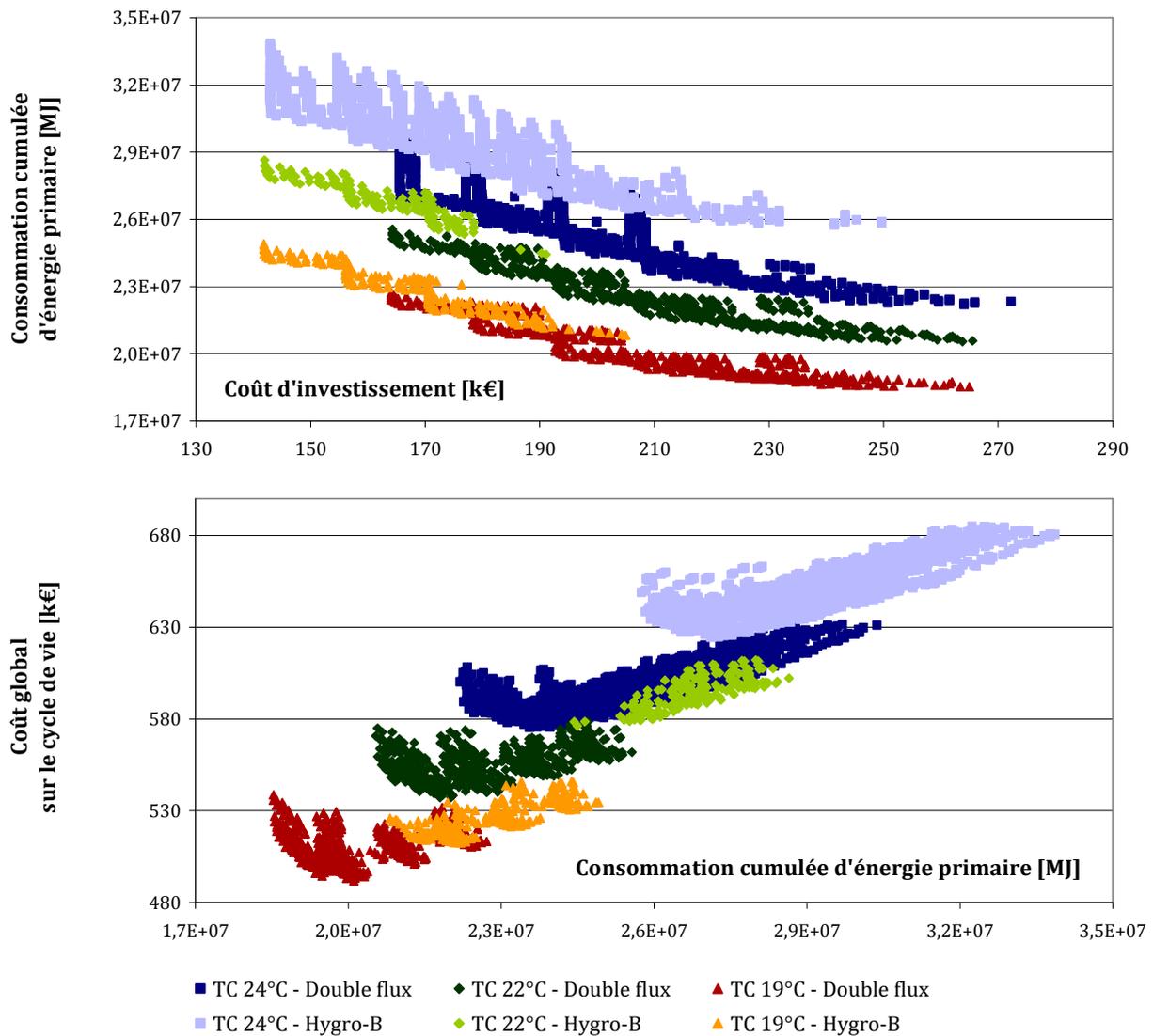
**Figure 114. Solutions, variantes de réhabilitation des FENETRES et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global**

La Figure 114 permet de remarquer que les solutions mettant en œuvre les fenêtres double vitrage basse émissivité à lame argon couvrent une large partie des surfaces de compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût global et coût d'investissement, quelle que soit la consigne de chauffage.

En particulier, le minimum en coût global sur le cycle de vie peut systématiquement être atteint à partir d'une combinaison de mesures de réhabilitation intégrant les fenêtres double vitrages.

Quel que soit le niveau de régulation du chauffage (parmi les 3 alternatives étudiées), le triple vitrage est réservé aux solutions les plus performantes énergétiquement. L'économie d'énergie primaire cumulée demeure cependant marginale sur 50 ans au regard de l'investissement additionnel consenti.

Ces remarques sont évidemment relatives à l'étude de cas considérée, définissant une configuration particulière d'orientation des surfaces de vitrages.

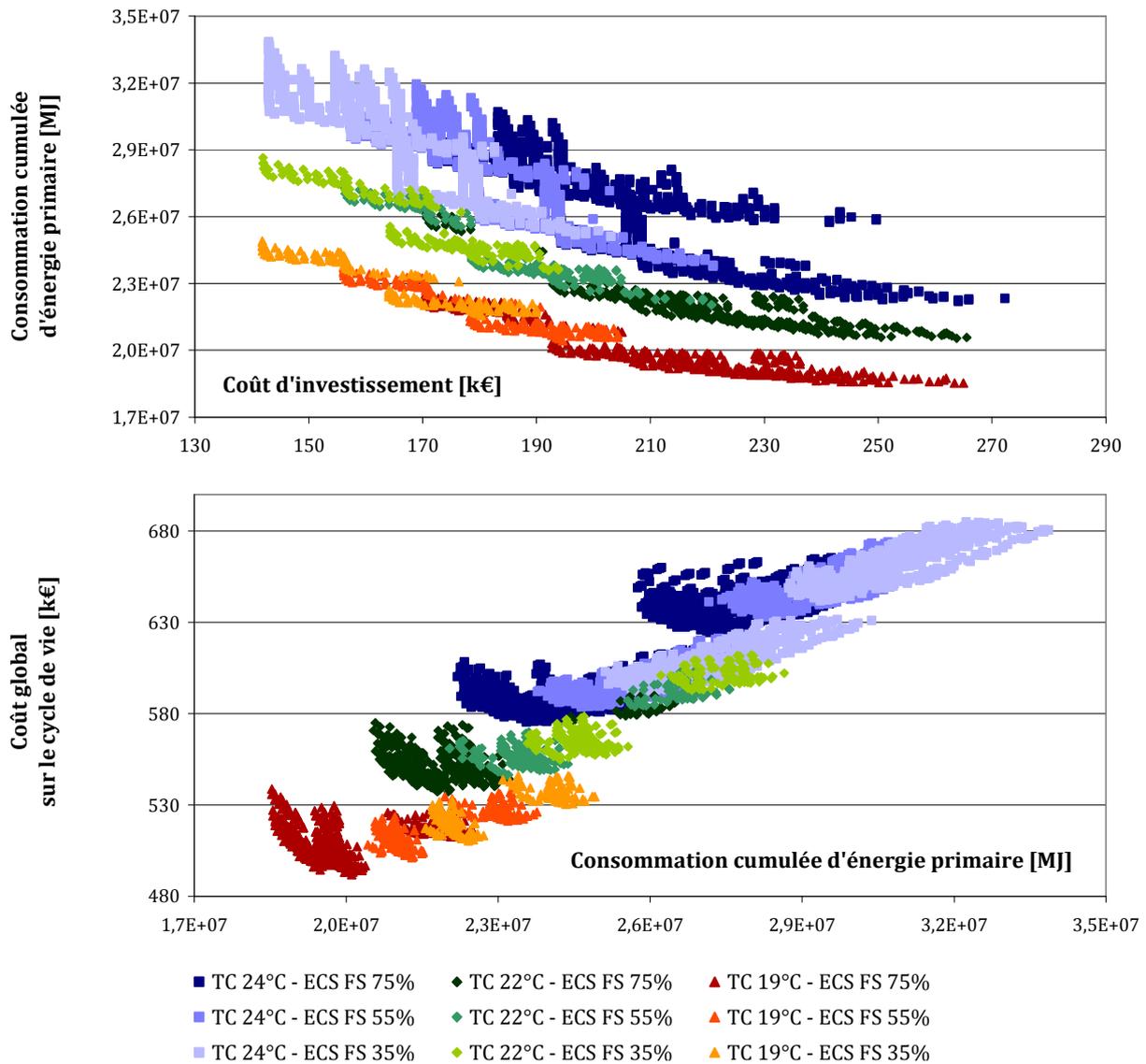


**Figure 115. Solutions, variantes de réhabilitation de VENTILATION et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global**

L'analyse de la répartition des solutions sur les variantes de remplacement du système de ventilation mécanique assistée préexistant est particulièrement intéressante. Elle permet en effet de distinguer très clairement les deux sous-ensembles de solutions non-dominées, apparus précédemment dans le cas d'une consigne de chauffage à 24°C.

De plus, sur la Figure 115, il est aisé de remarquer les solutions les plus performantes en termes de consommation cumulée d'énergie primaire, de coût global sur le cycle de vie ou encore de coût d'investissement mettent systématiquement en œuvre une ventilation double flux, quelle que soit la température de régulation imposée pour le chauffage.

Ce constat pourra néanmoins être approfondi, par une étude plus détaillée de la sensibilité des solutions aux débits de ventilation contrôlée et par infiltration à travers l'enveloppe, qui sont deux paramètres du modèle mis en place. La sensibilité à la configuration des logements - impactant largement le coût des solutions de ventilation – mérite également d'être investiguée (plus ou moins grande facilité à intégrer des conduits de circulation d'air).



**Figure 116. Solutions, variantes de réhabilitation sur l'ECS et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global**

Enfin, la Figure 116 permet de confirmer que, quelle que soit la consigne de chauffage, les solutions les plus efficaces – en consommation cumulée d'énergie primaire, coût global et coût d'investissement – intègrent la fraction solaire maximale sur l'espace de recherche, pour la production d'ECS : soit 75% ici.

### Conclusion sur la sensibilité aux consignes de chauffage

Le comportement des occupants, par exemple au travers des températures de consigne pour le chauffage, a une influence considérable sur les performances environnementales et en coût global des stratégies de réhabilitation efficaces.

L'étude des surfaces de compromis permet d'analyser l'influence des consignes de chauffage sur la nature (composition et phasage) ainsi que les performances des solutions non-dominées.

Des stratégies intermédiaires, mettant en œuvre les niveaux moyens (de l'espace de décision) d'isolation thermique pour les façades et le plancher bas, démontrent une certaine robustesse face à la sensibilité aux consignes de chauffage imposées par les occupants.

### 3.5.2 Evolution du coût de l'énergie en exploitation

Dans le modèle de cycle de vie proposé, les bâtiments existants sont exploités sur cinquante ans, à partir du début des opérations de réhabilitation énergétique. Sur ces 50 années, l'usage des locaux impose des consommations d'énergie. Une des hypothèses fortes du modèle tient alors à la loi d'évolution du coût des énergies consommées pour satisfaire à cet usage.

#### Scénarios d'évolution des prix

Comme le précise l'Annexe B, les scénarios de base (considérés par défaut) pour l'évolution du prix des énergies ont été construits à partir des données prospectives de la DGEC (Direction Générale de l'Energie et du Climat, service du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie), en 2010, pour la période 2010-2030.

Pour le gaz, les projections ont été établies à partir des taux de croissance annuels moyens par période, calculés sur la base des estimations disponibles sur 2010-2030, et ont été prolongées jusqu'à 2060, selon les mêmes taux de croissance.

Pour l'électricité, le scénario de base provient également des projections de la DGEC, calculées à partir des données d'Enerdata. Les projections sur la période 2030-2060 sont basées sur le taux de croissance annuel moyen des années 2020-2030.

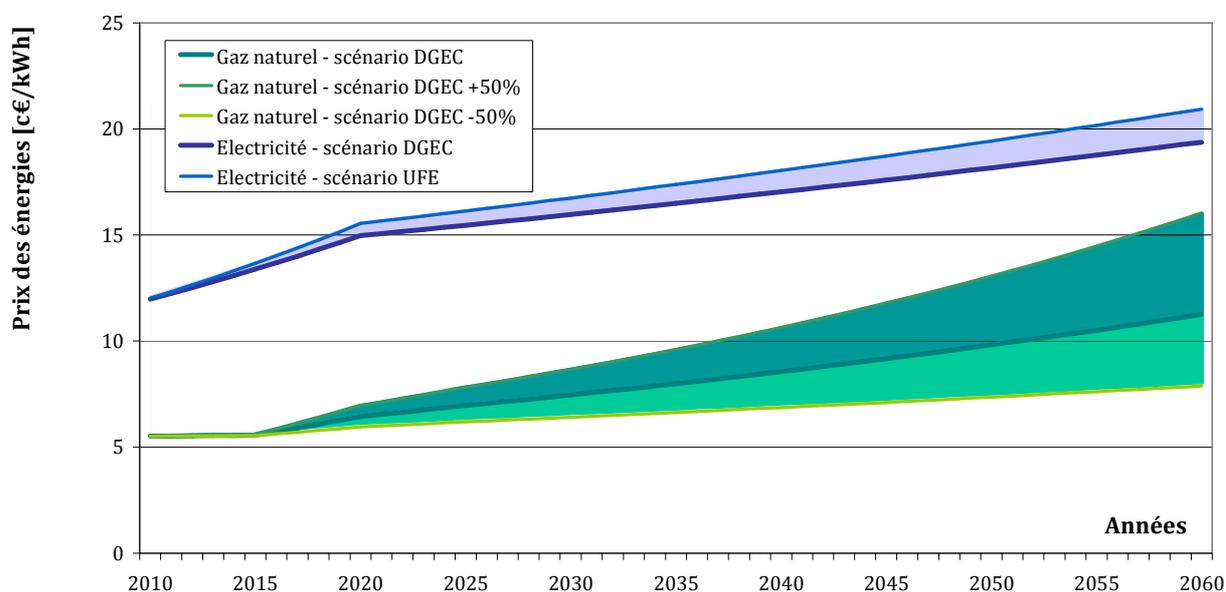


Figure 117. Scénarios d'évolution du prix du gaz et de l'électricité, sur la période 2010-2060

Dans une perspective d'étude de sensibilité, et devant le peu de données accessibles (à la connaissance de l'auteur) sur l'évolution des prix des énergies, nous avons établi deux scénarios

prospectifs, en faisant varier notamment les taux de croissance. La Figure 117 représente l'évolution des prix du gaz et de l'électricité, suivant ces différents scénarios prospectifs.

Le premier scénario noté « **DGEC -50%** », conservateur, est construit de la manière suivante :

- Pour le gaz : adaptation du scénario DGEC de base, par une réduction de 50% des taux de croissance, sur la période 2010-2060 ;
- Pour l'électricité : scénario DGEC de base. Ce choix est motivé par les nombreuses informations, portant à croire que les tarifs de l'électricité peuvent difficilement baisser en France dans les années à venir, y compris à mix énergétique constant.

Le second scénario noté « **DGEC +50%** », plus pessimiste, considère au contraire :

- Pour le gaz : adaptation du scénario DGEC de base, par une augmentation de 50% des taux de croissance, sur la période 2010-2060 ;
- Pour l'électricité : scénario prospectif issu de données de l'UFE (Union Française de l'Electricité). L'UFE a mené en 2010 une étude intitulée « Electricité 2030, quels choix pour la France », situant le prix moyen de l'électricité à environ 16,8 centimes d'euros par kWh, en 2020.

Aucune évolution du mix électrique n'est introduite à ce stade, aussi le bilan environnemental du kWh d'électricité consommé en 2050 est le même en 2010. Cette hypothèse pourrait être remise en cause dans une étude de sensibilité complémentaire.

L'évolution des prix des énergies, consommées en exploitation des bâtiments réhabilités, n'affecte nécessairement que le coût global, parmi les fonctions objectifs sur lesquelles sont évaluées les performances des solutions. Aussi, les figures proposées dans cette section ne s'intéressent qu'aux compromis faisant intervenir le coût global sur le cycle de vie.

### **Performances des solutions non-dominées**

Les ensembles de stratégies de réhabilitation énergétique efficaces sont identifiés, pour chacun des scénarios d'évolution des prix des énergies considérés. Les projections des surfaces de compromis obtenues, sur les plans définis par la consommation cumulée d'énergie primaire, le coût d'investissement et le coût global, sont représentées sur la Figure 118. Les solutions particulières identifiées sur cette figure sont exploitées dans la sous-partie suivante.

Sur cette figure, il apparaît nettement que, si la forme générale de la surfaces de compromis est conservée, les ensembles de solutions identifiés ne se recouvrent que très partiellement dans l'espace des objectifs. Ils sont caractérisés par des niveaux de performances bien distincts.

Les niveaux de performances, en coût global, atteints par les solutions efficaces des différents scénarios sont logiquement d'autant plus différenciés que les consommations énergétiques sont importantes. Ainsi, pour les solutions représentant les niveaux maximums en consommation énergétique, pour lesquelles les consommations d'électricité sont faibles devant celles de gaz, le scénario « **DGEC -50%** », conservateur sur l'évolution du prix du gaz, implique une diminution significative du coût global par rapport au scénario de base de la DGEC, et plus encore par rapport à la projection « **DGEC +50%** ». En revanche, les différences sont moindres pour les solutions les plus économes en énergie.

L'écart plus significatif entre les scénarios « DGEC Base » et « DGEC +50% », tient au fait que les coûts du gaz et de l'électricité sont supérieurs dans le cas « DGEC +50% ». Entre les scénarios « DGEC Base » et « DGEC -50% », seul le coût du gaz est amené à varier.

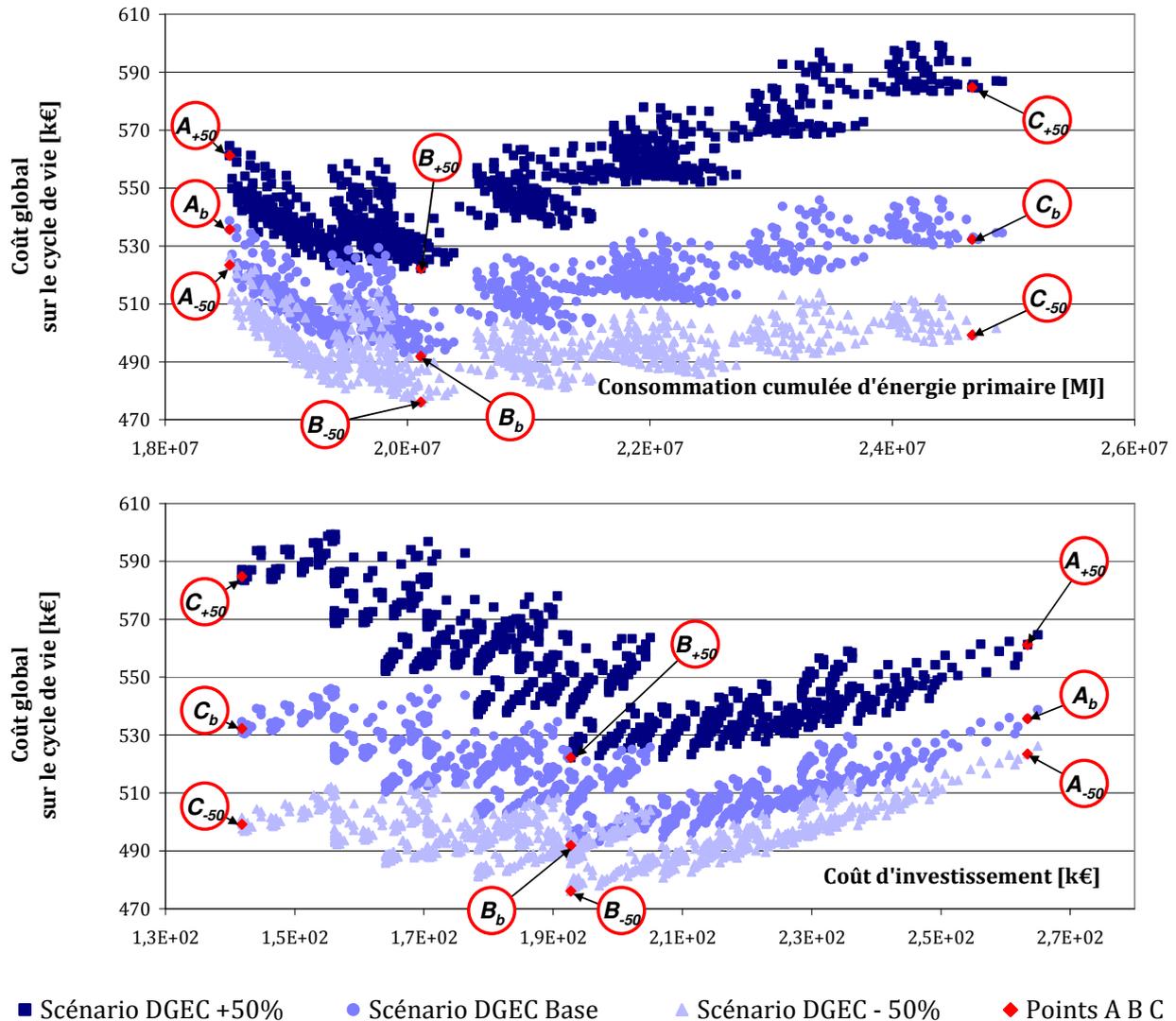


Figure 118. Scénarios d'évolution du prix des énergies et surfaces de compromis entre coût global, consommation cumulée d'énergie primaire et coût d'investissement

### Analyse de solutions particulières

Il s'agit à présent d'illustrer la nature des programmes de réhabilitation non-dominés, dans l'espace de recherche. A la manière des sections précédentes, nous nous intéressons, pour chaque scénario d'évolution, à 3 solutions efficaces particulières :

- **A** : Minimum en consommation cumulée d'énergie primaire ;
- **B** : Minimum en coût global sur le cycle de vie ;
- **C** : Minimum en coût d'investissement.

Ces solutions sont représentées sur la Figure 118 précédente. La notation  $X_b$  représente le scénario de base de la DGEC.  $X_{-50\%}$  et  $X_{+50\%}$  correspondent respectivement aux scénarios pour lesquels les taux de variation du prix du gaz sont réduits ou augmentés de 50%, par rapport aux projections de la DGEC.

Il est alors particulièrement intéressant de constater que, quel que soit le scénario envisagé pour l'évolution des prix des énergies, les solutions  $A_b$ ,  $A_{-50\%}$  et  $A_{+50\%}$  ne se différencient ici que par leurs performances. Elles représentent des programmes identiques par leur composition et leur phasage, précisés sur le Tableau 32 ci-dessous. La conclusion est similaire pour les ensembles de points «  $B_b$ ,  $B_{-50\%}$  et  $B_{+50\%}$  » et «  $C_b$ ,  $C_{-50\%}$  et  $C_{+50\%}$  ».

	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	N° Phase
<b>A</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 200 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 300 mm	3
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 200 mm	5
	Ouvertures	Triples vitrages basse émissivité (lame Argon)	6
	Ventilation	Double flux	7
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	2
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%	4
	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	N° Phase
<b>B</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm	2
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	3
	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	5
	Ventilation	Double flux	6
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	7
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%	4
	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	N° Phase
<b>C</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm	2
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	3
	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	4
	Ventilation	Hygro-B	5
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	6
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%	7

Tableau 32. Détail des programmes de réhabilitation de types A, B et C

Dans cette étude de cas, suivant les scénarios proposés pour l'évolution des prix de l'énergie, les solutions A, B et C sont affectées en termes de performances mais leur nature de change pas. Cette remarque ne s'applique cependant pas à l'ensemble des solutions des fronts obtenus. Dans le cas du scénario de base de la DGEC, 827 solutions non-dominées sont identifiées contre 775 et 833, respectivement pour les projections « DGEC -50% » et « DGEC +50% ». Ce constat démontre que les fronts solutions ne sont pas la simple transposition des solutions du scénario de base, en actualisant les performances en coût global.

### Solutions non-dominées et variantes de réhabilitation

L'étude de la répartition des variantes de réhabilitation sur les surfaces de compromis identifiées permet de poursuivre l'analyse précédente en ciblant l'influence des scénarios prospectifs des prix des énergies sur la nature des solutions de réhabilitation.

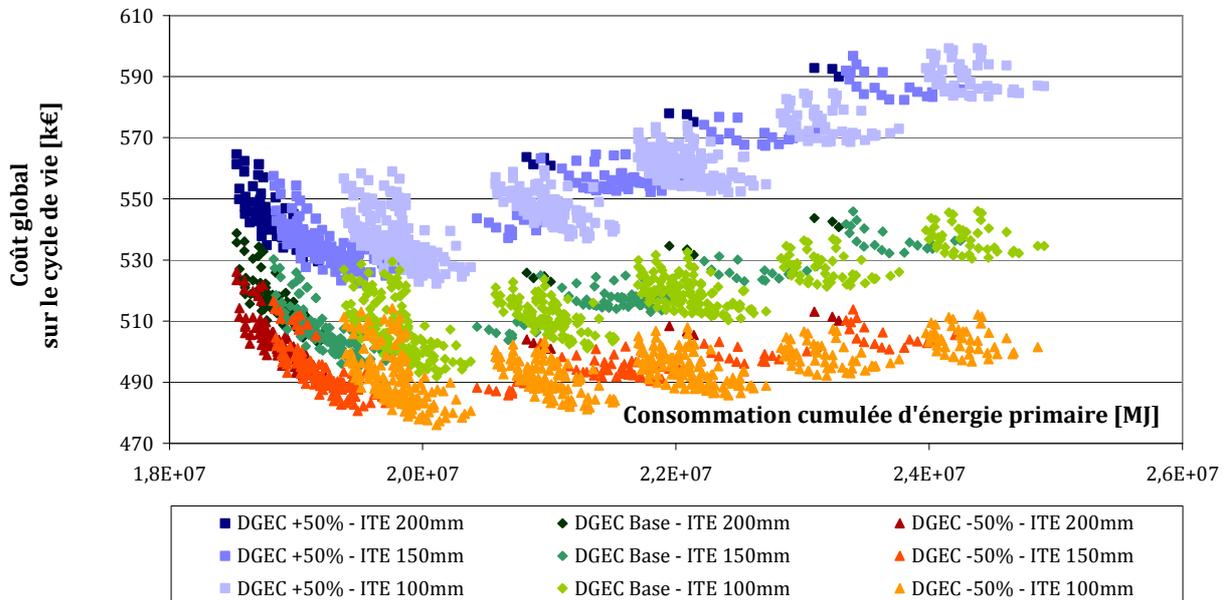


Figure 119: Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur les **FACADES** et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global

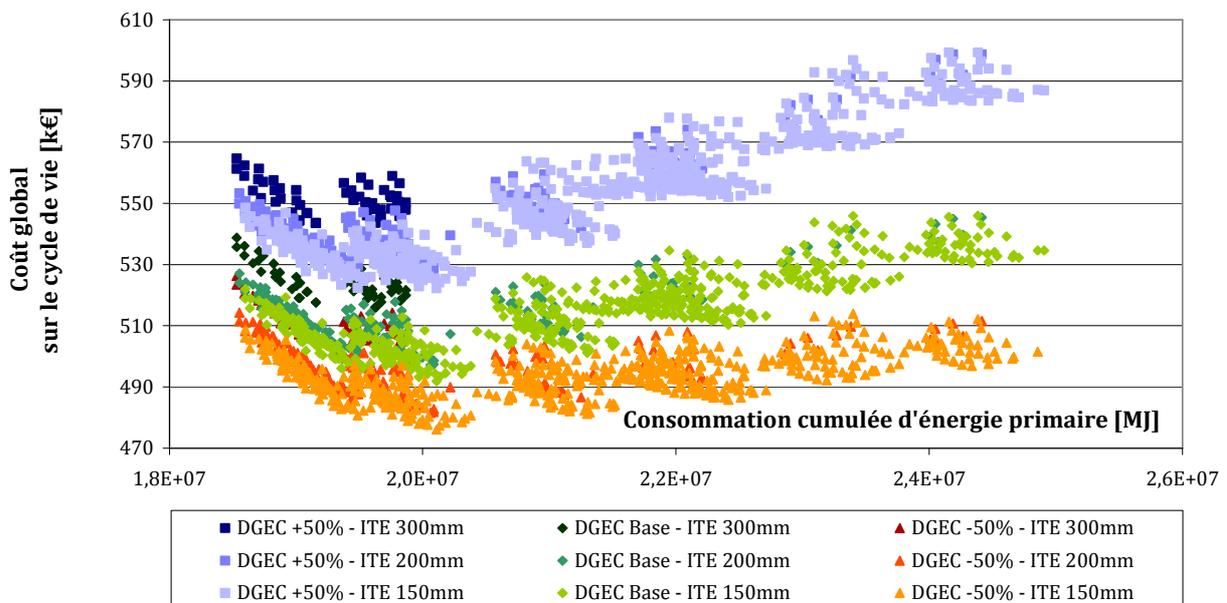


Figure 120. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur la **TOITURE** et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global

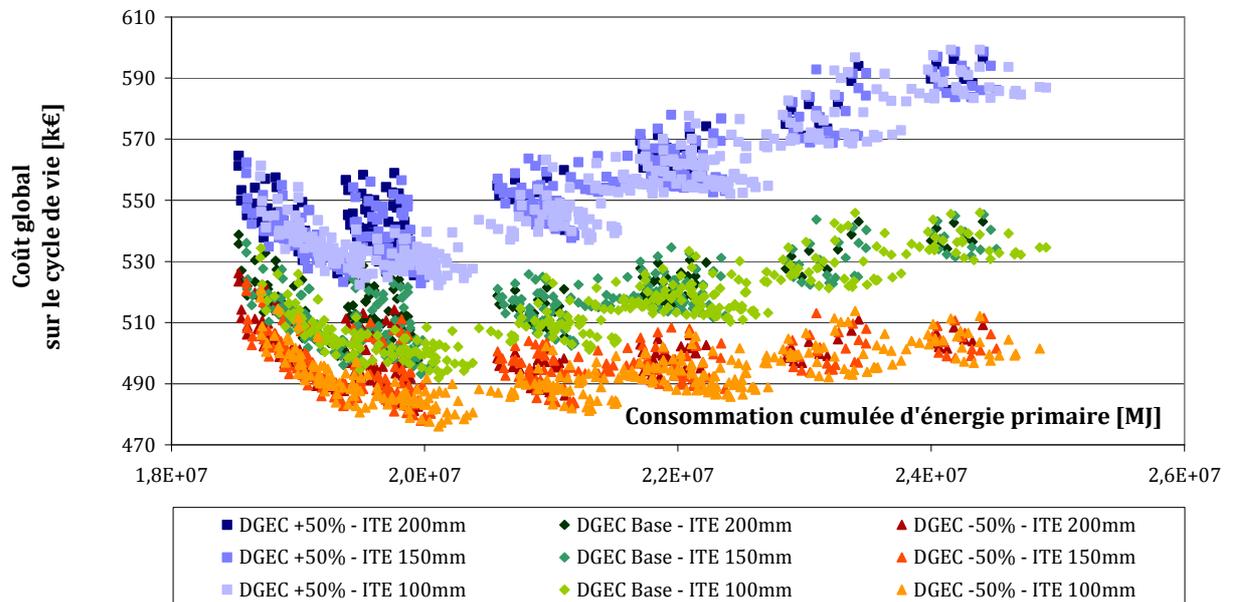


Figure 121. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur le **PLANCHER BAS** et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global

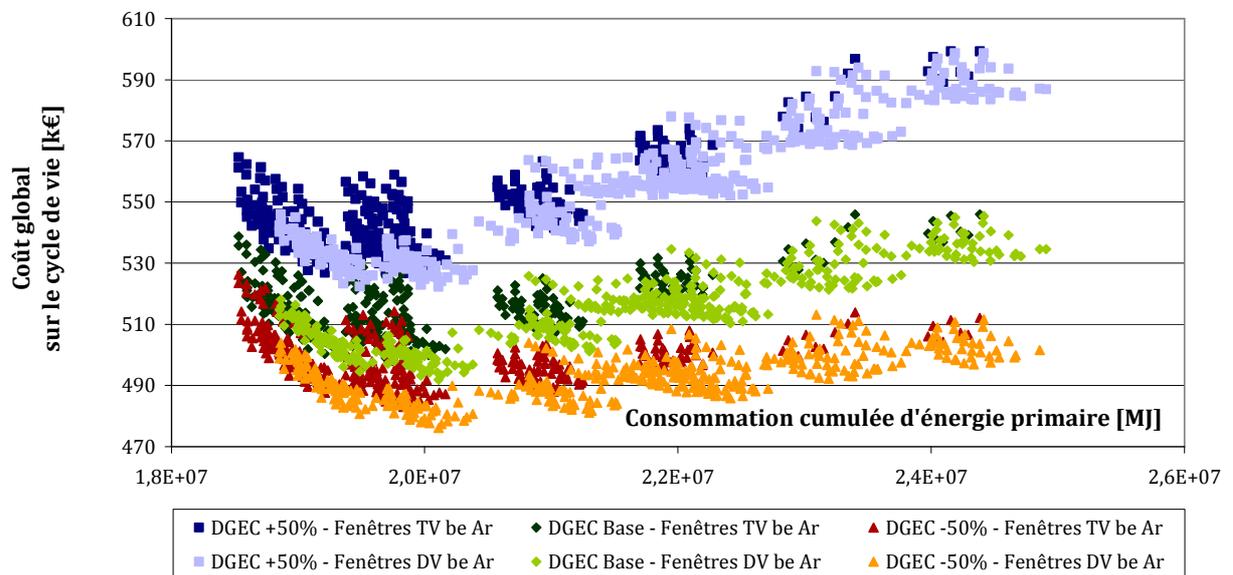


Figure 122. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur les **FENETRES** et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global

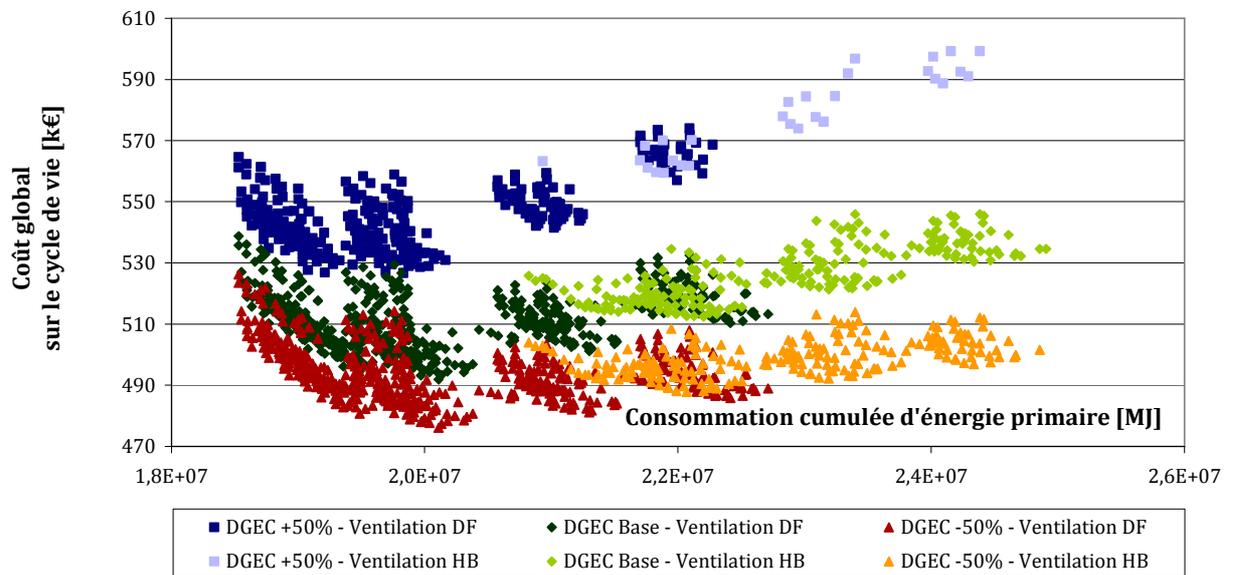


Figure 123. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur les systèmes de **VENTILATION** et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global

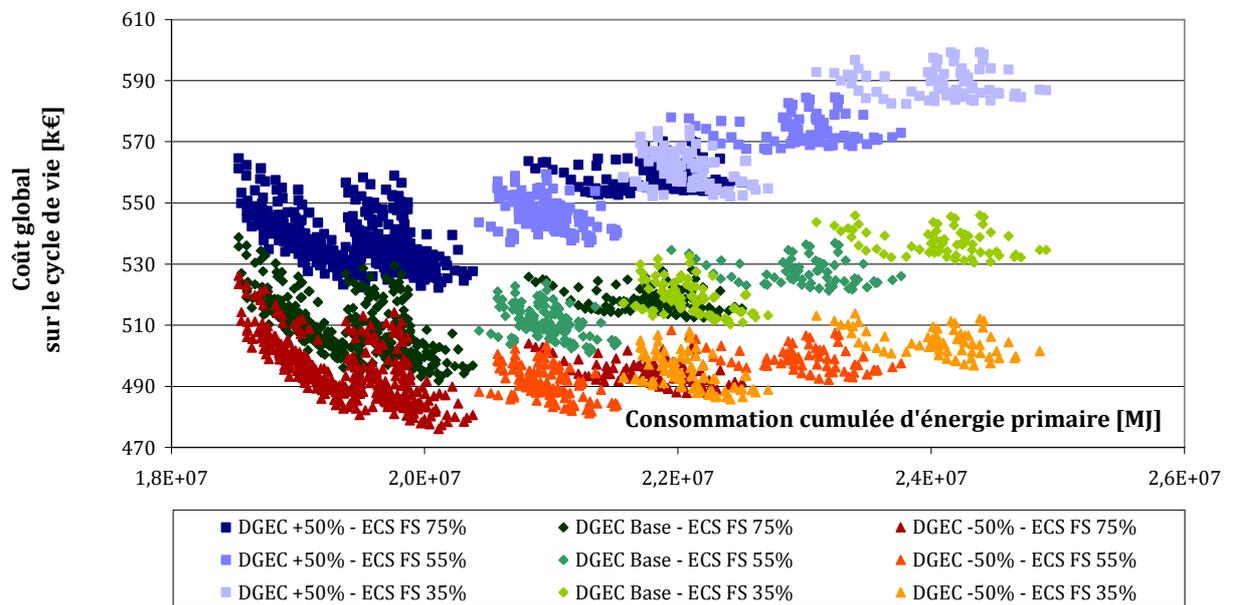


Figure 124. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur la fraction solaire (FS) de **PRODUCTION D'ECS** et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global

Les figures précédentes (Figure 119 à Figure 124) illustrent la segmentation des solutions non-dominées sur la base des variantes de réhabilitation mises en œuvre pour l'isolation thermique des façades, de la toiture, du plancher bas, le remplacement des fenêtres, du système de ventilation, la fraction solaire de production de l'ECS.

A la vue de ces graphiques, il apparaît que la répartition des solutions, sur les variantes de réhabilitation, est globalement très peu influencée par le scénario d'évolution des prix de l'énergie, parmi les 3 projections étudiées. De plus fortes amplitudes tarifaires pourraient cependant faire varier les conclusions.

De plus, cette remarque est à remettre dans la perspective des mesures de réhabilitation étudiées ici, soit de la définition de l'espace de recherche. Dans cette étude de cas, l'énergie de chauffage utilisée à l'issue de la réhabilitation est systématiquement le gaz. Dans le cas où différents systèmes de chauffage seraient proposés en réhabilitation (pompes à chaleur, chaudières bois, réseau de chauffage urbain, etc.), il est possible que les variations différentielles de tarifs entre les énergies conduisent à des évolutions plus importantes sur la nature des solutions non-dominées. Des études complémentaires dans ce sens auraient alors beaucoup d'intérêt.

Par ailleurs, on retrouve évidemment les comportements précédemment décrits en section 3.5.1, en termes de répartition des solutions sur les variantes de réhabilitation.

### **Conclusion sur la sensibilité à l'évolution des coûts de l'énergie**

Les projections sur l'évolution des prix des énergies ont donc une influence importante sur les performances en coût global des programmes de réhabilitation efficaces, particulièrement pour les solutions minimisant les coûts d'investissement. Cette étude de cas souligne cependant que les solutions sont globalement similaires en termes de composition et de phasage des travaux, dans le cadre des scénarios et des hypothèses de modélisation considérées. Il serait intéressant alors de remettre en cause cette observation dans le cas où différents systèmes de chauffage, consommant différentes énergies, seraient proposés en réhabilitation.

### **3.5.3 Durée de vie des composants**

Les précédentes optimisations ont été conduites en considérant que les composants du bâtiment – matériaux, systèmes constructifs ou équipements – introduits pour lors des opérations de réhabilitation énergétique, n'étaient pas remplacés sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment réhabilité (50 ans). Bien que la durée de vie des composants de bâtiment soit une variable incertaine, dépendant largement des conditions de mise en œuvre et d'entretien, ne prévoir aucun remplacement des composants mis en œuvre en réhabilitation, sur 50 ans, constitue évidemment une hypothèse forte du modèle de cycle de vie. Aussi, il convient d'en analyser la sensibilité sur les solutions identifiées.

#### **Hypothèses de durées de vie des composants de réhabilitation**

Le scénario de base, pour lequel aucun des composants de réhabilitation n'est remplacé sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment réhabilité, est noté « **DVC 50 ans** » (la **Durée de Vie des Composants** étant considérée supérieure, ou égale à 50 ans).

Ce scénario est comparé à une alternative dans laquelle les composants introduits en réhabilitation sont remplacés, suivant des cycles de maintenance définis par les durées de vie respectives des composants. Les durées de vie considérées sont présentées dans le Tableau 33 ci-dessous. Elles ont été proposées à partir de précédentes études (Thiers and Peuportier, 2012).

Ce second scénario, introduisant des durées de vie différenciées suivant les mesures de réhabilitation, est noté « **DVC diff.** ».

Type de composant de réhabilitation énergétique	Durée de vie (années)
Enveloppe (isolants et revêtements)	30
Ouvertures	30
Systèmes de ventilation	30
Chaudière gaz ou fuel (basse température ou à condensation)	20
Panneaux solaires thermiques	20

**Tableau 33. Durées de vie moyenne considérées pour les composants introduits en réhabilitation**

Le scénario « **DVC diff.** » est construit de la manière suivante :

- Sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment, le nombre de remplacements des composants est égal à la partie entière du quotient de la durée de vie du bâtiment par la durée de vie moyenne du composant considéré.
- Les composants sont systématiquement remplacés à l'identique, à l'exception du système de chauffage (point suivant) ;
- Lorsque le système de chauffage (installé en réhabilitation) atteint sa fin de vie, l'équipement de remplacement est alors dimensionné en fonction de la puissance maximale de chauffage appelée après réhabilitation. Cette puissance peut être nettement inférieure à la puissance nominale du système de chauffage ayant atteint sa fin de vie : par exemple, dans le cas où le programme de réhabilitation a conduit à remplacer le système de chauffage avant de réhabiliter l'enveloppe, soit avant de réduire les besoins de chaleur.

Pour chacun des composants de remplacement, sont prises en compte les étapes de production et de traitement en fin de vie.

### Remarques préliminaires

Les programmes de réhabilitation efficaces, identifiés dans le cadre du scénario « **DVC 50 ans** », sont nécessairement aussi les solutions du problème pour lequel le scénario de maintenance introduit serait indépendant des variantes considérées pour les mesures de réhabilitation. Dans ce cas, la maintenance sur une fenêtre double vitrage est identique à celle sur une ouverture triple vitrage, par exemple. Toutes les solutions de l'espace de décision sont alors translatées suivant un même vecteur dans l'espace des objectifs ; les solutions (composition et phasage des programmes) sont les mêmes, seules leurs performances se trouvent modifiées.

Le scénario « **DVC 50 ans** » permet donc d'identifier les solutions efficaces, y compris dans le cadre d'un scénario de maintenance, à la double condition que ce scénario n'envisage pas le

remplacement des équipements mais se limite à un entretien régulier, et que la maintenance pour une mesure de réhabilitation donnée soit indépendante de la variante considérée.

Cependant, si les composants doivent être remplacés, le scénario « **DVC 50 ans** » n'est alors plus valide. Il ne permet plus d'obtenir les solutions du problème et leurs performances par une simple translation dans l'espace des objectifs. En effet, le composant de remplacement dépend évidemment de la variante considérée pour la mesure de réhabilitation (une fenêtre triple vitrage est remplacée par une fenêtre identique, par exemple).

De plus, dans le cas où le remplacement concerne le système de chauffage, le nouveau système est dimensionné en fonction de la puissance de chauffage maximale appelée, suivant la configuration courante du bâtiment réhabilité. Il peut alors être différent de l'équipement installé en réhabilitation et dépend de la combinaison des variantes de réhabilitation mise en œuvre.

Le scénario « **DVC diff.** » permet alors de rechercher des solutions, en enrichissant le modèle de cycle de vie, par la prise en compte du remplacement des composants de réhabilitation.

Le scénario « **DVC diff.** » a été mis en œuvre uniquement dans cette étude de cas, essentiellement pour des questions de chronologie dans les développements informatiques.

### Performances des solutions non-dominées

Les résultats suivants permettent de comparer les solutions efficaces obtenues dans l'espace des objectifs, soit en termes de performances, suivant les deux scénarios de durée de vie considérés pour les composants.

La Figure 125 représente la projection des fronts de Pareto identifiés sur les 21 plans définis par les 7 critères de décision. Les Figure 126 à Figure 129 permettent de visualiser plus précisément certains des compromis présentés en Figure 125. Les solutions particulières identifiées sur ces graphiques sont exploitées dans la sous-partie suivante.

Il apparaît sur la Figure 125 que les performances des solutions non-dominées pour les scénarios « **DVC 50 ans** » et « **DVC diff.** » sont du même ordre de grandeur, en termes d'impact environnemental sur les indicateurs suivants : consommation cumulée d'énergie primaire, potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, potentiel de changement climatique à 100 ans.

Pour ces critères, les compromis adoptent le même comportement et obéissent aux corrélations mises en évidence dans le Chapitre 2. La Figure 126 fait ainsi apparaître le léger décalage mais large recouvrement des solutions non-dominées des deux scénarios de durée de vie, sur le compromis entre ressources et changement climatique.

L'étude de ces corrélations avait souligné que ces critères étaient fortement corrélés aux consommations énergétiques en usage, qui évoluent peu entre les deux scénarios.

En revanche, on note une nette différenciation entre les deux fronts de Pareto sur les critères économiques : coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie. Les graphiques relatifs aux performances économiques, sur la Figure 125, permettent de visualiser clairement cette distinction, de même que les Figure 127 et Figure 128. Ces différences s'expliquent évidemment par la maintenance des composants de réhabilitation, qui suivant leurs durées de vie respectives sont remplacés 1 à 2 fois sur les 50 années de poursuite du cycle de vie. Le coût d'investissement des programmes de réhabilitation est ainsi multiplié par un facteur supérieur à 2. L'augmentation des investissements se répercute directement sur le coût global sur le cycle de vie.

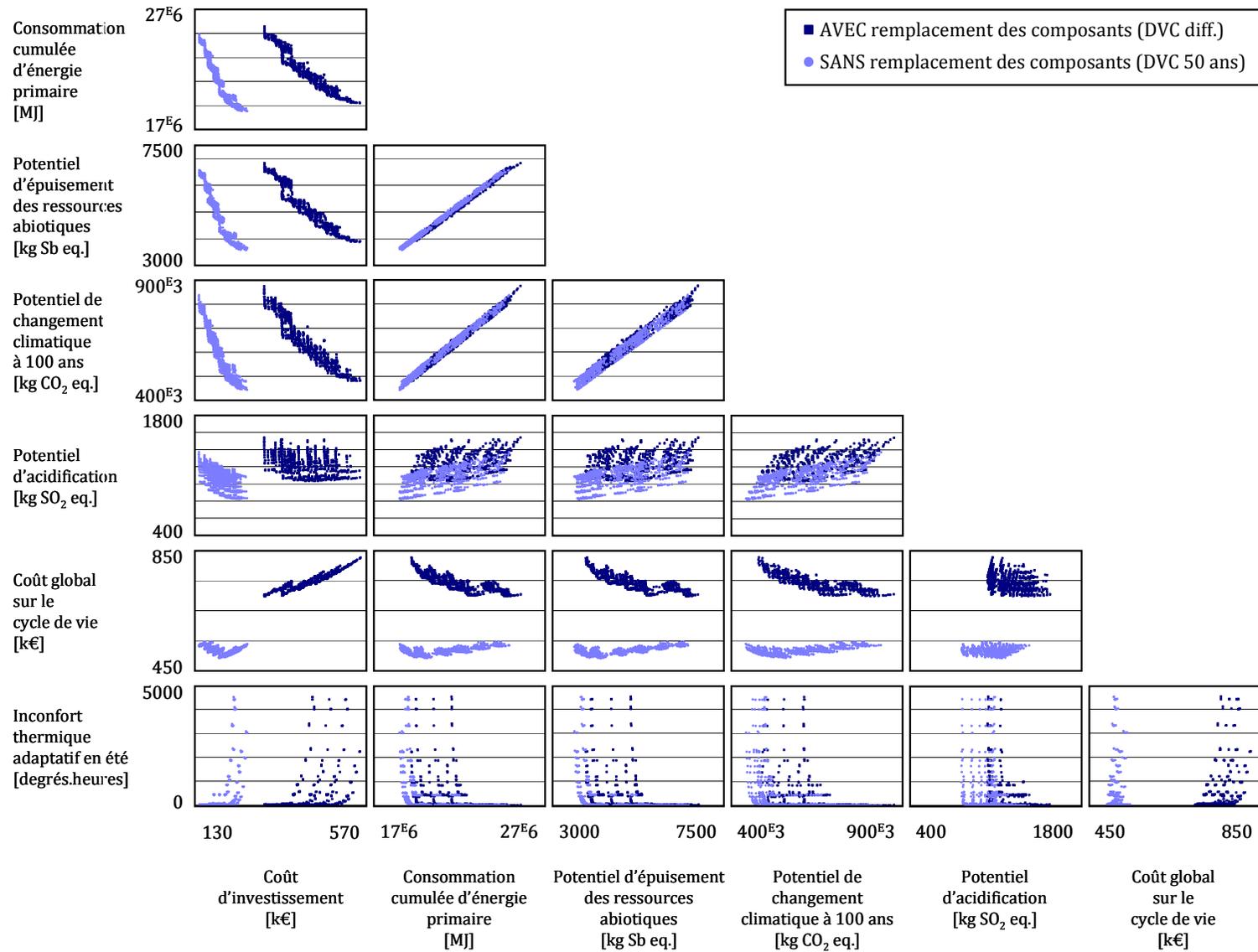


Figure 125. Représentation des fronts de Pareto, suivant les scénarios de remplacement des équipements, sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment

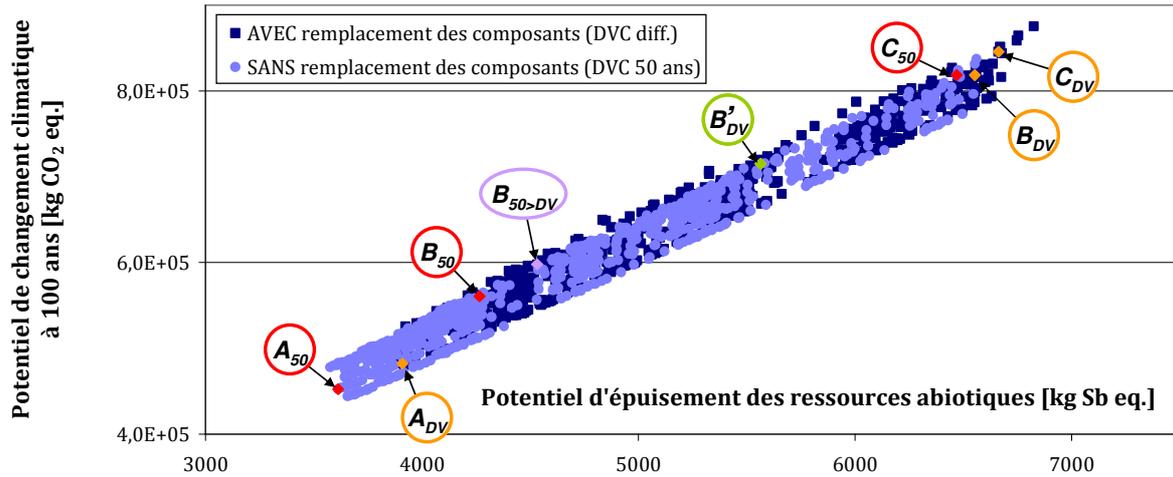


Figure 126. Scénarios de maintenance et compromis ressources / changement climatique

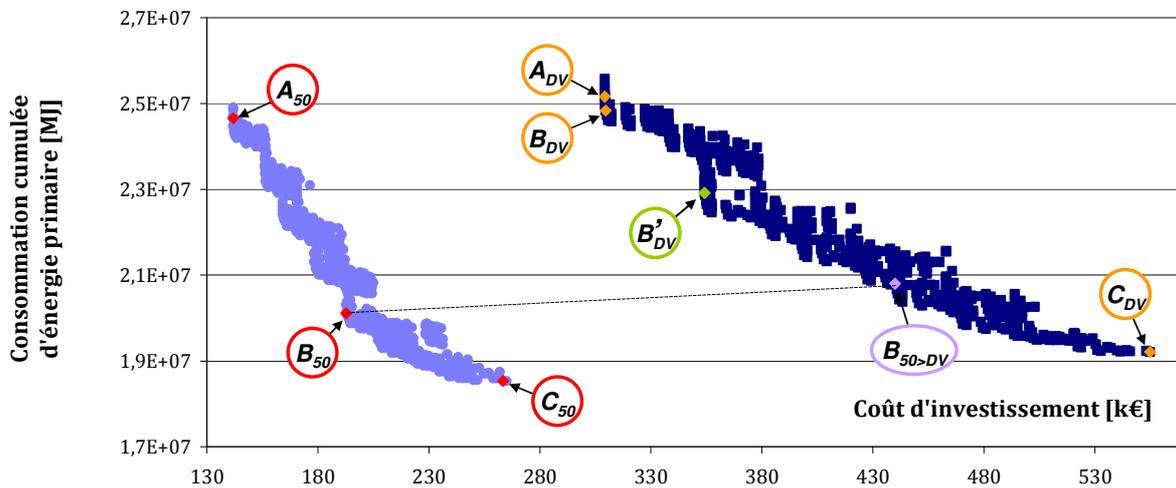


Figure 127. Scénarios de maintenance et compromis investissement / énergie

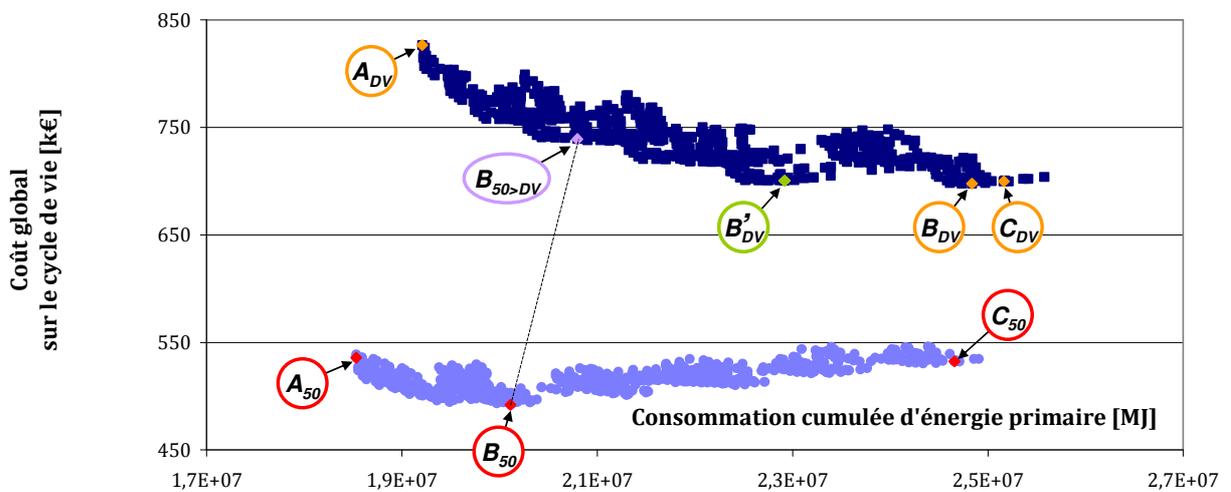


Figure 128. Scénarios de maintenance et compromis énergie / coût global

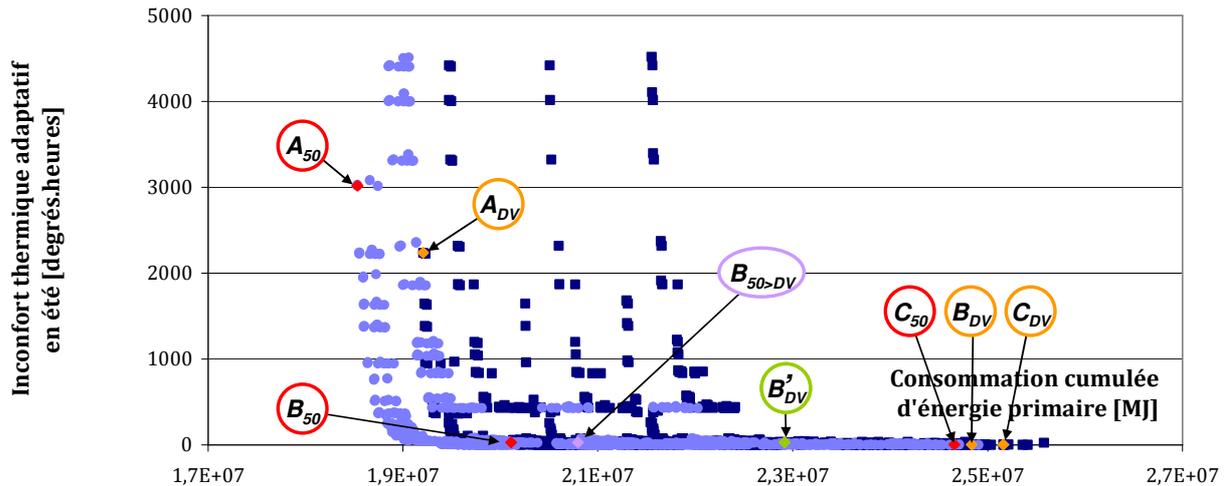


Figure 129. Scénarios de maintenance et compromis énergie / inconfort thermique

Dans l'espace des objectifs, sur les critères économiques, les différences portent tant sur les performances que sur l'allure des compromis.

Les ensembles de solutions non-dominées se dissocient nettement par les niveaux de performances. Ainsi, la Figure 127 souligne que les coûts d'investissement s'établissent entre 140 k€ et 265 k€ pour le scénario « DVC 50 ans », entre 309 k€ et 555 k€ dans le cas « DVC diff. ».

L'allure des compromis est également modifiée. On note ainsi, sur la Figure 127 que l'écart relatif entre les solutions peu performantes énergétiquement et au contraire très performantes est nettement plus important dans le cas du scénario « DVC diff. » que pour « DVC 50 ans ». Les investissements dans la performance énergétique sont d'autant plus considérables que les systèmes, déjà plus onéreux, sont remplacés souvent. Par ailleurs, alors que l'optimum en coût global apparaissait relativement proche de la meilleure solution du front en termes de performance énergétique, sur le scénario « DVC 50 ans », la Figure 128 souligne au contraire que dans le cas du scénario « DVC diff. », l'optimum global est atteint par une solution à la performance énergétique moindre. Ce constat s'appuie sur le positionnement des solutions  $B_{50}$  et  $B_{DV}$  au sein des fronts auxquels ils appartiennent, sur la Figure 128.

Enfin, en termes de confort thermique, les solutions des deux scénarios présentent des performances similaires (Figure 129). Le remplacement à l'identique des composants n'influence évidemment pas les niveaux de températures intérieures.

### Analyse de solutions particulières

L'étude de quelques solutions particulières est très complémentaire des développements précédents car elle permet de comparer des solutions efficaces non plus dans l'espace des objectifs (en termes de performances) mais dans l'espace de décision, soit en termes de composition et de phasage des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle.

Le Tableau 34 présente ainsi la définition de quelques solutions particulières, précédemment représentées sur les graphiques des Figure 126 à Figure 130. Les notations suivantes ont été adoptées pour désigner ces solutions :

- **A** : Optimum d'un front en termes de consommation cumulée d'énergie primaire ;
- **B** : Optimum d'un front en termes de coût global sur le cycle de vie ;
- **C** : Optimum d'un front en termes de coût d'investissement ;
- **DV** : Solution efficace du scénario « DVC diff. » ;
- **50** : Solution efficace du scénario « DVC 50 ans ».

Le point  $B'_{DV}$  représente une solution efficace, pour le scénario « **DVC diff.** », dont la performance en coût global est très proche de l'optimum sur ce même objectif (différence inférieure à 0,5%), pour une performance énergétique nettement plus élevée (différence supérieure à 8,3%). La solution  $B_{50>DV}$  est exploitée dans la partie suivante.

Il est apparaît sur le Tableau 34 que seuls les optimums en coût d'investissement correspondent au même programme de réhabilitation énergétique séquentielle, mettant en œuvre les niveaux minimums sur chaque mesure de réhabilitation, suivant un phasage identique.

Pour les solutions **A** et **B**, les programmes diffèrent en composition et en phasage entre les scénarios « **DVC 50 ans** » et « **DVC diff.** ». Il est alors intéressant de remarquer que, tant du point de vue de l'optimum en performance énergétique (point **A**) que de celui en de coût global (point **B**), l'analyse des solutions des deux scénarios fait apparaître deux tendances :

- Les solutions  $A_{DV}$  et  $B_{DV}$  du scénario « **DVC diff.** » mettent en œuvre des mesures de réhabilitation moins performantes en termes de consommation énergétique en usage du bâtiment, que celles du scénario « **DVC 50 ans** ».  
La solution  $A_{DV}$  définit un niveau d'isolation de la toiture moindre que la solution  $A_{50}$ . Les impacts consentis par la sur-isolation de la toiture ne sont plus compensés sur le cycle de vie, en termes de consommation cumulée d'énergie primaire, dans le cas du remplacement de l'isolant sur 50 ans ( $A_{DV}$ ).  
De même, la solution  $B_{DV}$  met en œuvre une ventilation hygro-B et une fraction solaire de 35% pour la production d'ECS, alors que  $B_{50}$  utilise une ventilation double flux et une fraction solaire de 75%.
- Par ailleurs, l'analyse des solutions  $A_{50}$ ,  $A_{DV}$ ,  $B_{50}$  et  $B_{DV}$  révèle que le scénario « **DVC diff.** » conduit à remplacer plus rapidement le système de chauffage.  
Dans le cas où les composants sont remplacés sur les 50 années de poursuite du cycle de vie, le surdimensionnement de l'équipement (lié à un remplacement avant la réduction des besoins de chaleur) est moins dommageable étant donné que l'équipement surdimensionné sera remplacé ensuite par un système adapté aux besoins après réhabilitation complète, lors des cycles de maintenance.

Enfin, l'intégration d'une surface supérieure de panneaux solaires thermiques pour la production d'ECS permet, dans le cadre du scénario « **DVC diff.** », une amélioration significative de la performance énergétique pour une très faible dégradation du coût global. Ce constat est basé sur la comparaison des points  $B_{DV}$  et  $B'_{DV}$ , sur le Tableau 34 et la Figure 128.

Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	VARIANTES DE REHABILITATION						
		A <sub>50</sub>	A <sub>DV</sub>	B <sub>50</sub>	B <sub>DV</sub>	B' <sub>DV</sub>	C <sub>50</sub>	C <sub>DV</sub>
Murs de façades	ITE laine minérale [mm]	200	200	100	100	100	100	100
Toiture	ITE polyuréthane [mm]	300	200	150	150	150	150	150
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé [mm]	200	200	100	100	100	100	100
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	TV	TV	DV	DV	DV	DV	DV
Ventilation	Type de système de ventilation	DF	DF	DF	HB	DF	HB	HB
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Production ECS	Fraction solaire [%]	75%	75%	75%	35%	35%	35%	35%

Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	PHASAGE DES TRAVAUX						
		A <sub>50</sub>	A <sub>DV</sub>	B <sub>50</sub>	B <sub>DV</sub>	B' <sub>DV</sub>	C <sub>50</sub>	C <sub>DV</sub>
Murs de façades	ITE laine minérale [mm]	1	2	1	1	1	1	1
Toiture	ITE polyuréthane [mm]	3	3	2	2	2	2	2
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé [mm]	5	5	3	3	3	3	3
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	6	6	5	6	4	4	4
Ventilation	Type de système de ventilation	7	7	6	7	5	5	5
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	2	1	7	4	6	6	6
Production ECS	Fraction solaire [%]	4	4	4	5	7	7	7

**Tableau 34. Détails des programmes de réhabilitation A, A<sub>DV</sub>, B, B<sub>DV</sub>, B'<sub>DV</sub>, C, C<sub>DV</sub> en termes de variantes de mesures de réhabilitation et de phasage des travaux**

Ouvertures : DV = double vitrage ; TV = triple vitrage ;  
Systèmes de ventilation : HB = ventilation de type hygro-B ; DF = ventilation double flux ;

### Analyse des impacts cumulés dans le temps

L'étude des quelques solutions particulières de la partie précédente a mis en évidence que les programmes de réhabilitation correspondant à l'optimum en coût global sont de nature différente dans le cas des scénarios « **DVC 50 ans** » et « **DVC diff.** » ( $\mathbf{B}_{50}$  et  $\mathbf{B}_{DV}$ , respectivement). Nous nous proposons alors d'illustrer cette différence par la représentation des performances cumulées dans le temps.

La Figure 130 présente les performances cumulées sur les années de poursuite du cycle de vie, à partir du début de la réhabilitation, de deux solutions, dans le cas du remplacement des composants de réhabilitation ayant atteints leur durée de vie, soit suivant le scénario « **DVC diff.** ». Ces deux solutions correspondent à :

- $\mathbf{B}_{DV}$  : Programme de réhabilitation représentant l'optimum en coût global, pour le scénario « **DVC diff.** » ;
- $\mathbf{B}_{50>DV}$  : Programme de réhabilitation représentant l'optimum en coût global, pour le scénario « **DVC 50 ans** ».  $\mathbf{B}_{50>DV}$  et  $\mathbf{B}_{50}$  correspondent au même programme de réhabilitation, mais leurs performances sont évaluées pour l'un et l'autre des scénarios de remplacement des composants de réhabilitation, sur le cycle de vie.

Les solutions  $\mathbf{B}_{DV}$  et  $\mathbf{B}_{50>DV}$  sont présentées sur les Figure 126 à Figure 129, qui permettent de constater les importantes différences de performances, sur l'ensemble des critères considérés. En revanche, il apparaît que les performances des solutions  $\mathbf{B}_{50>DV}$  et  $\mathbf{B}_{50}$  sont relativement proches, sauf sur les critères économiques.

De plus, sur la Figure 130, les zones en couleur représentent, pour chacun des critères de décision, les années du cycle de vie pour lesquelles la solution  $\mathbf{B}_{50>DV}$  est meilleure que le programme de réhabilitation  $\mathbf{B}_{DV}$ , sur le critère considéré.

L'introduction du remplacement des composants, sur les 50 années de cycle de vie considérées, fait clairement apparaître des sauts, correspondant au remplacement des composants mis en œuvre en réhabilitation énergétique séquentielle. Ils sont particulièrement identifiables sur les performances cumulées en coût d'investissement et en coût global

De plus, on note pour la solution  $\mathbf{B}_{DV}$  un très léger changement de pente, à partir de l'année 24. Le chauffage de la solution  $\mathbf{B}_{DV}$  avait été remplacé avant la réduction complète des besoins de chauffage (avant le remplacement des fenêtres et du système de ventilation). Aussi, pour cette solution, le remplacement du système de chauffage conduit à la mise en œuvre d'un équipement de puissance nominale inférieure, entraînant une modification du rendement.

La croissance temporelle des impacts demeure malgré tout supérieure pour la solution  $\mathbf{B}_{DV}$  que pour le programme  $\mathbf{B}_{50>DV}$ , sur certains critères dont l'ensemble des impacts environnementaux. En effet, la performance énergétique en usage de  $\mathbf{B}_{DV}$  demeure inférieure à celle de  $\mathbf{B}_{50>DV}$  (ventilation hygro-B et fraction solaire inférieure pour la production d'ECS).

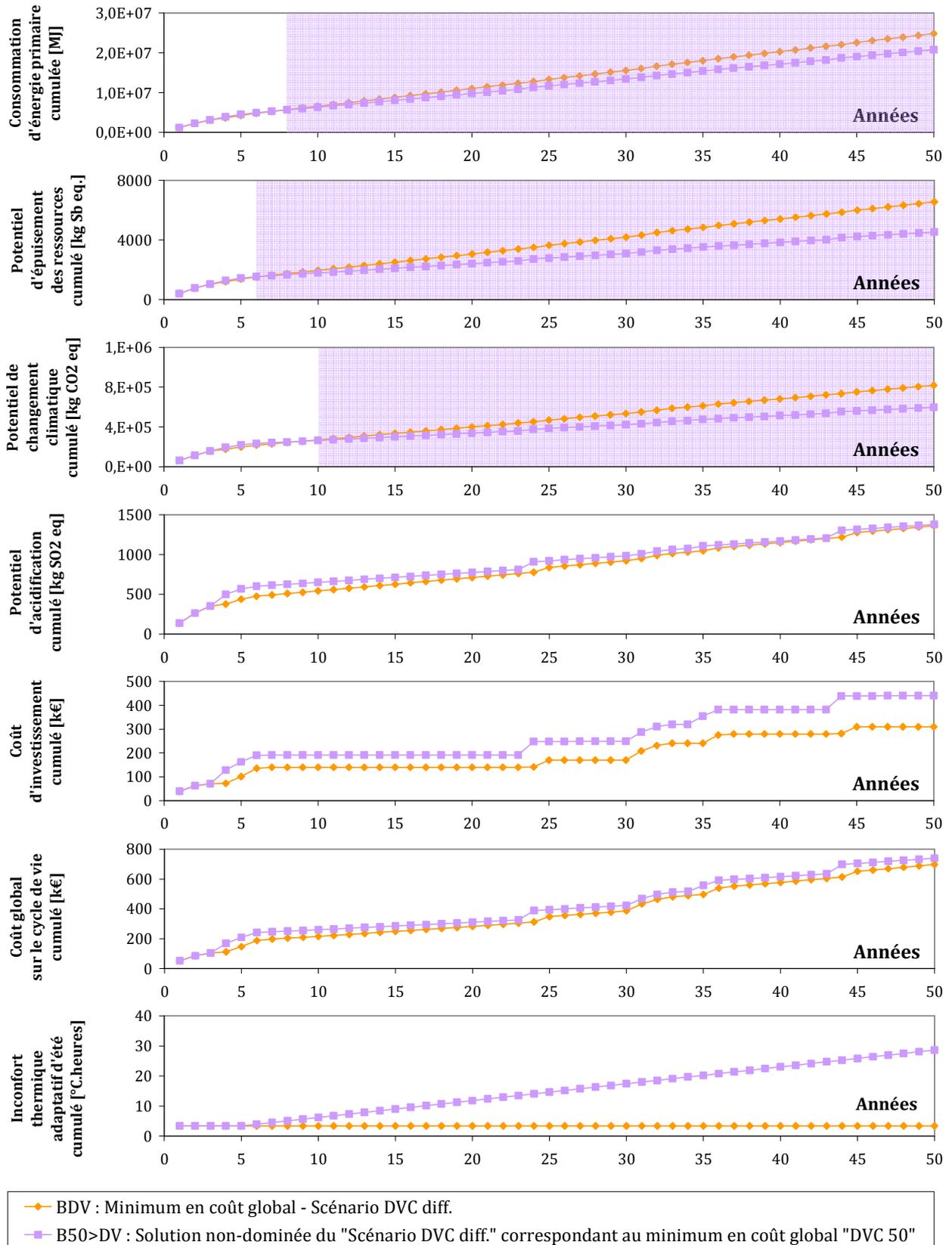
Globalement, on constate que ces deux solutions sont non-comparables, aucune ne domine l'autre sur l'ensemble des critères :

- La solution  $\mathbf{B}_{50>DV}$  est nettement dominée en termes de coût d'investissement, coût global, inconfort thermique adaptatif en été ;

- On note que les impacts initiaux de la solution  $\mathbf{B}_{50>DV}$ , supérieurs à ceux de  $\mathbf{B}_{DV}$ , en consommation cumulée d'énergie primaire, en potentiel d'épuisement des ressources abiotiques ou en potentiel de changement climatique en quelques années, sont compensés en 10 ans maximum ;
- Ils ne sont en revanche pas compensés pour le potentiel d'acidification, sur les 50 années du cycle de vie considéré ;

Ces deux dernières remarques sont liées à la part des impacts des matériaux (production et traitement en fin de vie) dans les impacts globaux sur le cycle de vie, pour chacun des critères. Les 3 premiers indicateurs ciblant l'énergie, les ressources et le changement climatique sont largement corrélés à la performance en usage, aussi la compensation des impacts matériaux additionnels entre  $\mathbf{B}_{50>DV}$  et  $\mathbf{B}_{DV}$  est rapide, comme le souligne la Figure 130. Réciproquement, elle est beaucoup plus lente pour le potentiel d'acidification.

Ainsi, le remplacement des composants de réhabilitation conduit à une augmentation significative de la part « matériaux » sur les performances de la solution  $\mathbf{B}_{50>DV}$  par rapport à  $\mathbf{B}_{DV}$ , ce qui la disqualifie sur les aspects économiques et sur certains critères environnementaux sur 50 ans.



**Figure 130. Comparaison des performances cumulées dans le temps de deux solutions efficaces du scénario « DVC diff. » :**  
 **$B_{DV}$  (optimum en coût global de DVC diff.),**  
 **$B_{50>DV}$  (programme de réhabilitation optimum en coût global du scénario DVC 50)**

### Solutions efficaces et variantes de réhabilitation

Enfin, pour éclairer la comparaison des solutions des deux fronts dans l'espace de décision, les figures suivantes représentent la répartition des variantes de réhabilitation sur les solutions efficaces obtenues pour l'un et l'autre des deux scénarios.

La Figure 131 illustre la répartition des variantes d'isolation thermique des façades sur les ensembles de solutions non-dominées identifiées. La répartition des variantes apparaît globalement similaire. Pour les deux scénarios, les solutions les plus efficaces en énergie mettent en œuvre une ITE de 200mm de laine minérale, soit le niveau d'isolation en façade le plus élevé sur l'espace de recherche étudié. Réciproquement les solutions les moins efficaces mettent en œuvre 100mm de laine minérale, dans les deux cas.

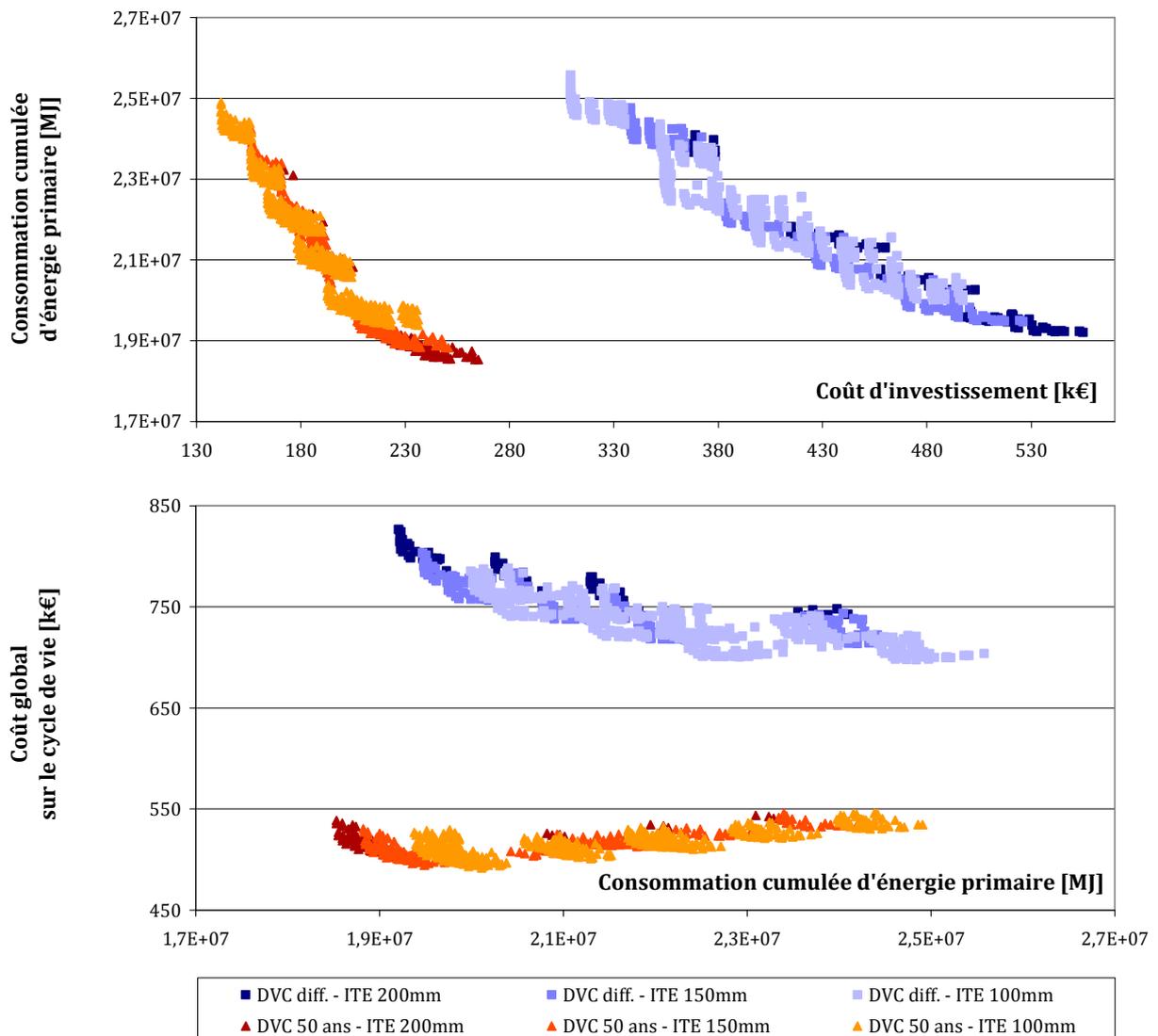
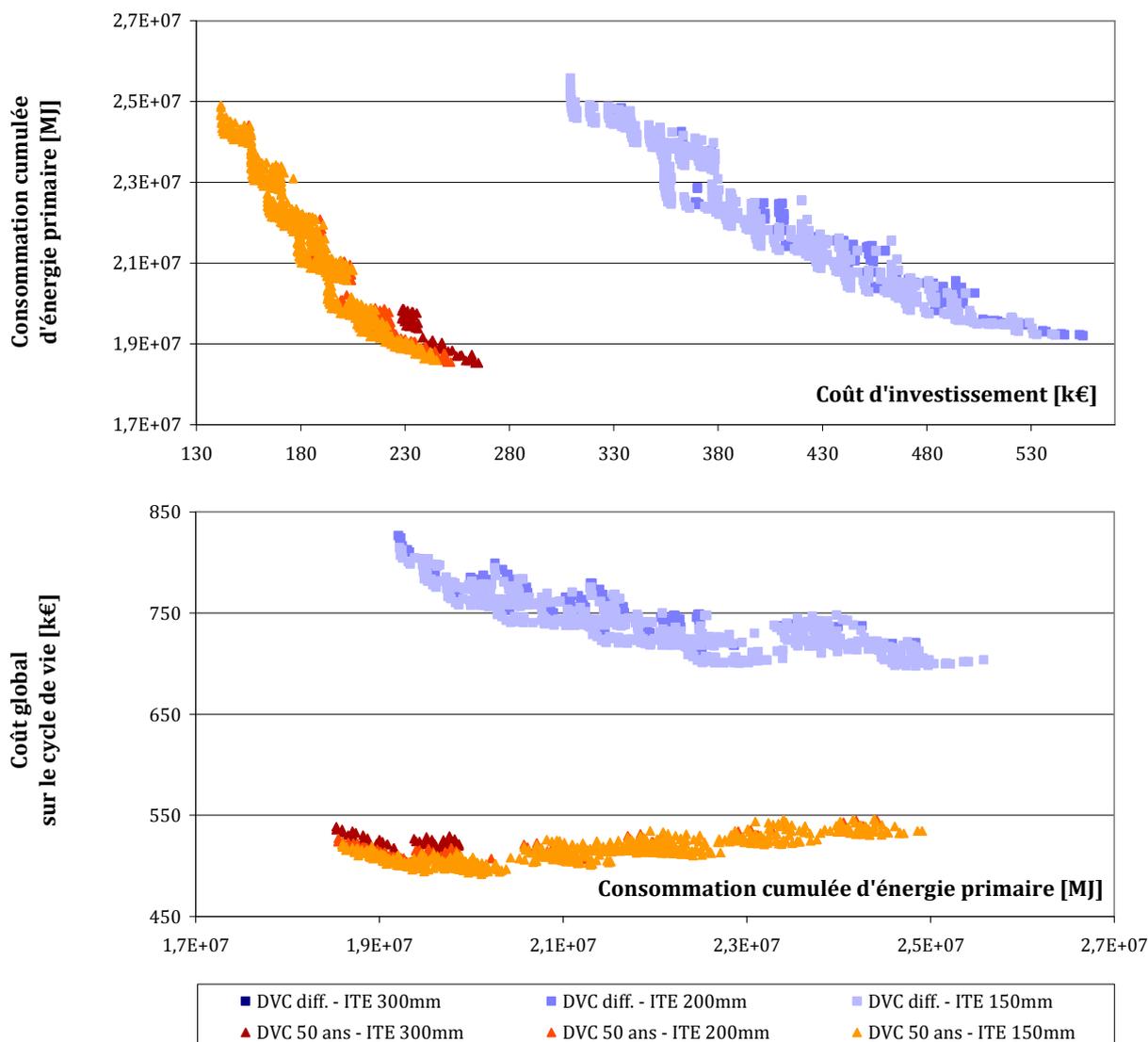


Figure 131. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les **FACADES**, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie.

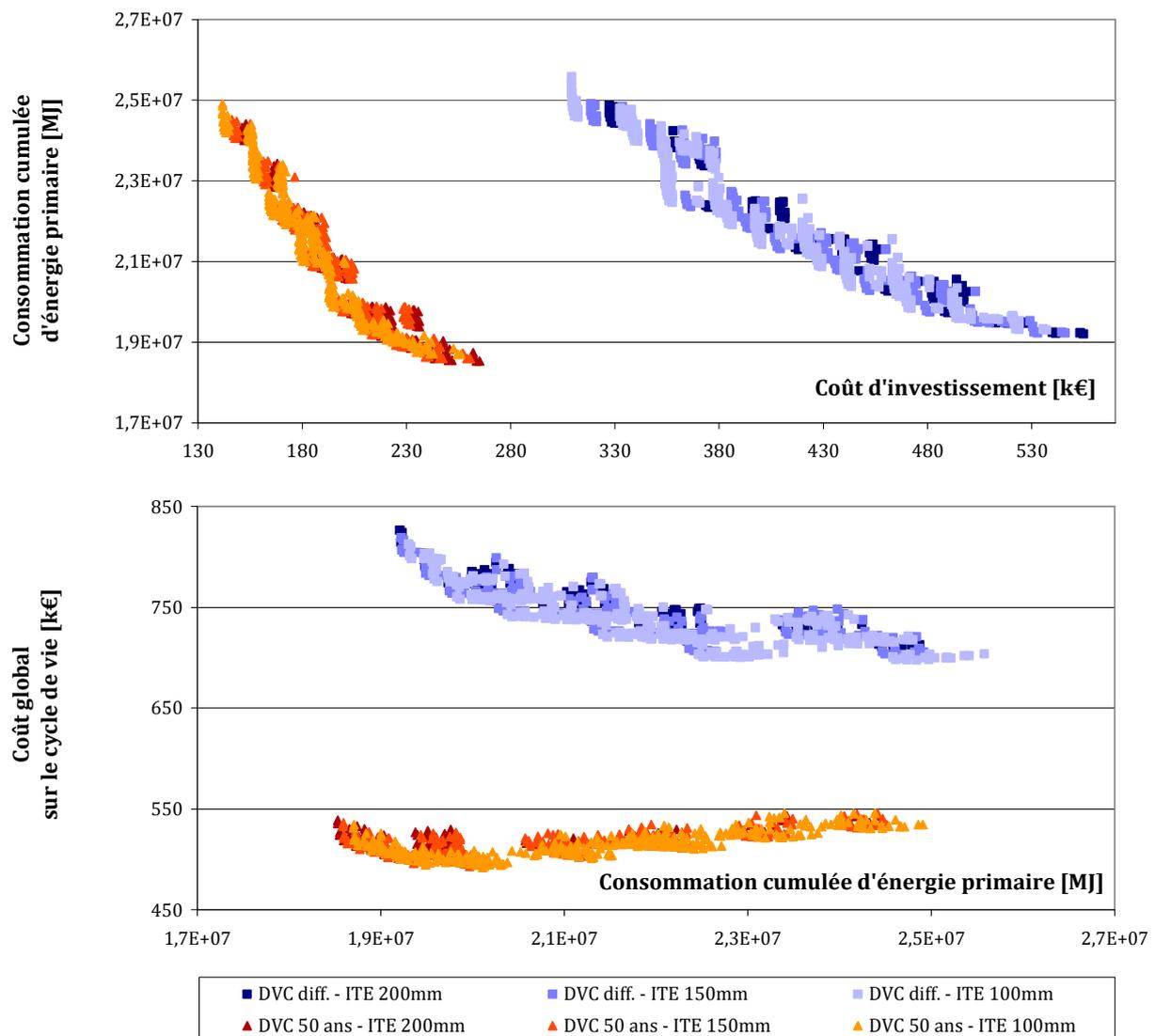


**Figure 132. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la TOITURE, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie.**

En ce qui concerne les variantes d'isolation de la toiture (Figure 132), il est particulièrement intéressant de remarquer que les solutions les plus efficaces en énergie du scénario « **DVC diff.** » ne mettent pas en œuvre le niveau maximum d'isolation, proposé sur l'espace de recherche étudié, contrairement au cas « **DVC 50 ans** ». Les solutions optimales en énergie du scénario conduisant au remplacement des composants définissent une épaisseur d'isolation polyuréthane de 200mm contre 30mm pour le cas où les composants ne sont pas remplacés.

Ainsi, les impacts en énergie primaire de la sur-isolation polyuréthane (300mm) ne sont pas compensés sur le cycle de vie étudié dans le cas du remplacement des composants.

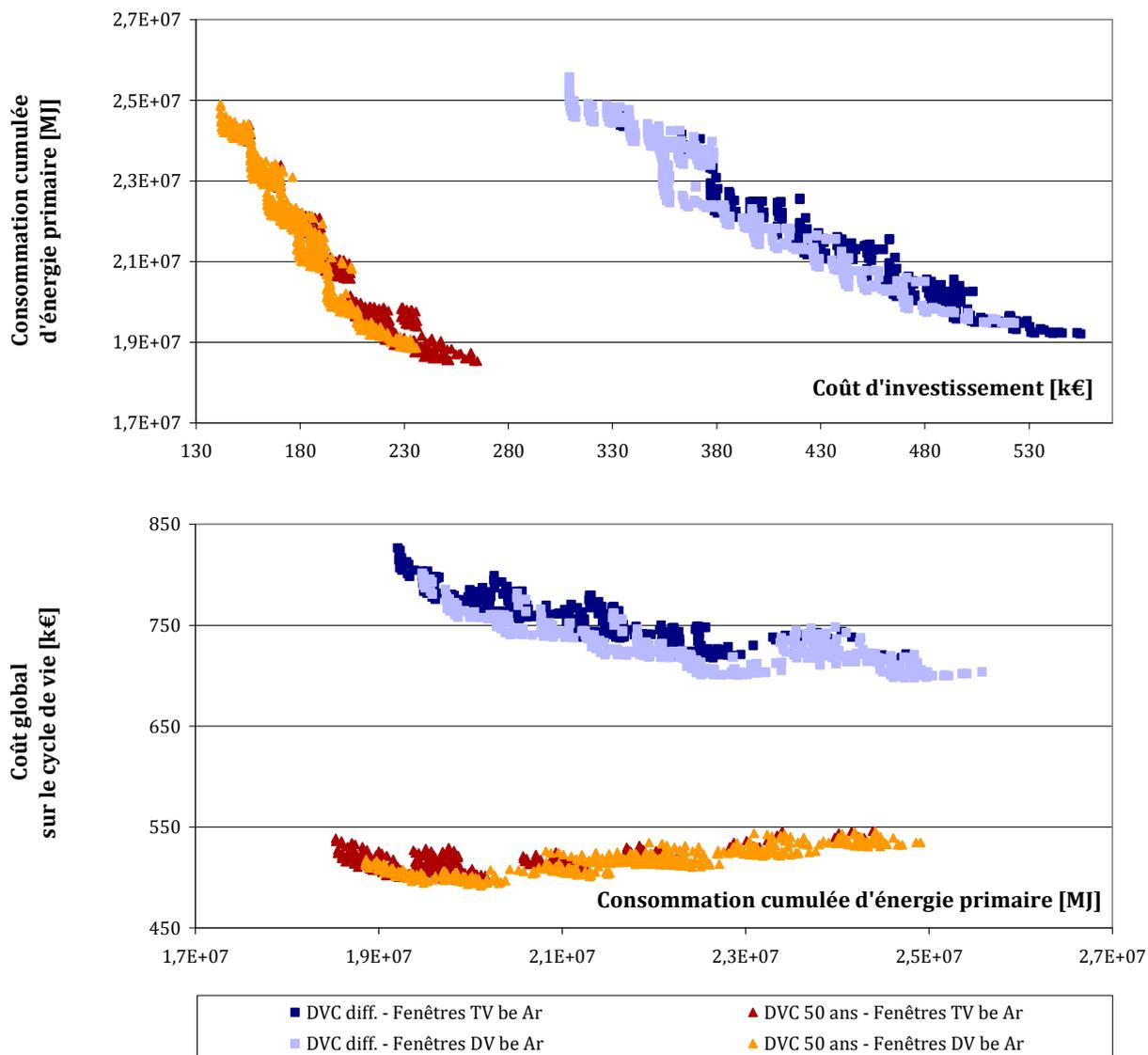
En dehors de cette remarque, les répartitions sont relativement similaires.



**Figure 133. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur le **PLANCHER BAS**, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie.**

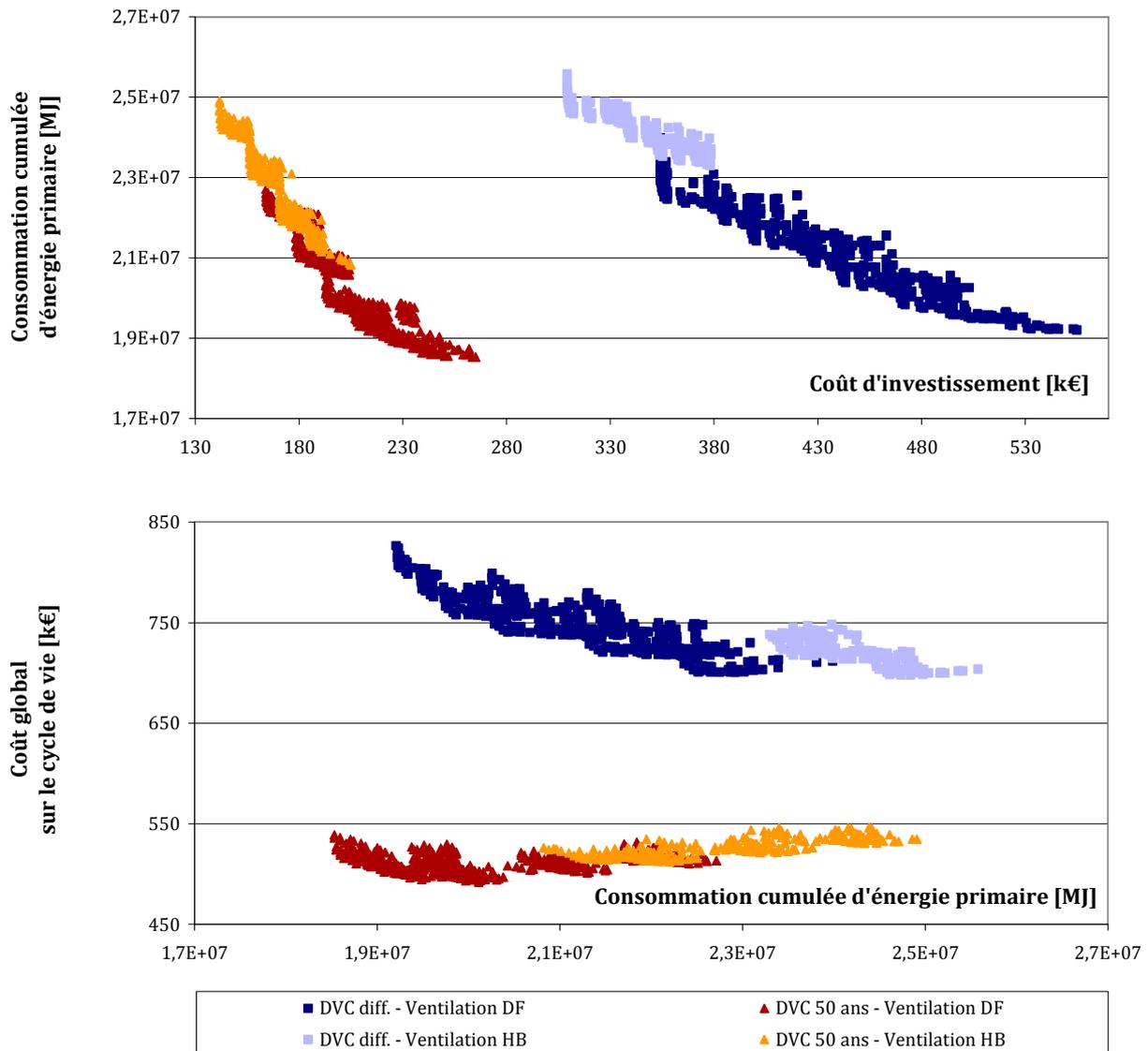
L'analyse de la Figure 133, sur les variantes de réhabilitation du plancher bas, révèle que la répartition de ces variantes sur les fronts de solutions semble peu sensible au scénario de maintenance adopté.

Dans les deux cas, on remarque que les 3 niveaux d'isolation sont présents au sein des solutions non-dominées. La combinaison des mesures de réhabilitation et leur phasage détermine alors davantage les performances du programme que le niveau d'isolation en plancher bas, sur l'espace de recherche considéré.



**Figure 134. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les OUVERTURES, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie.**

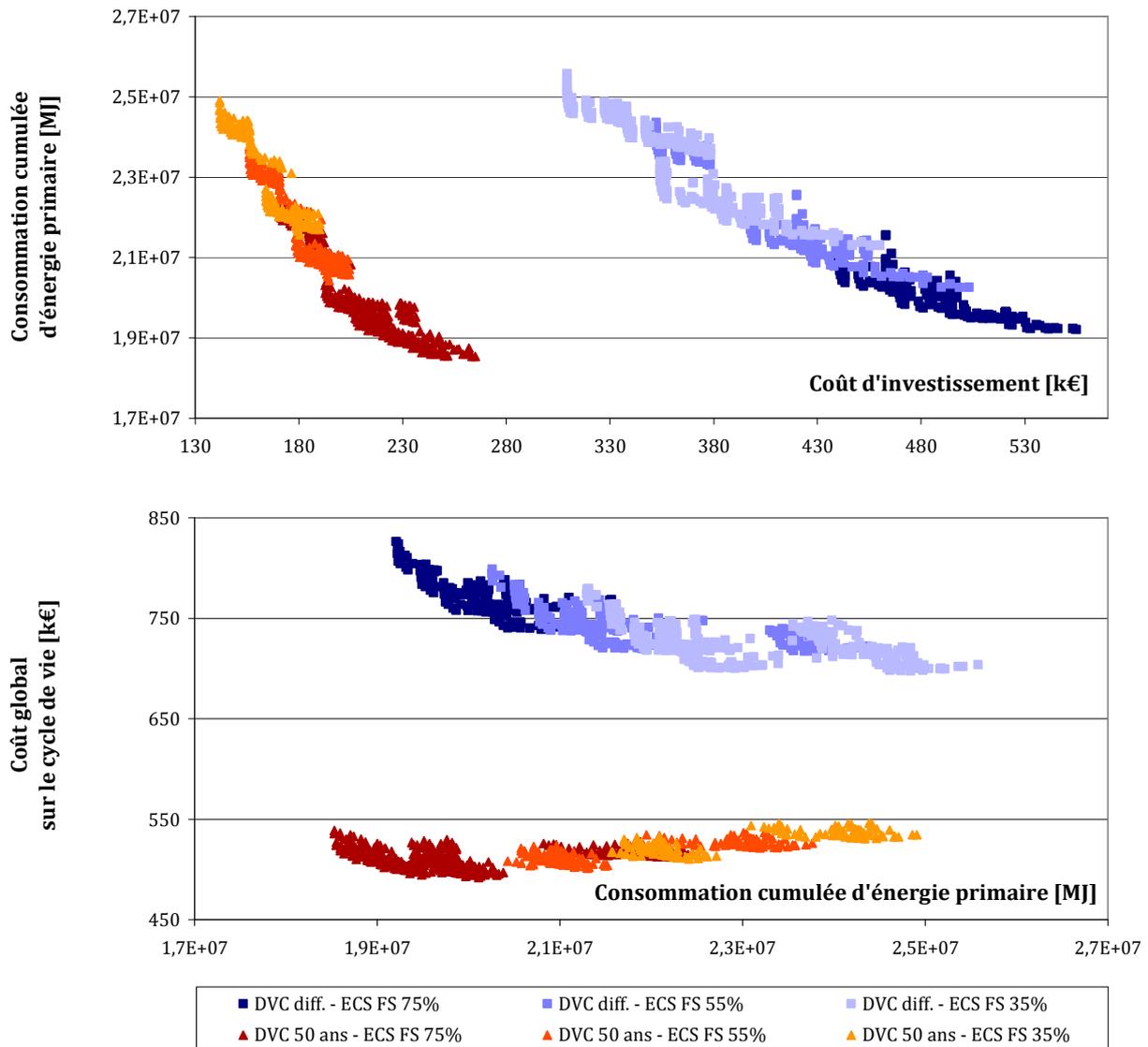
La répartition des fenêtres à double ou triple vitrages (Figure 134) est relativement similaire dans les deux scénarios de remplacement des composants étudiés. Les solutions les plus efficaces en énergie mettent systématiquement en œuvre le triple vitrage. En revanche, et quel que soit le scénario de maintenance, le double vitrage permet d'atteindre les performances optimales en termes de coût d'investissement et de coût global sur le cycle de vie.



**Figure 135. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la VENTILATION, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie.**

La Figure 135 représente la répartition des variantes de système de ventilation sur les solutions efficaces des deux fronts. Les solutions les plus efficaces en énergie mettent systématiquement en œuvre la ventilation double flux, quel que soit le scénario de maintenance. De même, la ventilation hygro-B est choisie pour minimiser les coûts d'investissement, indépendamment du scénario de maintenance et remplacement des équipements.

En revanche, alors que la ventilation double flux est systématiquement mise en œuvre par les solutions les plus efficaces en termes de coût global dans le scénario « **DVC 50 ans** », c'est la ventilation hygro-B qui permet d'atteindre le minimum en coût global en cas de remplacement des composants sur le cycle de vie. On remarque néanmoins que certaines solutions mobilisant le double flux atteignent des performances très proches (solution **B<sub>DV</sub>** étudiée précédemment).



**Figure 136. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la PRODUCTION D'ECS, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie.**

La répartition des variantes sur la production d'ECS, présentée sur la Figure 136, met en évidence que les fractions solaires les plus importantes (75%) ne sont envisageables que pour le groupe des solutions optimales en énergie, dans le cas du scénario « **DVC diff** ».

Au contraire, suivant le scénario « **DVC 50 ans** », des solutions aux performances intermédiaires en énergie sont obtenues avec 75% de production d'ECS d'origine solaire.

Il est enfin intéressant de remarquer que les solutions efficaces en coût global mettent en œuvre 35% d'ECS solaire dans le scénario « **DVC diff** », contre 75% dans le cas où les systèmes ont une durée de vie supérieure à 50 ans. Les impacts, sur tous les critères, liés à l'accroissement de la fraction solaire, ne sont pas compensés sur le cycle de vie, dans le cas d'un remplacement tous les 20 ans des composants.

## Conclusion sur la sensibilité à la durée de vie des composants

Cette étude de sensibilité tend à souligner que les performances des solutions efficaces ainsi que l'allure des compromis sont nettement influencés par le scénario de maintenance et les durées de vie associées aux composants de réhabilitation, en particulier sur les critères économiques. Les résultats révèlent que plus la durée de vie des composants est longue, plus la recherche de solutions optimales en coût global conduit à favoriser la performance énergétique en usage et globale sur le cycle de vie.

Par ailleurs, deux scénarios de maintenance ont été comparés. Ils peuvent être remis en cause. Le premier (« **DVC 50 ans** ») est certainement trop optimiste en considérant que la durée de vie des composants de réhabilitation est supérieure ou égale à 50 ans. Le second, imposant sur le remplacement cyclique des composants de réhabilitation suivant des durées de 20 à 30 ans, présente également quelques limites.

Les durées de vie des composants sont des paramètres incertains, difficiles à caractériser et dépendant assez largement de la mise en œuvre et de la maintenance. Il peut ainsi paraître assez conservateur de considérer que les fenêtres seront changées systématiquement tous les 30 ans, quels que soient les matériaux de menuiserie, les conditions climatiques auxquelles elles auront été soumises, l'entretien dont elles auront fait l'objet.

De plus, dans le scénario « **DVC diff.** », il serait intéressant de distinguer la part des impacts relevant de la maintenance traditionnelle de celle correspondant à une maintenance spécifique associée à la réhabilitation énergétique, additionnelle et différente suivant les programmes.

Enfin, le scénario « **DVC diff.** » conduit à remplacer à l'identique et cycliquement les composants de réhabilitation. Or étant donnée la période des cycles, de 20 à 30 ans, il est fort probable que l'état des technologies aura évolué. Dans ce cas, les composants en fin de vie ne seront vraisemblablement pas remplacés à l'identique mais plutôt par les composants et techniques alors disponibles. Cette hypothèse peut tendre à nettement réduire et modifier considérablement la déformation des compromis entre des deux scénarios, particulièrement si les composants de remplacement dépendent alors peu de la variante mise en œuvre initialement pour chaque mesure de réhabilitation. L'introduction de scénarios prospectifs sur l'évolution des technologies apporterait un éclairage très complémentaire.

## 3.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté une approche d'optimisation multicritère exacte, par programmation dynamique, pour la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants.

La représentation du problème sous la forme d'un graphe séquentiel – dont les états séquentiels représentent les combinaisons de mesures mises en œuvre précédemment et les décisions, les mesures de réhabilitation pouvant être choisies – a permis d'appliquer le théorème de Bellman à la recherche de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielles.

L'identification de solutions exactes présente différents avantages : la possibilité de qualifier les performances de méthodes d'optimisation approchées sur des cas d'études, celle de mener des études sur la sensibilité des solutions et de leurs performances à certains paramètres de modélisation.

Sur l'étude de cas de la barre Grimaud, fil rouge de cette thèse, la connaissance des solutions exactes a permis de souligner la qualité des solutions de l'approche génétique, de disqualifier les approches court-termistes comme l'algorithme glouton, de démontrer l'intérêt de la réhabilitation par rapport au scénario de l'inaction.

Les études de sensibilité se sont focalisées sur 3 paramètres de modélisation : les consignes de températures pour le chauffage, l'évolution des prix de l'énergie consommée en usage, les durées de vie des composants mis en œuvre en réhabilitation. Les stratégies intermédiaires, correspondant souvent aux solutions proches de l'optimum en coût global, démontrent alors une bonne robustesse aux variations mesurées du comportement des occupants. Les stratégies les moins efficaces en énergie sont très sensibles à l'évolution des prix de l'énergie consommée en usage, ce qui peut dégrader considérablement leur performance en coût global sur le cycle de vie. L'établissement de scénarios de maintenance est une problématique complexe, les choix effectués sont cependant de nature à modifier sensiblement les solutions identifiées. La recherche de solutions optimisant le bilan environnemental et le coût global encourage à progresser en termes de durées de vie, par rapport aux niveaux de 20 à 30 ans souvent considérés.

L'application de la programmation dynamique a ainsi permis de progresser tant sur la qualification de méthodes d'optimisation approchées que sur la compréhension de certains équilibres sur les solutions efficaces. Cependant, la recherche de solutions exactes s'effectue au détriment des temps de calcul ; chacune des optimisations menées par programmation dynamique, sur l'espace de recherche 2, réclame plusieurs jours sur un ordinateur de bureau en configuration courante actuelle. Aussi, dans la perspective de mener des études sur des espaces de recherches larges, ou à l'échelle d'un parc de bâtiments, l'approche génétique semble plus adaptée.

Enfin, les développements précédents se sont intéressés uniquement à l'optimisation des programmes sans contraintes. Or, dans la réalité, les projets de réhabilitation sont généralement soumis à des capacités de financement, échelonnées dans le temps. Aussi l'optimisation sous contrainte est-elle envisagée dans le chapitre suivant.



## Chapitre 4

# Réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments, sous contraintes de financement

---

*Ce chapitre se concentre sur l'introduction de contraintes, liées au financement séquentiel des opérations de réhabilitation, dans les méthodes d'optimisation multicritère étudiées pour la recherche de stratégies de réhabilitation efficaces.*

*A partir de l'écriture formelle d'un problème d'optimisation multicritère sous contraintes, ce chapitre commence par présenter un état de l'art sur la prise en compte des contraintes faibles dans les algorithmes génétiques.*

*Une approche est ensuite proposée pour la réhabilitation énergétique séquentielle, puis utilisée sur l'étude de cas de la barre Grimaud.*

---

## Plan du chapitre 4

4.1	Introduction	249
4.2	Problème d'optimisation multicritère sous contraintes	249
4.3	Etat de l'art de l'optimisation génétique sous contraintes	251
4.3.1	Peine de mort	251
4.3.2	Fonctions de pénalités	252
4.3.3	Séparation des objectifs et des contraintes	256
4.3.4	Traitement des solutions non-admissibles	258
4.3.5	Conclusion sur l'état de l'art	260
4.4	Application à la réhabilitation énergétique	261
4.4.1	Différences avec l'algorithme sans contraintes	261
4.4.2	Sélection pour la reproduction	262
4.4.3	Opérateurs de variation et génération des enfants	262
4.4.4	Sélection pour le remplacement	264
4.4.5	Conclusion	266
4.5	Etude de cas	266
4.5.1	Surface de compromis sous contraintes de financement	267
4.5.2	Progression des fronts admissible et non-admissible	269
4.5.3	Analyse de solutions particulières	272
4.5.4	Analyse des solutions efficaces admissibles	276
4.6	Conclusion	286
4.7	Perspectives	287

## 4.1 Introduction

Les développements des chapitres précédents ont permis de présenter différentes approches d'optimisation multicritère, pour l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants. Les programmes de réhabilitation sont ici définis comme des séquences dans le temps de mesures élémentaires.

Dans les Chapitre 2 et Chapitre 3, aucune contrainte, qu'elle soit globale ou portant sur chacune des phases de réhabilitation, n'a été imposée sur les performances des programmes de réhabilitation. Il s'agissait purement d'optimiser le bilan environnemental, les indicateurs économiques et le niveau de confort thermique, sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment existant à réhabiliter.

Cette absence de contraintes dans l'espace des objectifs a d'ailleurs obligé à fixer un nombre maximum de mesures pouvant être mises en œuvre à chaque phase de réhabilitation, pour imposer la planification dans le temps des actions. Dans le cas contraire, la recherche de solutions optimales se réduit immédiatement à mettre en œuvre toutes les mesures lors de la première phase de réhabilitation. Ainsi, à chaque phase de réhabilitation, une unique mesure était mise en œuvre, dans les développements précédents. L'écart entre deux phases consécutives avait été arbitrairement fixé à une année, il peut être modifié si besoin.

Cependant la réalité opérationnelle des projets de réhabilitation est souvent différente. La planification des interventions doit en effet satisfaire aux capacités de financement des investisseurs, limitées et éventuellement échelonnées dans le temps. Différents échanges avec un bailleur social, dans le cadre du projet CIBLE de la Fondation Bâtiment Energie, a clairement mis en évidence que les interventions de modernisation portant sur un ou plusieurs bâtiments sont programmées, dans la pratique, suivant un calendrier de financement pluriannuel.

Aussi, au sein de ce chapitre, nous nous proposons donc d'introduire dans la recherche de stratégies de réhabilitation efficaces des contraintes de financement, sur chacune des phases des programmes de réhabilitation à optimiser. A partir de l'écriture formelle d'un problème d'optimisation multicritère sous contraintes, ce chapitre permet de présenter un état de l'art sur la prise en compte des contraintes faibles dans les algorithmes génétiques. Une approche est ensuite développée pour la réhabilitation énergétique séquentielle, puis utilisée sur l'étude de cas de la barre Grimaud.

## 4.2 Problème d'optimisation multicritère sous contraintes

Comme l'a rappelé le Chapitre 1, les problèmes d'optimisation monocritère ou multicritère peuvent faire intervenir une ou plusieurs contraintes, sur l'espace de recherche ou sur celui des objectifs. Dans ce cas, les solutions potentielles du problème doivent vérifier l'ensemble des contraintes posées, pour être admissibles.

## Formalisme général

Le problème de réhabilitation énergétique des bâtiments existants, tel qu'il est étudié dans ces travaux, est un cas d'optimisation multicritère.

En complétant le formalisme présenté au Chapitre 1, l'écriture générale du problème d'optimisation multicritère sous contraintes devient ainsi :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{min/max} \quad f_m(x) \quad \text{avec} \quad m \in [1..M] \\ \text{sous} \quad \left\{ \begin{array}{l} g_j(x) \leq 0 \quad \text{avec} \quad j \in [1..J] \\ h_k(x) = 0 \quad \text{avec} \quad k \in [1..K] \\ x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad \text{avec} \quad i \in [1..N] \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Dans ce système d'équation, la solution  $x$  est un vecteur à  $N$  variables. Chacune des composantes de ce vecteur représente l'un des paramètres du problème. L'espace de décision est ainsi défini par l'ensemble des solutions satisfaisant aux  $2N$  seuils :  $x_i^L$  et  $x_i^U$ .

Les fonctions  $f_m$  sont les  $M$  objectifs sur lesquels sont évaluées les performances des solutions.

Les solutions de l'espace de décision doivent également vérifier les  $J$  contraintes d'inégalité et  $K$  contraintes d'égalité pour être considérées admissibles.

## Contraintes faibles et contraintes fortes

Les contraintes d'inégalité sont appelées contraintes faibles, par opposition aux contraintes d'égalité dites fortes, généralement plus difficiles à respecter. En pratique, on transforme souvent les contraintes fortes en un couple de contraintes faibles, ce qui simplifie la recherche de solutions. En appliquant une telle transformation, le problème d'optimisation tel que formalisé ci-dessus est converti en un problème à  $J+2K$  contraintes d'inégalité.

Dans le cas de la réhabilitation énergétique séquentielle, on considère que les contraintes budgétaires imposées à chaque phase de réhabilitation sont des contraintes d'inégalité ; les investissements à chaque phase devant être inférieurs ou égaux aux capacités financières disponibles. Nous n'introduisons ici aucune contrainte d'égalité dans le problème de réhabilitation énergétique. Des développements suivants s'intéressent donc principalement aux contraintes faibles.

## Fonctions de violation des contraintes

En optimisation multicritère sous contraintes, une fonction dite de « violation des contraintes » est souvent introduite pour caractériser l'admissibilité d'une solution  $x$  donnée. Une telle fonction peut prendre la forme ci-dessous :

$$\Omega(x) = \sum_{j=1}^J 1(w_j(x) > 0)$$

Avec

$$\forall j \in [1..J], w_j(x) = \begin{cases} g_j(x) & \text{si } g_j(x) > 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

La fonction  $\Omega$  construite à partir d'une fonction indicatrice (égale à 1 si la contrainte  $j$  est violée, nulle sinon) permet de déterminer le nombre de contraintes faibles violées par une solution  $x$  donnée. Par définition, si la valeur prise par  $\Omega(x)$  est nulle, la solution  $x$  respecte toutes les contraintes d'inégalité du problème ; elle est donc admissible. Dans le cas contraire, le nombre de contraintes non-respectées par la solution  $x$  peut ensuite être exploité pour comparer les solutions non-admissibles entre elles.

### Optimisation sous contraintes pour la réhabilitation énergétique séquentielle

A partir de la nature du problème d'optimisation (multicritère, combinatoire à variables discrètes, fonctions objectifs implicites), deux approches d'optimisation multicritère ont été identifiées et étudiées dans les chapitres précédents : les algorithmes génétiques et la programmation dynamique. Nous nous intéressons ici uniquement à ces deux méthodes.

L'intégration des contraintes de financement en programmation dynamique est parfaitement réalisable. Le graphe séquentiel associé au problème doit cependant être adapté par rapport au cas sans contraintes. A chaque phase de décision, les décisions potentielles correspondent alors à l'ensemble des combinaisons de mesures élémentaires, telles que la somme des coûts d'investissement soit inférieure ou égale à la capacité budgétaire. Les états sont définis par la combinaison des mesures mises en œuvre au cours des phases de décision précédentes.

Cependant, l'approche exacte par programmation dynamique est intrinsèquement limitée par les temps de calcul prohibitifs, relatifs à l'évaluation de l'ensemble des chemins partiels potentiels, dans le cas des espaces de recherche à large cardinalité.

Par conséquent, nous faisons le choix de nous concentrer ici sur l'intégration des contraintes faibles, au sein des algorithmes génétiques. La sous-partie suivante présente un état de l'art des techniques d'introduction des contraintes en optimisation génétique multicritère.

## 4.3 Etat de l'art de l'optimisation génétique sous contraintes

L'introduction et la gestion des contraintes dans les algorithmes génétiques a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. L'état de l'art en la matière, présenté ci-après, est une synthèse exposant les principales techniques existantes. Cette synthèse ne prétend pas à l'exhaustivité, elle est pour partie issue d'une large revue bibliographique proposée par Coello Coello (2001). Les différentes méthodes peuvent être regroupées par grandes familles, suivant les principes généraux sur lesquels elles reposent. Peine de mort, fonctions de pénalité, séparation des objectifs et des contraintes, traitement des solutions non-admissibles structurent ainsi les principales approches de la littérature, détaillées ci-après.

### 4.3.1 Peine de mort

La peine de mort est certainement la méthode la plus simple à implémenter et, à ce titre, elle demeure largement utilisée. Son principe consiste à rejeter systématiquement les solutions non-admissibles identifiées (Back et al., 1991).

En optimisation génétique, l'évolution de la population repose sur l'application d'opérateurs de reproduction et sur la sélection des meilleurs individus pour le remplacement générationnel. L'introduction de la peine de mort consiste alors, après l'application des opérateurs de croisements et mutations, à vérifier que les enfants générés sont admissibles. Si tel est le cas, ils sont conservés. Sinon, les génomes des parents sont croisés et mutés jusqu'à l'obtention d'individus admissibles. Numériquement, le nombre de tentatives est évidemment contrôlé.

La peine de mort donne des résultats intéressants dans le cas des problèmes sous contraintes dont l'espace des solutions admissibles est convexe et représente une large proportion de l'espace de recherche (Coello Coello, 2002).

Cependant, cette stratégie de gestion intuitive présente un inconvénient majeur : elle n'exploite absolument pas l'information génétique des solutions non-admissibles. L'élimination automatique de ces solutions peut alors être contreproductive. En effet, certaines présentent potentiellement des performances meilleures que celles de la population courante, ou peuvent se situer à proximité de la frontière de l'espace admissible. Leur conservation dans la population courante peut alors contribuer à faire tendre l'optimisation plus rapidement vers le front global exact, ou à s'échapper de régions sous-optimales. Cependant, leur nombre doit être contrôlé, l'objectif principal étant bien entendu d'identifier des solutions admissibles.

Aussi, on distingue deux approches de peine de mort.

Présentée ci-dessus, la peine de mort forte se résume à éliminer systématiquement tous les individus non-admissibles de la population courante.

Au contraire, la peine de mort dite affaiblie vise à conserver une proportion contrôlée de solutions non-admissibles au sein de la population. On définit dans ce second cas un coefficient  $P$ , qui représente le pourcentage d'individus non-admissibles qui peuvent être conservés dans la population. Ce coefficient peut être constant ou varier au cours des générations suivant une loi d'évolution (généralement décroissante).

En termes de loi d'évolution, on peut par exemple choisir d'autoriser une proportion de 40% d'individus non-admissibles dans la population initiale, puis diviser ensuite ce pourcentage par deux toutes les 5 générations, construisant ainsi une suite géométrique de raison  $1/2$ . Lorsque le paramètre  $P$  devient inférieur à 2%, les solutions non-admissibles peuvent être systématiquement exclues de la population (par exemple). Les lois d'évolution sont nombreuses et dépendent du problème d'optimisation considéré.

Le réglage de ce paramètre ou de la loi d'évolution associée devrait théoriquement procéder d'études de sensibilité mais demeure bien souvent empirique.

### 4.3.2 Fonctions de pénalités

Une deuxième approche, ancienne et très courante pour les algorithmes évolutionnaires (Courant, 1943), repose sur l'introduction de fonctions de pénalités dans l'évaluation des performances des individus ne respectant pas les contraintes. Le problème d'optimisation sous contrainte est alors transformé en une optimisation sans contrainte, sur laquelle s'appliquent les algorithmes génétiques présentés au Chapitre 2. L'approche par fonctions de pénalités conduit généralement à transformer le problème multicritère en une optimisation monocritère, sa mise en œuvre peut être plus ou moins complexe suivant le problème.

Dans la pratique, la pénalisation en optimisation génétique est souvent introduite suivant la procédure détaillée ci-après.

Les valeurs des contraintes sont déterminées pour l'ensemble des solutions de la population.

Ensuite, ces valeurs de contraintes sont normalisées, soit par rapport à la plus mauvaise solution non-admissible de la population courante, soit par rapport à celle de la population initiale. En monocritère la plus mauvaise solution non-admissible est directement identifiée comme la moins optimale sur l'objectif considéré. En multicritère, elle est représentée au point Nadir, défini au Chapitre 1.

Les valeurs prises par une solution  $x$  sur les contraintes normalisées sont notées  $w_j^*(x)$ . Elles sont évidemment nulles si la solution est admissible.

Les approches de la littérature transforment alors le problème multicritère sous contraintes en une optimisation monocritère sans contraintes par une fonction d'agrégation notée  $F$ , dont la valeur dépend du respect des contraintes. Cette fonction prend généralement la forme suivante :

$$F = \sum_{m=1}^M f_m + G\left(\sum_{j=1}^J R_j (w_j^*)^2\right)$$

$R_j$  représente un coefficient de pénalité.

$G$  est une fonction d'agrégation des contraintes qui peut varier suivant le problème étudié. Elle peut prendre diverses formes, comme le soulignent ces quelques exemples de la littérature sur l'expression de la fonction  $F$ :

$$F = \sum_{m=1}^M f_m + \sum_{j=1}^J R_j (w_j^*)^2$$

$$F = \sum_{m=1}^M f_m + \sqrt{\sum_{j=1}^J R_j (w_j^*)^2}$$

Le coefficient de pénalité  $R_j$  permet aussi d'intégrer un facteur d'échelle, et ainsi d'assurer que les valeurs prises par les fonctions objectifs et les fonctions de violation de contrainte aient le même ordre de grandeur, dans le cas où la normalisation n'a pas été appliquée.

Les fonctions de pénalités conduisent à dégrader les performances des seuls individus non-admissibles. Leur forme et leurs valeurs doivent être judicieusement choisies.

Si la pénalisation est trop forte, l'algorithme risque l'éliminer prématurément des individus non-admissibles et par conséquent de stagner dans des zones sous-optimales de l'espace des objectifs. Si l'espace de recherche est caractérisé par un ensemble de régions admissibles disjointes, une pénalisation trop forte complique également la transition d'une région vers une autre.

Au contraire, si la pénalisation demeure trop faible, les solutions non-admissibles sont potentiellement conservées en large proportion d'une génération sur l'autre, le temps de calcul est alors largement employé à l'exploration de la région non-admissible.

Par ailleurs, les coefficients  $R_j$  doivent idéalement conduire à privilégier les solutions non-admissibles proches de la frontière de l'espace admissible des objectifs.

Il existe deux grandes approches de modélisation des coefficients de pénalité. Dans le cas de la pénalité statique, le vecteur  $R = (R_j)_{j=1..J}$  est constant au cours des itérations générationnelles de l'algorithme génétique. La version dynamique de la pénalisation vise à faire varier les coeffi-

cients de pénalité au cours de l'optimisation. Pénalité statique et dynamique sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

#### 4.3.2.1 Pénalité statique

En première approche, le vecteur  $R$  des coefficients de pénalités peut être choisi constant, indépendant de la génération à laquelle appartient la population courante. La pénalisation est alors dite statique. Un modèle avec différents niveaux de coefficients de pénalité peut être introduit, en fonction du degré de violation des contraintes (Homaifar et al., 1994).

Suivant la modélisation choisie, l'approche par pénalité statique permet à l'utilisateur de limiter le nombre de paramètres introduits, ce qui simplifie théoriquement leur réglage souvent empirique. Cependant, il demeure difficile d'appréhender l'influence des coefficients de pénalité sur la recherche. De plus, l'aspect statique impose par définition un niveau de pénalisation constant sur les générations, que l'optimisation s'apparente à une recherche globale (premières générations) ou à une forme d'intensification autour des solutions efficaces identifiées. La pénalité dynamique, précisée ci-après, répond évidemment à cet enjeu.

#### 4.3.2.2 Pénalité dynamique

La pénalité dynamique recouvre elle-même différentes méthodes, la modélisation associée étant plus ou moins complexe. On distingue ainsi la pénalité dynamique classique, en fonction du temps, adaptative ou co-évolutionnaire dont les principes sont présentés ci-après.

##### Pénalité dynamique classique

Suivant l'approche dynamique classique, les coefficients de pénalité sont évalués en fonction du numéro de la génération courante. En général, les valeurs de ces coefficients sont croissantes avec les générations. La loi d'évolution choisie et son réglage influencent alors grandement la progression des solutions courantes vers le front admissible exact.

De nombreuses lois d'évolution des coefficients de pénalités ont été proposées. Par exemple, Kazarlis et Petridis (1997) ont conduit une étude détaillée du comportement d'une fonction de pénalité dynamique, sous la forme :

$$F(x) = f\left(f_m(x)_{m=1..M}\right) + V(g) \times \left( A \cdot \sum_{j=1}^J 1(w_j(x) > 0) \cdot \omega_j \cdot \Phi(w_j(x)) + B \right) \times \delta_x$$

Avec :

- $A$  : Facteur de sévérité ;
- $1$  : Fonction indicatrice (nulle si la condition n'est pas vérifiée, égale à 1 sinon) ;
- $w_j(x)$  : Valeur de la contrainte  $j$ , en cas de violation de contrainte ;
- $\omega_j$  : Facteur de pondération de la contrainte  $j$  ;
- $\Phi$  : Fonction de la violation de contrainte  $j$  ;
- $B$  : Facteur de seuil de pénalité ;
- $\delta_x$  : Facteur binaire (nul si  $x$  est admissible, égal à 1 sinon).

Dans l'expression précédente, la loi d'évolution dynamique est représentée par la fonction  $V$ , dépendant du numéro de la génération courante  $g$  et du nombre maximum de génération  $G$  considéré pour l'évolution de la population initiale. L'expression suivante établit une relation entre ces différents paramètres, décrivant une loi d'évolution possible :

$$V(g) = \left(\frac{g}{G}\right)^2$$

Si certains chercheurs ont avancé que l'approche dynamique offre de meilleurs résultats que la pénalité statique, elle impose cependant le réglage de davantage de paramètres. En pratique, il demeure difficile de calibrer les fonctions dynamiques de pénalité, comme il est complexe de régler les facteurs de pénalités statiques (Siedlecki et Sklanski, 1989).

### **Pénalité en fonction du temps**

La pénalité dynamique en fonction du temps est une variante de la précédente consistant à faire évoluer les coefficients de pénalité, à partir d'un nombre de générations ou d'un temps de calcul en optimisation, donnés. Dans cette approche, les coefficients  $\omega_j$  de pondération des contraintes peuvent également dépendre du temps. Des méthodes de pénalité en fonction du temps ont été dérivées des principes du recuit simulé (Michaelwicz et Attia, 1994). La principale limitation demeure le réglage des différents paramètres, qui se trouvent plus nombreux encore que dans la version dynamique classique.

### **Pénalité adaptative**

L'idée majeure de la pénalité adaptative est de capitaliser sur les résultats des générations précédentes pour calibrer les coefficients de pénalité sur la génération courante, comme le proposent Hadj-Alouane et Bean (1997).

Ainsi, les coefficients de pénalité peuvent être relaxés à la génération suivante si les solutions efficaces sont majoritairement admissibles, ou renforcés dans le cas contraire. Ainsi, la proportion d'individus non-admissibles peut être indirectement régulée, préservant une information génétique propre à faire tendre la population vers la frontière d'admissibilité.

Ce type de méthode présente l'avantage de favoriser l'exploration contrôlée de l'espace de recherche. Cependant, le réglage de l'évolution des coefficients de pénalité demeure largement empirique ou dépendante du problème considéré.

Coit et Smith (1996) ont comparé une méthode de pénalité adaptative à la peine de mort forte. Leurs résultats ont souligné l'amélioration tant des performances des individus obtenus que de la vitesse avec laquelle ceux-ci ont été identifiés, par rapport à l'approche par peine de mort.

### **Pénalité co-évolutionnaire**

La pénalité co-évolutionnaire repose également sur une évolution dynamique de la fonction de pénalité, cependant l'information conditionnant cette évolution est issue du traitement en parallèle de deux populations courantes et distinctes d'individus (Coello Coello, 2000).

La première population courante est celle qui sert à générer les résultats. La seconde est une auxiliaire dont l'évolution sur les générations ne vise qu'à déterminer l'évolution des coefficients de pénalité. Cette approche ne doit pas être confondue avec les algorithmes génétiques multi-populations ; il n'y a ici aucun échange d'individus entre les deux populations.

Coello (2002) propose la fonction de pénalité co-évolutionnaire suivante :

$$F(x) = f\left(f_m(x)_{m=1..M}\right) + \omega_1 \times \sum_{j=1}^J w_j^*(x) + \omega_2 \cdot \Omega(x)$$

Cette fonction prend en compte le nombre de contraintes violées  $\Omega(x)$  par la solution  $x$  ainsi que le degré de violation  $w_j^*(x)$  de ces contraintes par la solution. Les coefficients  $\omega_1$  et  $\omega_2$  sont fonction de l'évolution de la deuxième population d'individus.

La pénalité adaptative introduit des paramètres de modélisation additionnels par rapport aux autres méthodes, ce qui complexifie bien entendu le réglage de la fonction de pénalité. Cependant, elle donne une latitude supplémentaire par le choix d'évolution de la première population en fonction de la seconde. La forme de la fonction de pénalité permet de privilégier les individus les plus performants sur les fonctions objectifs, ou ceux qui dégradent le moins en moyenne les niveaux de contraintes, ou ceux qui au contraire dégradent le moins de contraintes.

### 4.3.2.3 Conclusion sur les méthodes par fonctions de pénalité

Les méthodes utilisant les fonctions de pénalité sont adaptables à la plupart des algorithmes génétiques et donnent des résultats de bonne qualité comme le soulignent les travaux de Vincenti et al. (2010). Néanmoins, elles nécessitent le réglage de différents paramètres, souvent laborieux et empirique. L'influence de ces paramètres sur la recherche de solutions admissibles est par ailleurs difficile à appréhender.

## 4.3.3 Séparation des objectifs et des contraintes

Certains algorithmes proposent une approche différente, reposant sur la séparation du traitement des objectifs et des contraintes. Cette section présente certaines des méthodes proposées.

### 4.3.3.1 La co-évolution

La technique de co-évolution, proposée par Paredis (1994), repose également sur l'utilisation simultanée de deux populations. La première contient l'ensemble des solutions de l'espace de recherche, admissibles ou non-admissibles. Les individus de la seconde population représentent les contraintes à satisfaire, leur performance correspond alors au nombre de solutions (de la première population) ne respectant pas la contrainte associée à l'individu.

La principale idée de l'approche tient alors à identifier les contraintes particulièrement difficiles à satisfaire et à exploiter cette information pour orienter le processus de recherche évolutionnaire. Couplée à une méthode de pénalisation, les coefficients de pénalité des contraintes les plus difficiles à satisfaire peuvent par exemple être relaxés pour permettre à la recherche d'explorer de nouvelles zones de l'espace de recherche.

La co-évolution est une approche relativement similaire à la pénalité co-évolutionnaire. Elle en diffère principalement par la nature de la seconde population. Si Paredis (1994) a communiqué des résultats très encourageants, la méthode présente cependant quelques limites, par exemple dans le cas où les contraintes sont aussi difficiles à satisfaire les unes que les autres. L'efficacité de l'approche sur les problèmes combinatoires, en général, reste à démontrer.

#### 4.3.3.2 La méthode du tournoi sous contraintes

Le tournoi sous contraintes introduit des règles de décision dans le cas des comparaisons par paires de solutions, pour les problèmes multicritères sous contraintes. Dans le cas sans contraintes, le rang de dominance et la distance de crowding peuvent être utilisés, par exemple, pour départager deux individus (Deb, 2000 ; Deb, 2001). Ici, le choix s'effectue suivant les principes énoncés ci-dessous :

- Si les deux individus sont admissibles, alors ils sont comparés par exemple à partir du rang de dominance (issu du classement par front de Pareto), puis de la distance de crowding si les deux individus appartiennent au même front ;
- Si un seul des individus est admissible, alors il est systématiquement choisi. Le tournoi sous contraintes repose sur le principe suivant : les solutions admissibles sont nécessairement les meilleures ;
- Si les deux solutions sont non-admissibles, alors le nombre de contraintes violées peut servir à départager les deux individus. La règle de décision peut également faire appel au rang de dominance et à la distance de crowding, à la manière des solutions admissibles.

Le tournoi sous contraintes présente l'avantage d'être une méthode générale, d'implémentation aisée, supposant relativement peu de modifications par rapport aux algorithmes génétiques sans contraintes. Il impose, pour seule modélisation, la loi d'évolution du nombre de solutions admissibles. Aucune forme de pénalité n'est nécessaire, la méthode de sélection est simplement basée sur des comparaisons par paires, suivant les règles énoncées ci-dessus.

Si une loi d'évolution du nombre de solutions non-admissibles est donnée, il est alors possible d'organiser dans la population des tournois entre solutions non-admissibles pour réguler leur nombre et choisir de manière déterministe celles qui seront conservées, comme parents ou bien dans la génération suivante. La régulation s'effectue au niveau des opérateurs de sélection.

Les résultats de la méthode proposée par Deb sont très encourageants. L'enjeu principal de la méthode tient au maintien de la diversité au sein de la population et donc au réglage de la loi d'évolution.

#### 4.3.3.3 L'optimisation par contraintes successives

Les méthodes précédentes considèrent systématiquement l'ensemble des contraintes du problème simultanément. L'originalité de l'optimisation par contraintes successives tient au traitement des contraintes de manière indépendante et chronologique, suivant un ordre lexicographique.

Par exemple, on peut choisir de sélectionner les individus de la première génération sur la base du respect de la première contrainte, puis du respect des deux premières contraintes et construire ainsi progressivement une population d'individus satisfaisant à l'ensemble des contraintes du problème. Lorsqu'elles sont toutes satisfaites, un algorithme génétique classique (sans contraintes) peut alors être appliqué pour poursuivre l'optimisation, les solutions non-admissibles générées étant éliminées par peine de mort forte.

Cette technique a l'avantage de conduire à une population dont tous les individus respectent l'ensemble des contraintes. Le traitement séquentiel des contraintes présente néanmoins le risque de piéger un grand nombre de solutions dans des zones sous-optimales ou ne satisfaisant qu'aux premières contraintes étudiées. De plus, l'ordre lexicographique d'intégration des contraintes est difficile à établir et souvent empirique, il s'agit théoriquement de commencer l'optimisation par les contraintes les plus difficiles à satisfaire.

#### **4.3.3.4 L'optimisation par contraintes transformées en objectifs**

Dans le cadre d'une optimisation multicritère, les contraintes peuvent être directement converties en fonctions objectifs. Leur traitement n'impose alors plus aucune procédure différenciée, étant donné qu'elles sont considérées de la même manière que les objectifs originels du problème et optimisées par un algorithme classique (Fonseca et Fleming, 1995).

Ce type d'approche présente cependant un inconvénient majeur. Il est en effet possible que l'optimisation ne conduise pas aux solutions admissibles efficaces ou encore que les solutions identifiées soient majoritairement non-admissibles. En effet, les solutions admissibles doivent de manière nécessaire et suffisante respecter les contraintes ; par définition, il ne s'agit pas de les optimiser. Une solution satisfaisant tout juste les contraintes peut ainsi être efficace (non-dominée). L'effet du traitement des contraintes en tant que fonction objectif est ainsi difficile à mesurer.

Une variante de ce principe consiste à introduire non pas les contraintes mais le nombre de contraintes violées comme fonction objectif. Le risque est alors similaire : obtenir, en forte proportion, des solutions admissibles mais peu efficaces (dans le problème d'optimisation limité aux fonctions objectifs originelles) ou des solutions efficaces mais non-admissibles.

### **4.3.4 Traitement des solutions non-admissibles**

Les approches précédentes se sont largement focalisées sur le traitement des contraintes. Une autre voie consiste alors à explorer la détermination de l'espace des solutions admissibles ou le traitement de ces solutions particulières.

#### **4.3.4.1 Localisation de la frontière de l'espace des solutions admissibles**

L'idée principale de cette technique consiste à identifier des zones proches de la frontière de l'espace admissible. Ce type d'approche cherche à caractériser la topologie de la frontière entre l'espace des solutions admissibles et non-admissibles. A partir de cette connaissance, il est possible de déterminer plus facilement l'ensemble des solutions admissibles.

Ce type d'approche réclame deux étapes. Dans un premier temps, une recherche globale rapide est menée pour identifier un premier ensemble de solutions admissibles proches de la frontière. Dans un deuxième temps, il s'agit de se déplacer le long de la frontière pour mieux la déterminer. Des pénalités adaptatives ou une recherche locale peuvent alors être mobilisées pour préciser le voisinage des solutions identifiées. Des opérateurs génétiques sont utilisés pour explorer la frontière (« passer d'un côté à l'autre ») et donc la préciser. Par exemple, cette exploration peut être conduite en générant de nombreux enfants différents à partir de deux parents donnés, situés de part et d'autre de la frontière, ou bien du même côté de la frontière. L'objectif est d'obtenir une description de la forme de la frontière et des solutions efficaces et admissibles.

Cette méthode présente l'avantage de préciser localement l'ensemble des solutions efficaces admissibles. En revanche, elle réclame souvent des temps de calculs prohibitifs et est généralement spécifique au problème étudié.

### **Optimisation avec une grille de détermination**

Les méthodes de grille de détermination peuvent également servir à la caractérisation de l'espace des solutions admissibles. Si l'utilisation de ces techniques en combinaison avec les algorithmes génétiques demeure limitée, elles ont cependant démontré des performances intéressantes en application avec d'autres méthodes d'optimisation, comme le soulignent Santana-Quintero et al. (2010).

Le principe de la méthode est relativement intuitif. La première phase consiste à générer de nombreuses solutions, qui sont évaluées. Ensuite, un maillage ou « grille » de l'espace des objectifs est créé ; chaque case contenant au moins un individu. Le nombre de contraintes violées par les individus permet de différencier les cases entre celles contenant des individus connus admissibles ou non-admissibles. Une recherche locale dans chacune des cases permet alors de préciser l'espace des solutions admissibles.

Les avantages et inconvénients de la méthode sont assez similaires à ceux énoncés précédemment. L'exploration globale couplée à la recherche locale permet de préciser la frontière de l'espace admissible. Cependant, l'efficacité de la technique demeure largement liée à la précision de la grille et donc au nombre de solutions évaluées, ce qui peut conduire à des temps de calculs prohibitifs.

#### **4.3.4.2 Les algorithmes de réparation**

Les algorithmes de réparation reposent sur un principe original et sensiblement différent des techniques précédentes. Les solutions non-admissibles ne sont ni rejetées, ni exploitées de manière statique pour préciser la frontière de l'espace admissible, mais utilisées pour tenter de construire des solutions admissibles.

La réparation intervient généralement après les phases de reproduction et peut alors prendre plusieurs natures. Par exemple, une ou plusieurs mutations aléatoires peuvent être appliquées à l'individu à réparer pour constituer une solution admissible. Il est également possible d'implanter dans le génome des solutions non-admissibles des allèles particuliers, identifiés de manière récurrente sur les individus admissibles. Cette identification empirique est cependant difficile à maîtriser tant les performances peuvent être influencées par les combinaisons génétiques, suivant les problèmes.

Certains individus non-admissibles peuvent être conservés dans la population courante pour maintenir une forme de diversité génétique.

Liepins et Potter (1991) ont montré sur différents problèmes combinatoires sous contraintes que les algorithmes de réparation surpassaient les autres approches en termes de performances des solutions identifiées et de vitesse d'identification.

Ainsi, si les solutions non-admissibles d'un problème peuvent être transformées en solutions admissibles à moindre coût (en temps de calcul), alors les techniques de réparation constituent souvent une option intéressante. Cependant, leur utilisation n'est pas toujours possible, ou introduit parfois un biais important dans le processus de recherche, suivant le problème. Enfin, cette technique est largement dépendante du problème, les algorithmes et opérateurs associés sont généralement spécifiques au problème étudié.

#### 4.3.4.3 Sélection des parents

Enfin, la recherche de solutions admissibles peut mobiliser un travail sur la sélection des parents, en amont de la reproduction. Dans le cas des croisements à deux individus, il est alors intéressant d'associer deux parents, qui s'ils ne sont pas admissibles, se révèlent complémentaires en termes de contraintes respectées. L'objectif est alors de générer par variations (croisements et mutations) des individus qui respectent toutes les contraintes ou au moins autant que leurs parents.

Cette méthode est simple du point de vue de l'implémentation, n'imposant qu'une modification mineure des algorithmes génétiques sans contraintes.

#### 4.3.5 Conclusion sur l'état de l'art

Le traitement des contraintes en optimisation génétique multicritère est une problématique complexe ayant motivé l'apparition de nombreuses approches. Le choix d'une méthode peut être orienté par l'algorithme génétique utilisé ou le type de problème. Par exemple, dans le cas de l'algorithme NSGA II, le caractère multi-objectif est traité sans recours à l'agrégation (mais sur la base de la relation de dominance et de la distance de crowding), aussi on évitera d'imposer la transformation en problème mono-objectif pour le traitement des contraintes.

Une fois la méthode de traitement des contraintes choisie, la littérature recommande d'effectuer des études de sensibilité pour régler des différents paramètres de modélisation et ainsi s'assurer de l'efficacité de la méthode mise en œuvre. Dans la pratique, il est souvent difficile de procéder à ces opérations de réglage du fait des temps de calcul prohibitifs.

L'algorithme génétique mis en œuvre au Chapitre 2 est de type NSGA II. Il a été choisi en raison de ses performances et également parce qu'il n'impose aucune agrégation des objectifs, permettant ainsi d'avoir accès directement à une description de la surface de compromis. Par conséquent, nous recherchons une méthode de gestion des contraintes préservant le caractère multicritère du problème. De plus, la limitation du nombre de paramètres spécifiques au traitement des contraintes simplifie les problématiques de réglage.

Aussi, nous faisons le choix d'une approche centrée sur le tournoi sous contraintes. Celle-ci est exposée plus précisément dans la section suivante.

## 4.4 Application à la réhabilitation énergétique

Le Chapitre 2 a présenté l'algorithme génétique de type NSGA II, mis en œuvre pour l'identification de programmes efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle, sans contraintes. Nous nous intéressons ici à l'introduction et au traitement des contraintes dans l'approche génétique, à l'échelle du bâtiment.

On suppose qu'un plan de financement structure sur plusieurs années les capacités séquentielles d'investissement pouvant être mobilisées pour financer les opérations de réhabilitation. De plus, ces capacités d'investissement sont supposées connues a priori et ne sont pas nécessairement constantes dans le temps. A chaque phase de financement, plusieurs mesures de réhabilitation peuvent alors être mises en œuvre ; les ensembles de mesures devant systématiquement satisfaire aux contraintes budgétaires données.

A partir de la revue bibliographique précédente, nous choisissons de travailler sur une approche par tournoi sous contraintes. La réparation de solutions non-admissibles et une loi d'évolution sont également mobilisées.

### 4.4.1 Différences avec l'algorithme sans contraintes

Le Chapitre 2 a détaillé le principe général d'un algorithme génétique ainsi que les opérateurs particuliers de sélection, à la base l'algorithme NSGA II, et les opérateurs de variation, choisis pour le problème de la réhabilitation énergétique séquentielle. Nous faisons ici l'inventaire des modifications à apporter à l'algorithme sans contraintes.

La Figure 29 (Chapitre 2) rappelle les étapes successives de l'algorithme :

- Initialisation aléatoire de la population courante ;
- Décodage du phénotype en génotype ;
- Evaluation des performances des individus de la population courante ;

Puis sur les itérations générationnelles :

- Sélection pour la reproduction (1) ;
- Génération des enfants par variations (2) :
  - Croisements sur les individus parents sélectionnés ;
  - Mutations sur les enfants générés ;
- Décodage du phénotype en génotype (3) ;
- Evaluation des performances des enfants générés (3) ;
- Sélection pour le remplacement générationnel (4).

Les étapes d'initialisation aléatoire de la population initiale, ainsi que du décodage phénotype en génotype ne sont pas affectées par l'introduction des contraintes de financement. Une population aléatoire comptant des individus admissibles et non-admissibles est initialisée.

La représentation génétique des solutions est celle du Chapitre 2. Les individus sont constitués d'un couple de chromosome : composition et ordre. Cependant, l'information génétique présente sur le chromosome ordre ne définit plus rigoureusement une permutation sur l'ensemble des types de mesures considérées ; plusieurs mesures de réhabilitation peuvent ici être mises en œuvre lors de la même phase de financement.

Avant évaluation, il demeure nécessaire de traduire l'information génétique binaire ou entière sous la forme d'une combinaison de mesures de réhabilitation identifiées et d'une séquence de mise en œuvre associée.

L'évaluation des individus de la population initiale ou celle des enfants, au cours des itérations générationnelles, impose le calcul de leur performances sur les fonctions objectifs du problème. Dans le cas de l'optimisation sous contraintes, il est également nécessaire d'évaluer leurs performances sur les fonctions de contraintes, soit donc les coûts d'investissement à chaque phase de réhabilitation, pour chacune des solutions.

L'introduction des contraintes conduit ensuite à modifier sensiblement les procédures de sélection pour reproduction, génération des enfants et remplacement générationnel. Les sous-parties suivantes présentent les choix alors effectués.

#### 4.4.2 Sélection pour la reproduction

En sélection pour la reproduction, le tournoi de foules du Chapitre 2 (sans contraintes) est remplacé par le tournoi sous contraintes, présenté dans la section précédente. Les règles de décision suivantes sont alors appliquées pour comparer les paires de solutions tirées aléatoirement au sein de la population courante :

- Si l'un des individus est admissible et l'autre pas, alors la solution admissible est systématiquement sélectionnée ;
- Si les deux individus sont admissibles, ou non-admissibles, on applique une règle de sélection fondée sur : le rang des fronts de dominance auxquelles les solutions appartiennent, puis la distance de crowding si les solutions sont non-comparables.

Les individus sélectionnés (admissibles ou non) forment alors la population des parents.

#### 4.4.3 Opérateurs de variation et génération des enfants

Après sélection des parents, l'information génétique portée par leurs chromosomes est utilisée pour générer les individus enfants par variations : croisements et mutations.

##### Variations par croisements et mutations

Les opérateurs de variations appliqués au chromosome composition sont alors rigoureusement identiques à ceux mis en œuvre au Chapitre 2, en l'absence de contraintes.

Sur le chromosome ordre, la mutation est opérée de la même manière que pour l'optimisation sans contraintes, par interversion des allèles portés par deux gènes tirés aléatoirement.

Cependant, sous les contraintes liées aux capacités d'investissement, il est possible de mettre en œuvre différentes mesures de réhabilitation, à chaque phase. Aussi, il n'est plus nécessaire de garantir le maintien d'une permutation sur les gènes du chromosome ordre. Le croisement de Davis est alors abandonné au profit d'un croisement simple à un point. A partir de deux chromosomes ordre parents – imposant des permutations sur l'ensemble des mesures de réhabilitation considérées – il devient possible de générer des séquences de mise en œuvre comportant plusieurs mesures par phase. Notons qu'à l'issue du croisement, les numéros de phase (allèles portés par les gènes du chromosome ordre) sont réindexés pour éviter les phases ne comportant aucune action de réhabilitation entre les phases effectives.

### **Enfants admissibles – Enfants non-admissibles**

Il est important de noter que les enfants engendrés, y compris à partir d'un couple de parents admissibles, peuvent être non-admissibles.

Or, la génération d'une trop forte proportion de ces individus est contreproductive en termes d'exploration de l'espace admissible. Aussi, le nombre enfants non-admissibles conservés parmi les enfants doit être maîtrisé. Il est ainsi régulé par la procédure détaillée ci-dessous :

- Identification du nombre de solutions non-admissibles parmi les parents préalablement sélectionnés ;
- Détermination du nombre maximal d'enfants non-admissibles pouvant intégrer la population des enfants (présentée ci-après).
- Evaluation des performances des enfants sur les fonctions de contraintes ;
- Détermination du nombre d'enfants non-admissibles ;
- Si trop d'enfants non-admissibles ont été générés, alors :
  - La population d'enfants est régénérée jusqu'au respect de la contrainte sur le nombre d'enfants non-admissibles ;
  - Au-delà, d'un nombre de régénérations donné, des enfants non-admissibles tirés aléatoirement sont réparés de manière à respecter la contrainte sur le nombre d'enfants non-admissibles. La procédure de réparation, qui transforme des enfants non-admissibles en solutions admissibles, est détaillée ci-après.

### **Nombre maximal d'enfants non-admissibles**

Le nombre maximal d'enfants non-admissibles au sein la population d'enfants est pris égal au nombre de parents non-admissibles sélectionnés, sauf pour les premières générations pour lesquelles il est fixé par un pourcentage donné de la population courante (paramètre de l'algorithme). Le nombre des « premières » générations ainsi que la proportion d'enfants non-admissibles alors admise sont deux paramètres de l'algorithme. Dans les simulations, nous avons fixé ces variables à 20 et 50%, respectivement. Ce choix d'implémentation permet une large diversité génétique en reproduction lors des premières générations, puis la stabilité du nombre de solutions non-admissibles.

## Réparation des enfants non-admissibles

Rien ne garantit que pour un nombre donné de régénération des enfants, l'algorithme parvienne à exhiber une population d'enfants comportant un nombre d'individus non-admissibles inférieur ou égal à la borne fixée. Aussi, pour limiter les temps de calculs, un algorithme de réparation est appliqué au-delà d'un nombre donné de tentatives de régénérations infructueuses (ici, nous avons fixé ce paramètre à 10).

Dans le cas de la réparation, sont tirés aléatoirement (parmi les enfants non-admissibles) autant d'individus que le nombre maximal d'enfants non-admissibles pouvant être conservés. Les autres sont réparés : pour chacune des phases pour lesquelles la contrainte de financement n'est pas respectée, une mesure de réhabilitation est choisie aléatoirement et reportée sur la phase de réhabilitation suivante, et ce jusqu'à obtention d'une séquence admissible.

Dans l'approche développée, la réparation des enfants non-admissibles est envisagée ponctuellement de manière à maintenir une proportion donnée d'individus non-admissibles, favorisant l'exploration des frontières de l'espace admissible. Un algorithme différent pourrait être construit à partir de la réparation systématique de toutes les solutions non-admissibles ; l'algorithme opérerait alors uniquement sur des solutions admissibles. Dans ce cas, il serait nécessaire de vérifier que la réparation n'introduise aucun biais dans l'exploration de l'espace de recherche.

L'introduction des contraintes de financement a également une incidence sur la sélection pour le remplacement générationnel.

### 4.4.4 Sélection pour le remplacement

La sélection pour le remplacement générationnel en optimisation sous contraintes doit permettre de sélectionner les meilleurs individus admissibles de la population mais aussi de maintenir une certaine proportion de solutions non-admissibles et efficaces. La proportion maximale d'individus non-admissibles conservés lors du remplacement générationnel est régulée par une loi d'évolution proposée ci-dessous. La sélection pour remplacement procède ensuite du classement des solutions en front de Pareto et du calcul des distances de crowding.

#### Loi d'évolution

Une loi d'évolution est introduite, sur les générations, pour contrôler le nombre maximum d'individus non-admissibles au sein de la population courante.

Cette loi d'évolution est décroissante sur les générations. La décroissance permet de profiter au départ une large diversité génétique, propice à l'exploration de l'espace de décision, puis de concentrer progressivement la recherche sur l'espace des solutions admissibles, en maintenant cependant une information génétique permettant potentiellement d'explorer la frontière.

En pratique, la loi d'évolution utilisée est basée sur les relations suivantes :

- Le nombre initial maximal d'individus non-admissibles conservés dans la population courante est pris égal à 50% de la taille de la population courante ;

- Puis, toutes les 5 générations, le nombre maximum d'individus non-admissibles au sein de la population courante est réduit suivant la relation ci-dessous :

$$NB_{NA} (NB_{GEN}) = E \left[ NB_{POP} / (2 \times E [NB_{GEN} / 5]) \right]$$

Avec :

$NB_{NA}$  Nombre d'individus non-admissibles de la population courante ;

$NB_{POP}$  Nombre d'individus de la population courante ;

$NB_{GEN}$  Nombre de générations effectuées (soit le numéro de la génération courante) ;

$E$  Partie entière des nombres relatifs calculés.

Cette relation permet de conserver une forte proportion de solutions non-admissibles dans la population courante jusqu'à la 10ème génération (50%) et une proportion supérieure à 5% jusqu'à la 50ème génération.

A titre d'information, les optimisations génétiques sans contraintes, menées précédemment, ont permis de remarquer que l'amélioration des performances des solutions était très nette sur les premières dizaines de générations, ensuite la progression était plus lente et correspondait principalement au remplissage et à la distribution progressive des solutions sur le front identifié.

La Figure 137 illustre la loi d'évolution ainsi définie. La proportion de solutions non-admissibles conservées pour la constitution de la génération suivante est en décroissance avec le nombre de générations d'évolution de la population.

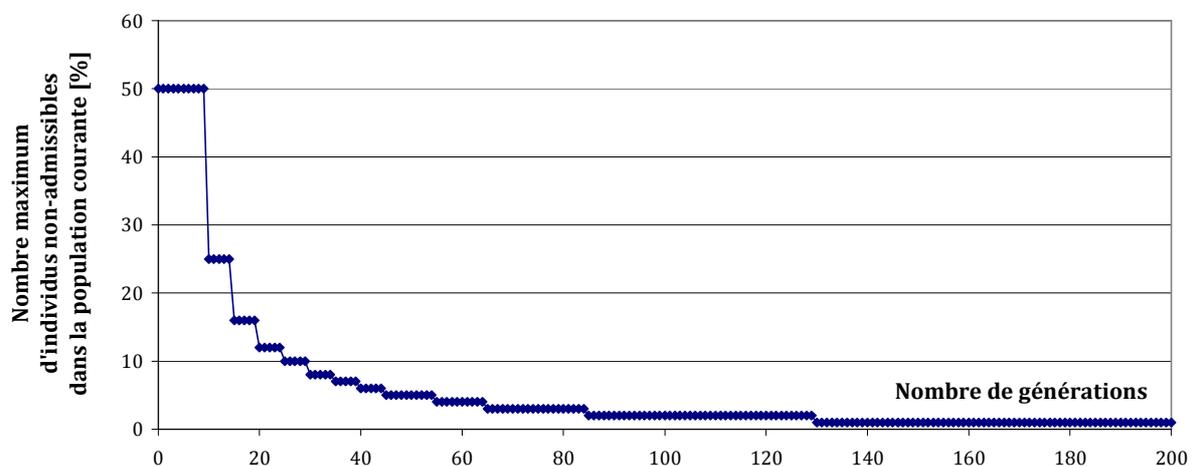


Figure 137. Représentation de la loi d'évolution sur le nombre d'individus non-admissibles, conservés au maximum au sein de la population courante

## Remplacement générationnel

Le nombre maximum d'individus non-admissibles pouvant être conservés pour la génération suivante étant défini, la sélection pour le remplacement générationnel est alors directement inspirée de la sélection pour remplacement de l'algorithme NSGA II (Deb, 2001).

L'ensemble des solutions – admissibles et non-admissibles – est classé par front de Pareto successifs, sur la base de la relation de dominance.

La sélection des solutions admissibles et non-admissibles est alors totalement dissociée.

Jusqu'à sélection d'un nombre de solutions non-admissibles inférieur ou égal à la borne supérieure définie par la loi d'évolution, les fronts de Pareto sont parcourus par rang croissant. Si toutes les solutions non-admissibles d'un même front ne peuvent être sélectionnées, la distance de crowding est alors utilisée pour différencier les individus.

Le complémentaire est alors apporté par les solutions admissibles. Jusqu'à la sélection d'un nombre d'individus suffisant pour assurer le renouvellement générationnel, la population de la nouvelle génération est alors remplie en parcourant les solutions admissibles des fronts de Pareto de rangs croissants. Si toutes les solutions admissibles d'un même front ne peuvent être sélectionnées, la distance de crowding est de la même manière utilisée pour différencier les individus entre eux.

#### 4.4.5 Conclusion

Les développements précédents ont précisé les choix d'opérateurs pour la sélection pour reproduction, la reproduction par variations et la sélection pour remplacement nécessaires au traitement des contraintes de financement. L'approche de traitement des contraintes présentée précédemment a fait l'objet d'un développement logiciel sur le code de PLEIADES+COMFIE. L'algorithme développé est alors utilisé pour étudier la réhabilitation énergétique séquentielle sous contraintes, sur une étude de cas.

### 4.5 Etude de cas

L'étude de cas est menée sur la barre Grimaud, application fil rouge de ces travaux de thèse. Sur ce bâtiment collectif résidentiel, les mesures et variantes de réhabilitation étudiées sont celles de l'espace de recherche 2, défini au Chapitre 1.

Les valeurs suivantes ont été utilisées pour le paramétrage de l'algorithme d'optimisation génétique NSGA II sous contraintes :

- Nombre d'individus dans la population courante : 100 ;
- Nombre d'enfants générés à chaque génération : 100 ;
- Probabilité de croisement sur les chromosomes composition et ordre : 80% ;
- Probabilité de mutations sur les chromosomes composition et ordre : 1% ;
  
- Proportion initiale d'individus non-admissibles conservés : 50% ;
- Proportion initiale d'enfants non-admissibles conservés : 50% ;
- Nombre de générations à proportion d'enfants non-admissibles initiale : 20 ;
- Nombre de régénérations de la population des enfants avant réparation : 10.

Enfin, les contraintes de financement sont ici supposées constantes sur les différentes phases de réhabilitation. Elles ont été fixées de sorte que la mesure de réhabilitation représentant le coût d'investissement le plus élevé, puisse être envisagée à toutes les phases du programme de réhabilitation, ici arbitrairement séparées d'une année.

Sur l'espace de recherche étudié, cette mesure correspond à la mise en œuvre d'une isolation thermique par l'extérieur, à base de laine minérale d'une épaisseur de 200mm, sur l'ensemble des façades de la basse Grimaud. Le coût d'investissement associé est évalué à 67,6 k€ ; aussi, la contrainte budgétaire appliquée à chacune des phases est de 70k€.

Les sections suivantes présentent quelques résultats sur les compromis identifiés sous contraintes, la progression générationnelle du front des solutions admissibles par rapport aux individus non-admissibles, l'analyse des solutions efficaces identifiées tant en termes de composition que de phasage des stratégies de réhabilitation.

### 4.5.1 Surface de compromis sous contraintes de financement

L'approche génétique multicritère sous contraintes est conduite indépendamment de toute agrégation des fonctions objectifs mais à partir de la relation de dominance et de la distance de crowding, notamment. Par conséquent, le résultat de l'optimisation est un ensemble de solutions efficaces, décrivant une surface de compromis multidimensionnelle du problème.

A la manière des chapitres précédents, cette surface de compromis multidimensionnelle est projetée sur l'ensemble des plans définis par les couples de critères de décision. Chacun des points portés sur la Figure 138 représente alors les performances d'une stratégie particulière de réhabilitation. Cette représentation permet ainsi la visualisation et facilite donc la compréhension des compromis entre les critères de décision ici considérés :

- Consommation cumulée d'énergie primaire [MJ] ;
- Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques [kg Sb eq.] ;
- Potentiel de changement climatique à 100 ans [kg CO<sub>2</sub> eq.] ;
- Potentiel d'acidification [kg SO<sub>2</sub> eq.] ;
- Coût d'investissement [k€] ;
- Coût global sur le cycle de vie [k€] ;
- Inconfort thermique adaptatif en été [degrés.heures].

Sur la Figure 138, il est ainsi intéressant de remarquer que les compromis inter-critères, sous les contraintes de financement pluriannuel, sont relativement similaires aux relations identifiées en l'absence de contraintes (chapitres 2 et 3) :

- La projection de la surface de compromis sur le plan défini par les performances en consommation cumulée d'énergie primaire et en potentiel d'épuisement des ressources abiotiques fait clairement apparaître une relation de type linéaire. Le comportement linéaire est également observé sur les compromis entre les deux critères précédents et le potentiel de changement climatique à 100 ans, notamment ;

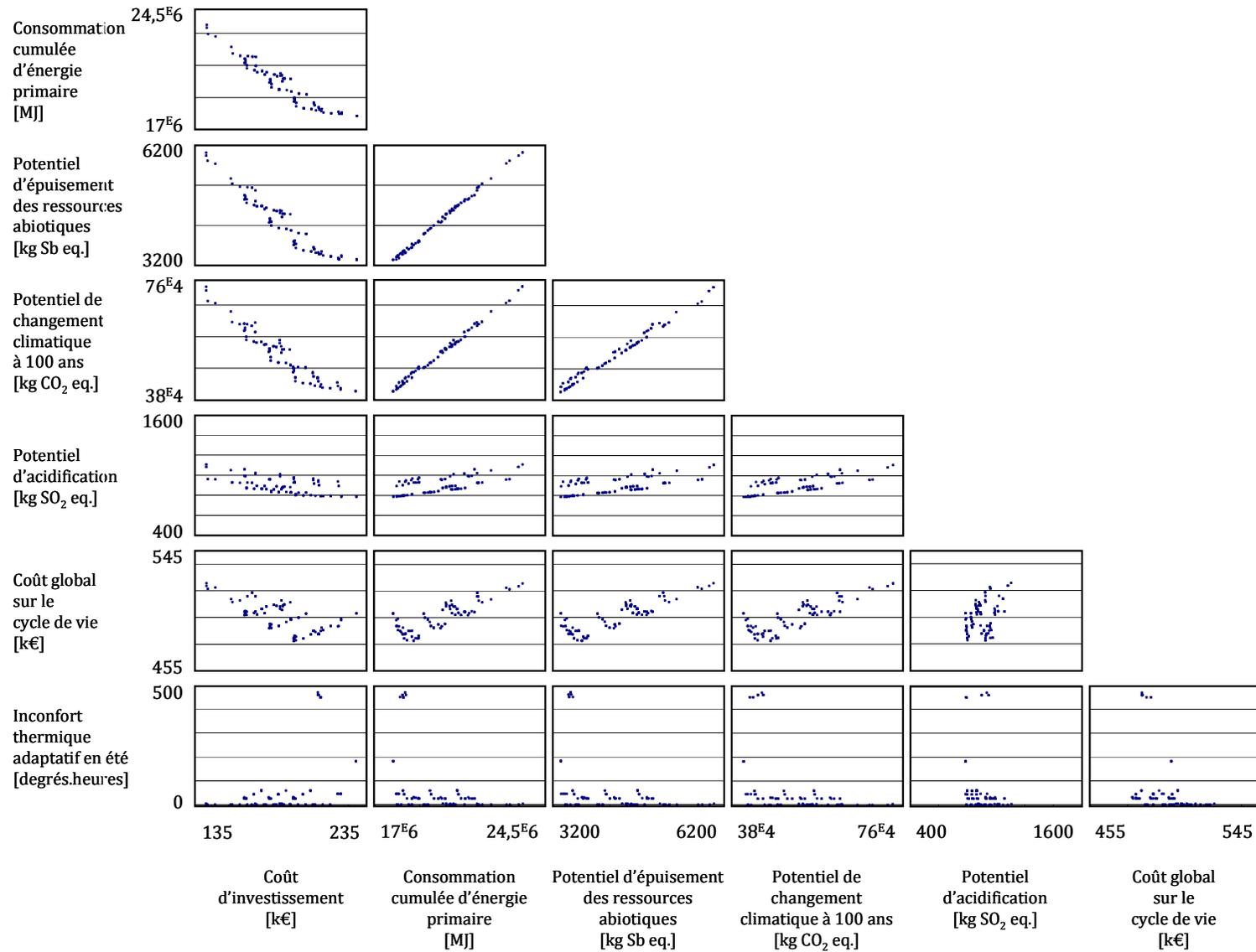


Figure 138. Ensemble des solutions admissibles non-dominées de la génération 200

- De plus, on observe également les nécessaires compromis entre coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation) et la réduction des impacts environnementaux, sur le cycle de vie : graphiques ayant en abscisse le coût d'investissement et en ordonnée la consommation cumulée d'énergie primaire, le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, le potentiel de changement climatique à 100 ans ou encore le potentiel d'acidification (Figure 138). Qualitativement, ces compromis font apparaître différents sauts en termes de performances environnementales en fonction du niveau d'investissement cumulé sur les phases de réhabilitation. Ces sauts semblent plus marqués que dans le cas sans contraintes sur le financement.
- L'étude des compromis faisant intervenir le coût global sur le cycle de vie souligne, comme dans les chapitres précédents, l'existence systémique d'un minimum en coût global, ne correspondant pas aux stratégies les plus performantes en termes de réduction des consommations énergétiques.
- Enfin, le niveau d'inconfort thermique adaptatif en été (cumulé sur les 50 années de poursuite du cycle de vie du bâtiment à réhabiliter) est toujours inférieur à 500 degrés.heures, garantissant des niveaux de confort élevés, hors périodes de canicules estivales exceptionnelles.

L'analyse des relations entre les performances des stratégies efficaces, sur les critères de décision considérés dans cette étude de cas, révèle de manière intéressante des comportements de compromis globalement similaires à ceux observés précédemment, sans contraintes budgétaires imposées à chacune des phases de réhabilitation.

#### 4.5.2 Progression des fronts admissible et non-admissible

L'introduction des contraintes dans le problème d'optimisation multicritère fait apparaître des solutions non-admissibles. Nous avons ici choisi de nous appuyer sur ces individus, conservés en proportion donnée de la population courante, suivant une loi d'évolution, pour guider la recherche vers des solutions admissibles efficaces.

Pour illustrer la relation entre individus admissibles et non-admissibles, en termes de progression générationnelle des fronts de solutions efficaces, nous représentons sur les Figure 139 à Figure 142 les ensembles de solutions non-dominées, admissibles et non-admissibles, pour différentes générations. Ces solutions efficaces sont identifiées, à chaque génération (2, 5, 10, 20, 50 ou 200), parmi les individus de la population courante et les enfants engendrés.

Ces figures donnent un éclairage particulier sur les compromis entre :

- **Figure 139** : Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques et potentiel de changement climatique à 100 ans ;
- **Figure 140** : Coût d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire ;
- **Figure 141** : Consommation cumulée d'énergie primaire et coût global sur le CDV ;
- **Figure 142** : Consommation cumulée d'énergie primaire et inconfort thermique adaptatif en été.

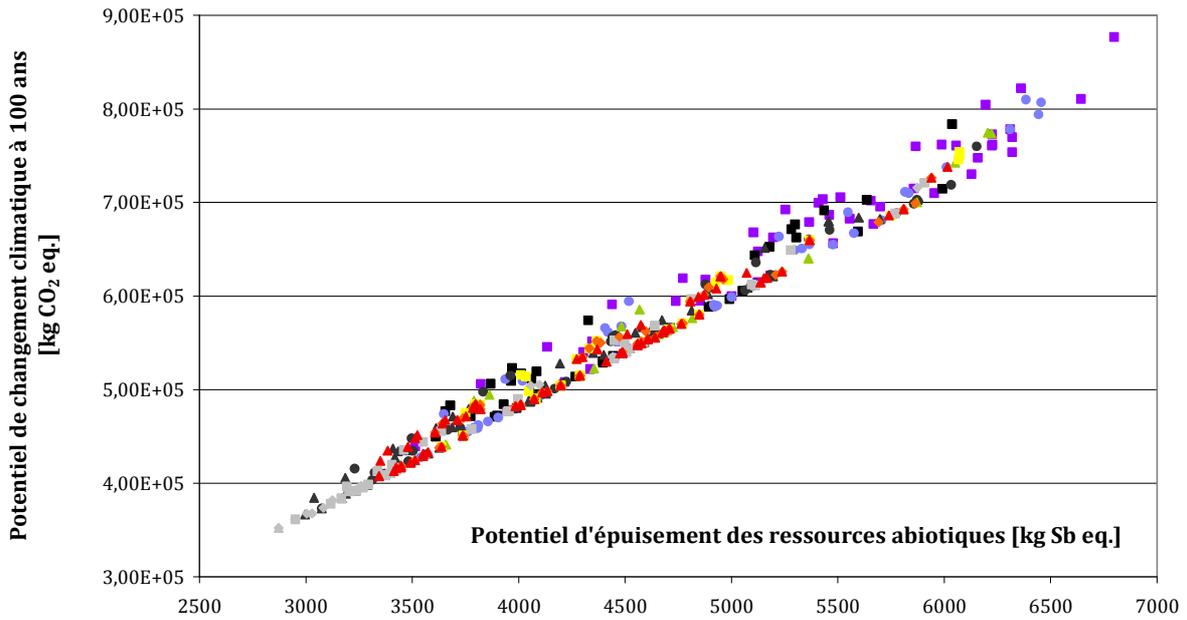


Figure 139. Ensembles des solutions non-dominées admissibles ou non-admissibles, sur différentes générations (2,5,10,20,50,100), compromis entre **épuisement des ressources** et **changement climatique**

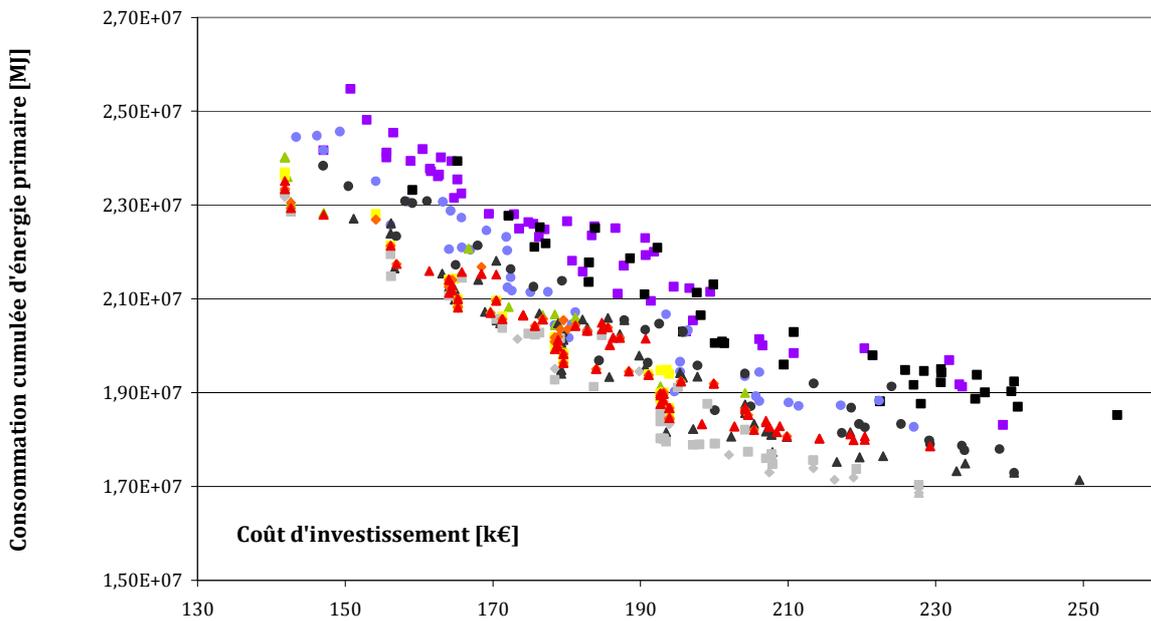


Figure 140. Ensembles des solutions non-dominées admissibles ou non-admissibles, sur différentes générations (2,5,10,20,50,100), compromis entre **investissement** et **consommation d'énergie primaire**

■ iA Génération 2	● iA Génération 5	▲ iA Génération 10	■ iA Génération 20	◆ iA Génération 50	▲ iA Génération 200
■ iNA Génération 2	● iNA Génération 5	▲ iNA Génération 10	■ iNA Génération 20	◆ iNA Génération 50	▲ iNA Génération 200

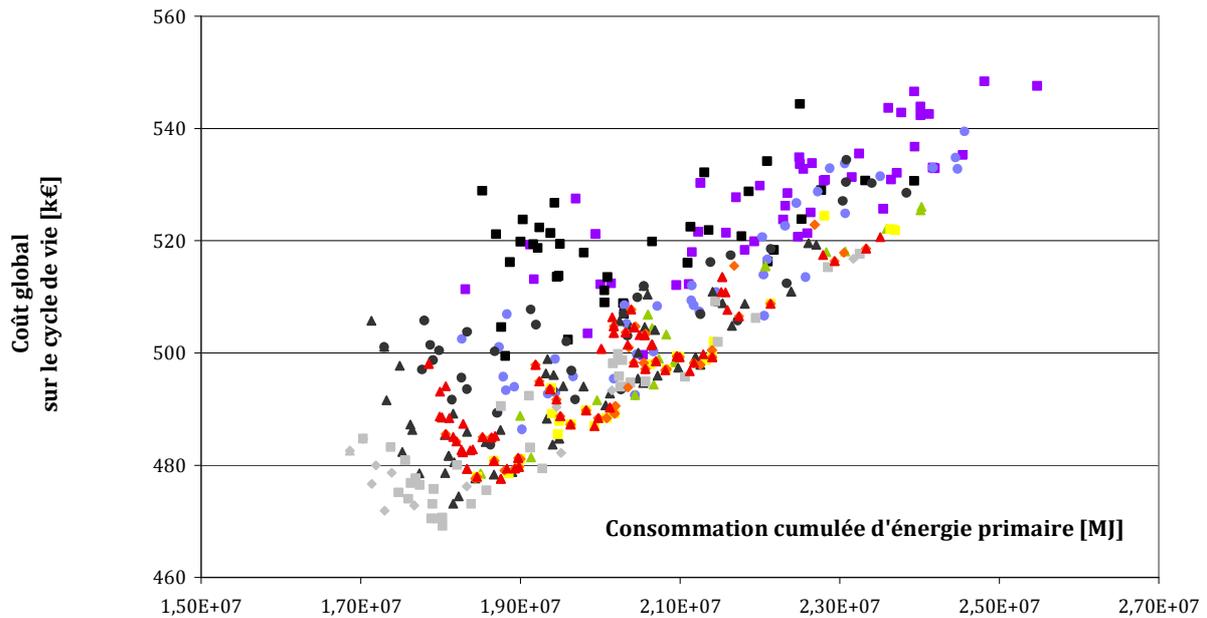


Figure 141. Ensembles des solutions non-dominées admissibles ou non-admissibles, sur différentes générations (2,5,10,20,50,100), compromis entre consommation d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie

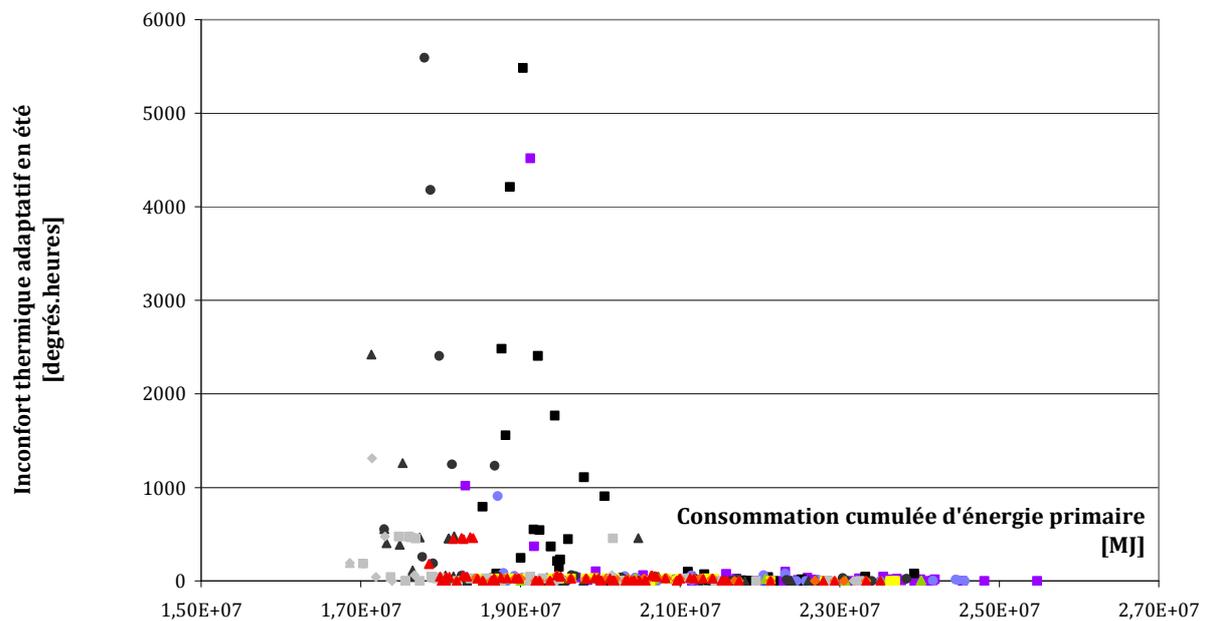


Figure 142. Ensembles des solutions non-dominées admissibles ou non-admissibles, sur différentes générations (2,5,10,20,50,100), compromis entre consommation d'énergie primaire et inconfort thermique adaptatif en été

■ iA Génération 2	● iA Génération 5	▲ iA Génération 10	◆ iA Génération 20	◆ iA Génération 50	▲ iA Génération 200
■ iNA Génération 2	● iNA Génération 5	▲ iNA Génération 10	◆ iNA Génération 20	◆ iNA Génération 50	▲ iNA Génération 200

Les ensembles d'individus admissibles et non-admissibles sont notés respectivement  $iA$  et  $iNA$ .

Sur les figures ci-dessus, on remarque graphiquement que les itérations générationnelles permettent globalement une amélioration des performances et de la distribution des fronts efficaces identifiés tant en termes de solutions admissibles que non-admissibles.

Aucun indicateur de distance n'est ici introduit entre les solutions non-admissibles et le front admissible courant. Aussi, au cours du processus d'optimisation, le front des solutions non-admissibles progresse tant en termes de performances des solutions que de description de la surface de compromis.

Si lors des premières générations (générations 2 ou 5), la segmentation de l'espace des objectifs entre individus admissibles et non-admissibles semble peu explicite, il apparaît progressivement un front de solutions non-admissibles dominant globalement celui des individus admissibles.

Ainsi, sur la Figure 140, individus admissibles et non-admissibles forment deux nuages de points se recouvrant largement lors des premières générations (2 et 5). Cette remarque permet de souligner la complexité topologique de la frontière entre ensembles admissibles et non-admissibles, dans l'espace des objectifs. Les premiers individus générés – qu'ils soient admissibles ou non – sont globalement peu efficaces sur le problème considéré. Il apparaît donc que les individus non-admissibles ne sont pas nécessairement plus efficaces que des solutions admissibles.

En revanche, sur la même figure, l'étude des solutions de la génération 200 met en évidence un ensemble de solutions non-admissibles, globalement plus efficace que le front admissible identifié. Ces individus non-admissibles sont relativement proches du front admissible dans l'espace des objectifs. La conservation de certaines de ces solutions est donc de nature à contribuer à l'amélioration générationnelle des populations admissibles.

Des constats similaires peuvent être établis sur les Figure 139, Figure 141 et Figure 142 qui mettent en évidence que les solutions non-admissibles des générations 20, 50 et 200 se trouvent globalement plus efficaces que les solutions admissibles identifiées aux mêmes stades.

En conclusion, l'algorithme implémenté permet de faire progresser – sur les générations – les solutions des fronts admissible et non-admissible tant en termes de performances que de distribution sur les surfaces de compromis. Les ensembles d'individus non-admissibles forment rapidement des fronts globalement plus efficaces que les solutions admissibles. Ils sont alors de nature à contribuer à l'amélioration des solutions efficaces admissibles.

### 4.5.3 Analyse de solutions particulières

Sur les figures précédentes, chacun des points représente dans l'espace des objectifs une stratégie particulière de réhabilitation énergétique séquentielle. Pour éclairer la compréhension de ces solutions, au-delà de l'analyse des relations de compromis entre les critères, nous nous proposons de nous intéresser à trois solutions particulières :

- **A** : Optimum local en consommation cumulée d'énergie primaire ;
- **B** : Optimum local en coût global sur le cycle de vie ;
- **C** : Optimum local en coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation).

Ces trois stratégies de réhabilitation énergétique séquentielle correspondent à des solutions admissibles du problème. Elles sont représentées sur les Figure 143, Figure 144, Figure 145 et Figure 146 parmi les individus admissibles efficaces identifiés à la génération 200.

Le Tableau 35 détaille les programmes de réhabilitation énergétique séquentielle, relatifs aux trois solutions étudiées :

	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	N° Phase
<b>A</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 150 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm	2
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 200 mm	2
	Ouvertures	Triple vitrages basse émissivité (lame Argon)	3
	Ventilation	Double flux	5
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	1
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%	4
	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	N° Phase
<b>B</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm	2
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	2
	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	2
	Ventilation	Double flux	1
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	3
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%	3
	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation	N° Phase
<b>C</b>	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm	1
	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm	1
	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm	2
	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)	2
	Ventilation	Hygro-B	1
	Chauffage	Chaudière gaz à condensation	3
	Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%	3

**Tableau 35. Détail des programmes de réhabilitation séquentiels sous contraintes A, B et C**

L'analyse du phasage des stratégies de réhabilitation **A**, **B** ou **C** (Tableau 35) permet d'identifier que plusieurs mesures sont potentiellement mises en œuvre à chacune des phases de travaux, sous respect des capacités d'investissement à chaque phase de financement.

Les solutions les plus efficaces énergétiquement (**A**) commencent par remplacer le système de chauffage existant et par isoler les façades (ITE Laine minérale : 200mm soit  $R = 3,7 \text{ W/m}^2.K$ ). Ensuite, la seconde phase est consacrée à l'isolation thermique de la toiture et du plancher bas : ITE polyuréthane 150 mm et ITE polystyrène extrudé 200 mm, respectivement. Séquentiellement, les fenêtres existantes sont remplacées par du triple vitrage basse émissivité, des collecteurs solaires thermiques sont mis en œuvre pour assurer 75% de la production d'ECS annuelle, une ventilation double flux est installée, respectivement aux phases 3, 4 et 5.

La stratégie de réhabilitation **B** se distingue de la solution **A** tant par le phasage que par la composition du programme de réhabilitation séquentiel. L'enveloppe du bâtiment est ainsi réhabilitée intégralement lors des deux premières phases du programme, avant le remplacement du système de chauffage existant et l'intégration de la production d'ECS thermique (fraction solaire : 75%). Les niveaux d'isolation thermique mis en œuvre correspondent alors aux valeurs minimales proposées sur l'espace de recherche considéré. Sur les différentes phases de réhabilitation, les techniques mises en œuvre sont les suivantes :

- Phase 1 : ITE des façades (100mm laine minérale ;  $R = 2,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) ; installation d'une ventilation double-flux ;
- Phase 2 : ITE de la toiture (150mm polyuréthane), ITE du plancher bas (100mm polystyrène extrudé), remplacement des ouvrants existants par des fenêtres double vitrage basse émissivité ;
- Phase 3 : Remplacement du système de chauffage ; intégration de la production d'ECS thermique (fraction solaire : 75%).

Les solutions minimisant les coûts d'investissement (**C**) conduisent à des programmes de réhabilitation relativement similaires à celui de la solution **B**. La stratégie de réhabilitation **C** mobilise cependant une ventilation hygro-B ainsi qu'une fraction solaire de 35% pour la production d'ECS. En termes de phasage, le différentiel d'investissement entre la ventilation hygro-B et le double flux permet d'intégrer la pose de l'ITE sur la toiture dès la première phase de réhabilitation, dans le cas de la stratégie **C**.

**Remarque.** A l'état initial, le renouvellement de l'air intérieur est assuré par ventilation mécanique contrôlée. Aussi, quelles que soient les mesures de réhabilitation mises en œuvre séquentiellement, le renouvellement sanitaire d'air intérieur demeure garanti. Cependant, si le renouvellement d'air avait été assuré à l'état initial par une ventilation naturelle, il alors aurait été nécessaire de prévoir l'installation d'une ventilation mécanique dès les phases de réhabilitation de l'enveloppe. L'introduction complémentaire de règles heuristiques pour la composition des programmes peut alors assurer la cohérence globale des interventions dans le temps.

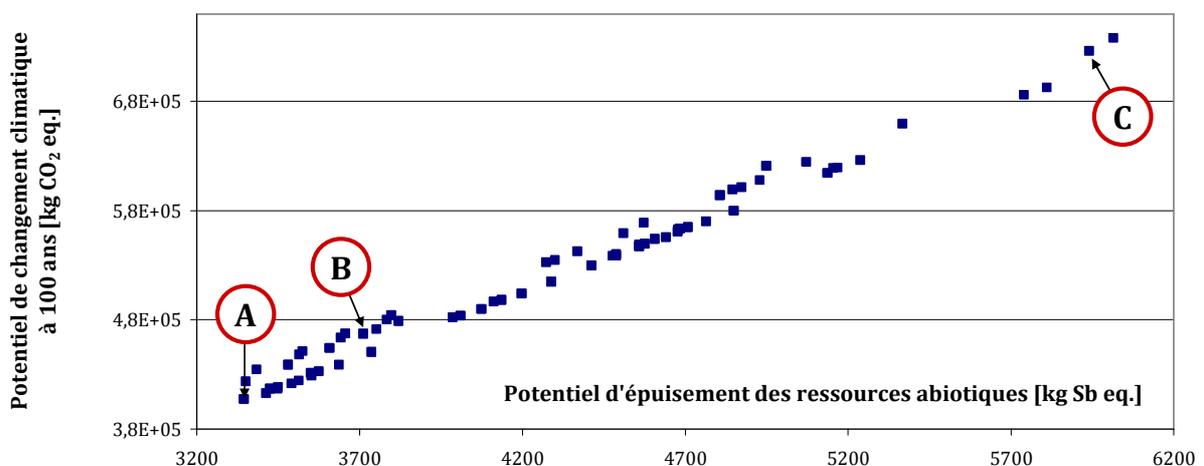


Figure 143. Solutions particulières et front admissible efficace à la génération 200  
Compromis entre **épuisement des ressources** et **potentiel de changement climatique**

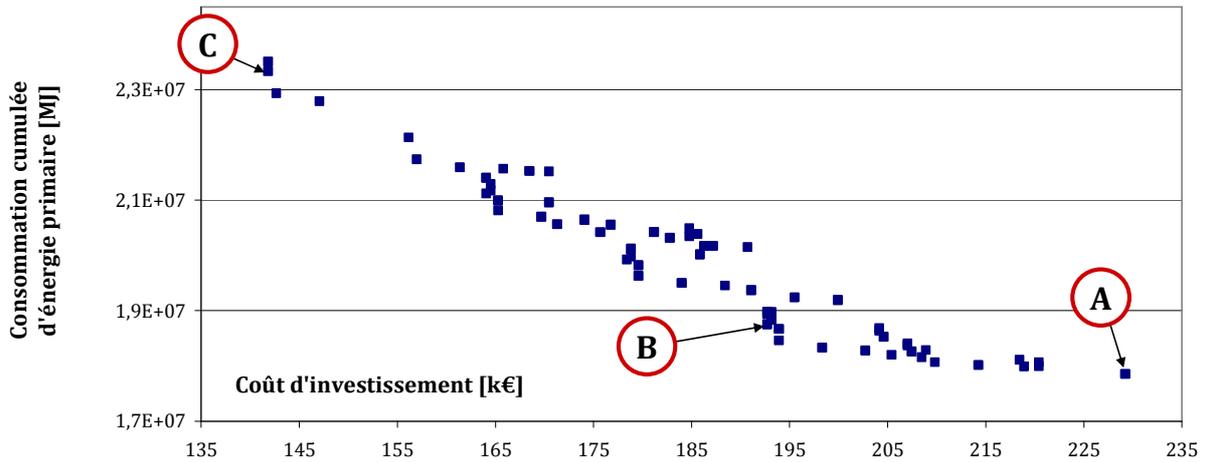


Figure 144. Solutions particulières et front admissible efficace à la génération 200  
Compromis entre **investissement** et **consommation cumulée d'énergie primaire**

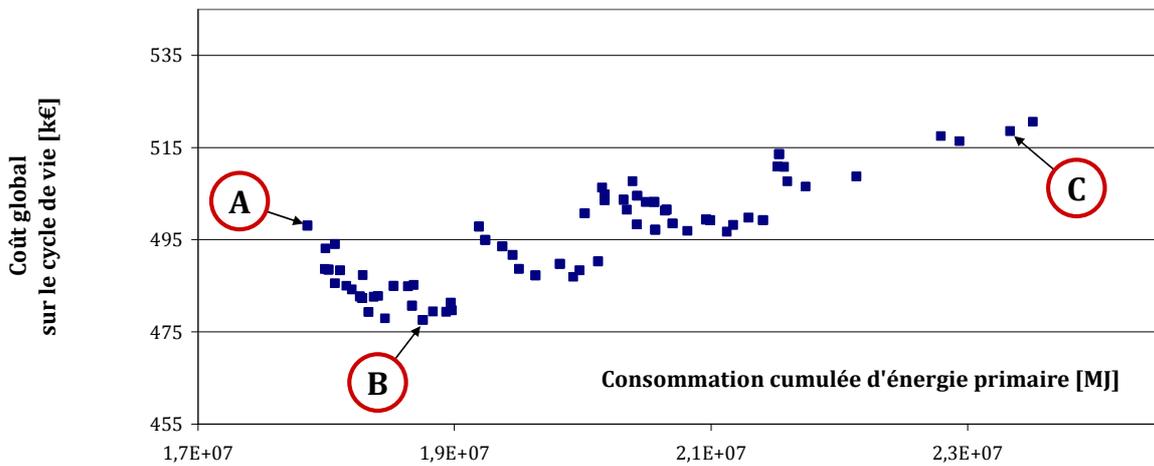


Figure 145. Solutions particulières et front admissible efficace à la génération 200  
Compromis entre **consommation cumulée d'énergie primaire** et **coût global sur le cycle de vie**

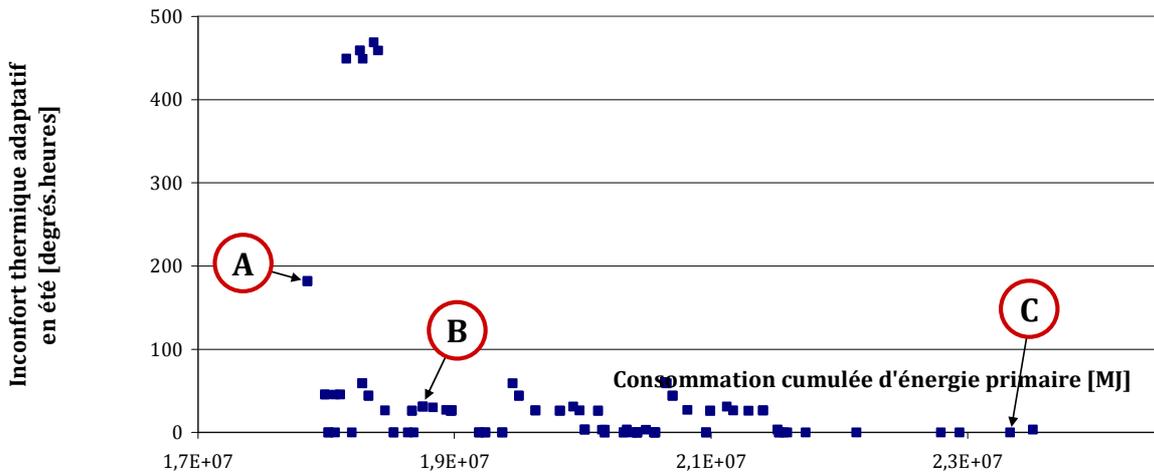


Figure 146. Solutions particulières et front admissible efficace à la génération 200  
Compromis entre **consommation d'énergie primaire** et **inconfort thermique adaptatif en été**

En termes de performances, les figures précédentes éclairent le positionnement de ces trois solutions particulières et permettent de visualiser les écarts, en valeur absolue. Globalement, on retrouve ici une situation similaire à celle observée en optimisation libre (sans contraintes).

Sur la Figure 144, il est ainsi intéressant de noter que la solution **B** (optimale en termes de coût global sur le cycle de vie) permet une réduction significative du coût d'investissement (cumulé sur les phases de financement) par rapport à la stratégie de réhabilitation **A** ; la différence de performance énergétique demeurant limitée.

En revanche, l'augmentation significative de la consommation cumulée d'énergie primaire entre les solutions **A** ou **B** et la solution **C** se traduit également par des impacts environnementaux nettement supérieurs, dans le cas de la stratégie de réhabilitation **C** (Figure 143).

En termes de coût global, les surcoûts d'investissement, pour l'ensemble des solutions présentant une performance énergétique supérieure à la solution **B**, ne sont pas compensés par la réduction des coûts d'exploitation sur les 50 années de poursuite du cycle de vie du bâtiment à réhabiliter, dans le cadre des hypothèses retenues.

Enfin, les stratégies de réhabilitation **A**, **B** ou **C** imposent des niveaux d'inconfort thermique adaptatif en été relativement limités, inférieurs à 200 degrés.heures sur 50 ans. Ce résultat demeure à interpréter au regard des hypothèses considérées : climat de la région parisienne, ne correspondant pas à une année de canicule, mise en œuvre des protections solaires, surventilation nocturne.

En conclusion, l'étude de ces quelques solutions particulières permet d'apprécier la nature (composition et phasage) de différents programmes de réhabilitation correspondant à des compromis de types différents sur le front de Pareto identifié.

Sous les hypothèses de rendement considérées pour le système de chauffage avant et après réhabilitation, il est intéressant de remarquer que les solutions les plus performantes en termes de consommation cumulée d'énergie primaire conduisent au remplacement du système de chauffage dès la première phase d'intervention. Au contraire, les stratégies **B** ou **C** privilégient tout d'abord la réduction des besoins de chauffage par la réhabilitation de l'enveloppe, avant de mettre en œuvre des équipements performants.

## 4.5.4 Analyse des solutions efficaces admissibles

### 4.5.4.1 Variantes de réhabilitation

Au-delà des 3 solutions particulières précédentes, nous poursuivons l'étude des types de solutions mises en œuvre en analysant la distribution des variantes de réhabilitation sur les solutions admissibles non-dominées, identifiées parmi les individus de la génération 200.

Sur les compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie, les figures ci-dessous présentent la répartition des variantes de réhabilitation sur les solutions non-dominées admissibles pour les mesures concernant : les façades, le plancher bas, les ouvertures, la ventilation ou la production d'ECS. Notons que, pour le plancher haut, une seule alternative de réhabilitation apparaît parmi les solutions admissibles non-dominées de la génération 200 : l'ITE à base de 150 mm de polyuréthane.

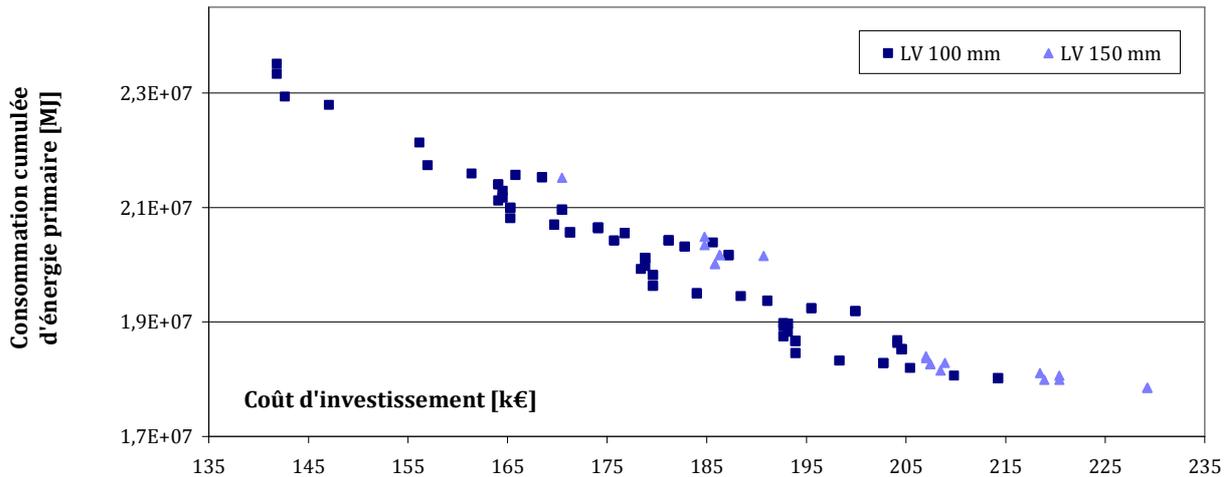


Figure 147. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les **FACADES**  
Compromis entre **coût d'investissement** et **consommation cumulée d'énergie primaire**

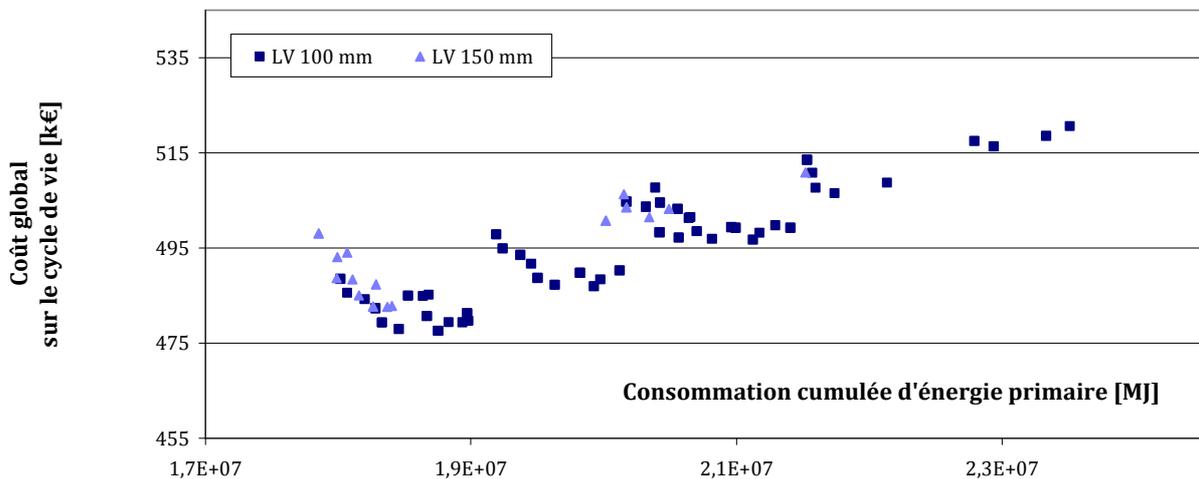


Figure 148. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les **FACADES**  
Compromis entre **consommation cumulée d'énergie primaire** et **coût global sur le cycle de vie**

Sous les hypothèses considérées pour le modèle de cycle de vie, dont en particulier le coût de l'énergie et son évolution, les Figure 147 et Figure 148 font apparaître qu'aucune des solutions identifiées ne met en œuvre une épaisseur de 200mm de laine minérale (niveau maximum sur l'espace de recherche). De plus, si les solutions intégrant 150mm d'isolant présentent généralement une meilleure performance énergétique (toutes choses égales par ailleurs), elles sont aussi responsables d'un surcoût d'investissement (cumulé) non négligeable, qui n'est pas compensé en termes de coût global sur 50 ans (Figure 148). Il est alors supérieur à celui de la solution **B** (section précédente).

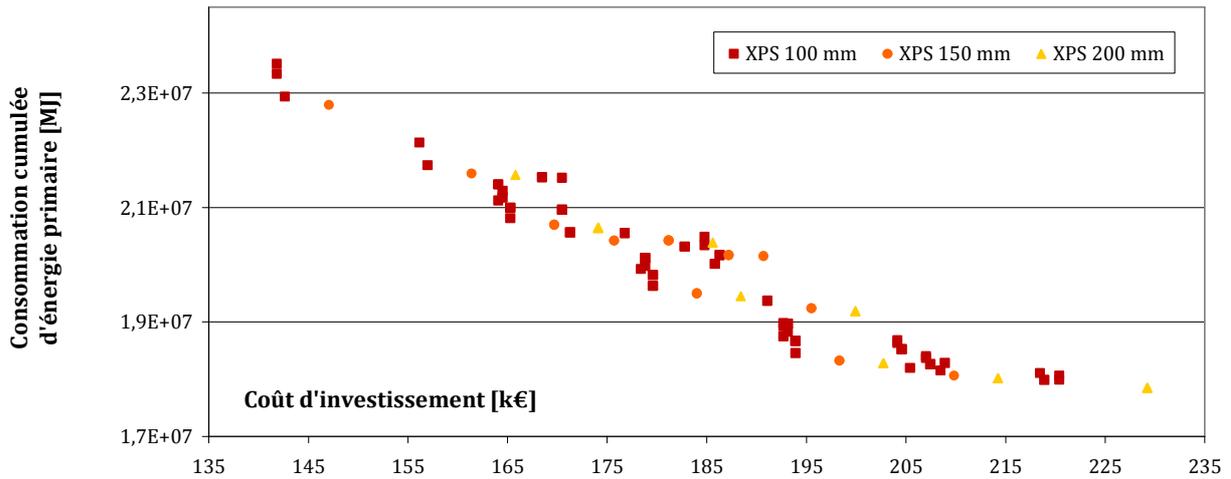


Figure 149. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur le **PLANCHER BAS**  
Compromis entre **coût d'investissement** et **consommation cumulée d'énergie primaire**

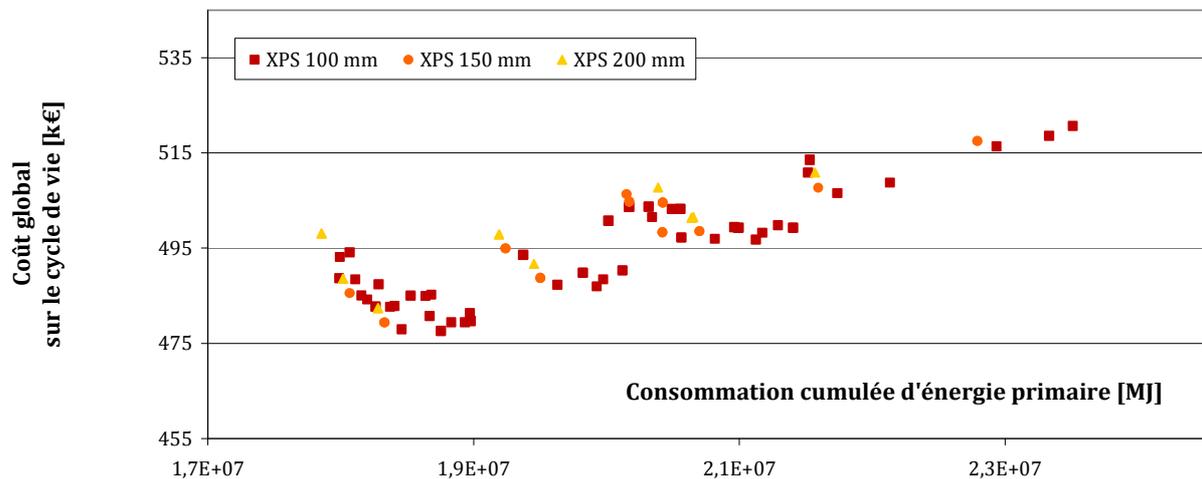


Figure 150. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur le **PLANCHER BAS**  
Compromis entre **consommation cumulée d'énergie primaire** et **coût global sur le cycle de vie**

Concernant l'isolation du plancher bas, les 3 variantes de réhabilitation proposées sur l'espace de recherche sont représentées sur le front admissible (Figure 149, Figure 150). L'association d'une ITE à base de 100mm de polystyrène extrudé à un ensemble cohérent de mesures complémentaires permet de constituer des stratégies minimisant le coût global sur le cycle de vie. Sur l'espace de recherche étudié, le niveau d'isolation du plancher bas semble peu déterminant tant le niveau minimum permet d'atteindre une large gamme de performance énergétique.

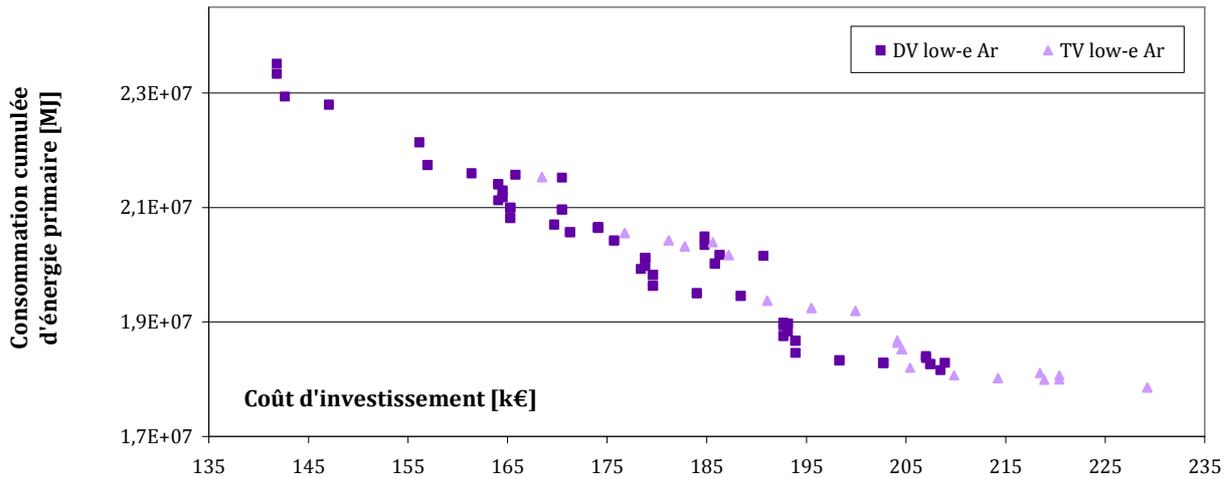


Figure 151. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les **OUVERTURES**  
Compromis entre **coût d'investissement** et **consommation cumulée d'énergie primaire**

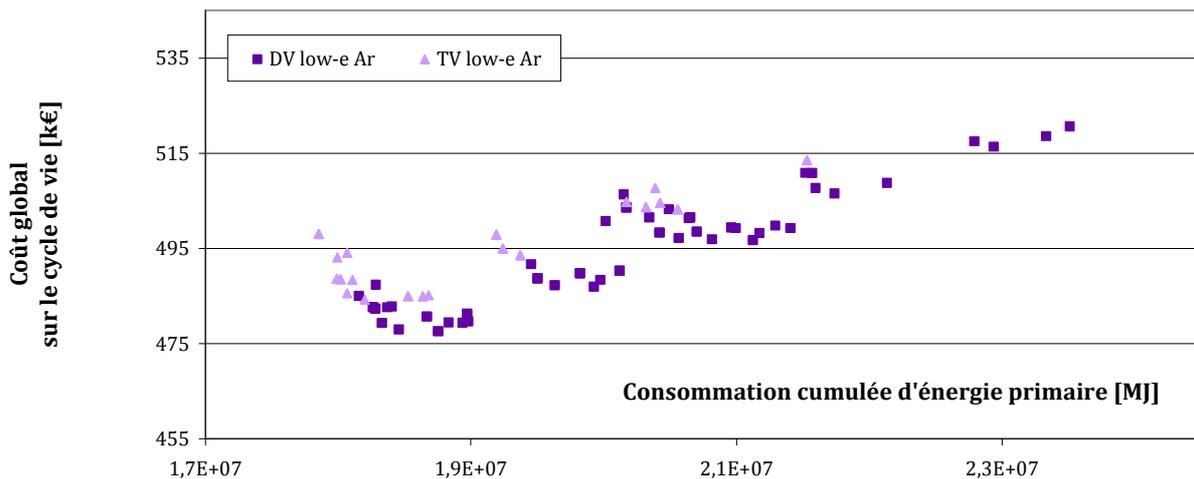
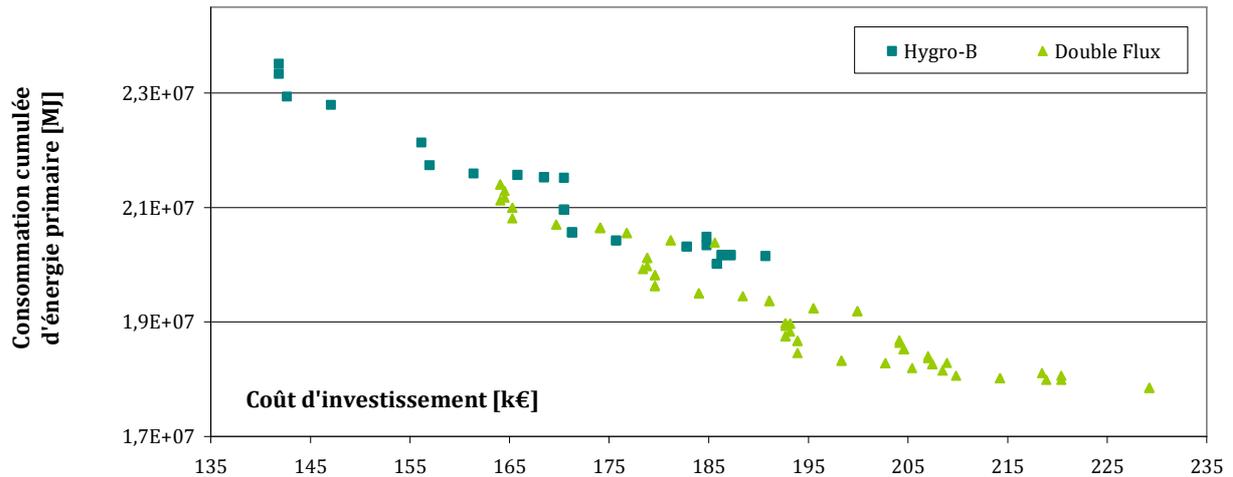


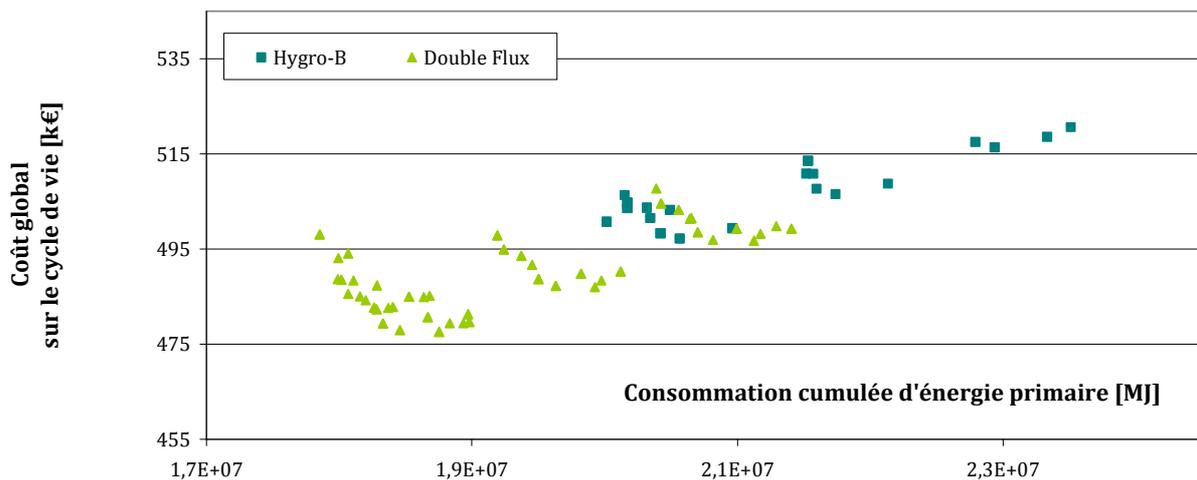
Figure 152. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les **OUVERTURES**  
Compromis entre **consommation cumulée d'énergie primaire** et **coût global sur le cycle de vie**

Les Figure 151 et Figure 152 illustrent les variantes de réhabilitation en termes de type d'ouvertures mises en œuvre par les solutions admissibles non-dominées de la génération 200. Dans cette étude de cas, le vitrage posé en réhabilitation est le même sur toutes les façades du bâtiment à réhabiliter, quelle que soit leur orientation.

Les stratégies de réhabilitation énergétique séquentielles les plus efficaces en termes de performance énergétique mettent en œuvre le triple vitrage basse émissivité à lame argon (Figure 151). Cependant, on note que l'intégration de ces composants est associée à des coûts d'investissement nettement supérieurs (Figure 151), non compensés sur la poursuite du cycle de vie (Figure 152). Ce résultat est évidemment à considérer au regard du scénario d'évolution du coût des énergies ici introduit.



**Figure 153. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la VENTILATION**  
Compromis entre **coût d'investissement** et **consommation cumulée d'énergie primaire**



**Figure 154. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la VENTILATION**  
Compromis entre **consommation cumulée d'énergie primaire** et **coût global sur le cycle de vie**

En optimisation sous contraintes de financement comme en optimisation libre, la segmentation de l'ensemble des solutions admissibles non-dominées à partir du type de ventilation mis en œuvre en réhabilitation fait apparaître une distinction assez nette entre :

- Les solutions performantes énergétiquement et en coût global, qui mobilisent une ventilation double flux ;
- Et les solutions à faible coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation) qui emploient systématiquement une ventilation de type hygro-B.

Ce résultat demeure cependant à interpréter au regard de l'ensemble des hypothèses retenues dans le modèle de cycle de vie associé au bâtiment (dont les débits de ventilation équivalents aux deux techniques).

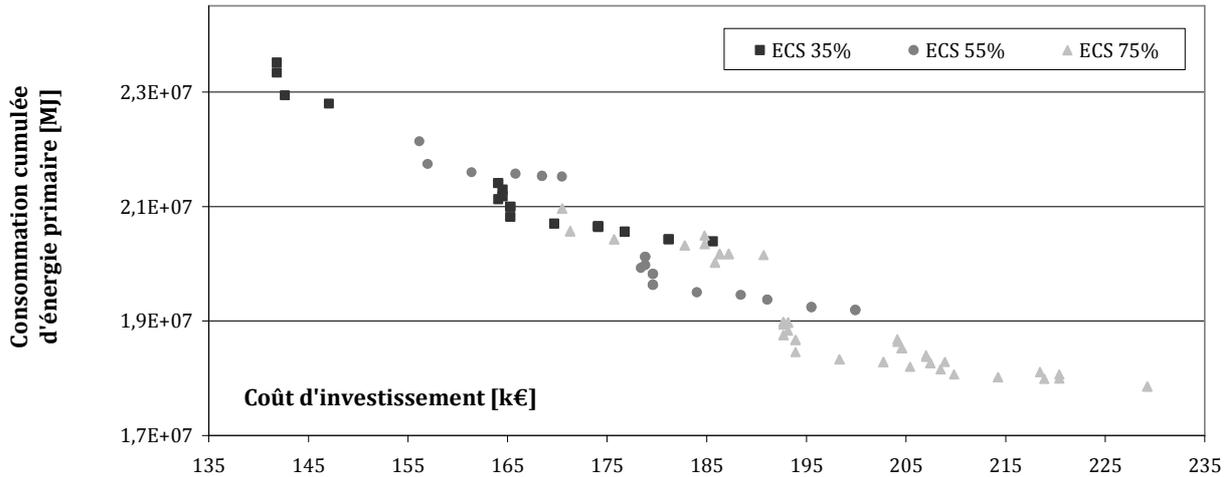


Figure 155. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la **PRODUCTION D'ECS**  
Compromis entre **coût d'investissement** et **consommation cumulée d'énergie primaire**

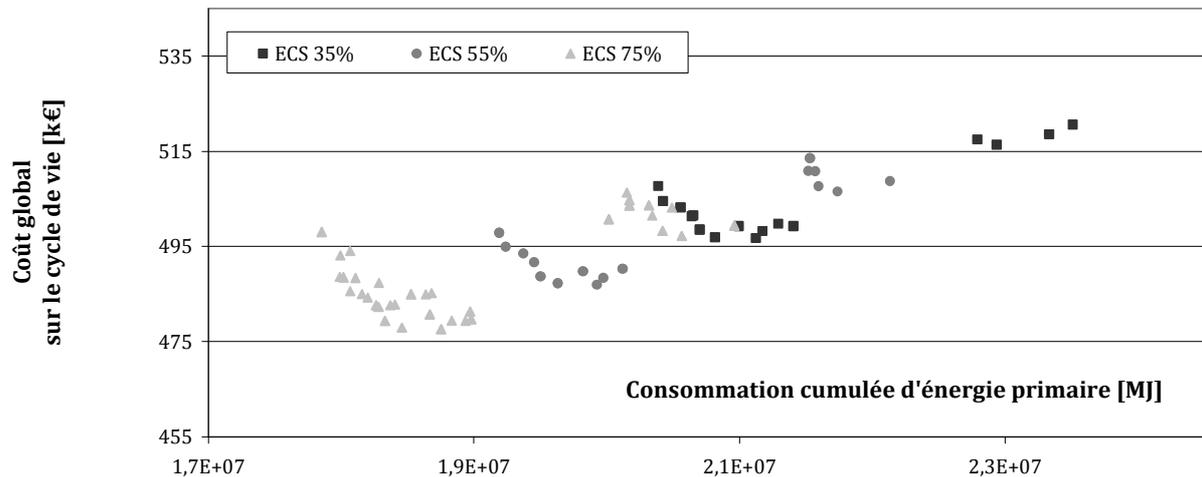


Figure 156. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la **PRODUCTION D'ECS**  
Compromis entre **consommation cumulée d'énergie primaire** et **coût global sur le cycle de vie**

De la même manière, on observe une segmentation relativement claire des stratégies admissibles non-dominées à partir des variantes de fraction solaires intégrées pour la production d'ECS (Figure 155 et Figure 156).

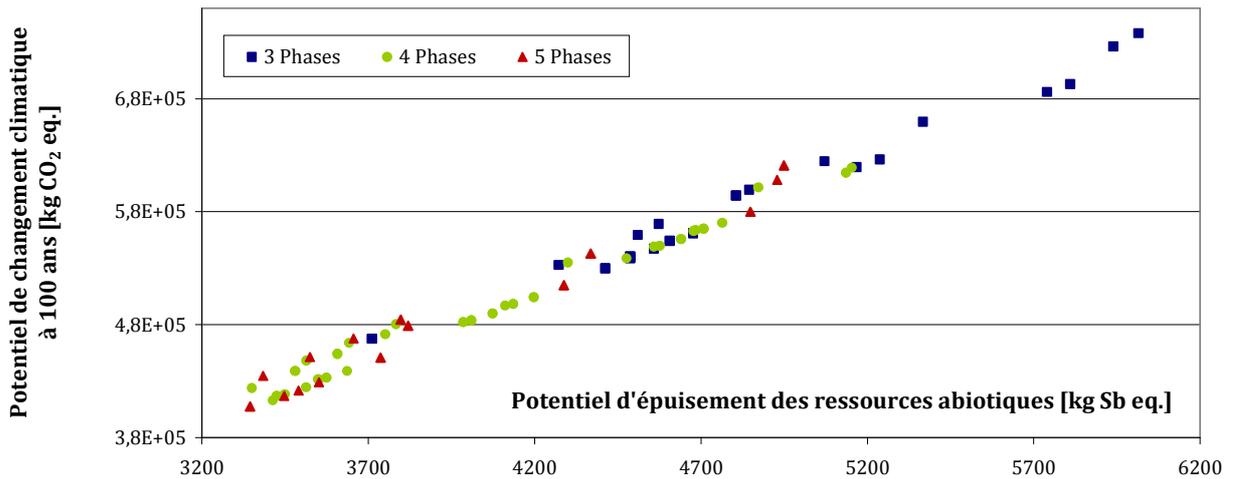
En conclusion, l'étude de la répartition des variantes de réhabilitation sur les stratégies admissibles non-dominées ne fait pas apparaître ici de différences significatives par rapport aux cas précédents, où l'optimisation n'intégrait pas de contraintes sur les capacités d'investissement à chaque phase d'intervention.

Les analyses précédentes ont mis en évidence qu'aucune des solutions identifiées n'employait un niveau d'isolation de résistance thermique supérieur à  $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  sur la toiture. Evitons cependant de sur-interpréter cette remarque ; les algorithmes génétiques sont des techniques approchées, aussi nous ne pouvons pas garantir à ce stade que des niveaux d'isolation thermique supérieurs en toitures ne permettraient pas de formuler des solutions efficaces du problème.

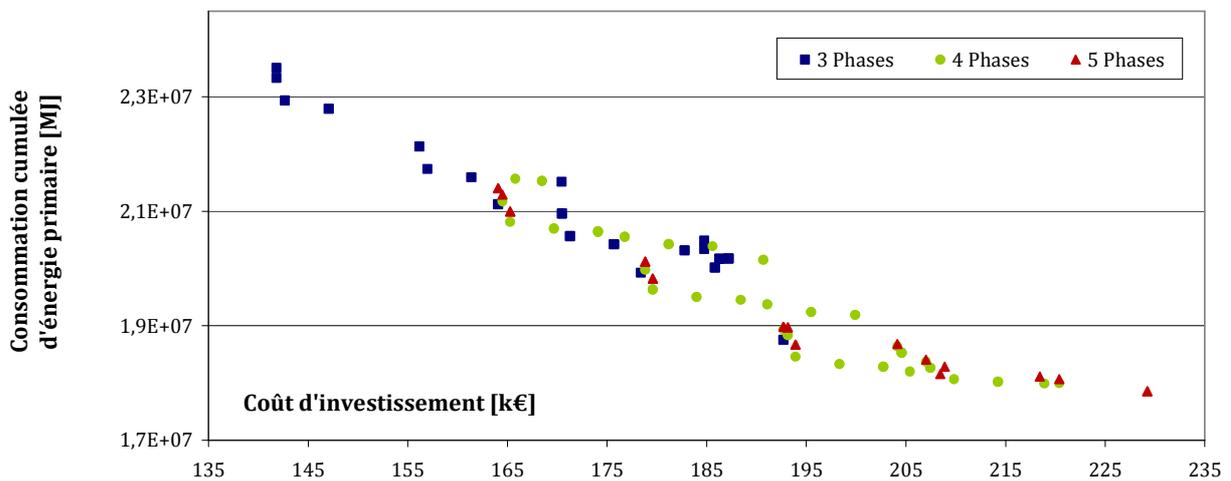
#### 4.5.4.2 Nombre de phases de réhabilitation

Les programmes de réhabilitation étudiés sont caractérisés par leur composition et leur phasage. La section précédente a apporté un éclairage sur la composition des solutions admissibles identifiées. Nous analysons à présent les solutions efficaces admissibles, en termes de phasage des interventions de réhabilitation.

Les figures ci-dessous représentent ainsi les solutions admissibles non-dominées identifiées à la génération 200, suivant le nombre de phases de réhabilitation qu'elles imposent.



**Figure 157. Solutions efficaces admissibles et nombre de phases de réhabilitation**  
**Compromis entre potentiel d'épuisement des ressources et potentiel de changement climatique**



**Figure 158. Solutions efficaces admissibles et nombre de phases de réhabilitation**  
**Compromis entre coût d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire**

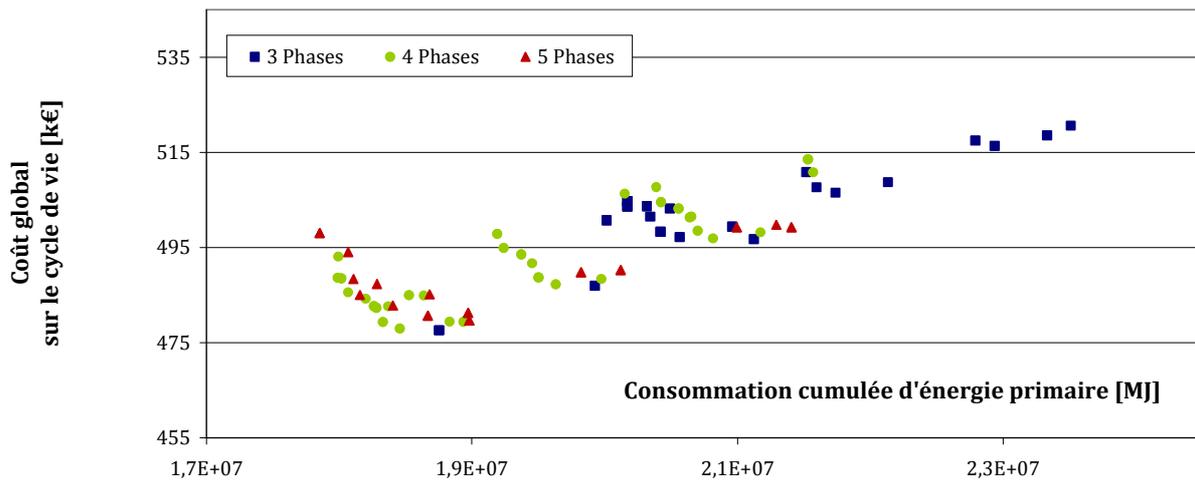


Figure 159. Solutions efficaces admissibles et nombre de phases de réhabilitation  
Compromis entre **consommation cumulée d'énergie primaire** et **coût global sur le cycle de vie**

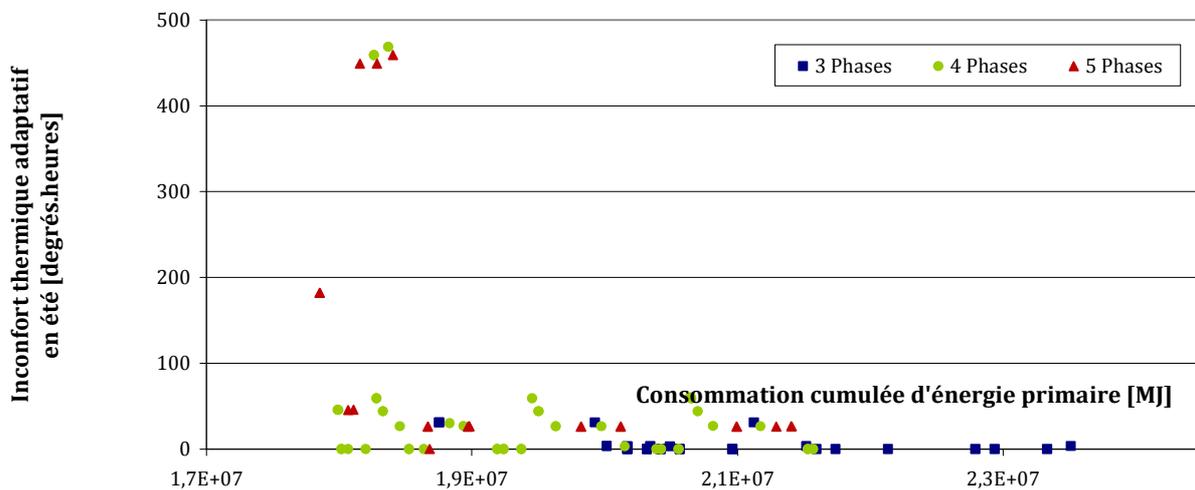


Figure 160. Solutions efficaces admissibles et nombre de phases de réhabilitation  
Compromis entre **consommation d'énergie primaire** et **inconfort thermique adaptatif en été**

Il est intéressant de noter que les programmes de réhabilitation concentrant l'ensemble des interventions sur 3 phases présentent globalement des performances moindres en termes réduction du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (Figure 157), du potentiel de changement climatique à 100 ans (Figure 157), de consommation cumulée d'énergie primaire (Figure 160), de coût global sur la poursuite du cycle de vie (Figure 159). Cette remarque est vérifiée en particulier pour les programmes dont le coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation) est inférieur à 165 k€ (Figure 158).

En effet, ces programmes mettent en œuvre des niveaux d'isolation thermique moindres, des composants et des équipements les moins efficaces sur l'espace de recherche. Par conséquent, ils imposent des coûts d'investissement moindres et permettent de rassembler avantageusement l'ensemble des interventions sur un nombre réduit de phases de réhabilitation, ici 3.

Réciproquement, certaines des solutions imposant 5 phases de réhabilitation présentent quant-à elles les meilleures performances en réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire

(Figure 158), du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (Figure 157) ou du potentiel de changement climatique à 100 ans (Figure 157).

Globalement, et en termes de tendance, on observe que plus les mesures mises en œuvre sont efficaces en termes énergétiques et environnementaux, plus les coûts d'investissement associés sont importants et plus le nombre de phases d'interventions tend logiquement à augmenter.

#### 4.5.4.3 Saturation des contraintes

Enfin, les stratégies de réhabilitation énergétique séquentielle étudiées dans les sections précédentes sont les solutions efficaces admissibles d'un problème d'optimisation multicritère sous contraintes. Aussi, nous nous intéressons aux valeurs prises par les différentes solutions sur les contraintes imposées.

Pour rappel, ces contraintes représentent les capacités d'investissement pouvant être engagées à chacune des phases de financement. Elles ont été fixées à 70 k€ (environ 90€/m<sup>2</sup> et par phase de réhabilitation), indépendamment de la phase considérée. Ce plafond garantit que chacune des mesures de l'espace de recherche puisse être considéré à chacune des phases de réhabilitation ; toutes représentant un investissement inférieur ou égal à 70 k€.

Les figures ci-dessous représentent les montants d'investissements à chacune des phases de réhabilitation pour l'ensemble des solutions efficaces admissibles identifiées à la génération 200. Comme l'a mis en évidence la section précédente, certaines stratégies définissent 3 phases d'interventions, les autres nécessitant 4 ou 5 étapes. Suivant le nombre de phases nécessaires à la mise en œuvre du programme de réhabilitation (3, 4 ou 5), ces solutions sont représentées sur les Figure 161, Figure 162 et Figure 163, respectivement.

Sur ces figures, les performances (sur les contraintes de financement) d'une solution efficace admissible donnée sont représentées par la séquence des montants d'investissement à chacune des phases de réhabilitation. Par exemple, sur la Figure 161, les montants d'investissement à chaque phase d'une solution particulière en 3 étapes sont représentés en bleu clair. Ces investissements représentent séquentiellement 66,1 k€, 66,6 k€ et 45,6 k€ sur les phases 1, 2 et 3 respectivement du programme de réhabilitation énergétique.

On vérifie ainsi que toutes ces solutions sont admissibles : quelle que soit la solution et la phase de réhabilitation considérées, le coût d'investissement est bien inférieur à la contrainte : 70 k€.

De plus, il apparaît que :

- Quel que soit le nombre de phases de réhabilitation nécessaires (3, 4 ou 5), la contrainte sur la première phase est proche de la saturation. Les montants d'investissement cumulés sur la première phase atteignent en moyenne 60 k€ ;
- Les programmes de réhabilitation en 3 phases exploitent relativement bien les capacités budgétaires disponibles à chaque phase. Dans aucun cas, le reliquat sur la capacité d'investissement à une phase donnée ne permet de financer l'ensemble des actions de réhabilitation de la phase suivante ;

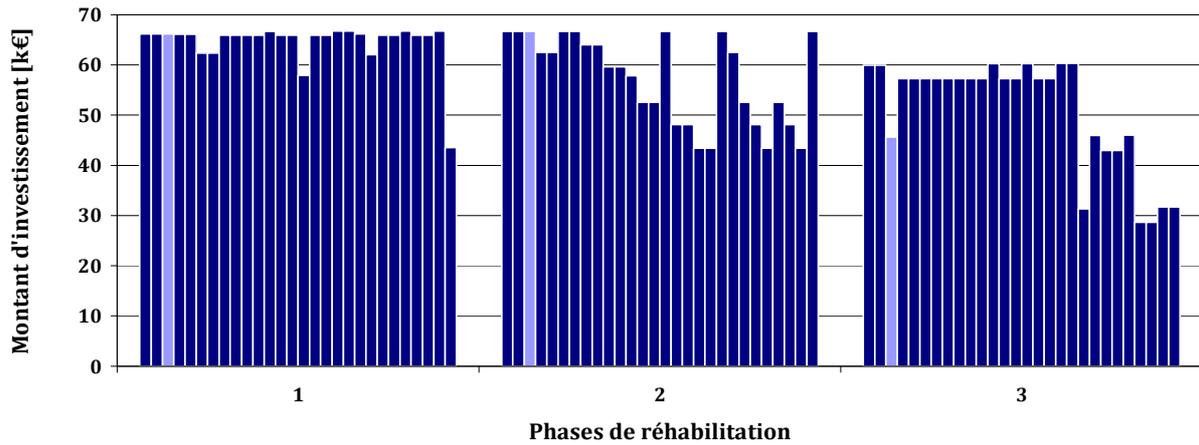


Figure 161. Montants d'investissement à chaque phase de réhabilitation pour les solutions efficaces admissibles (génération 200) comportant **3 PHASES** de réhabilitation

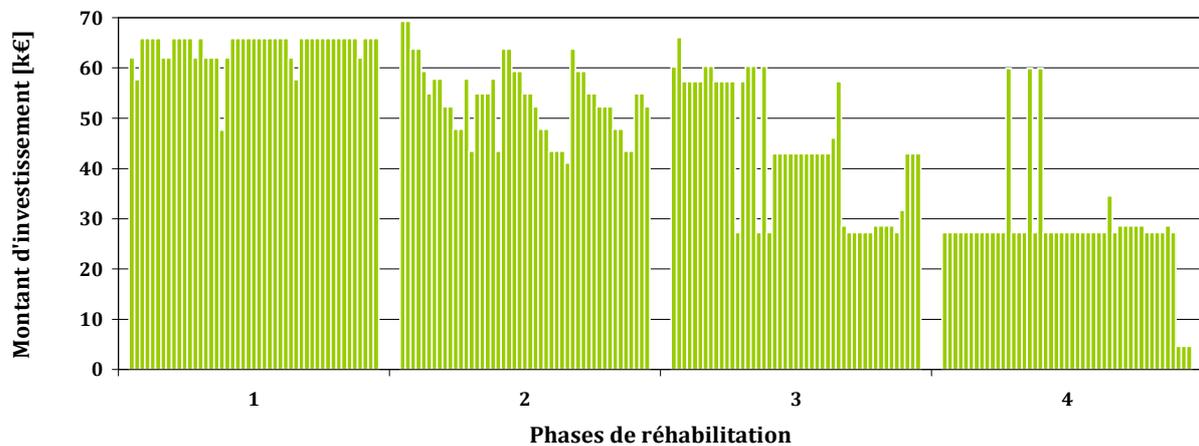


Figure 162. Montants d'investissement à chaque phase de réhabilitation pour les solutions efficaces admissibles (génération 200) comportant **4 PHASES** de réhabilitation

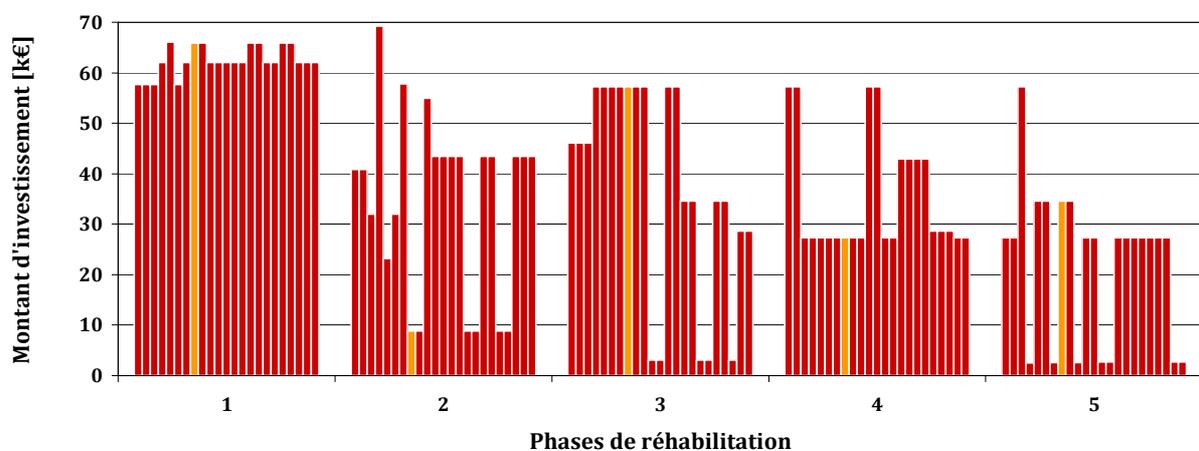


Figure 163. Montants d'investissement à chaque phase de réhabilitation pour les solutions efficaces admissibles (génération 200) comportant **5 PHASES** de réhabilitation

- En revanche, on observe pour un certain nombre de solutions imposant 4 ou 5 phases d'interventions que la remarque précédente n'est pas vérifiée ; le reliquat sur la capacité d'investissement à une phase donnée permettrait de financer les actions de réhabilitation programmées pour la phase suivante. Par exemple, pour la stratégie de réhabilitation représentée en orange sur la Figure 163, le reliquat sur la capacité d'investissement en phase 2 permet de financer les actions de la phase 3.

Les solutions non-dominées identifiées à la génération 200 ne sont donc pas toutes des solutions efficaces du problème ; « l'algorithme n'a pas encore convergé ».

Notons toutefois que, dans cette étude de cas, les phases d'interventions sont arbitrairement séparées d'une année. Le report d'une année de certaines actions implique alors une variation limitée des performances du programme, par rapport aux 50 années de poursuite du cycle de vie, en particulier lorsqu'un certain nombre de mesures de réhabilitation a déjà été mis en œuvre.

La mise en œuvre de l'algorithme génétique sous contraintes permet donc d'identifier les stratégies de réhabilitation séquentielle satisfaisant aux contraintes budgétaires à chaque phase de financement. Les capacités d'investissement sont largement mobilisées, en particulier sur les premières phases de réhabilitation. Les analyses précédentes soulignent néanmoins l'importance de travailler sur des populations de grande taille et évoluant sur davantage de générations pour tendre vers les solutions efficaces du problème.

## 4.6 Conclusion

La réalité opérationnelle des projets de réhabilitation imposant des contraintes budgétaires sur les investissements, ce chapitre a présenté une approche de prise en compte de ces contraintes, exprimées sous la forme d'un calendrier de financement pluriannuel, dans la recherche de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments.

L'introduction et le traitement des contraintes en optimisation génétique multicritère constituent une problématique complexe ayant fait l'objet de nombreux travaux de recherche au niveau académique. La préservation du caractère multicritère de la méthode d'optimisation – permettant l'identification d'une surface de compromis – nous a conduit à développer une approche basée sur le tournoi sous contraintes, mobilisant également la réparation de solutions non-admissibles et une loi d'évolution sur le nombre de ces solutions au sein de la population courante.

La méthode proposée a été utilisée pour mener une étude de cas sur la barre Grimaud. L'évolution générationnelle des solutions admissibles et d'un nombre contrôlé d'individus non-admissibles ont permis l'identification de solutions de réhabilitation admissibles de bonne qualité ainsi que la description d'une surface de compromis.

Dans cette étude de cas, sous condition de respect des contraintes sur l'investissement, plusieurs mesures de réhabilitation peuvent être mises en œuvre lors de la même phase d'intervention. Etant donné le niveau de contrainte fixé à 70 k€ par phase, indépendamment de la phase :

- La stratégie minimisant le coût global sur 50 ans commence par réduire les besoins de chaleur par la réhabilitation de l'enveloppe avant de considérer le remplacement des équipements.
- Suivant les coûts d'investissements associés aux mesures mises en œuvre, les programmes de réhabilitation identifiés définissent 3, 4 ou 5 phases d'interventions sur le bâtiment à réhabiliter.
- De par leur nature, les solutions identifiées sous contraintes de financement semblent peu différentes de celles identifiées en optimisation multicritère libre (Chapitre 2 et Chapitre 3), au phasage des travaux près.

D'autres approches prometteuses d'optimisation multicritère sous contraintes pourraient être construites, notamment à partir de la réparation des enfants non-admissibles.

## 4.7 Perspectives

L'étude de cas réalisée a permis de mettre en évidence certaines des limitations de l'outil d'optimisation, en son état actuel de développement.

Ainsi, différentes interactions – physiques ou économiques – mériteraient d'être explicitement intégrées à la recherche opérationnelle de solutions efficaces.

Par exemple, l'isolation thermique des façades, le remplacement des fenêtres et le traitement de la ventilation interviennent souvent, en pratique, lors de la même phase de travaux, notamment pour réduire les coûts de mise en œuvre (dont ceux liés aux échafaudages). A ce stade, si le coût de mise en œuvre de chaque mesure de réhabilitation est intégré, il demeure néanmoins indépendant de la combinaison de mesures considérée lors d'une phase donnée d'intervention.

L'intégration de ces interactions dans les fonctions objectifs ou l'introduction de règles expertes sur la composition et le phasage des programmes de réhabilitation permettraient donc une recherche plus proche des conditions de l'opérationnel.

Par ailleurs, en tant qu'extension des approches précédentes au cas de l'optimisation sous contraintes de financement, ce Chapitre s'est logiquement focalisé sur l'échelle du bâtiment.

Néanmoins, la problématique d'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle, sous contraintes de financement, se pose également de manière aiguë à l'échelle des parcs existants. Ainsi, dans le cas d'un parc bâti, il serait particulièrement intéressant de positionner sur une surface de compromis, différentes stratégies intuitives telles que :

- Réhabilitation du parc, séquentiellement par bâtiment (bâtiment B1, puis B2, etc.) ;
- Réhabilitation du parc, séquentiellement par mesure ou groupe de mesures de réhabilitation énergétique, sur les différents bâtiments (isolation de l'enveloppe, puis...) ;
- Réhabilitation du parc, par allocation d'un budget par bâtiment et par phase.

Ces travaux de thèse ne traitent pas en l'état de l'optimisation sous contraintes à l'échelle des parcs de bâtiments. Cependant, les méthodes présentées dans ce Chapitre, associées à une représentation génétique d'un programme de réhabilitation à l'échelle d'un parc, permet de conduire

la recherche de stratégies efficaces sous contraintes de financement, et l'identification d'une surface de compromis pour le problème.

Le Chapitre 5 détaille ainsi une telle représentation et la recherche libre de programmes de réhabilitation énergétique séquentielle, à l'échelle des parcs de bâtiments.

## Chapitre 5

# Vers la réhabilitation énergétique séquentielle d'un parc de bâtiments existants

---

*Au sein de ces travaux de thèse, ce chapitre vise à dépasser l'échelle du bâtiment pour s'intéresser aux stratégies de réhabilitation énergétique des parcs bâtis existants. Les méthodes d'optimisation multicritère – développées précédemment à l'échelle du bâtiment – sont alors étendues pour permettre d'identifier des programmes efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle à l'échelle des parcs. Objets de recherche, les parcs bâtis sont régulièrement segmentés en typologies de bâtiments, pour réduire la complexité du problème. La définition de ces typologies a des implications considérables et mérite d'être questionnée. L'optimisation multicritère peut alors permettre de porter un regard différent sur la problématique. Des études de cas simplifiées viennent enfin étayer les approches proposées.*

---

## Plan du chapitre 5

5.1	Introduction	291
5.2	De la réhabilitation de bâtiment à la gestion de parc	292
5.2.1	Approches de modélisation des parcs de bâtiments	292
5.2.2	Optimisation génétique multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des parcs de bâtiments	298
5.2.3	Etude de cas	307
5.2.4	Conclusion	320
5.3	Typologies de bâtiment et réhabilitation énergétique	321
5.3.1	Introduction	321
5.3.2	Approches traditionnelles de typologie	322
5.3.3	Optimisation multicritère et typologies de bâtiments en réhabilitation énergétique	329
5.3.4	Etude de cas	330
5.3.5	Conclusion sur les typologies de bâtiments en réhabilitation	349
5.4	Conclusion	349

## 5.1 Introduction

A l'échelle du bâtiment, l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle ainsi que la description des compromis accessibles peuvent s'appuyer sur les approches par algorithmes génétiques ou par programmation dynamique, proposées dans les chapitres précédents. Ces méthodes d'optimisation multicritère contribuent alors à l'aide à la décision sur la définition de programmes systémiques de réhabilitation énergétique, constitués à partir de séquences cohérentes d'interventions complémentaires.

Cependant, les enjeux de demain, qu'ils soient énergétiques, environnementaux, économiques ou sociétaux, commandent de dépasser l'échelle du bâtiment. Au vu des taux moyens annuels de renouvellement du parc (inférieurs à 1%, en Europe occidentale), la réhabilitation de l'existant est évidemment une priorité pour tenter d'atteindre des objectifs environnementaux comme le Facteur 4. Contribuer à son efficacité suppose cependant d'identifier et de planifier les interventions dans le temps, à l'échelle des parcs, qu'ils soient publics ou privés.

Les problématiques de gestion de parc ne sont pas des sujets récents pour la recherche opérationnelle. Elles trouvent un écho direct auprès d'un certain nombre d'acteurs du secteur du Logement, tels que les bailleurs sociaux. Certains sont d'ailleurs responsables de la gestion patrimoniale de plusieurs dizaines de milliers de logements (par exemple, la Régie Immobilière de la Ville de Paris). L'introduction des dimensions énergétique et environnementale suppose de revisiter les stratégies traditionnelles de gestion des parcs.

Dans le cadre du projet CIBLE de la Fondation Bâtiment Energie, de nombreux échanges nous ont permis de saisir les enjeux de la réhabilitation énergétique, dans son déploiement sur un parc et sur le long terme, pour des acteurs comme les bailleurs sociaux. La planification des actions de réhabilitation énergétique est une problématique complexe, qui doit également se placer en cohérence avec les demandes des occupants à court terme, les interventions d'entretien et de maintenance, les réponses urgentes aux dégradations volontaires ou physiques des espaces.

Dans une perspective plus globale, notons bien enfin que le patrimoine construit représente un capital économique, physique, social et culturel considérable à l'échelle d'une nation (Kohler et Hassler, 2002). Ce capital doit donc être préservé et maintenu dans le temps. La composante énergétique ne constitue évidemment qu'un pan des stratégies de conservation.

Ce chapitre présente une approche d'aide à la décision, basée sur un algorithme génétique, pour l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle, à l'échelle des parcs. Il propose également quelques réflexions sur la problématique des typologies de bâtiment en réhabilitation énergétique. Ces développements sont détaillés dans les sections suivantes.

## 5.2 De la réhabilitation de bâtiment à la gestion de parc

Les parcs de bâtiments ont fait l'objet de différentes approches de modélisation, visant à en décrire le comportement et à caractériser les évolutions face à des scénarios donnés. A partir d'une revue des travaux actuels, une approche d'aide à la décision pour l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle est proposée à l'échelle du parc. Celle-ci se base sur l'optimisation multicritère par algorithme génétique. L'algorithme développé est ensuite appliqué à l'étude d'un parc composé de deux bâtiments simplifiés.

### 5.2.1 Approches de modélisation des parcs de bâtiments

Dans un contexte où des améliorations rapides et significatives sont attendues en termes de performance énergétique et de réduction des impacts sur l'Environnement des bâtiments existants, l'élaboration de stratégies de réhabilitation, l'orientation et l'évaluation des politiques publiques réclament des modèles précis et robustes de parcs immobiliers permettant de répondre à différents questionnements (Kavgic et al. 2010), par exemple :

- L'évaluation dynamique de la demande énergétique du parc ;
- L'exploration des implications techniques et économiques d'une stratégie ;
- L'évaluation des effets de la performance énergétique et de la réduction des émissions sur la qualité des ambiances intérieures, du confort, etc.

Au cours des dernières années, de nombreux modèles d'évolution des parcs immobiliers ont ainsi été développés. Répondant à différentes problématiques, dans différents contextes géographiques et d'usage, les modèles construits font logiquement apparaître des différences en termes d'exigences sur les données d'entrée, de segmentation adoptée sur les parcs, d'hypothèses socio-économiques induites et donc nécessairement de résultats.

La construction de ces modèles de parcs de bâtiments, s'intéressant à leur performance énergétique ou à leur bilan environnemental, procède généralement de deux types d'approches :

- Approches descendantes ("Top-down") ;
- Approches ascendantes ("Bottom-up").

La Figure 164 présente l'architecture générale de ces modèles par approches descendante ou ascendante. Suivant les données de départ (données macroéconomiques sur le parc ou spécification détaillée de composants sur des bâtiments étudiés) et les questions posées, ces modèles parcourent les différentes échelles du système « parc de bâtiments » depuis celle des composants vers celle du parc (approche ascendante ou "bottom-up") ou inversement depuis l'échelle globale vers une vision plus détaillée (approche descendante ou "top-down").

Les sections suivantes s'appuient sur la Figure 164 pour préciser ces deux approches de modélisation des parcs de bâtiments en termes de structure et d'objectifs, en donnent quelques exemples et identifient les avantages et inconvénients, suivant les cas. Des éléments complémentaires sont apportés par la revue bibliographique conduite par Swan et Ugursal (2009).

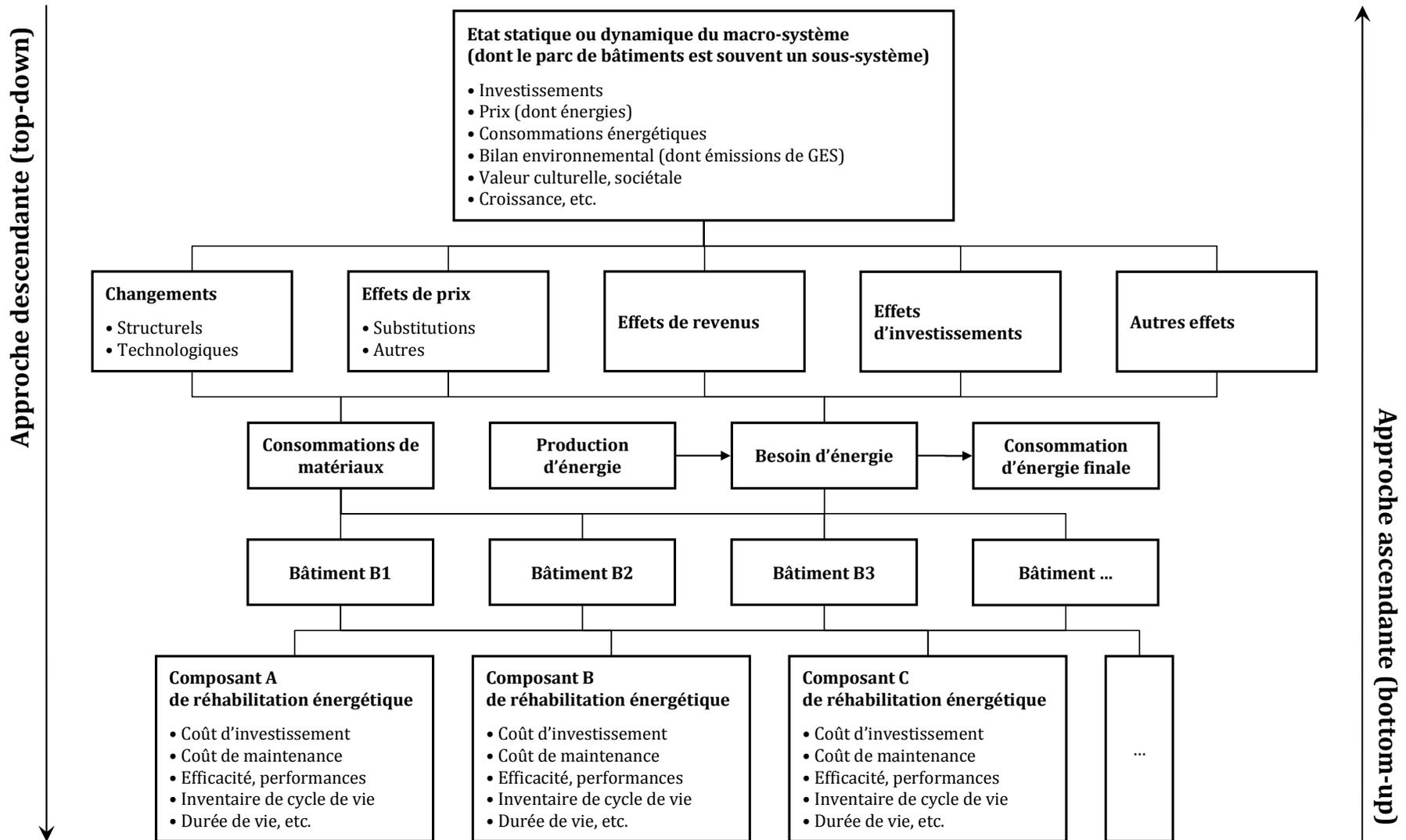


Figure 164. Approches ascendantes et descendantes de modélisation énergétique des parcs de bâtiments (adapté de Kavgic et al., 2010)

Caractéristique	Descendant (Top-down)	Ascendant statistique (Bottom-up statistical)	Ascendant de physique du bâtiment (Bottom-up building physics)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modélisation des interactions entre les secteurs de l'Energie et de l'Economie, au sens large : relations entre différents paramètres économiques et la demande en énergie, par exemple</li> <li>▪ Utilisation de données économiques agrégées</li> <li>▪ Capacité à modéliser l'influence de différentes stratégies ou politiques socio-économiques sur les économies d'énergie ou la réduction des impacts environnementaux (émissions de GES)</li> <li>▪ Ne nécessite pas de description détaillée des technologies</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intégration d'effets macro-économiques et socio-économiques</li> <li>▪ Capacité à évaluer les consommations d'énergie finales, par exemple</li> <li>▪ Simple à développer et utiliser</li> <li>▪ Ne nécessite pas de données détaillées mais uniquement des factures et informations statistiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intégration d'une description détaillée des technologies actuelles mise en œuvre et prospectives</li> <li>▪ Utilisation de données mesurables</li> <li>▪ Potentiel d'évaluation de politiques publiques visant des cibles précises</li> <li>▪ Evaluation quantitative de l'influence de combinaisons de technologies sur la demande en énergie</li> <li>▪ Capacité à identifier des stratégies efficaces sur le plan technico-économique pour atteindre des cibles d'économies d'énergie</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Construction de projections futures à partir des évolutions passées, robuste de l'approche limitée face aux changements de nature socio-économique ou technologique</li> <li>▪ Pas d'information sur les technologies mise en œuvre et donc peu adapté à l'analyse de stratégies reposant sur des technologies</li> <li>▪ Repose sur l'hypothèse d'efficience des marchés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Offre des réponses limitées, à la flexibilité limitée</li> <li>▪ Faible capacité de modélisation de l'influence de mesures portant sur les économies d'énergie</li> <li>▪ Construction à partir de statistiques passées de consommation, limitant la robustesse des conclusions en cas d'évolution des modes de vie ou des techniques</li> <li>▪ Requiert un échantillonnage statistique relativement large</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Description généralement pauvre des interactions économiques : pas de prise en compte des interactions entre les consommations d'énergie et l'activité macro-économique</li> <li>▪ Nécessite des volumes conséquents de données physiques</li> <li>▪ Pas de détermination des comportements sur la base du modèle mais introduction par des hypothèses externes sous la forme de scénarios</li> </ul>

**Tableau 36. Avantages et inconvénients des approches ascendantes et descendantes de modélisation énergétique des parcs de bâtiments (traduit de Kavgić et al., 2010).**

### 5.2.1.1 Approches descendantes : Top-down

#### Principe des approches descendantes

Les **approches descendantes** (ou « top-down ») sont construites à partir d'un niveau agrégé d'information, telle que les consommations énergétiques d'un pays ou d'une grande agglomération. Sur la Figure 164, ce niveau d'information est présenté dans la partie supérieure du graphe, définissant l'état du système global « parc de bâtiments ».

Selon Kavcic et al. (2010), ces modèles explorent notamment les relations entre le secteur de l'Energie et celui de l'Economie au sens large. Par exemple, ils peuvent chercher à caractériser l'influence de paramètres macroéconomiques comme le prix des énergies sur les consommations et les décisions individuelles, à l'échelle des actions de rénovation entreprises par les propriétaires. Ces modèles suivent la décomposition descendante de la Figure 164, depuis le niveau général (en haut de la figure) jusqu'aux éléments particuliers (en bas de la figure : idéalement choix des composants de réhabilitation énergétique, par exemple).

#### Modèles économétriques et technologiques

Parmi les approches descendantes, on distingue les modèles économétriques et les modèles technologiques, construits à partir de variables différentes.

Les modèles économétriques se concentrent sur des paramètres comme l'évolution des prix des énergies, le PIB, le revenu moyen, etc. Comme le rappelle le Tableau 36, ils ne s'intéressent généralement pas au détail des options technologiques actuelles ou futures, préférant se focaliser sur les tendances macro-économiques et les corrélations avec les données historiques. Aussi, ils établissent alors difficilement le lien entre tendances macro-économiques et facteurs physiques propres aux bâtiments, influençant pourtant largement les consommations énergétiques (MIT, 1997). De plus, ils sont souvent construits à partir d'évolutions statistiques passées, ce qui les expose intrinsèquement au risque d'être brutalement disqualifiés en cas de transition énergétique, de changement socio-économique ou des modes de vie profond.

Les modèles descendants technologiques introduisent quant-à eux des facteurs portant sur le progrès technologique, les taux de pénétration des technologies, des changements structurels sur la production d'énergie, des effets de saturation, par exemple (Johnston, 2003). Dans une perspective de développement durable, ils sont particulièrement intéressants en support des réflexions prospectives, par l'introduction de degrés de libertés sur les changements.

#### Exemple de modèle descendant

Le modèle ADEPT (Annual Delivered Energy Price and Temperature) a été développé pour modéliser la consommation énergétique annuelle des ménages en Grande Bretagne depuis 1970 (Summerfield et al., 2010). Ce modèle établit une corrélation les consommations énergétiques de chauffage des ménages et deux facteurs macros : l'évolution des températures extérieures pendant la saison de chauffe et les prix de l'énergie (ajustés de l'inflation). Ces travaux visent notamment à pouvoir analyser les consommations énergétiques en termes d'amélioration des constructions, indépendamment des fluctuations climatiques annuelles et de celles des prix des énergies.

### 5.2.1.2 Approches ascendantes

#### Principe des approches ascendantes

Contrairement aux modèles descendants, les **approches ascendantes** (ou “bottom-up”) sont construites à partir d'un niveau désagrégé d'information, sur les sous-systèmes du système global. Elles mobilisent d'importantes bases de données pour recomposer les performances des systèmes globaux complexes, sur la base de leurs composants élémentaires, éventuellement en interaction (Shorrock et Dunster, 1997). Ces modèles peuvent être utilisés pour identifier les technologies les plus prometteuses en termes de réduction au niveau global de dépenses financières, de consommations d'énergie ou de bilan environnemental (Rivers et Jaccard, 2005).

Sur la Figure 164, et suivant l'approche ascendante, le détail des composants de réhabilitation mis en œuvre sur différents bâtiments, permet d'évaluer les consommations énergétiques de chaque bâtiment, puis de les agréger sur la parc au niveau municipal, régional ou national, par exemple.

Parmi les approches ascendantes sur les parcs de bâtiments, on distingue les modèles de physique du bâtiment et les démarches statistiques, présentés ci-dessous.

#### Approches statistiques

En dépit de la large variété des modélisations par approche statistique “bottom-up” (Swan et Ugursal, 2009), la plupart des modèles sont fondés sur des techniques de régression.

Par exemple, ces approches peuvent être construites à partir de l'analyse de factures. Elles modélisent alors l'évolution des consommations énergétiques des bâtiments en fonction d'une donnée sur le climat moyen mensuel (Méthode PRISM, Fels, 1986).

Cependant, basées sur les données statistiques des mois ou années précédents, et d'introduisant pas de paramètres physiques, ces modèles peuvent difficilement simuler l'influence de scénarios de réhabilitation sur les performances énergétiques et environnementales. L'introduction de modèles détaillés de physique du bâtiment répond alors à cet enjeu.

#### Approches de physique du bâtiment

Les approches de physique du bâtiment se basent généralement sur deux éléments (Aydinalp-Koksal et Ugursal, 2008) :

- La modélisation du parc étudié par un échantillon de bâtiments jugé représentatif des typologies rencontrées sur le parc global ;
- et une méthode d'évaluation (simulation thermique dynamique, modèle statique ou simplifié polynomial) de leurs consommations énergétiques.

Nous ne discutons pas ici de la modélisation, ni de la représentativité des « bâtiments types », abordées plus spécifiquement en section 5.3.

Logiquement, ces modèles requièrent d'abondantes quantités de données, sous forme désagrégée : géométrie des bâtiments, composition physique des parois, types d'équipements, débits de renouvellement d'air, consignes de température de chauffage, nombre d'occupants, etc.

A partir de la description géométrique des bâtiments du parc et physique de leurs composants, ainsi que de données sur leurs conditions d'usage, il est possible de modéliser par exemple l'évolution des consommations énergétiques passées, présentes ou futures, suivant différents scénarios prospectifs. Ces modèles ascendants peuvent permettre d'évaluer les économies d'énergies potentielles, au niveau global, liées à la mise en œuvre d'une technologie donnée (Wilson et Swisher, 1993). Suivant des scénarios, les performances de différentes stratégies ou politiques publiques peuvent être évaluées et comparées sur le moyen-long terme. Les technologies les plus prometteuses par segments de parc peuvent alors être identifiées.

Comme le souligne le Tableau 36, une des faiblesses des approches de physique du bâtiment tient à l'introduction de la modélisation des comportements sous la forme de scénarios hypothétiques, difficilement corrélés aux niveaux des consommations, au coût des énergies ou à des facteurs démographiques comme l'âge de la population.

### Exemples de modèles ascendants de physique du bâtiment

De nombreux modèles de physique du bâtiment ont été développés pour analyser les consommations énergétiques des parcs et d'évaluer différentes stratégies de réhabilitation (Farahbakhsh et al., 1998).

Par exemple, Snakin (2000) a proposé un modèle sur le parc immobilier de la Carélie du Nord, en Finlande. Ses travaux sont destinés à enrichir les bases de données locales, en termes de consommations énergétiques des bâtiments et d'émissions de GES et à contribuer aux réflexions des autorités publiques locales, en matière de stratégies de réhabilitation.

Il s'agit d'un modèle statique ascendant décomposant le parc immobilier à partir de quelques « typologies » de bâtiments, sur la base de critères suivants :

- Type d'activité et mitoyenneté : pavillons individuel, mitoyen, appartements, locaux commerciaux, établissements scolaires, bureaux, hôpitaux, entrepôts, bâtiments industriels, etc.
- Type de chauffage : eau chaude, air chaud, électricité, etc.
- Type d'énergie primaire : électricité, charbon, bois, gaz naturel, fioul, chauffage urbain, etc.
- Période de construction et de rénovation : avant 1920, 1921-1939, 1940-1959, 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, après 1990, etc.

Le modèle développé permet d'évaluer et de simuler (suivant différents scénarios) les consommations énergétiques et les émissions de GES du parc. Les résultats ont poussé les autorités publiques locales à introduire de nouveaux indicateurs de développement durable : consommations énergétiques et émissions de GES par personne, au niveau municipal, pourcentage d'énergie renouvelable dans les consommations de chauffage.

Les principales limitations de ces travaux concernent l'accès et l'exploitation de données fiables ; il demeure difficile d'estimer combien de bois a été utilisé pour le chauffage, par exemple. De plus, le couplage du modèle à des outils de simulation thermique dynamique permettrait de mieux tenir compte des évolutions temporelles de certains paramètres dynamiques comme les températures extérieures, les gains solaires et métaboliques, etc.

### 5.2.1.3 Conclusion sur les modèles de parcs et approche développée

De nombreuses modélisations des parcs de bâtiments ont ainsi été proposées. Modèles top-down et bottom-up ne sont pas équivalents. Ils donnent, des mêmes objets, des visions différentes, modélisant des interactions entre des paramètres différents, permettant de répondre chacun à des questionnements spécifiques. Le Tableau 36Tableau 1 propose une synthèse des avantages et inconvénients, suivant les approches de modélisation retenues.

Bien qu'ils intègrent difficilement les interactions économiques, les modèles bottom-up de physique du bâtiment se différencient notamment par leur capacité à évaluer l'influence de mesures de réhabilitation énergétique sur la demande globale en énergie ou les bilans économiques et environnementaux d'un parc. La recherche de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle à l'échelle d'un parc s'inscrit donc clairement dans le cadre des approches bottom-up de physique du bâtiment.

Cependant, et à la connaissance de l'auteur, les modèles de la littérature s'intéressent assez peu à l'optimisation de la déclinaison pratique des objectifs énergétiques, en termes de mesures de réhabilitation sur les parcs immobiliers. Ils répondent principalement à la question de la quantification des implications (énergétiques, environnementales, économiques) de scénarios de réhabilitation, proposés ou préalablement construits à partir de données externes, sur les performances des parcs. La recherche de stratégies efficaces impose alors la simulation itérative des performances de différents scénarios.

A la manière des travaux conduits à l'échelle du bâtiment, notre ambition dans les développements suivants est de contribuer à l'optimisation des stratégies de réhabilitation énergétique séquentielle et à la description des compromis accessibles à la décision, à l'échelle du parc. Cette approche se veut plus riche en termes d'aide à la décision que la simple (mais techniquement très complexe) identification de stratégies en fonction de cibles de performances à atteindre. La description d'une surface de compromis sous la forme d'un front de Pareto permet d'étudier les variations marginales sur les performances en fonctions des choix de réhabilitation effectués. La section suivante présente l'approche développée à partir d'un algorithme génétique.

## 5.2.2 Optimisation génétique multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des parcs de bâtiments

L'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle sur un parc de bâtiments est modélisée dans ces travaux par un problème multicritère, combinatoire, à variables discrètes et fonctions objectifs implicites et non-linéaires. Les algorithmes génétiques sont des techniques d'optimisation stochastiques bien adaptées à la résolution de ce type de problème (cf. Chapitres 1 et 2). Aussi, l'approche d'aide à la décision à l'échelle des parcs a été construite à partir de ces méthodes.

### 5.2.2.1 Modélisation du problème d'aide à la décision

En préliminaire, nous revenons ci-dessous sur la modélisation du problème d'aide à la décision, à l'échelle des parcs. La construction des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle y est très similaire à celle proposée pour les bâtiments (Chapitre 1).

Les programmes de réhabilitation à l'échelle des parcs sont construits sous forme de séquences d'interventions sur les différents bâtiments. Comme à l'échelle des bâtiments, ils sont caractérisés par la double donnée d'une composition et d'un phasage :

- **COMPOSITION** : La composition du programme sur le parc est la simple concaté-  
nation des mesures de réhabilitation proposées sur chacun des bâtiments du parc.  
Pour chacun des bâtiments, on rappelle que les stratégies de réhabilitation sont – en  
termes de composition – des combinaisons de mesures élémentaires portant sur  
l'enveloppe (isolation thermique des façades, de la toiture, du plancher bas, rempla-  
cement des ouvrants), l'efficacité énergétique des équipements (systèmes de ventila-  
tion et de génération de chaleur) et l'intégration d'une production d'énergie d'origine  
renouvelable (production solaire thermique d'eau chaude sanitaire).  
De plus, d'évidentes contraintes industrielles limitent le continuum des variantes po-  
tentielles sur chacune des ces mesures. Par conséquent, la composition du programme  
sur le parc est une combinaison de variables discrètes.
- **PHASAGE** : Le phasage correspond à la séquence temporelle de mise en œuvre des  
travaux de réhabilitation sur le parc.  
Notons bien que, dans le cadre de la modélisation adoptée, le phasage définit une  
permutation sur l'ensemble des mesures de réhabilitation, à mettre en œuvre sur  
l'ensemble des bâtiments du parc.  
Aussi, il n'est pas nécessaire d'avoir finalisé l'ensemble des interventions identifiées  
sur un bâtiment donné pour initier la réhabilitation d'un autre groupe de logements.  
Par exemple, les programmes peuvent commander séquentiellement d'isoler les fa-  
çades d'un bâtiment **A**, avant de remplacer les ouvrants du bâtiment **B**, puis de reve-  
nir sur le bâtiment **A** pour en isoler la toiture.

Les performances des programmes de réhabilitation sur les parcs sont évaluées sur une base multicritère : en termes de consommations énergétiques, de bilan environnemental, de bilan économique, de confort thermique en été. Les fonctions objectifs sont celles détaillées au Chapitre 1 et utilisées pour les études de cas des Chapitres 2, 3 et 4. Les performances des programmes de réhabilitation sont évaluées suivant le modèle de cycle de vie (analyse de cycle de vie et analyse du coût du cycle de vie), exposé au Chapitre 1.

L'évaluation des besoins de chaleur et des températures intérieures est conduite par simulation thermique dynamique, pour tenir compte du stockage des apports solaires et métaboliques et calculer les besoins de chaleur au pas de temps horaire. La simulation thermique dynamique ne donne pas accès à une expression analytique liant variables de réhabilitation et performances des programmes. Elle impose par conséquent le caractère implicite des fonctions objectifs.

Etant donnée la nature mathématique du problème modélisé, et par analogie avec les travaux effectués à l'échelle du bâtiment, les algorithmes génétiques se présentent comme des techniques d'optimisation stochastiques bien adaptées à l'identification de stratégies efficaces. Nous ne revenons pas ici sur le principe général des algorithmes génétiques, ni sur les opérateurs de sélection, croisements ou mutations qui ont été largement détaillés au Chapitre 2.

A l'échelle du parc, l'algorithme génétique mis en œuvre est également de type NSGA II. En revanche, la représentation des individus et les opérateurs de croisement doivent être adaptés à l'objet « parc de bâtiments ».

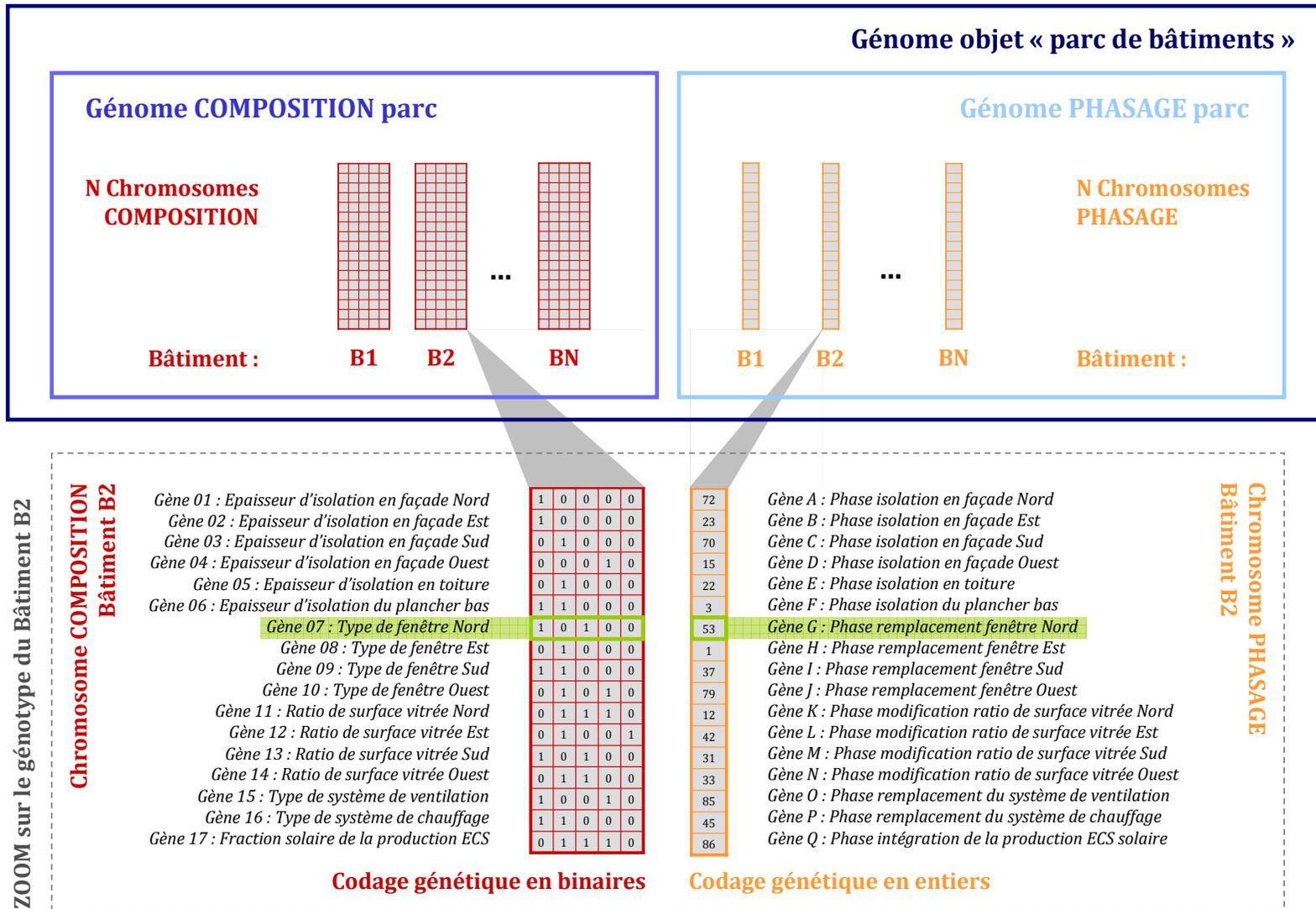


Figure 165. Représentation du génome des solutions : programmes de réhabilitation énergétique séquentielle, à l'échelle du parc de bâtiments

### 5.2.2.2 Représentation des individus

Les individus de l'algorithme génétique développé représentent les solutions du problème à l'échelle du parc, soient des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle sur un ensemble de plusieurs bâtiments.

La représentation par un génome – constitué d'un ou plusieurs chromosomes – doit alors porter l'information nécessaire et suffisante à la caractérisation complète d'un individu donné. Suivant la modélisation du problème, cette information porte sur la composition et le phasage du programme à l'échelle du parc. S'inspirant des travaux conduits à l'échelle du bâtiment, nous faisons le choix d'un génome composé de deux groupes de chromosomes.

La Figure 165 illustre la représentation génétique des solutions du problème. Chaque programme de réhabilitation sur le parc est modélisé par deux groupes de chromosomes :

- **Génome COMPOSITION sur le parc**

Le génome portant sur la composition du programme comprend autant de chromosomes que le parc étudié compte de bâtiments différents. Ici, on considère un parc constitué de  $N$  bâtiments distincts.

Chacun des chromosomes composition (**B1**, **B2**, ... **BN**) représente alors la combinaison de mesures de réhabilitation associée à l'un des bâtiments du parc. Comme l'illustre le détail du chromosome composition associé au bâtiment **B2** (partie inférieure de la Figure 165), la représentation de ce chromosome est alors rigoureusement identique à celle du Chapitre 2.

Pour rappel, chaque chromosome composition est constitué d'un ensemble de gènes, représentant chacun une variable d'action, soit une des mesures élémentaires de réhabilitation du bâtiment correspondant. Par exemple, le gène 07 du chromosome composition code le type de fenêtre mis en œuvre en réhabilitation sur la façade Nord.

Chaque gène porte lui-même un allèle, permettant d'identifier la variante considérée pour la mesure de réhabilitation qu'il représente. Sur la Figure 165, l'allèle porté par le gène 07 est figuré par la chaîne binaire : 10100, représentant la 5<sup>ème</sup> variante de réhabilitation (lecture binaire de gauche à droite), soit le 5<sup>ème</sup> type de vitrage considéré pour la façade Nord. Les gènes du chromosome composition sont codés par des chaînes binaires, permettant d'opérer des croisements à l'intérieur des gènes.

- **Génome PHASAGE sur le parc**

Le génome associé au phasage des interventions sur le parc est également figuré par un ensemble de chromosomes, dont le nombre est égal au nombre de bâtiments du parc, soit  $N$  dans l'exemple de la Figure 165.

Chacun de ces chromosomes correspond à un chromosome phasage, associé à l'un des bâtiments du parc. Conformément à la représentation proposée au Chapitre 2, les gènes des chromosomes phasage sont des entiers désignant les positions relatives des différentes mesures élémentaires de réhabilitation dans la séquence de mise en œuvre. Par exemple, le remplacement des fenêtres de la façade Nord du bâtiment B2 est envisagé en phase 53, sur l'exemple de la Figure 165.

Notons bien que les allèles d'un chromosome phasage ne forment pas une permutation sur l'ensemble des mesures de réhabilitation associées à un bâtiment donné. La permutation est définie sur l'ensemble des allèles portés par les chromosomes du génotype phasage, soit sur l'ensemble des mesures de réhabilitation, à l'échelle du parc.

Pour chacun des bâtiments :

- Le nombre de gènes du chromosome composition dépend du nombre de variables de décision considérées dans l'analyse ;
- Il est possible d'imposer la mise en œuvre de plusieurs mesures élémentaires de réhabilitation, lors de la même phase de travaux. Par exemple, toutes les façades peuvent être isolées thermiquement lors de la même phase. La taille du chromosome ordre associé à un bâtiment donné n'est donc pas nécessairement celle du chromosome composition.

La représentation génétique adoptée pour les solutions synthétise l'ensemble de l'information nécessaire à la définition d'une combinaison de mesures de réhabilitation et à la description de la séquence de mise en œuvre, sur un parc de bâtiments.

Cette représentation suppose néanmoins quelques adaptations de l'algorithme génétique développé par rapport au cas de la réhabilitation à l'échelle du bâtiment.

### 5.2.2.3 Aspects algorithmiques et adaptation des opérateurs de variation

Le principe des algorithmes génétiques ainsi que le choix d'un algorithme et d'opérateurs de sélection et de variation spécifiques ont été précisés au Chapitre 2, dans le cas de la réhabilitation énergétique séquentielle à l'échelle du bâtiment. Nous ne revenons pas ici sur les aspects généraux. Cependant, la représentation génétique des programmes de réhabilitation à l'échelle des parcs suppose quelques ajustements de l'algorithme précédemment développé à l'échelle des bâtiments. Les développements suivants précisent les principales étapes de l'algorithme appliqué à la réhabilitation des parcs ainsi que les modifications introduites.

#### Initialisation des solutions

L'algorithme génétique commence nécessairement par l'initialisation aléatoire d'une population de solutions, représentant chacune un programme de réhabilitation énergétique séquentielle sur le parc de bâtiments.

Le génotype composition – soit l'ensemble des chromosomes composition relatifs à chaque bâtiment – est initialisé directement à partir des opérateurs implémentés à l'échelle du bâtiment.

En revanche, l'initialisation du génotype sur le phasage réclame de former une permutation aléatoire sur l'ensemble des interventions à l'échelle du parc, soit sur l'ensemble des gènes de l'ensemble des chromosomes phasage, utilisés pour modéliser la séquence des interventions sur chaque bâtiment. Contrairement à l'échelle du bâtiment, la permutation aléatoire n'est alors pas initialisée à l'échelle d'un chromosome phasage mais de l'ensemble des chromosomes phasages modélisant la séquence sur le parc.

## Evaluation des solutions

Les performances des individus de la population courante, ou des enfants engendrés à chaque génération, doivent être évaluées. Avant l'évaluation, le génotype des solutions est traduit en phénotype. Pour chaque programme potentiel, le détail des variantes sur les mesures de réhabilitation à mettre en œuvre sur chaque bâtiment ainsi que la séquence globale des interventions sur le parc sont identifiés.

A l'issue de cette phase de décodage, les performances des solutions sont évaluées suivant les fonctions objectifs et l'architecture du modèle de cycle de vie détaillés au Chapitre 1.

Les choix suivants sont appliqués par défaut, ils peuvent bien entendu être remis en cause :

- Une unique mesure de réhabilitation, ciblant un bâtiment donné, est mise en œuvre à chaque phase de réhabilitation ;
- Les phases de réhabilitation sont séparées d'une année ;
- Une durée d'exploitation de 50 ans est considérée pour la poursuite du cycle de vie des bâtiments du parc, à partir du début des opérations de réhabilitation.

Encore une fois, ces paramètres peuvent facilement être adaptés aux cas étudiés.

A chaque phase de réhabilitation sont donc pris en compte : la production des composants de réhabilitation à mettre en œuvre sur le bâtiment concerné par la phase, le traitement en fin de vie des composants préexistants et déposés, l'usage de l'ensemble des bâtiments du parc.

Au terme de la séquence de réhabilitation, on considère l'usage de l'ensemble des bâtiments sur la durée résiduelle d'exploitation. Celle-ci correspond à la différence entre la durée de poursuite du cycle de vie à partir du début des interventions (ici 50 années) et la somme des temps écoulés entre les phases de réhabilitation.

Enfin, au terme de la durée considérée pour la poursuite du cycle de vie, le traitement en fin de vie des composants de réhabilitation, mis en œuvre sur l'ensemble des bâtiments du parc, est intégré au bilan énergétique, environnemental et économique.

Remarque : Les contraintes de financement sur la réhabilitation d'un parc de bâtiments ne sont pas prises en compte à ce stade. Ultérieurement, elles pourraient être intégrées à la manière des réflexions conduites au Chapitre 4.

## Sélection pour la reproduction

La sélection pour la reproduction est basée sur le tournoi de foules, comme dans le cas de l'algorithme NSGA-II développé à l'échelle du bâtiment. La comparaison des paires de solutions repose sur l'analyse de leurs performances à partir de la relation de dominance et de la distance de crowding (définies au Chapitre 2). Aucune modification de l'algorithme préexistant n'est nécessaire. En effet, seules les performances des solutions sur les fonctions objectifs sont requises, indépendamment de la nature des solutions et de leur représentation génétique.

## Variations par croisement

A partir des parents sélectionnés, une population d'individus enfants est engendrée par croisements et mutations appliquées au génome des parents.

Les croisements opérés sur le génome composition reposent sur les opérateurs évolutionnaires et génétiques de croisement, définis au Chapitre 2. Comme l'illustre la Figure 166 pour le croisement évolutionnaire, les opérateurs sont appliqués directement sur les chromosomes composition modélisant les combinaisons de mesures de réhabilitation à mettre en œuvre sur le parc. Ainsi, sont croisées deux à deux les paires de chromosomes composition, issus des parents et représentant chacun une combinaison de mesures sur un même bâtiment.

En revanche, les croisements de l'information génétique portant sur le phasage doivent former des permutations valides sur l'ensemble des interventions sur le parc. L'ensemble des gènes des différents chromosomes ordre modélisant le génome phasage d'un individu enfant doit constituer une permutation. Le croisement de Davis (détaillé au Chapitre 2) ne peut donc être utilisé directement sur les paires de chromosomes phasage, associés à la séquence des interventions sur chaque bâtiment, mais sur la séquence globale des interventions sur le parc.

La Figure 167 détaille alors le processus suivi. Un chromosome phasage auxiliaire – représentant la séquence globale des interventions sur le parc – est reconstruit pour chacun des parents (2). Celui-ci est obtenu par concaténation des chromosomes phasage associés aux différents bâtiments (1). Puis, le croisement de Davis, construisant de nouvelles permutations pour les enfants, est appliqué sur les chromosomes auxiliaires des parents (3). Les chromosomes auxiliaires obtenus pour le génotype des enfants (4) sont enfin désagrégés pour recomposer un ensemble de chromosomes phasage (5), fidèle au génome défini par la Figure 165.

### Variations par mutation

Les opérateurs de mutation évolutionnaire et génétique définis au Chapitre 2 sont directement appliqués sur les chromosomes composition et phasage du génome caractérisant les programmes de réhabilitation à l'échelle du parc.

### Sélection pour le remplacement générationnel

La sélection pour le remplacement générationnel correspond à la procédure définie par l'algorithme NSGA II soit :

- Le classement des solutions par fronts de Pareto, suivant leurs performances ;
- Puis, le remplissage progressif de la population de la génération suivante à partir des fronts classés et de la distance de crowding, servant à départager les solutions appartenant à un même front.

Cette procédure de sélection est détaillée plus avant au Chapitre 2. Une nouvelle fois, seules les performances des solutions sur les fonctions objectifs sont requises. Aussi, la représentation génétique des solutions de réhabilitation sur le parc n'induit pas de modification de l'algorithme.

### Implémentation

L'algorithme génétique adapté à l'étude de la réhabilitation des parcs a été implémenté en langage DELPHI, directement dans le code du logiciel PLEIADES+COMFIE. Ce développement logiciel a permis de procéder à quelques études de cas, dont celle proposée dans la section suivante.

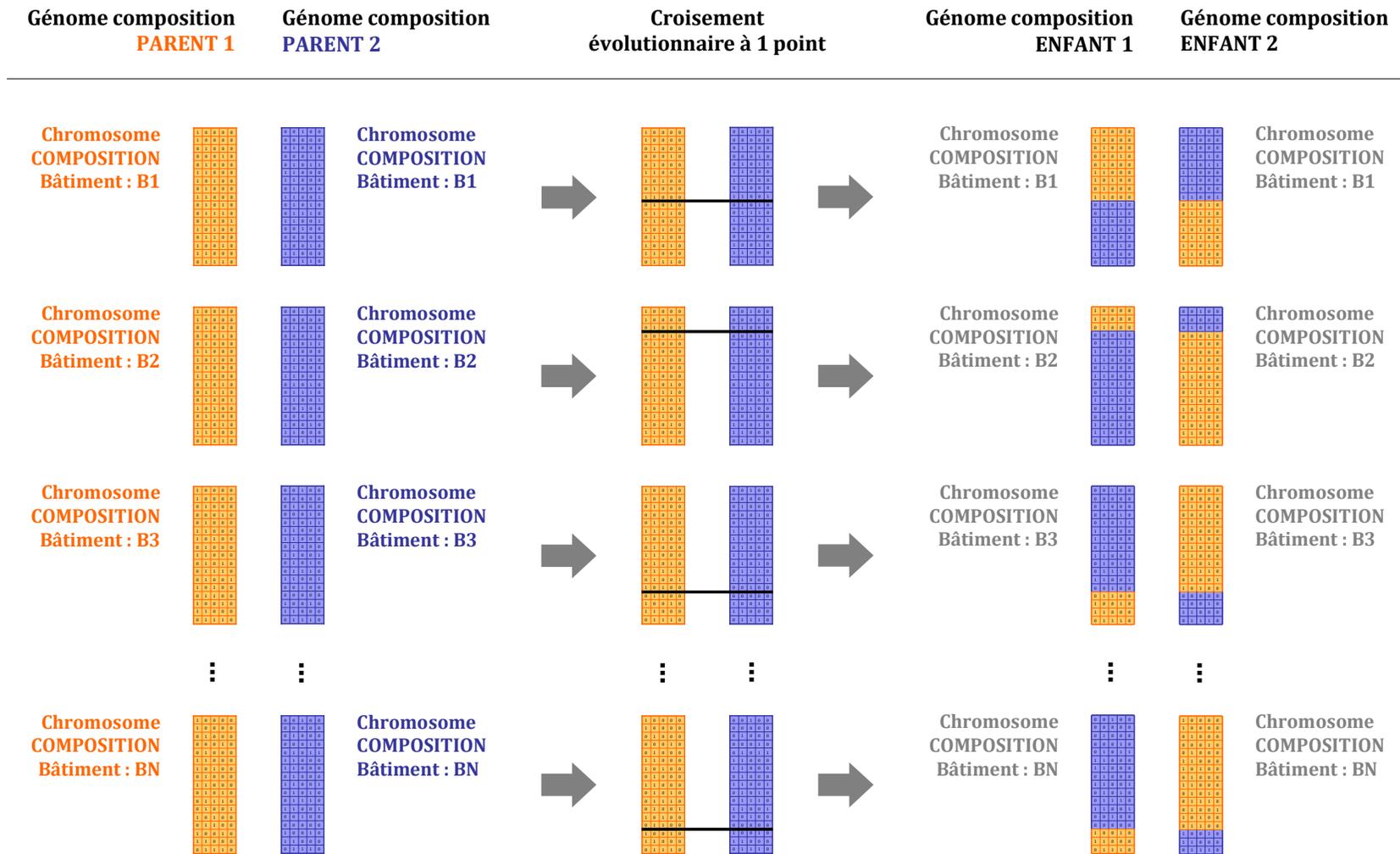


Figure 166. Croisement évolutionnaire à 1 point sur le génome COMPOSITION et génération de l'information génétique de deux individus enfants

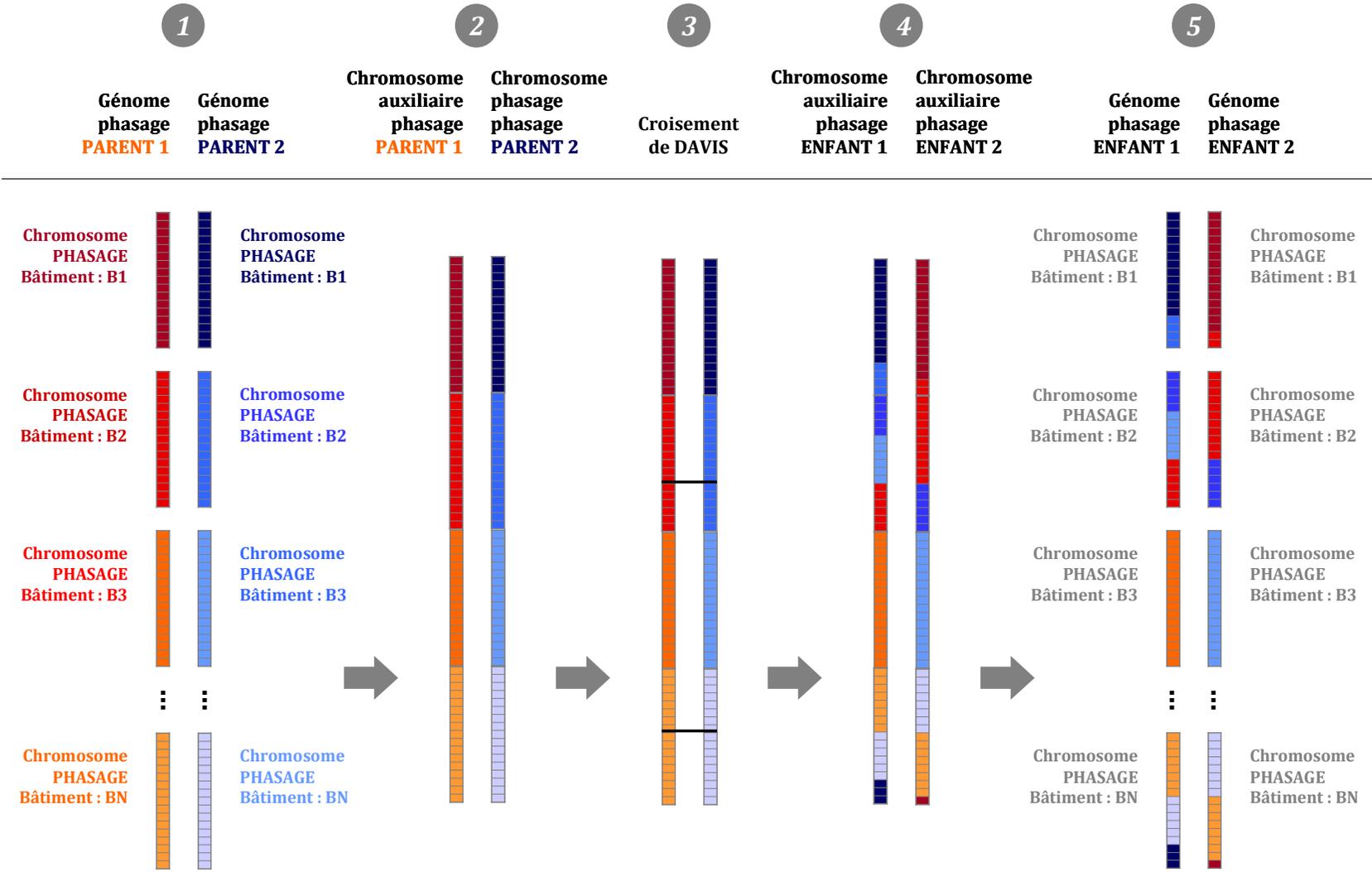


Figure 167. Croisement de DAVIS sur le génome PHASAGE et génération de l'information génétique de deux individus enfants

### 5.2.3 Etude de cas

Cette section présente l'application de l'approche par optimisation génétique multicritère au cas d'un parc de bâtiments, composé de deux constructions simplifiées.

#### 5.2.3.1 Présentation du parc étudié

L'étude de cas est menée sur un ensemble de deux bâtiments simplifiés dans le but de limiter les temps de calcul, en optimisation. La mise en œuvre de l'algorithme génétique multicritère sur ce parc réduit permet néanmoins démontrer le principe de la méthode, qui pourra ensuite être appliquée à des parcs plus complexes et plus conséquents.

Les figures ci-dessous précisent quelques aspects géométriques sur les constructions simplifiées étudiées, dont le plan des étages et une représentation tridimensionnelle sur laquelle apparaît la décomposition des bâtiments en zones thermiques homogènes.

Les appellations « house » et « dwelling » désignent respectivement le bâtiment de plain-pied et celui comprenant un étage.

On suppose que l'état physique de ces deux constructions, avant réhabilitation, est identique à celui de la barre Grimaud, aux aspects géométriques près. Aussi, nous ne revenons pas sur la description de l'état initial, précédemment détaillée au Chapitre 1 dans le cas de la barre Grimaud. Le dimensionnement des équipements est adapté aux besoins de chacun des bâtiments.

L'ensemble des mesures de réhabilitation considéré pour les bâtiments « house » et « dwelling » correspond à l'espace de recherche 2, défini au Chapitre 1. Pour rappel, le Tableau 37 présente les mesures de réhabilitation et leurs variantes, correspondant à cet espace de recherche. Sur les deux bâtiments considérés, les mesures de réhabilitation envisagées sont ici les mêmes. Suivant la spécificité des projets, ce choix peut être remis en cause et des solutions spécifiques, adaptées à chaque bâtiment pourraient être introduites. On imagine bien que les solutions pour l'isolation thermique des façades puissent être différentes dans le cas d'un immeuble Haussmannien ou d'une barre de logements construite dans les années 1970.

Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation
Murs de façades	ITE laine minérale : 100, 150 ou 200 mm
Toiture	ITE polyuréthane : 150, 200 ou 300 mm
Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100, 150 ou 200 mm
Ouvertures	Double ou triple vitrages basse émissivité, menuiseries bois
Ventilation	Double flux ou ventilation de type Hygro-B
Chauffage	Chaudière gaz à condensation
Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%, 55% ou 75%

Tableau 37. Mesures et variantes de réhabilitation : Espace de recherche 2

L'espace de recherche 2 définit 7 classes de mesures de réhabilitation, pour chacun des deux bâtiments du parc. Une mesure étant mise en œuvre par phase, et les phases étant séparée d'un an, chaque programme de réhabilitation sur le parc représente une séquence d'une durée de 14 ans.

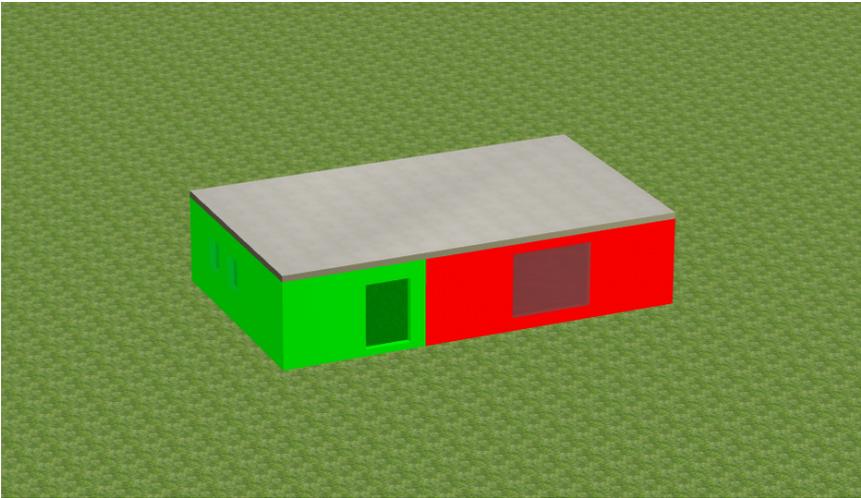


Figure 168. Décomposition 3D du bâtiment "house" en zones thermiques homogènes

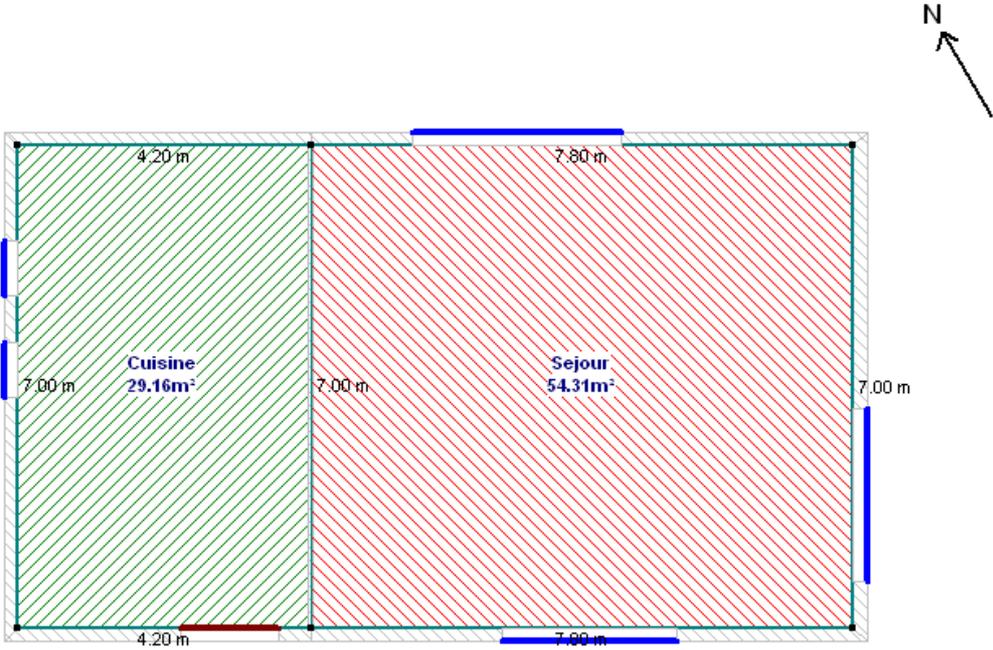


Figure 169. Plan du bâtiment "house"

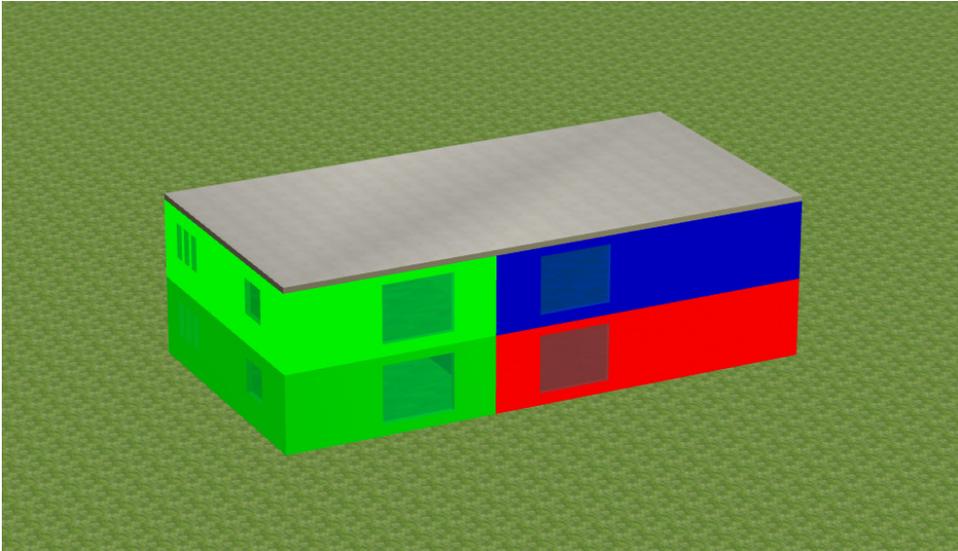


Figure 170. Décomposition 3D du bâtiment "dwelling" en zones thermiques homogènes

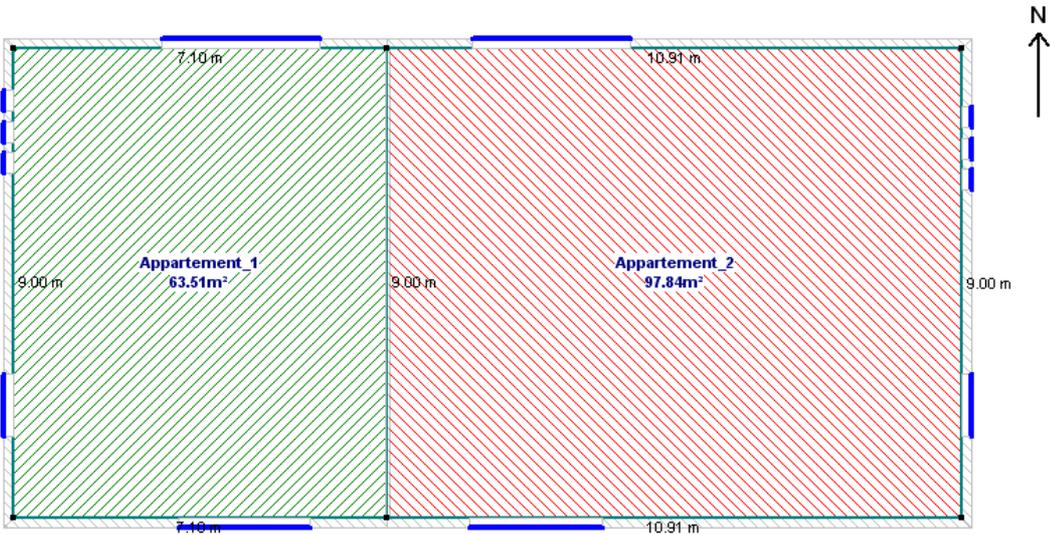


Figure 171. Plan des appartements au 1<sup>er</sup> étage du bâtiment "dwelling"

Enfin, et pour préciser les performances des bâtiments avant toute intervention de réhabilitation énergétique séquentielle, les besoins de chaleur pour le chauffage des deux constructions étudiées, calculés sous Pléaides+Comfie, sont précisés ci-dessous :

- House : 358 kWh/m<sup>2</sup>.an
- Dwelling : 209 kWh/m<sup>2</sup>.an

### 5.2.3.2 Paramètres de l'algorithme

Les valeurs suivantes ont été utilisées dans cette étude de cas pour les différents paramètres de l'algorithme génétique :

- Nombre de générations : 100 ;
- Nombre d'individus dans la population courante : 200 ;
- Nombre d'enfants générés à chaque génération : 200 ;
- Probabilité de croisement sur les chromosomes du génome composition : 80% ;
- Probabilité de croisement sur le chromosome ordre auxiliaire : 80% ;
- Probabilité de mutation sur les chromosomes du génome composition : 1% ;
- Probabilité de mutation sur les chromosomes du génome ordre : 1%.

Les opérateurs de croisement génétiques ont été préférés à leurs versions évolutionnaires pour introduire davantage de degrés de liberté dans les variations par croisement.

### 5.2.3.3 Performances optimale et moyenne des solutions courantes

Avant de détailler les solutions de l'optimisation, tant en termes de compromis sur les critères de décision et que de programmes de réhabilitation énergétique séquentielle sur le parc, nous revenons sur l'amélioration itérative et générationnelle des solutions de l'algorithme génétique, au travers de deux indicateurs précédemment utilisés au Chapitre 2. Ceux-ci donnent un éclairage à la fois sur la progression vers des solutions de bonne qualité ainsi que vers une description aussi large que possible de l'étendue des compromis accessibles.

Pour rappel, ces deux indicateurs représentent :

- La **valeur optimale**, atteinte sur chacune des fonctions objectifs, par les individus de la population courante (à chaque génération) ;
- La **valeur moyenne**, atteinte sur chacune des fonctions objectifs, par les individus de la population courante (à chaque génération).

Les graphiques de la Figure 172 représentent, pour les 7 critères de décision considérés dans ces études de cas, l'évolution de ces deux indicateurs sur les générations simulées par l'algorithme génétique. Sur cette figure, il est intéressant de noter que :

- Les évolutions des performances optimales, sur chacun des critères de décision, sont des fonctions décroissantes du nombre de générations.

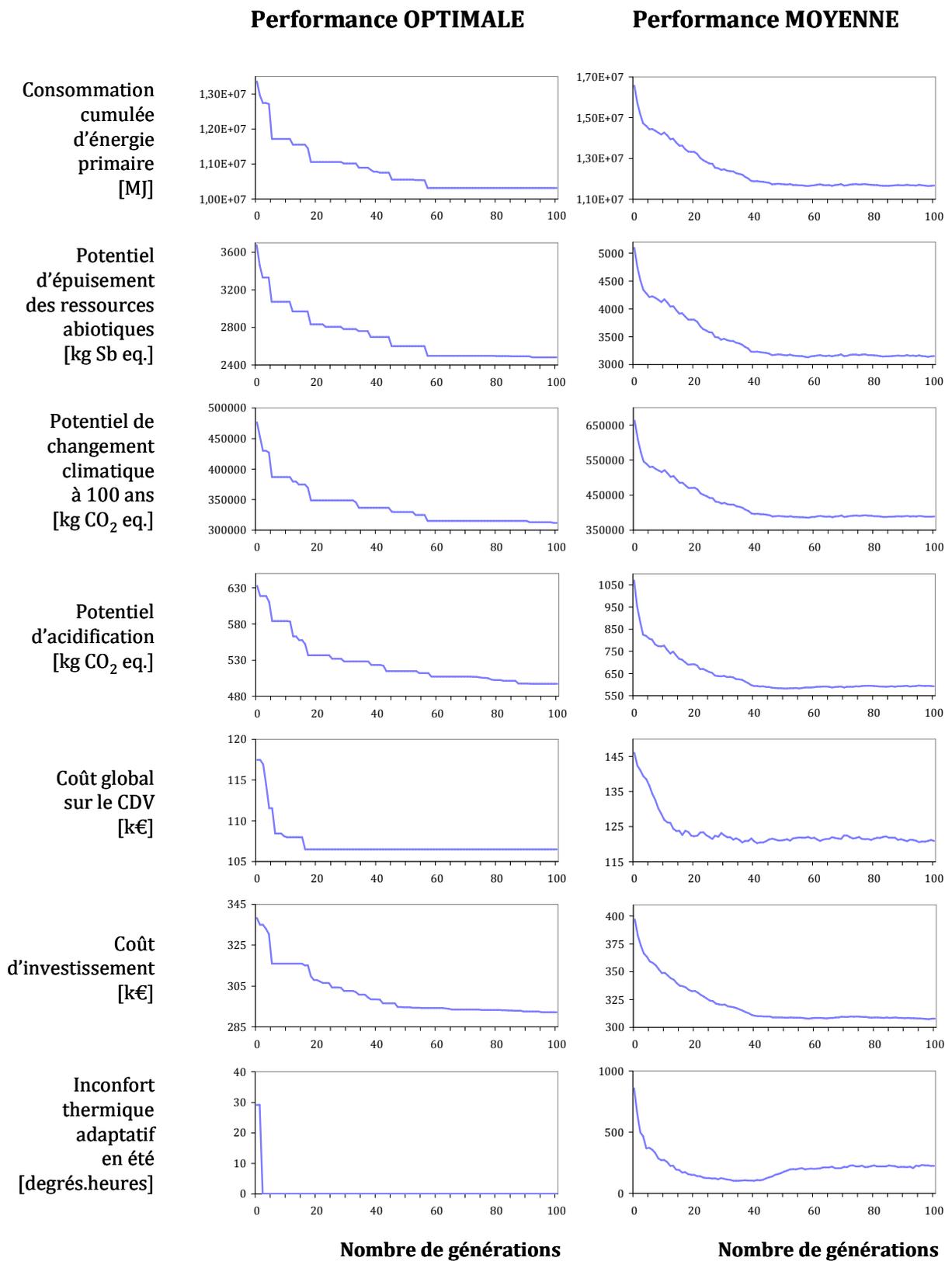


Figure 172. Evolution sur les générations des performances optimale et moyenne, pour chaque fonction objectif, sur les solutions de la population courante

Ce constat est cohérent avec le caractère élitiste de l'algorithme génétique NSGA II mis en œuvre. Les meilleures solutions locales sur chaque critère sont conservées d'une génération sur l'autre. Aussi, la performance optimale ne peut que progresser, soit diminuer dans un problème de minimisation ;

- Si les évolutions des performances optimales adoptent par construction toutes le même comportement, celles des performances moyennes ne sont pas homogènes. Pour certains critères – tels que le coût d'investissement ou la consommation cumulée d'énergie primaire – l'évolution de la performance moyenne des individus de la population courante est globalement décroissante, à quelques fluctuations près. En revanche, l'analyse de la performance moyenne sur l'inconfort thermique adaptatif en été révèle trois phases successives : décroissance, puis croissance et enfin stagnation relative à partir de la génération 60 environ. L'hétérogénéité des comportements trouve une interprétation dans la double perspective de l'optimisation multicritère. L'identification de solutions de bonne qualité suggère une amélioration des performances moyennes sur les générations, sur chaque fonction objectif. Cependant, la description d'une surface de compromis impose une forme de diversification dans la recherche de solutions non-dominées. Aussi, il peut être nécessaire de dégrader les performances de certaines solutions sur certains objectifs pour pouvoir progresser sur d'autres critères de décision. C'est très vraisemblablement le comportement observé sur le niveau d'inconfort thermique adaptatif.
- En termes de performances optimales, et quel que soit le critère considéré, on note une progression rapide sur les 60 premières générations environ, puis une progression moindre ensuite. Cette relative stagnation sur les générations 40 à 100 est également observable sur les performances moyennes de la population courante. La surface efficace de compromis identifiée à la génération 100 semble s'être stabilisée.

Les résultats portés sur la Figure 172 sont importants à plusieurs titres.

Ils soulignent la capacité de l'algorithme génétique mis en œuvre à progresser dans la recherche de solutions efficaces et dans la description de la surface de compromis, sur son étendue.

De plus, la relative stagnation des performances optimales et moyennes, sur les dernières dizaines de générations, suggère une forme de stabilisation autour de la surface efficace de compromis identifiée. A défaut d'une surface exacte, les solutions non-dominées représentent donc a minima une niche de Pareto.

Sur cette base, nous abordons sereinement l'interprétation des compromis observés et la description des programmes de réhabilitation identifiés, objets de deux sections suivantes.

#### 5.2.3.4 Surface de compromis pour la réhabilitation du parc

Le résultat de l'optimisation multicritère – conduite ici par l'algorithme génétique de type NSGA II – est intrinsèquement un ensemble de solutions efficaces, décrivant une surface de compromis multidimensionnelle du problème.

La Figure 173 représente les projections de cette surface multidimensionnelle sur l'ensemble des plans définis par les couples de critères de décision considérés dans cette étude de cas.

A la différence des Chapitres précédents, chacun des points portés sur la Figure 173 correspond aux performances d'une stratégie particulière de réhabilitation énergétique séquentielle, sur un parc de bâtiments.

Sur le parc de bâtiments étudié dans cette étude de cas, il est intéressant de remarquer que les compromis inter-critères observés sont relativement similaires à ceux identifiés à l'échelle d'un bâtiment (chapitres 2, 3 et 4). L'analyse de la Figure 173 permet ainsi de souligner que :

- Les projections de la surface de compromis – sur les plans définis par les couples de critères parmi la consommation cumulée d'énergie primaire, le potentiel de changement climatique à 100 ans ou le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques – font clairement apparaître une relation de type linéaire entre les performances sur ces critères. Comme l'a souligné l'étude de cas du Chapitre 2, celles-ci sont largement corrélées à la performance énergétique en exploitation pour chacun des bâtiments et donc, par additivité, pour le parc également ;
- De plus, des compromis nécessaires apparaissent entre la réduction des consommations énergétiques ou des impacts sur l'Environnement et le coût d'investissement relatif aux programmes efficaces de réhabilitation énergétique séquentiels.  
Sur les graphiques présentant en abscisse le coût d'investissement, on remarque que différentes solutions permettent de minimiser l'investissement, tout en étant caractérisées par des performances distinctes sur les indicateurs énergétique, environnementaux ou coût global. Ces solutions correspondent en effet à la même combinaison de mesures de réhabilitation sur le parc, elles imposent cependant un phasage différent des interventions. Le choix arbitraire d'entreprendre une intervention par an implique l'étalement des programmes de réhabilitation sur 14 ans, pour cette étude de cas. Aussi, les distinctions en termes de phasage sont responsables de différences significatives sur les consommations énergétiques cumulées en usage.
- L'étude des compromis faisant intervenir le coût global sur le cycle de vie souligne, comme dans les chapitres précédents, l'existence systémique d'un minimum en coût global, ne correspondant pas aux stratégies les plus performantes en termes de réduction des consommations énergétiques.  
Ici, les projections de la surface de compromis adoptent cependant une forme singulière. L'optimum local en coût global sur le cycle de vie présente une performance en consommation cumulée d'énergie primaire proche du niveau optimal identifié. Les solutions les moins performantes en énergie imposent des coûts globaux supérieurs aux programmes maximisant la performance énergétique, responsables des coûts d'investissement les plus élevés. Ce résultat est ici également lié à l'étalement des interventions sur 14 années ; les solutions les moins efficaces en termes de phasage imposent des consommations énergétiques élevées tant que l'ensemble du programme de réhabilitation n'a pas été mis en œuvre. Les coûts associés aux consommations énergétiques en usage impactent alors fortement le coût global.

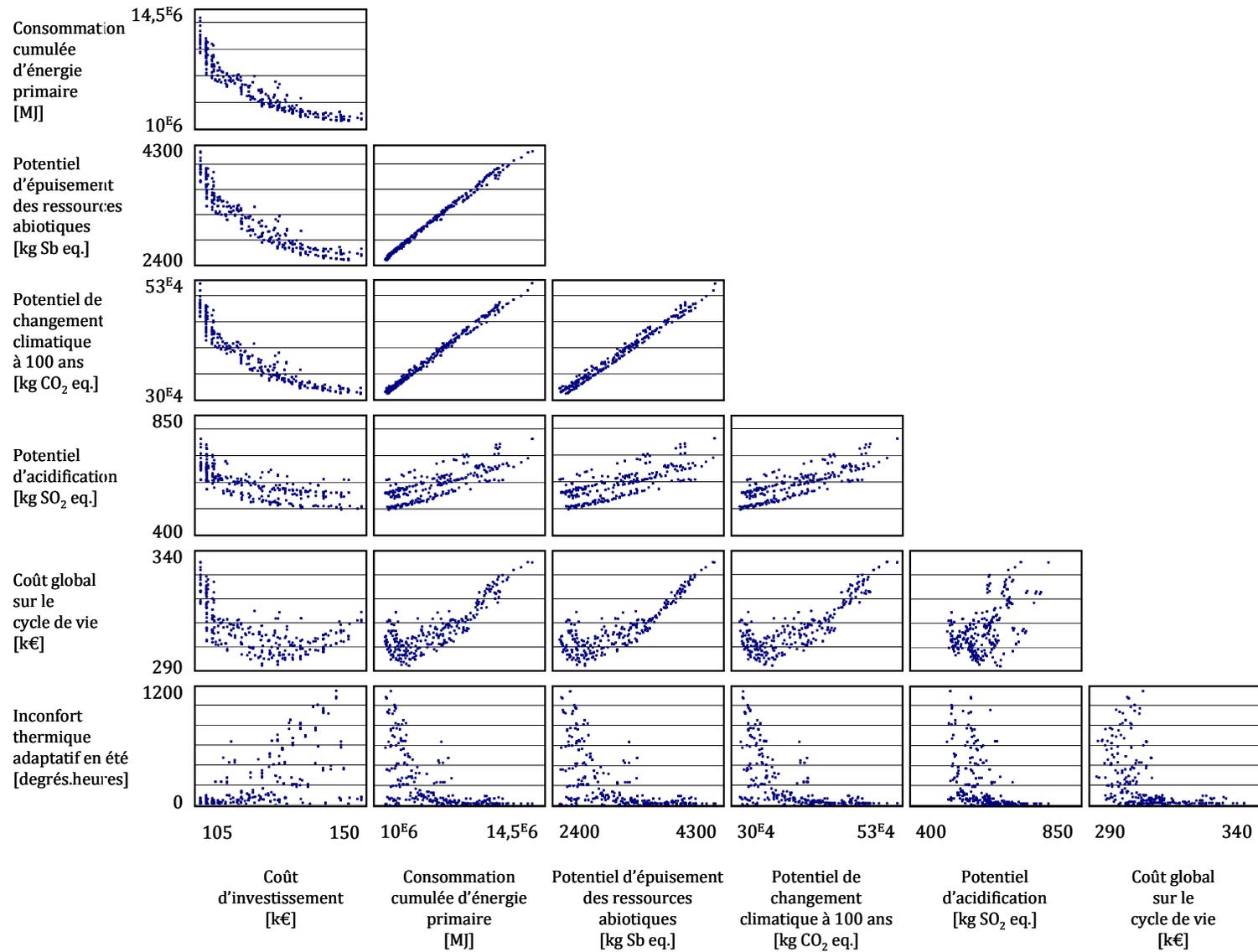


Figure 173. Projection de l'ensemble des solutions non-dominées de la génération 100 sur les plans définis par les couples de critères

- Enfin, le niveau d'inconfort thermique adaptatif en été (cumulé sur les 50 années de poursuite du cycle de vie et additionné sur les deux bâtiments du parc) est toujours inférieur à 1200 degrés.heures. Ces performances garantissent des niveaux de confort élevés, hors périodes de canicules estivales exceptionnelles, et dans les conditions d'usage spécifiées au Chapitre 1.

L'analyse des relations entre les performances des stratégies efficaces, sur les critères de décision considérés dans cette étude de cas, révèle de manière intéressante des comportements de compromis globalement similaires à ceux observés précédemment, dans les études de cas menées à l'échelle d'un bâtiment.

### 5.2.3.5 Analyse de solutions particulières

Sur la Figure 173 précédente, chaque point représente une solution non-dominée, soit un programme efficace de réhabilitation énergétique séquentielle, à l'échelle du parc. La section précédente a permis de préciser les compromis sur les performances entre les différents critères de décision. Cependant, la nature des solutions efficaces n'a pas encore été évoquée à ce stade. Nous nous proposons donc de la préciser pour quelques solutions particulières, tant en termes de combinaison de mesures de réhabilitation, à mettre en œuvre sur les différents bâtiments du parc, que de phasage des interventions dans le temps.

#### Définition des solutions particulières

Dans la continuité des Chapitres précédents, nous nous intéressons à trois solutions particulières, qui correspondent aux minimums locaux suivants :

- **A** : Optimum local en consommation cumulée d'énergie primaire ;
- **B** : Optimum local en coût global sur le cycle de vie ;
- **C** : Optimum local en coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation).

Les solutions **A**, **B** et **C** sont identifiées parmi les individus non-dominés de la génération 100. Les Figure 174, Figure 175, Figure 176 et Figure 177 illustrent le positionnement de leurs performances dans l'espace des objectifs. Ces figures représentent quatre projections (parmi les 21 représentées sur la Figure 173) de l'ensemble des solutions non-dominées de la génération 100 sur des plans définis par des couples de critères de décision.

Sur la Figure 175, on note que le minimum en termes de coût d'investissement est atteint par plusieurs points distincts. Parmi ces solutions, **C** est choisie de manière à minimiser la consommation cumulée d'énergie primaire.

#### Positionnement des solutions particulières dans l'espace des objectifs

L'analyse des performances de ces solutions éclaire leur positionnement relatif et permet de visualiser les écarts, ici en valeur absolue. Globalement, on retrouve ici une situation similaire à celle observée dans les études de cas à l'échelle d'un bâtiment.

Sur la Figure 175, on note ainsi que la solution **B** (optimale en termes de coût global sur le cycle de vie) permet une réduction significative (15% environ) du coût d'investissement (cumulé sur

les phases de financement) par rapport à la stratégie de réhabilitation **A** ; la différence de performance énergétique demeurant limitée (6% environ).

En revanche, la Figure 174 met en évidence que l'augmentation significative de la consommation cumulée d'énergie primaire entre les solutions **A** ou **B** et la solution **C** (supérieure à 17%) se traduit également par des impacts environnementaux nettement supérieurs, dans le cas de la stratégie de réhabilitation **C**.

En termes de coût global, la Figure 176 démontre que les surcoûts d'investissement, consentis par les solutions présentant une performance énergétique supérieure à la solution **B**, ne sont pas compensés par la réduction des coûts d'exploitation sur les 50 années de poursuite du cycle de vie du bâtiment à réhabiliter, dans le cadre des hypothèses retenues.

Sur cette même courbe, il est intéressant de noter que la solution **C** représente un coût global nettement inférieur à celui des stratégies minimisant également le coût d'investissement mais sous-optimales en termes de performance énergétique.

Enfin, la Figure 177 souligne que les stratégies de réhabilitation **A**, **B** ou **C** imposent des niveaux d'inconfort thermique adaptatif en été relativement limités, inférieurs à 300 degrés.heures cumulés sur 50 ans et sur les deux bâtiments du parc étudié.

Ce résultat demeure à interpréter au regard des hypothèses considérées : climat de la région parisienne, ne correspondant pas à une année de canicule, mise en œuvre des protections solaires et de la surventilation nocturne en été (Chapitre 1).

En conclusion, l'étude de ces quelques solutions particulières permet d'apprécier le positionnement performantiel de différents programmes de réhabilitation correspondant à des compromis de types différents sur le front de Pareto identifié. Il est intéressant de remarquer que les solutions les plus performantes en termes de consommation cumulée d'énergie primaire conduisent au remplacement du système de chauffage dès la première phase d'intervention tandis que les stratégies **B** ou **C** privilégient la réduction des besoins de chauffage par la réhabilitation de l'enveloppe, avant de mettre en œuvre des équipements performants.

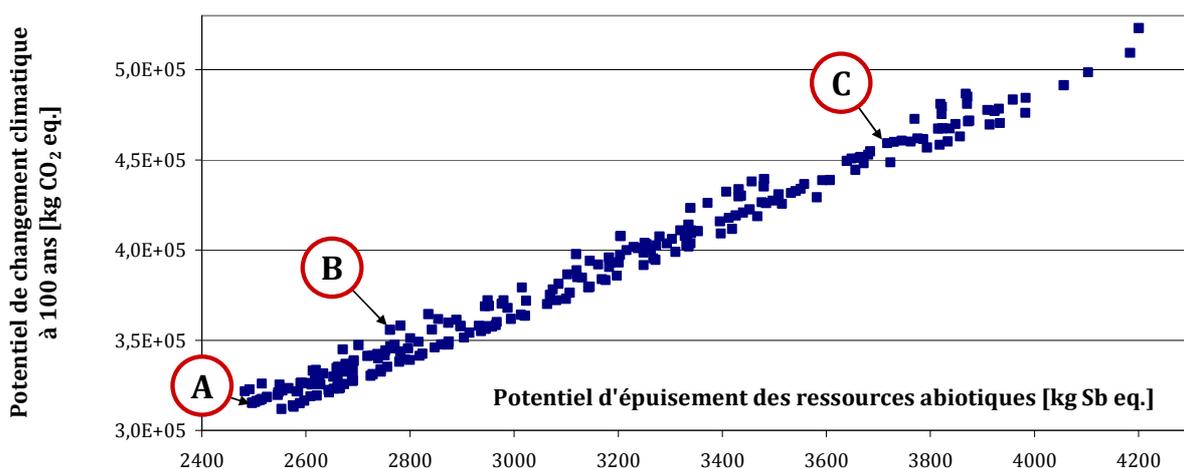


Figure 174. Solutions particulières et compromis entre le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques et le potentiel de changement climatique à 100 ans

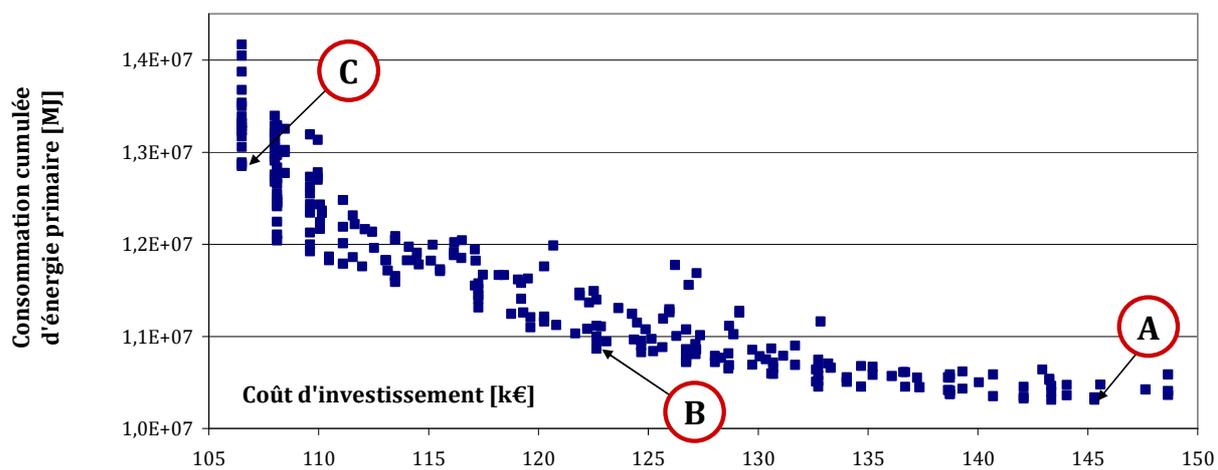


Figure 175. Solutions particulières et compromis entre le coût d'investissement et la consommation cumulée d'énergie primaire

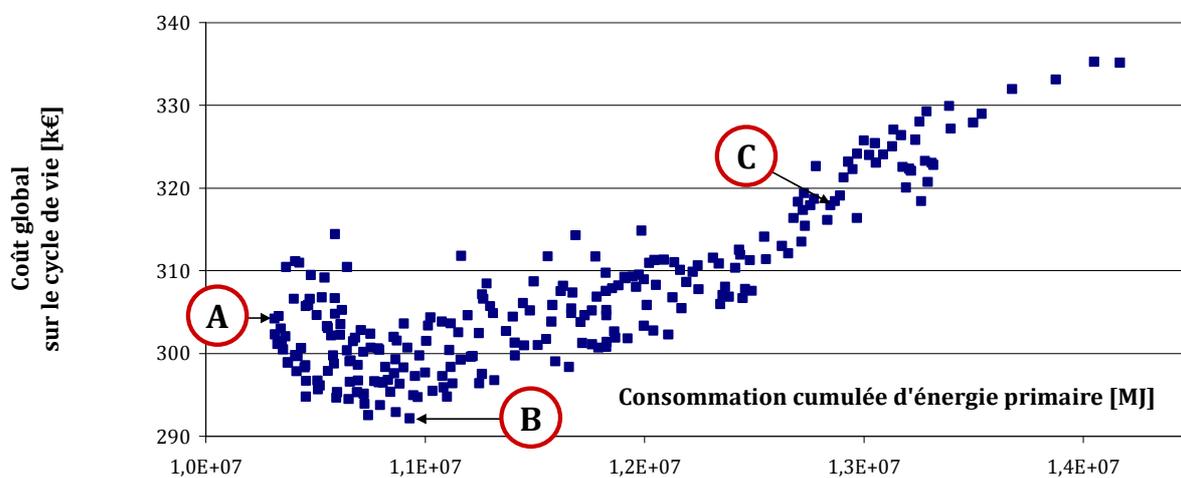


Figure 176. Solutions particulières et compromis entre la consommation cumulée d'énergie primaire et le coût global sur le cycle de vie

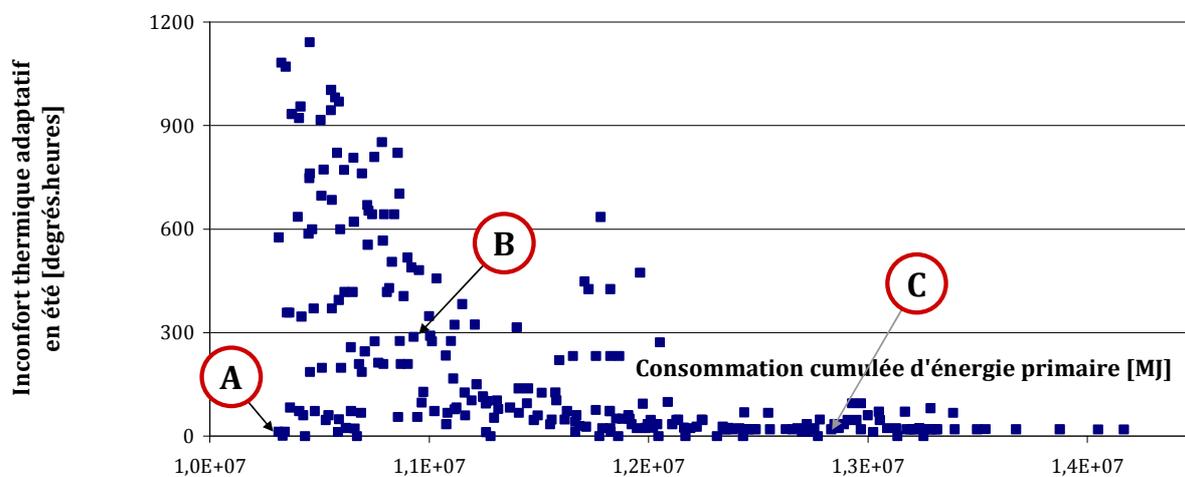


Figure 177. Solutions particulières et compromis entre la consommation cumulée d'énergie primaire et l'inconfort thermique adaptatif en été

## Détail des programmes A, B et C de réhabilitation sur le parc

Le Tableau 38 précise les programmes de réhabilitation **A**, **B** et **C** en termes de combinaisons de mesures mises en œuvre sur les deux bâtiments du parc et de phasage des interventions.

A partir de ce tableau, il est particulièrement intéressant de remarquer que :

### En termes de phasage des programmes...

- Quelle que soit la solution particulière considérée (**A**, **B** ou **C**), les interventions de réhabilitation commencent systématiquement par la réhabilitation complète du bâtiment « house », avant d'entreprendre celle de « dwelling ». Pourtant, l'optimisation donnait la possibilité de construire des séquences d'intervention imposant des allers-retours entre les bâtiments du parc. Ce résultat est bien entendu lié au niveau des consommations énergétique de « house » avant réhabilitation, nettement plus élevé que « dwelling ».
- Quel que soit le programme de réhabilitation, et quel que soit le bâtiment, le plancher inférieur est systématiquement réhabilité en fin de séquence. Le niveau d'isolation mis en œuvre correspond toujours au minimum sur l'espace de recherche, soit 100mm de polystyrène extrudé.
- L'isolation thermique de la toiture du bâtiment « house » correspond toujours à la première des mesures de réhabilitation mise en œuvre. Ce n'est pas le cas pour la construction « dwelling ». Ce constat s'explique notamment par le pourcentage surfacique que représente la toiture par rapport à la surface d'enveloppe totale, plus élevé dans le cas du bâtiment de plain-pied.
- La séquence des interventions sur la maison « house » est relativement similaire pour les trois programmes de réhabilitation étudiés.
- Pour le bâtiment « dwelling », on remarque que le système de chauffage préexistant est remplacé plus rapidement dans le cas du programme **A**, optimum en performance énergétique, que dans celui du programme **B**, qui minimise le coût global et se concentre tout d'abord sur la réduction des besoins d'énergie avant d'intégrer des équipements efficaces.

### En termes de composition des programmes...

- Le programme de réhabilitation **A**, optimum local en termes de réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire, impose évidemment un niveau de résistance thermique de l'enveloppe supérieur à celui des programmes **B** ou **C**. Il est le seul à mettre en œuvre 200mm d'isolation thermique sur les façades soit le maximum sur l'espace de recherche, ainsi que des fenêtres triple vitrages.
- Le programme **B** se distingue du **A** sur le plan de la combinaison de mesures de réhabilitation par la mise en œuvre du double vitrage ainsi que d'une épaisseur de 100mm de laine minérale pour l'isolation thermique des façades.

	N° Phase	Bâtiment	Classe de mesure	Alternatives de réhabilitation
<b>A</b>	1	House	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm
	2	House	Murs de façades	ITE laine minérale : 200 mm
	3	House	Ouvertures	Triples vitrages basse émissivité (lame Argon)
	4	House	Chauffage	Chaudière gaz à condensation
	5	House	Ventilation	Double-flux
	6	House	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%
	7	House	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm
	8	Dwelling	Murs de façades	ITE laine minérale : 200 mm
	9	Dwelling	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm
	10	Dwelling	Chauffage	Chaudière gaz à condensation
	11	Dwelling	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%
	12	Dwelling	Ouvertures	Triples vitrages basse émissivité (lame Argon)
	13	Dwelling	Ventilation	Double-flux
	14	Dwelling	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm
<b>B</b>	1	House	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm
	2	House	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm
	3	House	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)
	4	House	Chauffage	Chaudière gaz à condensation
	5	House	Ventilation	Double-flux
	6	House	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%
	7	House	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm
	8	Dwelling	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm
	9	Dwelling	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm
	10	Dwelling	Production ECS	Fraction solaire de la production : 75%
	11	Dwelling	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)
	12	Dwelling	Ventilation	Double-flux
	13	Dwelling	Chauffage	Chaudière gaz à condensation
	14	Dwelling	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm
<b>C</b>	1	House	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm
	2	House	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)
	3	House	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm
	4	House	Chauffage	Chaudière gaz à condensation
	5	House	Ventilation	Hygro-B
	6	House	Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%
	7	House	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm
	8	Dwelling	Murs de façades	ITE laine minérale : 100 mm
	9	Dwelling	Toiture	ITE polyuréthane : 150 mm
	10	Dwelling	Chauffage	Chaudière gaz à condensation
	11	Dwelling	Ouvertures	Doubles vitrages basse émissivité (lame Argon)
	12	Dwelling	Ventilation	Hygro-B
	13	Dwelling	Production ECS	Fraction solaire de la production : 35%
	14	Dwelling	Plancher inférieur	ITE polystyrène extrudé : 100 mm

Tableau 38. Composition et phasage des programmes de réhabilitation A, B et C

- Les programmes **A** et **B** préconisent tous deux la ventilation double-flux ainsi qu'une fraction solaire de 75% pour la production d'ECS, sur les deux bâtiments du parc. En revanche, le programme **C** minimisant le coût d'investissement implique la ventilation hygro-B ainsi qu'une fraction solaire de 35% en production d'ECS, pour les deux bâtiments du parc.
- Les programmes de réhabilitation **A**, **B** et **C** commandent la mise en œuvre de 150mm de polyuréthane sur la toiture et de 100mm de polystyrène extrudé sur le plancher bas, systématiquement et sur les deux bâtiments du parc. Pour information, ces épaisseurs d'isolant thermique correspondent aux niveaux minimums sur l'espace de recherche considéré, pour la toiture et le plancher bas respectivement.
- Il est enfin intéressant de noter que, dans cette étude de cas, les variantes mises en œuvre pour les différentes mesures de réhabilitation sont les mêmes pour chacun des deux bâtiments, seules les séquences d'intervention diffèrent éventuellement, pour chacun des programmes **A**, **B** ou **C**.

### Conclusion sur les solutions particulières

Les différentes remarques précédentes illustrent la composition et le phasage de quelques solutions potentielles de réhabilitation énergétique séquentielle, à l'échelle d'un parc. Ces conclusions sont évidemment propres à l'étude de cas ici considérée. Toute tentative d'extrapolation mériterait alors des études complémentaires.

#### 5.2.4 Conclusion

De nombreux modèles ont été développés au cours des années passées pour simuler et tenter de prédire le comportement énergétique de parcs de bâtiments existants, en fonction de différentes évolutions macro-économiques ou de scénarios de réhabilitation.

Dans ce contexte, les développements précédents (section 5.2) se positionnent comme contribution à l'aide à la décision sur la réhabilitation énergétique séquentielle des parcs existants.

Cette contribution a consisté à étendre l'approche d'optimisation multicritère par algorithme génétique depuis l'échelle du bâtiment (Chapitre 2) vers celle du parc.

L'optimisation génétique permet ainsi d'identifier, sur des parcs de bâtiments, des stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle ainsi que de décrire les surfaces de compromis accessibles. La recherche est conduite sur une base multicritère et considérant le cycle de vie des différents bâtiments à réhabiliter du parc.

L'étude de cas sur un parc composé de deux bâtiments simplifiés a permis de démontrer le principe de la méthode. Si les résultats ont une portée limitée à l'étude de cas considérée, ils ont néanmoins permis d'identifier des compromis inter-critères de nature similaire à ceux observés à l'échelle du bâtiment. De plus, ils ont mis en évidence l'influence des performances initiales des différents bâtiments, ou des contraintes sur le phasage (ici une intervention sur un bâtiment par an), sur les combinaisons de mesures mises en œuvre, la planification des interventions dans le temps et les performances des programmes, sur le parc. Par exemple, il est intéressant de noter que les trois solutions particulières étudiées suggèrent de focaliser les interventions d'abord sur la maison individuelle avant d'entreprendre des travaux sur le petit bâtiment collectif.

En termes de perspectives, l'étude de parcs complexes de plusieurs dizaines de bâtiments est à ce stade limitée par des temps de calcul prohibitifs. Ces temps de calcul sont liés à l'évaluation des besoins de chaleur par simulation thermique dynamique. Le couplage de l'optimisation à des méthodes de calcul rapides d'évaluation des besoins énergétiques constitue une piste intéressante. Modèles de thermique statique ou interpolation de la surface de réponses offrent deux voies potentielles, la qualité de l'évaluation devant alors être maîtrisée.

De plus, ces développements ont permis d'étendre les approches d'optimisation libre, à l'échelle des parcs bâtis. A la manière du Chapitre 4, il serait alors intéressant d'intégrer des contraintes budgétaires, sous la forme de plans de financement pluriannuel, et d'envisager l'optimisation sous contraintes, pour dépasser le cas du phasage à une intervention de réhabilitation par an.

Par ailleurs, les mesures de réhabilitation étudiées à l'échelle du parc sont ici les mêmes que celles à l'échelle des bâtiments. Or des degrés de liberté supplémentaires peuvent exister sur un parc. Par exemple, il serait intéressant de compléter les développements actuels en étendant l'espace de recherche par l'introduction de mesures de réhabilitation pouvant être mutualisées entre plusieurs bâtiments. Dans le cas où les différents bâtiments du parc sont voisins, au sein d'un quartier, leur raccordement au réseau de chaleur urbain pourrait être considéré lors d'une phase donnée du programme, limitant ainsi les investissements relatifs.

Enfin, l'échelle du parc soulève la problématique récurrente des typologies de bâtiments. La section suivante propose quelques éléments et réflexions sur le sujet.

## 5.3 Typologies de bâtiment et réhabilitation énergétique

L'étude des stratégies de réhabilitation énergétique sur les parcs existants pose nécessairement la question de la représentation et de la modélisation des différents bâtiments constitutifs du parc. Sont-ils à modéliser individuellement ou peuvent-ils être représentés dans leur diversité par quelques bâtiments types ?

Cette section propose quelques éléments de discussion et quelques réflexions sur les typologies de bâtiment en réhabilitation énergétique. Plus que l'expression d'une vision définitive sur la problématique des typologies, l'objectif de ces développements est davantage d'illustrer en quoi l'optimisation multicritère exacte peut contribuer aux réflexions sur le sujet.

### 5.3.1 Introduction

Différents acteurs publics ou privés ont initié des démarches encourageantes de compréhension de leurs parcs immobiliers, dans une perspective de réhabilitation énergétique.

Par exemple, la communauté d'agglomération de Grenoble a lancé en 2003 une vaste opération de réhabilitation énergétique du quartier des Grands Boulevards (OPATB, ou Opération Programmée d'Amélioration Thermique et Energétique des Bâtiments). Ainsi, 45 copropriétés, soit 1300 logements, ont fait l'objet de diagnostics énergétiques.

La définition de bouquets de réhabilitation énergétique sur les bâtiments des Grands Boulevards, puis l'extension du périmètre des actions à l'agglomération grenobloise dans son ensemble (Campagne Isolation, sur 26700 logements en copropriétés privées), ont conduit à mener des études détaillées sur quelques bâtiments types et à extrapoler les conclusions sur le parc.

Une typologie du bâti existant en logements collectifs a ainsi été établie, à partir de 9 paramètres techniques et architecturaux (ayant une influence sur la performance énergétique du bâtiment et potentiellement sur les mesures à mettre en œuvre). Des audits énergétiques détaillés – mobilisant thermographie infrarouge, tests d'étanchéité à l'air de l'enveloppe et simulations thermiques dynamiques – ont alors été menés sur 4 copropriétés jugées représentatives du parc.

Une démarche similaire a été suivie pour partie dans le cadre du projet CIBLE (Cohérence des Interventions pour réaliser des Bâtiments de Logements basse Energie) de la Fondation Bâtiment Energie. Sept typologies ont ainsi été définies pour représenter 770 bâtiments appartenant au parc d'OSICA, soit 86% du parc étudié, ou 89% en termes de logements. Des bâtiments correspondants à chacune des 7 typologies ont servi de base aux études thermiques.

Notons bien que la représentation d'un parc par une typologie n'est pas anodine dans le déploiement d'une stratégie de réhabilitation énergétique.

Elle conduit notamment à une transition importante depuis une approche par objectifs de performance vers une approche par définition de moyens. Les études détaillées des bâtiments types conduisent à la définition de bouquets types de travaux de réhabilitation énergétique. Les bâtiments relatifs à une typologie donnée sont alors à réhabiliter suivant les préconisations techniques identifiées sur les types, sans garantie a priori des performances atteintes. La définition des typologies a donc des conséquences importantes sur la pertinence énergétique et économique des travaux entrepris. Ces conséquences doivent être maîtrisées.

Ainsi, la définition opérationnelle d'une stratégie d'intervention sur le parc fait souvent face à la tentation naturelle de réduire la complexité du problème par la représentation des différents bâtiments du parc par quelques typologies, jugées représentatives et sur lesquelles des audits énergétiques détaillés sont alors conduits. Les conclusions sur le parc sont alors brutalement extrapolées à partir des quelques études menées.

En l'absence de données suffisantes, cette approche opérationnelle est compréhensible ; les études thermiques détaillées réclament du temps et des moyens financiers non-négligeables, les rendant aujourd'hui difficilement envisageables à moindre coût, à l'échelle d'un parc.

Cependant, et à partir de quelques audits énergétiques, la projection d'une grande variété de bâtiments sur un nombre réduit de types préétablis demeure une problématique complexe et dont les implications sont difficiles à maîtriser.

### 5.3.2 Approches traditionnelles de typologie

Plus généralement, et dans une perspective de réhabilitation énergétique du patrimoine bâti, la définition des typologies de bâtiments procède traditionnellement de deux approches principales (N. Kohler), précisées ci-après :

- La **typologie descriptive, a priori** ;
- La **classification statistique, a posteriori**.

#### Typologies descriptives a priori

Les approches de recherche opérationnelle, pour l'aide à la décision concernant la réhabilitation énergétique des parcs, sont souvent fondées sur une typologie descriptive a priori, comme illustré ci-dessus en introduction.

Dans ce cas, la segmentation du parc en types de bâtiments est basée sur quelques paramètres descriptifs des bâtiments existants, à l'état initial avant réhabilitation. Choisis en raison de leur influence sur le bilan énergétique des constructions, ces paramètres techniques et architecturaux ont généralement trait au :

- Type de programme : résidentiel ou tertiaire (bureaux, locaux commerciaux, établissements scolaires, bureaux, hôpitaux, entrepôts, bâtiments industriels) ;
- Aspects morphologiques : taille (nombre d'étages, surface habitable, etc.), forme (barre, tour, etc.), mitoyenneté ;
- Type de chauffage ;
- Type d'énergie primaire pour le chauffage ;
- Année de construction et/ou de rénovation ;
- Contexte climatique ;
- Type d'occupant : propriétaire ou locataire.

Sont plus rarement considérés :

- Caractérisation des façades : présence de loggias ou balcons ;
- Distribution des surfaces vitrées suivant les orientations ;
- Systèmes d'aération préexistants.

Cette liste de paramètres ne se veut pas exhaustive. Les Tableau 39 et Tableau 40 illustrent ceux ayant servis à l'établissement de typologies de bâtiments, pour différents modèles s'intéressant à la réhabilitation des parcs existants. Le type de programme et les aspects morphologiques sont souvent employés. Les classes d'âge sont systématiquement mobilisées.

*La connaissance des périodes de construction ou de rénovation constitue en effet une information importante, renseignant sur les modes constructifs susceptibles de caractériser la composition physique de l'enveloppe. Par exemple, en France, les bâtiments résidentiels construits après 1974 – soit après l'introduction de la première réglementation thermique – ont systématiquement été isolés thermiquement, contrairement à ceux construits avant 1974 et non réhabilités depuis. Toutefois, même à partir de la classe d'âge, d'importantes incertitudes demeurent. Sur cette seule base, il est difficile de déterminer la composition physique réelle des parois d'un bâtiment donné, ayant vraisemblablement connu sur son cycle de vie différentes transformations souvent mal connues.*

A partir des valeurs prises sur ces paramètres, des types de bâtiments sont définis sur le parc. Les édifices présentant des caractéristiques descriptives similaires sont alors directement représentés par un bâtiment type unique, dont l'ensemble des propriétés spécifiques leur sont associées. Une modélisation et des études détaillées sont menées uniquement sur les bâtis types. Les solutions de réhabilitation identifiées sur les types sont ensuite extrapolées à l'ensemble des bâtiments présentant des caractéristiques descriptives similaires, sans études complémentaires.

Cette classification a priori n'est cependant pas sans risque. Suivant la nature du parc et les paramètres de segmentation, elle peut conduire à assimiler des constructions très différentes ou à introduire des distinctions peu pertinentes.

<b>Modèle de parc</b>	<b>BREHOMES</b>	<b>CREEM</b>	<b>Regional engineering model</b>	<b>US Building stock*</b>	<b>VerbCO<sub>2</sub>M</b>
<b>Source</b>	<b>Shorrocks et al. (1997)</b>	<b>Farahbakhsh et al. (1998)</b>	<b>Snakin (2000)</b>	<b>Huang et Brodrick (2000)</b>	<b>Hens et al. (2001)</b>
Type de programme (activité)		X	X		
Morphologie/mitoyenneté (résidentiel)	X		X	X	X
Surface habitable					X
Niveau d'isolation thermique					
Type de chauffage	X		X		X
Type d'énergie primaire de chauffage		X	X		X
Année de construction/rénovation	X	X	X	X	X
Région climatique		X		X	
Type d'occupant (propriétaire ou non)	X				

**Tableau 39. Paramètres de caractérisation des typologies de bâtiments pour différents modèles de parcs basés sur la physique du bâtiment [1/2]**

\* Nom exact: A Bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads for the entire US Building stock

<b>Modèle de parc</b>	<b>Johnston</b>	<b>UKDCM</b>	<b>DECarb</b>	<b>CDEM</b>
<b>Source</b>	<b>Johnston (2003)</b>	<b>Boardman et al. (2005)</b>	<b>Natarajan et Levermore (2007)</b>	<b>Firth et al. (2010)</b>
Type de programme (activité)		X	X	X
Morphologie/mitoyenneté (résidentiel)		X	X	X
Surface habitable		X		
Niveau d'isolation thermique			X	
Type de chauffage				
Type d'énergie primaire de chauffage				
Année de construction/rénovation	X	X	X	X
Région climatique				
Type d'occupant (propriétaire ou non)				

**Tableau 40. Paramètres de caractérisation des typologies de bâtiments pour différents modèles de parcs basés sur la physique du bâtiment [2/2]**

Une segmentation basée uniquement sur les classes d'âge, supposées représenter des modes constructifs différents, ne fait pas nécessairement de sens en termes énergétiques.

Sur le Tableau 41, il est ainsi intéressant de remarquer que les différences de consommations énergétiques peuvent être plus significatives entre les bâtiments appartenant à une même période de construction, qu'en moyenne entre différentes périodes. Ainsi, l'écart entre les niveaux maximum et minimum de consommations de chauffage atteint 627 MJ/m<sup>2</sup>.an, pour les bâtiments construits avant 1919. La différence entre les moyennes de consommations des bâtiments construits avant 1919 et entre 1920 et 1945 s'établit à 12 MJ/m<sup>2</sup>.an.

	Nombre	Médiane	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
<b>Avant 1919</b>	27	436	453	140	190	817
<b>1920-1945</b>	59	426	441	146	130	991
<b>1946-1960</b>	15	461	474	114	294	724
<b>1961-1970</b>	12	440	450	131	256	782
<b>1971-1980</b>	8	449	443	59	354	545
<b>1981-1990</b>	0	-	-	-	-	-
<b>1991-2000</b>	2	241	241	35	217	266
<b>Après 2000</b>	0	-	-	-	-	-
<b>Toutes périodes</b>	123	433	445	136	130	991

**Tableau 41. Consommations énergétiques de chauffage, en fonction des périodes de construction, pour différents bâtiments collectifs résidentiels de la ville de Bâle [MJ/m<sup>2</sup>.an] (extrait de Wallbaum et Jakob, 2009).**

Les typologies descriptives a priori reposent largement sur un jugement expert. Construites à partir de données trop limitées, elles sont susceptibles de conduire à une segmentation du parc apparaissant peu cohérente, comme sur l'exemple du Tableau 41. Par ailleurs, Michelson et Muller-Michelson (2010) concluent également qu'il n'existe pas de corrélations simples entre les propriétés des bâtiments (dont structure et composition physique, relatives aux classes d'âge) et les consommations énergétiques.

Certains travaux ont travaillé à l'élaboration de typologies descriptives beaucoup plus détaillées. Par exemple, A. Pouget et son équipe (2011) ont défini une typologie sur le parc des bâtiments collectifs résidentiels français, selon les grandes époques de construction, en caractérisant les bâtis existants sur de nombreux paramètres. Le Tableau 42 fournit un exemple des dispositions et caractéristiques urbaines, spatiales et d'usage, constructives et assurant le clos et le couvert, pour des bâtiments post-haussmanniens construits entre 1850 et 1914.

Cette typologie renseignée sert la connaissance des bâtis existants. Elle vise à mieux comprendre les objets à traiter et appréhender les choix d'amélioration de leur performance énergétique.

De l'avis même des auteurs, cette typologie ne peut servir à établir des « recettes toutes-faites » pour la réhabilitation de chaque type. En effet, chaque bâtiment constitue un cas particulier, ne serait-ce que par les transformations connues depuis la livraison. Il s'agit davantage d'un outil d'aide à la réflexion.

<b>TYPE 3 : POST-HAUSSMANNIEN – PERIODE : 1870 – 1914</b>	
<b>A / Dispositions urbaines – environnement</b>	
Datation	Vers 1906
Superficie de la parcelle et densité de la construction (COS)	394 m <sup>2</sup> – COS = 6
Position du bâtiment sur la parcelle	A l'alignement sur rue entre mitoyen – Bâtiment d'angle
Epaisseur des corps de bâtiment	10 m
Gabarits	R+5+C – H = 22m à l'alignement – 1 <sup>er</sup> étage en retrait et 2 étages de combles habitables
<b>B / Dispositions spatiales – usage</b>	
Mixité (résidentiel / commercial)	Logements en étages – Commerces au RDC
Séquences d'entrée / distributions verticales	Passage cocher – Vestibule donnant accès à la cage d'escalier – Loge de concierge – Escalier de service accessible depuis la cour
Position et éclairage des pièces de service	Sur cour, éclairées et ventilées naturellement
Niveau de confort initial / rapporté	Immeuble bourgeois – Salle d'eau + WC
Rapport plein / vide en façade	
Hauteur sous-plafond	RDC : 3,50 m – Etage courant : 3,00 à 3,50 m
Caractère du bâtiment (décoration intérieure et extérieure)	Façade rue peu ouvragée mais de caractère, en pierres de taille (ou mixte pierre et briques) avec saillies toute hauteur à partir du R+2 (consoles balcons en pierre sculptée – Garde-corps serrurerie ouvragée) – Parquets et plafonds plâtre ornementés
<b>C / Dispositions constructives – équarrissages – matériaux</b>	
Parois verticales	Façade rue en pierres de taille ou mixtes pierres et briques épaisseur 50 à 35 cm – Façade sur cour en briques 44 à 22 cm – Murs mitoyens en pierre 50 cm
Planchers	Poutrelles métalliques + hourdis plâtre 15 à 20 cm, hors revêtements
Combles ou terrasses	Charpente bois à fermes et pannes, Brisis + terrasson
Escaliers	Escalier bois balancé 2 quarts tournants à jour central
Sous-sol	Poutrelles métalliques + voutains briques pleines 15 à 25 cm hors revêtements
<b>D / Dispositions assurant le clos et le couvert – second œuvre</b>	
Revêtement de façade	Pierres de taille + briques apparentes sur rue – Enduit plâtre sur cour 2 à 3 cm
Menuiseries extérieures	Bois simple vitrage – Pose en feuillure à mi-mur avec ébrasements
Occultation (intérieure ou extérieure)	Persiennes métalliques extérieures
Couverture	Ardoises ou zinc sur brisis – Zinc sur terrasson
Cloisons et contre-cloisons	Briques ou carreaux de machefer épaisseur 5 à 7 cm
Plafonds	Plâtre épaisseur 2 à 5 cm avec corniches et moulures
Revêtements de sol	Parquet chêne sur lambourdes scellées au plâtre dans les pièces sèches, épaisseur 6 à 7 cm – Carreaux de terre cuite + mortier de pose sur aire de sable dans les pièces humides, épaisseur 6 à 10 cm

**Tableau 42. Dispositions et caractéristiques du bâti par typologie**  
Exemple du type 3 post-haussmannien – Période 1 : 1850-1914 (extrait de Pouget, 2011).

## Classification statistique a posteriori

Contrairement aux approches descriptives a priori, la **classification statistique a posteriori** ne repose pas sur la définition en amont de bâtiments types, souvent utilisés pour déduire par extrapolation le comportement ou les stratégies de réhabilitation à l'échelle du parc. La segmentation des parcs en typologies est ici construite à partir de l'analyse statistique de données dont la granularité est l'échelle du bâtiment et caractérisant l'ensemble du parc.

L'identification de clusters ou de sous-ensembles homogènes au sein du parc se base sur une large gamme de paramètres (dont certains correspondent à ceux cités précédemment) ainsi que sur les consommations énergétiques des différents bâtiments, connus par leur géo-localisation, par exemple.

Pour être pertinente, la classification statistique réclame des volumes de données importants, caractérisant les bâtiments individuellement et sur de nombreux critères.

Force est de constater que les sources de données détaillées sur les parcs de bâtiments Européens sont aujourd'hui relativement limitées. Le rapport Erabuild sur la rénovation et la modernisation des bâtiments en Europe (Itard et al., 2008) figure comme l'une des rares références.

Kohler et Hassler (2012) considèrent néanmoins que ces bases de données peuvent apparaître à grande échelle, sous deux conditions. La structuration rigoureuse et à grande échelle du recueil de ces données (par des statistiques nationales, ou toute agence gouvernementale) associée à une instrumentation limitée des bâtiments à réhabiliter permettraient ainsi de constituer efficacement les bases de données nécessaires à l'exploitation statistique. Par ailleurs, le recueil de ces données à l'échelle du bâtiment constitue évidemment un point de départ pour l'élaboration de stratégies de réhabilitation :

*« Chaque bâtiment doit être étudié en termes de : type et état physique de la structure et de l'enveloppe, fonction et scénarios d'usage, efficacité des équipements, consommations énergétiques mesurées. Ces données constituent l'information nécessaire à la structuration de toute stratégie d'intervention. Ce travail d'analyse à l'échelle du bâtiment ne répond pas uniquement aux enjeux énergétiques mais également au caractère multidimensionnel de la valeur des bâtiments – matérielle et immatérielle – résultant de sa situation et de son histoire ». (Kohler et Hassler, 2012).*

Au-delà de la problématique des typologies, ces données une fois recueillies offrent des possibilités évidentes de modélisation des parcs. Elles permettent de constituer des modèles tridimensionnels détaillés. Les bâtiments des parcs sont alors traités individuellement et géo-localisés. Leur état courant est caractérisé par rapport aux cycles de rénovation et de maintenance, permettant ainsi de simuler l'évolution du parc dans le temps.

La constitution de large base de données sur les stocks existant est donc une clé de voûte, tant pour les études statistiques de classification que pour la modélisation fine des parcs bâtis.

### **5.3.3 Optimisation multicritère et typologies de bâtiments en réhabilitation énergétique**

De par leur principe et la fraction du parc étudiée, typologie descriptive a priori ou classification statistique a posteriori sont des méthodes fondamentalement différentes de segmentation des parcs existants. Néanmoins, elles se basent toutes deux sur des informations de même nature : paramètres descriptifs et performances des bâtiments à l'état avant réhabilitation. L'optimisation multicritère peut alors permettre de porter un regard différent sur la problématique des typologies.

#### **Changement de paradigme**

Remarquons que les approches précédentes classent les bâtiments, dans une perspective de réhabilitation énergétique, en n'exploitant ni la nature, ni les performances des programmes efficaces de réhabilitation, pouvant être proposés sur les différents bâtis du parc considéré. Elles sont fondées sur des paramètres descriptifs ou les performances à l'état initial avant réhabilitation. Elles ne renseignent donc a priori ni sur les types, ni sur les performances, ni sur les différences potentielles de programmes de réhabilitation, suivant les bâtiments du parc.

Formellement, les typologies descriptives ou statistiques sont établies à partir de distinctions dans un ensemble de décision (sur la base des valeurs prises par les variables du problème), sans lien avec les performances atteintes en réhabilitation dans l'espace des objectifs.

Pourtant, rien n'assure que la différenciation sur la base de paramètres descriptifs ou des performances actuelles soit nécessaire et suffisante pour discriminer les cas de réhabilitation. Le lien avec les performances en réhabilitation n'est pas scientifiquement établi à ce stade.

Dans les travaux suivants, nous proposons de changer de paradigme et de réfléchir à la problématique des typologies en réhabilitation, non pas à partir de paramètres descriptifs de l'état du bâtiment existant mais sur la base des ensembles de stratégies de réhabilitation non-dominées, solutions d'une optimisation.

#### **Contribution de l'optimisation multicritère aux réflexions typologiques**

L'approche proposée dans les développements suivants fonde la différenciation des bâtiments sur les programmes efficaces de réhabilitation énergétique identifiés en optimisation et caractérisés par la double donnée de :

- La nature des interventions, soient les combinaisons de mesures de réhabilitation et de séquence des travaux, par exemple ;
- Des performances atteintes par le bâtiment réhabilité.

Ces travaux ne portent aucunement l'ambition de définir une classification globale et définitive des typologies mais de contribuer aux réflexions sur le sujet. Une étude a été menée simplement sur quelques cas pour étayer la démarche. La différenciation proposée souffre d'une limite évidente : elle est dépendante des technologies existantes considérées dans la définition de l'espace de recherche. L'introduction de nouvelles techniques est alors de nature à modifier les différences potentiellement observées.

### 5.3.4 Etude de cas

Pour illustrer la contribution de l'optimisation multicritère aux réflexions sur les typologies de bâtiments en réhabilitation énergétique, nous nous proposons de comparer les solutions identifiées par programmation dynamique, pour différentes configurations initiales de bâtiments, directement inspirés de la barre Grimaud. La programmation dynamique étant une technique d'optimisation exacte, les solutions identifiées et les surfaces de compromis obtenues peuvent donc être comparées directement. La comparaison porte alors tant sur la nature des solutions efficaces obtenues que sur leurs performances.

#### Présentation de l'étude de cas

Cette étude de cas – assimilable à une étude de sensibilité – vise à comparer les solutions de réhabilitation pour différentes configurations initiales de bâtiments, inspirés de la barre Grimaud. Celles-ci diffèrent de la barre Grimaud de référence (présentée au Chapitre 1) par quelques variations paramétriques portant sur : l'orientation des ouvertures, les masques proches au rayonnement solaire, le climat local ou encore la composition et la résistance thermique de certains composants de l'enveloppe. 7 configurations sont ainsi étudiées. Elles sont désignées par les dénominations suivantes :

- Référence (Ref) [besoin de chauffage : **178** kWh/m<sup>2</sup>.an] ;
- Orientation Nord (ON) [besoin de chauffage : **181** kWh/m<sup>2</sup>.an] ;
- Morphologie de centre urbain (CU) [besoin de chauffage : **196** kWh/m<sup>2</sup>.an] ;
- Morphologie de grands ensembles (GE) [besoin de chauffage : **190** kWh/m<sup>2</sup>.an] ;
- Climat de Nice (N) [besoin de chauffage : **67** kWh/m<sup>2</sup>.an] ;
- Climat de Rennes (R) [besoin de chauffage : **147** kWh/m<sup>2</sup>.an] ;
- Rénovation traditionnelle partielle (RP) [besoin de chauffage : **154** kWh/m<sup>2</sup>.an].

Les abréviations introduites ci-dessus sont utilisées sur les graphiques et tableaux des pages suivantes. Le détail de ces configurations et en particulier des modifications apportées par rapport à la barre Grimaud de référence, est présenté sur le Tableau 43. Par ailleurs, les Figure 178 et Figure 179 illustrent les morphologies urbaines simplifiées associées respectivement au cas des grands ensembles et du centre urbain. Les Figure 180 et Figure 181 détaillent les variantes de configurations sur la répartition des ouvertures suivant l'orientation.

Notons bien que ces différentes configurations représentent des bâtiments construits à la même période, de même morphologie (même compacité), tous chauffés à l'état initial par une chaudière à fioul datant de plus de 10 ans. Les scénarios d'occupation et les consignes de chauffage sont rigoureusement identiques dans tous les cas. Suivant bon nombre de classifications typologiques, ces constructions appartiendraient à un même type de bâtiment.

Dans les différents cas, les programmes non-dominés de réhabilitation énergétique séquentielle sont recherchés par la programmation dynamique sur l'espace de décision 2. Cet espace de décision a été défini au Chapitre 1 et rappelé dans la première partie de ce Chapitre. La programmation dynamique est une méthode d'optimisation exacte, aussi les solutions identifiées pour les différentes configurations étudiées peuvent être directement comparées.

<b>CONFIGURATION</b>	<b>DIFFERENCES PAR RAPPORT A LA BARRE GRIMAUD DE REFERENCE</b>
<b>Orientation Nord (ON)</b>	Modification de la répartition de la surface de vitrages suivant les différentes orientations. La surface totale de vitrages est cependant conservée pour chacun des appartements. La répartition correspondante des ouvertures est illustrée sur les Figure 180 et Figure 181.
<b>Climat de Nice (N)</b>	Positionnement de la barre Grimaud dans le climat de Nice (et non de Trappes).
<b>Climat de Rennes (R)</b>	Positionnement de la barre Grimaud dans le climat de Rennes (et non de Trappes).
<b>Morphologie de centre urbain ancien (CU)</b>	Intégration de masques proches au rayonnement solaire modélisant une morphologie urbaine de type centre urbain ancien. Les bâtiments adjacents sont ici séparés par la largeur de la voirie correspondant à deux voies de circulation, environ (9m). La géométrie de la morphologie simplifiée adoptée est illustrée sur la Figure 179.
<b>Morphologie de grands ensembles (GE)</b>	Intégration de masques proches au rayonnement solaire modélisant une morphologie urbaine de type périphérie urbaine, correspondant à un environnement dominé par les grands ensembles. Les bâtiments adjacents sont espacés de quelques dizaines de mètres. Des terrains ou esplanades sont considérés entre les constructions voisines. La géométrie de la morphologie simplifiée adoptée est illustrée sur la Figure 178.
<b>Rénovation traditionnelle partielle (RP)</b>	Modification de la composition de certaines parois et du type d'ouverture. On considère dans cette configuration qu'un certain nombre de travaux de rénovation traditionnelle ont été menés sur le cycle de vie de la barre Grimaud. Ainsi, la réfection de l'étanchéité à l'eau de la toiture a donné lieu à la pose d'une isolation thermique sous la forme d'une épaisseur de 5cm de polyuréthane. De plus, les menuiseries anciennes ont été remplacées par des fenêtres double-vitrage (peu performant) dont les menuiseries sont en PVC. L'état initial – avant réhabilitation énergétique – diffère donc de la configuration de référence sur ces deux aspects.

Tableau 43. Configurations de bâtiments étudiées et différences par rapport à la barre Grimaud de référence

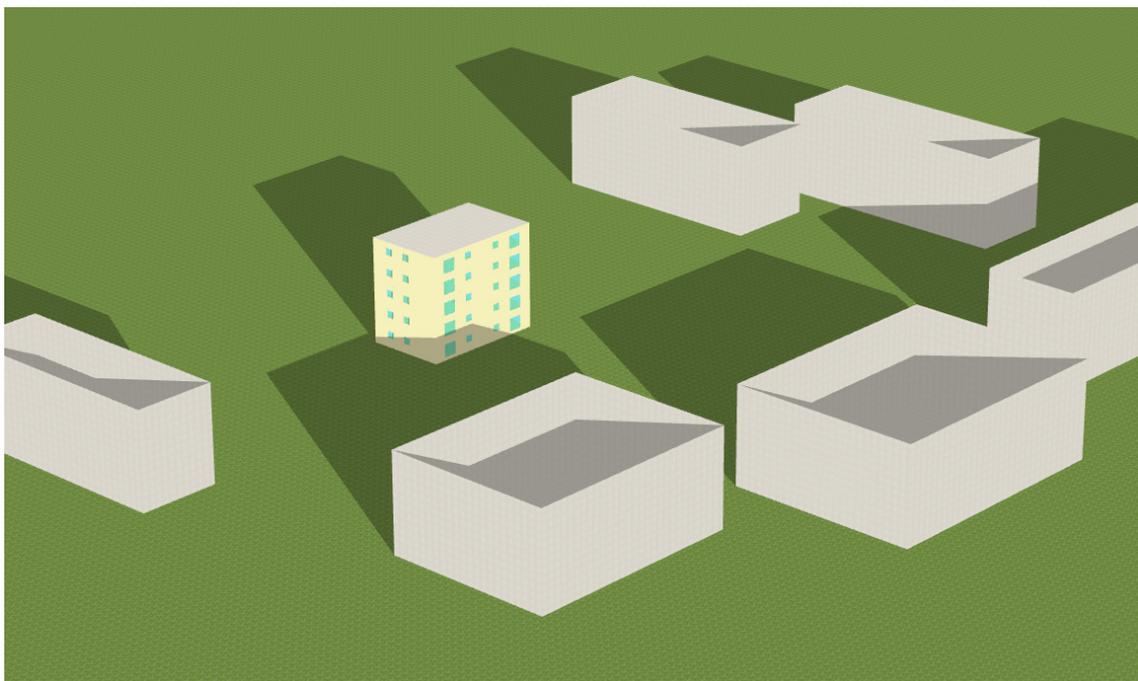


Figure 178. Barre Grimaud et masques proches de la « Morphologie de grands ensembles »  
(Ombres portées le 31 décembre à 14h00)

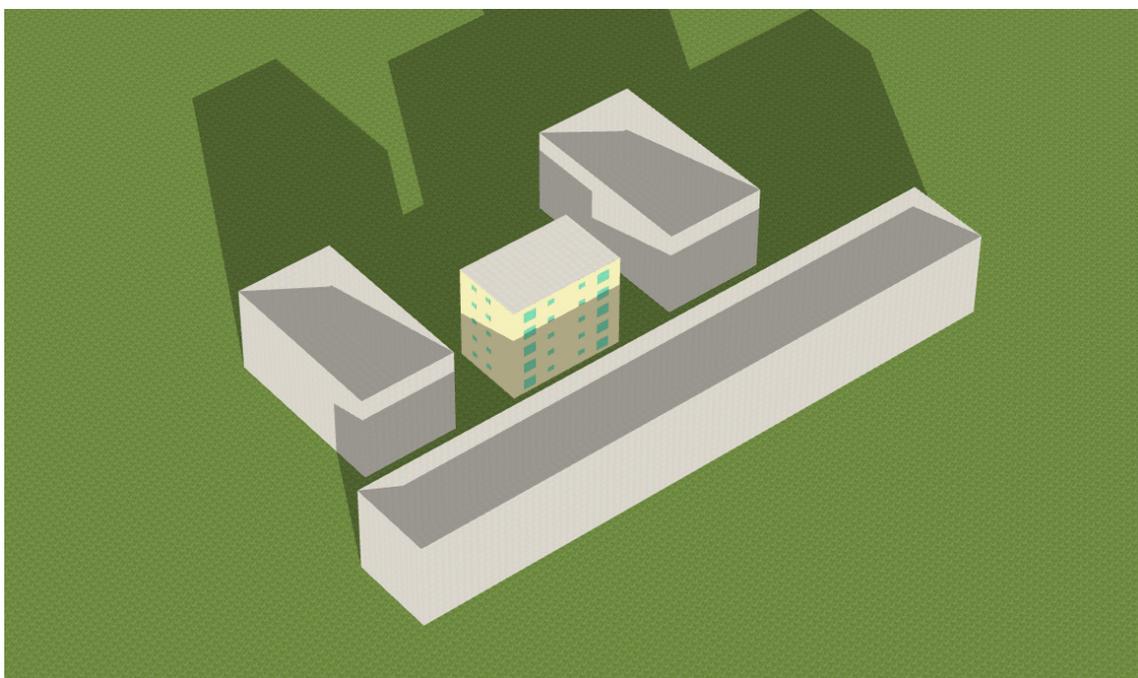


Figure 179. Barre Grimaud et masques proches de la « Morphologie de centre urbain ancien »  
(Ombres portées le 31 décembre à 14h00)

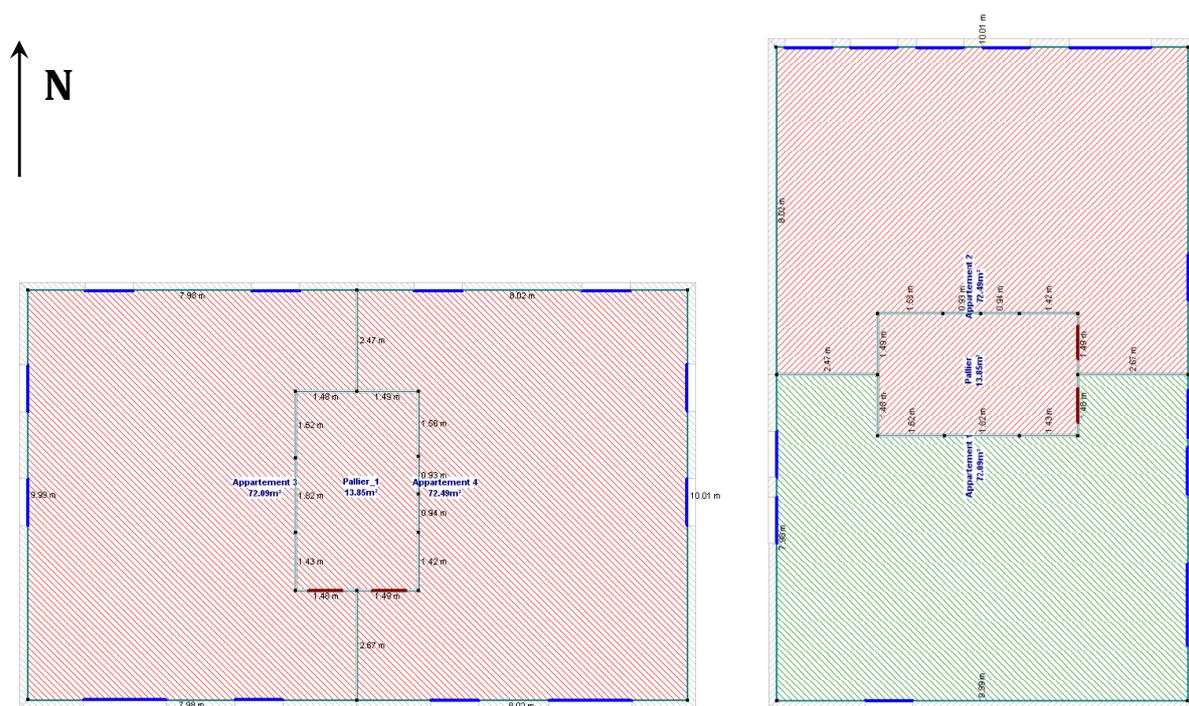


Figure 180. Barre Grimaud et répartition des ouvertures suivant l'orientation  
Cas de référence (à gauche) et cas à orientation Nord (à droite)

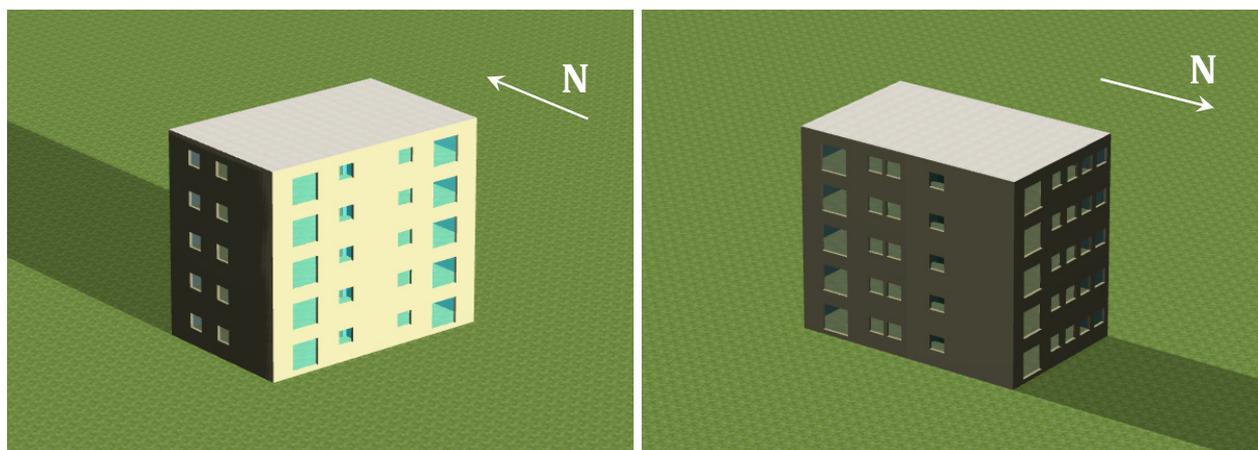


Figure 181. Représentation 3D de la barre Grimaud suivant la répartition des ouvertures  
Cas de référence (à gauche) et cas à orientation Nord (à droite)  
Les ombres portées sont représentées pour une journée quelconque à 12h00.

## Comparaison des solutions particulières

Sur l'espace de recherche 2, les stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle ont été recherchées par programmation dynamique, pour les sept configurations étudiées.

Les comparaisons quantitatives sont limitées à quelques solutions particulières. En effet, Zitzler et al. (2003) ont démontré que la comparaison de deux ensembles de points dans un espace multidimensionnel nécessite un nombre infini de mesures sur l'ensemble.

Cette section a donc pour objectif de comparer – en termes de définition : combinaison de mesures de réhabilitation et de séquence des interventions – les solutions obtenues dans les différents cas pour les optimums locaux suivants :

- **A** : Optimum local en consommation cumulée d'énergie primaire ;
- **B** : Optimum local en coût global sur le cycle de vie ;
- **C** : Optimum local en coût d'investissement (Cumulé sur les phases de réhabilitation).

Les abréviations précisées en introduction de l'étude de cas sont ici utilisées pour désigner les solutions des différentes configurations. Pour rappel :

- **Ref.** : Configuration de référence de la barre Grimaud ;
- **ON** : Orientation Nord prépondérante pour les surfaces de vitrages ;
- **CU** : Morphologie de centre urbain pour l'intégration des masques proches ;
- **GE** : Morphologie de grands ensembles pour l'intégration des masques proches ;
- **N** : Implantation de la barre Grimaud dans le climat de Nice ;
- **R** : Implantation de la barre Grimaud dans le climat de Rennes ;
- **RP** : Etat initial de la barre Grimaud intégrant quelques interventions relatives à la rénovation traditionnelle partielle du bâtiment sur son cycle de vie.

Les Tableau 44, Tableau 45 et Tableau 46 ci-après précisent la nature des solutions particulières, de types **A**, **B** ou **C**, identifiées pour chacune des configurations étudiées de la barre Grimaud.

A partir de ces tableaux, chacun des programmes de réhabilitation correspondant à l'une des solutions particulières est donc connu par la combinaison de mesures de réhabilitation mise en œuvre ainsi que par la séquence des interventions associée.

Sur ces tableaux, sont représentées sur fond rouge les différences par rapport à la configuration de référence de la barre Grimaud.

Sur l'espace de recherche considéré, il est intéressant de noter que :

### En termes de composition...

- Globalement, les stratégies efficaces de réhabilitation énergétique (**A**, **B** ou **C**) diffèrent peu suivant la configuration considérée, en termes de combinaison de mesures. En dehors du cas du climat de Nice, la composition des programmes de réhabilitation

correspondant aux solutions optimales **A**, **B** ou **C**, est la même quelle que soit la configuration étudiée pour la barre Grimaud.

- Dans le climat de Nice, les solutions les plus efficaces énergétiquement ne réclament cependant pas des niveaux élevés d'isolation thermique. Aussi, les niveaux minimum sur l'espace de recherche sont considérés pour l'isolation thermique de la toiture (ITE 150 mm de polyuréthane), du plancher bas (ITE 100 mm de polystyrène extrudé) ainsi que pour les fenêtres (double-vitrages). Au-delà de ces niveaux, la sur-isolation ne représente aucun bénéfice sur le plan énergétique, sur le cycle de vie considéré. Par ailleurs, dans le climat de Nice, notons que la stratégie minimisant le coût global met en œuvre la ventilation de type hygro-B alors que le double flux est préféré dans tous les autres cas.

### En termes de phasage des interventions...

- On note davantage de variations en termes de phasage des programmes de réhabilitation efficaces, suivant les configurations de bâtiments étudiées.
- En particulier, on note sur le Tableau 44 que, dans les cas où les besoins de chauffage à l'état initial sont significativement inférieurs à ceux de la référence (climat de Nice ou de Rennes), le remplacement du système de chauffage est alors considéré en premier lieu par les stratégies **A**, minimisant les consommations énergétiques sur le cycle de vie. Les performances attendues par l'amélioration de la résistance thermique de l'enveloppe sont dans ce cas moindres que les progrès liés à l'augmentation du rendement de la génération de chaleur, sous les hypothèses considérées.
- Par ailleurs, la configuration dite de « rénovation traditionnelle partielle » impose une séquence d'interventions particulière. La toiture ayant déjà été légèrement isolée, les ouvertures ayant été remplacées quelques années auparavant, les mesures de réhabilitation relatives à ces deux postes sont logiquement considérées en seconde partie de programme, quelle que soit la solution particulière considérée : **A**, **B** ou **C**. En revanche, l'isolation de la toiture et le remplacement des ouvertures sont souvent des priorités pour les autres configurations du bâtiment.

Ainsi, si quelques variations sont notées sur les solutions particulières en termes de phasage des interventions, globalement les programmes efficaces **A**, **B** ou **C** sont de même nature quelle que soit la configuration considérée pour la barre Grimaud, à l'exception du climat Niçois.

Dans des climats fortement différenciés (Paris et Nice par exemple), les stratégies optimales de réhabilitation ne sont clairement pas de même nature.

Sur la base des configurations étudiées et des solutions particulières comparées, les distinctions en termes de natures des solutions sont relativement limitées, en dehors de différences marquées de contexte climatique. Cependant, la comparaison des solutions ne peut se limiter à leur nature et se doit de faire état des performances atteintes dans les différents cas.

		VARIANTES DE REHABILITATION						
Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	A <sub>Ref</sub>	A <sub>ON</sub>	A <sub>CU</sub>	A <sub>GE</sub>	A <sub>RP</sub>	A <sub>N</sub>	A <sub>R</sub>
Murs de façades	ITE Laine minérale [mm]	200	200	200	200	200	200	200
Toiture	ITE Polyuréthane [mm]	300	300	300	300	300	150	300
Plancher inférieur	ITE Polystyrène extrudé [mm]	200	200	200	200	200	100	200
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	TV	TV	TV	TV	TV	DV	TV
Ventilation	Type de système de ventilation	DF	DF	DF	DF	DF	DF	DF
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Production ECS	Fraction solaire de la production [%]	75	75	75	75	75	75	75

		PHASAGE DES INTERVENTIONS						
Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	A <sub>Ref</sub>	A <sub>ON</sub>	A <sub>CU</sub>	A <sub>GE</sub>	A <sub>RP</sub>	A <sub>N</sub>	A <sub>R</sub>
Murs de façades	ITE Laine minérale [mm]	1	2	1	1	1	2	2
Toiture	ITE Polyuréthane [mm]	3	3	3	3	6	4	4
Plancher inférieur	ITE Polystyrène extrudé [mm]	5	5	5	5	4	5	5
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	6	6	6	6	5	6	6
Ventilation	Type de système de ventilation	7	7	7	7	7	7	7
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	2	1	2	2	2	1	1
Production ECS	Fraction solaire de la production [%]	4	4	4	4	3	3	3

**Tableau 44. Détail des programmes de réhabilitation A<sub>Ref</sub>, A<sub>ON</sub>, A<sub>CU</sub>, A<sub>GE</sub>, A<sub>RP</sub>, A<sub>N</sub> et A<sub>R</sub> en termes de variantes sur les combinaisons de mesures de réhabilitation et sur le phasage des interventions**

DV = Double vitrage ; TV = Triple vitrage

HB = Ventilation de type hygro-B ; DF = Ventilation double-flux.

		VARIANTES DE REHABILITATION						
Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	$B_{Ref}$	$B_{ON}$	$B_{CU}$	$B_{GE}$	$B_{RP}$	$B_N$	$B_R$
Murs de façades	ITE Laine minérale [mm]	100	100	100	100	100	100	100
Toiture	ITE Polyuréthane [mm]	150	150	150	150	150	150	150
Plancher inférieur	ITE Polystyrène extrudé [mm]	100	100	100	100	100	100	100
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV
Ventilation	Type de système de ventilation	DF	DF	DF	DF	DF	HB	DF
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Production ECS	Fraction solaire de la production [%]	75	75	75	75	75	75	75

		PHASAGE DES INTERVENTIONS						
Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	$B_{Ref}$	$B_{ON}$	$B_{CU}$	$B_{GE}$	$B_{RP}$	$B_N$	$B_R$
Murs de façades	ITE Laine minérale [mm]	1	1	1	1	1	1	1
Toiture	ITE Polyuréthane [mm]	2	2	2	2	5	4	3
Plancher inférieur	ITE Polystyrène extrudé [mm]	3	4	4	3	2	3	4
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	5	5	5	5	4	5	5
Ventilation	Type de système de ventilation	6	6	6	6	6	6	6
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	7	7	7	7	7	7	7
Production ECS	Fraction solaire de la production [%]	4	3	3	4	3	2	2

**Tableau 45. Détail des programmes de réhabilitation  $B_{Ref}$ ,  $B_{ON}$ ,  $B_{CU}$ ,  $B_{GE}$ ,  $B_{RP}$ ,  $B_N$  et  $B_R$  en termes de variantes sur les combinaisons de mesures de réhabilitation et sur le phasage des interventions**

DV = Double vitrage ; TV = Triple vitrage

HB = Ventilation de type hygro-B ; DF = Ventilation double-flux.

		VARIANTES DE REHABILITATION						
Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	C <sub>Ref</sub>	C <sub>ON</sub>	C <sub>CU</sub>	C <sub>GE</sub>	C <sub>RP</sub>	C <sub>N</sub>	C <sub>R</sub>
Murs de façades	ITE Laine minérale [mm]	100	100	100	100	100	100	100
Toiture	ITE Polyuréthane [mm]	150	150	150	150	150	150	150
Plancher inférieur	ITE Polystyrène extrudé [mm]	100	100	100	100	100	100	100
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	DV	DV	DV	DV	DV	DV	DV
Ventilation	Type de système de ventilation	HB	HB	HB	HB	HB	HB	HB
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Production ECS	Fraction solaire de la production [%]	35	35	35	35	35	35	35

		PHASAGE DES INTERVENTIONS						
Classe de mesure	Mesure de réhabilitation	C <sub>Ref</sub>	C <sub>ON</sub>	C <sub>CU</sub>	C <sub>GE</sub>	C <sub>RP</sub>	C <sub>N</sub>	C <sub>R</sub>
Murs de façades	ITE Laine minérale [mm]	1	2	1	1	1	1	1
Toiture	ITE Polyuréthane [mm]	2	1	2	2	5	3	2
Plancher inférieur	ITE Polystyrène extrudé [mm]	3	3	3	3	2	2	3
Ouvertures	Type de fenêtres (basse émissivité, lame Argon)	4	4	4	4	4	5	4
Ventilation	Type de système de ventilation	5	5	5	5	6	6	5
Chauffage	Chaudière gaz à condensation	6	6	6	6	7	7	6
Production ECS	Fraction solaire de la production [%]	7	7	7	7	3	4	7

**Tableau 46. Détail des programmes de réhabilitation C<sub>Ref</sub>, C<sub>ON</sub>, C<sub>CU</sub>, C<sub>GE</sub>, C<sub>RP</sub>, C<sub>N</sub> et C<sub>R</sub> en termes de variantes sur les combinaisons de mesures de réhabilitation et sur le phasage des interventions**

DV = Double vitrage ; TV = Triple vitrage  
 HB = Ventilation de type hygro-B ; DF = Ventilation double-flux.

## Performances et surfaces de compromis des différentes configurations

Après avoir comparé la nature de trois solutions particulières pour les différentes configurations, l'étude des performances atteintes et la représentation des surfaces de compromis permettent d'analyser le positionnement des solutions dans l'espace des objectifs.

Les Figure 182 à Figure 189 représentent ainsi les ensembles de solutions non-dominées, identifiées par programmation dynamique pour chacune des configurations, en projection sur quelques plans définis par des couples de critères de décision.

En particulier, les Figure 182 à Figure 185 illustrent le positionnement des surfaces de compromis, pour l'ensemble des configurations étudiées. Sur ces figures, sont également représentées les solutions particulières examinées dans le paragraphe précédent, ce qui permet de visualiser leur positionnement relatif en termes de performances.

Les Figure 186 à Figure 189 ne présentent pas les solutions obtenues pour le climat de Nice, ce qui permet une appréciation plus précise des résultats des autres configurations.

Sur ces graphiques, les performances évaluées sur certains indicateurs le sont en termes de réduction d'impact par rapport au scénario de l'inaction. Les objectifs concernés par cette remarque sont les suivants :

- Consommation cumulée d'énergie primaire [MJ] ;
- Potentiel d'épuisement des ressources naturelles abiotiques [kg Sb eq.] ;
- Potentiel de changement climatique à 100 ans [kg CO<sub>2</sub> eq.] ;
- Potentiel d'acidification [kg SO<sub>2</sub> eq.] ;
- Coût global sur le cycle de vie [k€].

Pour ces critères de décision, on considère ici les performances relativement à la réduction d'impact par rapport au scénario de l'inaction (scénario défini au Chapitre 3).

En effet, les fonctions objectifs définies au Chapitre 1 sur ces 5 critères évaluent directement les impacts cumulés sur les années du cycle de vie considéré.

Or, dans le cas de la comparaison des solutions de différents cas, deux programmes de réhabilitation peuvent potentiellement présenter des performances similaires sur le cycle de vie modélisé mais représenter des réductions d'impact différentes (par exemple, en termes d'économies d'énergie), en fonction de l'état initial du bâtiment. La seule valeur de la performance renseigne alors de manière insuffisante pour différencier les configurations. On préfère donc quantifier la réduction d'impact par rapport au scénario de l'inaction, représentative des économies.

Par ailleurs, on peut considérer que l'intérêt de la réhabilitation énergétique se porte davantage sur le niveau des économies potentielles que sur celui des consommations induites.

Remarque : dans le cas de l'évaluation en réduction d'impact, l'objectif est alors de maximiser les performances et non plus de les minimiser ! Aussi, la lecture graphique doit ici se concentrer sur la maximisation des réductions de consommation cumulée d'énergie primaire, du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, du potentiel de changement climatique à 100 ans, du potentiel d'acidification, du coût global sur le cycle de vie.

Les résultats portés sur les Figure 182 à Figure 189 sont porteurs de constats importants. Les remarques présentées ci-après ne peuvent cependant être considérées comme vérités générales ; elles ont une portée limitée à l'étude de cas présentée.

### Remarques générales

- Les superpositions des surfaces de compromis sont très limitées, en dehors des fronts de Pareto associés à la configuration de référence et à celle introduisant une modification de l'orientation des surfaces de vitrage (Orientation Nord).
- En termes de coût d'investissement, la Figure 183 souligne que l'intervalle de variation des performances est peu influencé par la configuration considérée, en dehors du cas de Nice. Cette remarque tend à démontrer que des solutions de réhabilitation sont de nature similaire dans tous les autres cas.
- Globalement, on retient donc une distinction claire des surfaces de compromis identifiées pour les différentes configurations, soit une différenciation sensible des performances atteintes par les solutions des différentes configurations par rapport au front de Pareto de la barre Grimaud de référence (Figure 182 à Figure 185).

### Influence du contexte climatique

- Les Figure 182 à Figure 185 mettent en évidence l'influence du contexte climatique sur les performances des stratégies efficaces de réhabilitation. Plus le climat impose des besoins de chauffage élevés, plus les économies en termes de consommations énergétiques, d'impacts environnementaux ou de coût global sont importantes.
- Ainsi, le contexte climatique de Nice impose une très nette différenciation des performances des stratégies efficaces de réhabilitation par rapport à l'ensemble des autres configurations envisagées pour la barre Grimaud.

Par exemple, par rapport à la configuration de référence dans le climat de Paris, le climat de Nice conduit en moyenne à une diminution de 52% environ de la réduction de consommation cumulée en énergie primaire (Figure 183), de la réduction du potentiel d'épuisement des ressources naturelles abiotiques (Figure 182), du potentiel de changement climatique à 100 ans (Figure 182) ou du potentiel d'acidification. La diminution des performances atteint en moyenne 62% sur le coût global (Figure 184).

Les niveaux d'investissement, pour les solutions efficaces les plus performantes en énergie, sont également significativement inférieurs dans le cas de Nice. En effet, dans ce contexte climatique, la performance énergétique élevée ne réclame pas des niveaux importants d'isolation de l'enveloppe.

La Figure 185 met en évidence que les programmes de réhabilitation dont la performance énergétique est supérieure à celle de la solution  $\mathbf{B}_N$  (minimisant le coût global sur le cycle de vie) induisent des niveaux d'inconfort thermique adaptatif significativement plus élevés dans le climat de Nice. Ces niveaux d'inconfort sont atteints malgré l'usage de protections solaires et de la surventilation nocturne. Cette remarque demeure néanmoins à tempérer au regard des hypothèses relatives aux comportements et aux scénarios d'occupation. Une étude de sensibilité sur les comportements pourra ainsi préciser les niveaux de confort thermique dans ce cas.

Les Figure 182 et Figure 183 soulignant une amélioration des performances énergétiques et environnementales inférieure à 5% par la transition depuis  $\mathbf{B}_N$  vers  $\mathbf{A}_N$ , la solution  $\mathbf{B}_N$  correspond donc à un compromis très intéressant dans le climat de Nice.

- Dans une moindre mesure, le climat de Rennes impose également une diminution des performances des programmes efficaces de réhabilitation par rapport à la configuration de référence en climat parisien. D'après les Figure 182, Figure 183 et Figure 184, cette diminution représente en moyenne environ 14% sur les réductions d'impacts des indicateurs énergétique et environnementaux, près de 19% sur la réduction du coût global sur le cycle de vie.

### **Influence de l'orientation**

- Les surfaces de compromis obtenues entre la configuration de référence et celle correspondant à une modification de la distribution des surfaces de vitrages suivant les orientations (Orientation Nord) sont les seules à se recouvrir très largement (Figure 182 à Figure 185). Dans le cas étudié, ce constat souligne alors la faible influence de l'orientation des surfaces vitrées. Cependant, la consigne de chauffage était ici fixée à 19°C dans toutes les pièces, à toute heure, de début octobre à fin mai. Le raffinement du modèle et l'introduction d'une différenciation entre pièces de jour et de nuit (plus fraîches et au Nord) est de nature à modifier ce constat sur l'orientation.
- Les réductions d'impacts énergétique, environnementaux et en termes de coût global sont alors légèrement supérieures au cas de référence. En moyenne, elles représentent 1% sur les critères de décisions relatifs.

### **Influence des masques proches au rayonnement solaire**

- L'introduction de masques solaires modifie sensiblement les performances des stratégies efficaces de réhabilitation énergétique identifiées (Figure 182 à Figure 185). La morphologie de l'environnement urbain est donc un paramètre non négligeable relativement aux performances des programmes de réhabilitation.

Il est ainsi intéressant de noter les différences entre les performances atteintes par les programmes de réhabilitation appliqués à la barre Grimaud en contexte de centre urbain ancien ou d'urbanisme des grands ensembles, par rapport au cas de référence. Nous rappelons que dans la configuration de référence, aucun masque proche dû aux bâtiments voisins n'est intégré.

- Par rapport à la configuration de référence, les différences de performances atteignent en moyenne :
  - Dans le cas du centre urbain, environ 8% sur les réductions d'impacts énergétique et environnementaux et 10% en termes de réduction du coût global ;
  - Dans le cas de l'urbanisme de grands ensembles, environ 5% sur les réductions d'impacts énergétique et environnementaux et 7% en coût global ;
- La Figure 189 permet d'identifier que les niveaux d'inconfort thermique adaptatif en été sont très faibles dans le cadre de l'intégration de la barre Grimaud dans un centre urbain ancien, par rapport aux autres configurations étudiées. L'interprétation de ce constat est relativement aisée, étant donné les masques proches importants générés par les bâtiments adjacents dans ce cas. L'effet des masques est d'autant plus significatif que l'effet d'îlot de chaleur n'est pas pris en compte dans cette étude.

- Enfin, il est important de noter que les résultats obtenus, dans le cas du positionnement de la barre Grimaud en centre urbain ancien ou au sein d'un urbanisme de grands ensembles, représentent certes deux situations très différentes en termes de masques proches mais aussi deux réalités urbaines, contrairement au cas de référence selon lequel la barre n'est pas masquée.

Les différences de performances en moyenne, entre centre urbain et urbanisme de grands ensembles, sont limitées à 3% sur la plupart des critères de décision (sauf inconfort thermique), ce qui tend à relativiser l'influence de la morphologie urbaine sur la nature et les performances des programmes de réhabilitation efficaces.

### **Influence de l'état physique du bâtiment à l'état initial**

- L'état physique du bâtiment à l'état initial est évidemment une donnée majeure dans la recherche de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique.
- Les Figure 182 à Figure 184 mettent en évidence d'importantes différences sur les performances des programmes de réhabilitation entre le cas de référence et la configuration de rénovation traditionnelle partielle. Ces différences atteignent en moyenne 9% sur la réduction des impacts énergétique et environnementaux (Figure 182 et Figure 183), près de 13% en termes de réduction du coût global (Figure 184).

L'isolation thermique de la toiture ou de remplacement des vitrages mis en œuvre dans le cadre d'une rénovation traditionnelle partielle ont nécessairement modifié l'état physique de la barre Grimaud et impactent les économies potentielles de la réhabilitation énergétique considérée ultérieurement.

### **Conclusion sur l'étude de cas**

Globalement, si l'étude des solutions particulières avait mis en évidence une certaine similarité des combinaisons de mesures entre les configurations étudiées (hors Nice), l'analyse des performances des stratégies de réhabilitation efficaces révèle des différences sensibles suivant les configurations à l'état initial.

Au vu des résultats de l'étude de cas, l'influence du contexte climatique est particulièrement nette. Celle de l'état physique du bâtiment avant réhabilitation n'est pas négligeable. Pourtant, au regard de la plupart des typologies traditionnellement considérées, ces différentes configurations de la barre Grimaud auraient souvent été assimilées à un seul et même type de bâtiment.

A ce stade, nos conclusions demeurent cependant limitées. Les études menées ne permettent pas d'apprécier les variations observées sur les performances par rapport aux niveaux des performances atteintes par des programmes de réhabilitation différents, sur les bâtiments représentant des typologies considérées différentes.

Retenons cependant que cette étude de cas souligne la contribution potentielle de l'optimisation multicritère à la critique constructive des typologies souvent mobilisées pour travailler sur la réhabilitation énergétique de parcs de bâtiments. La comparaison des solutions optimales en termes d'interventions proposées et de performances simulées fournit une approche quantitative de réflexion et de différenciation des typologies en réhabilitation.

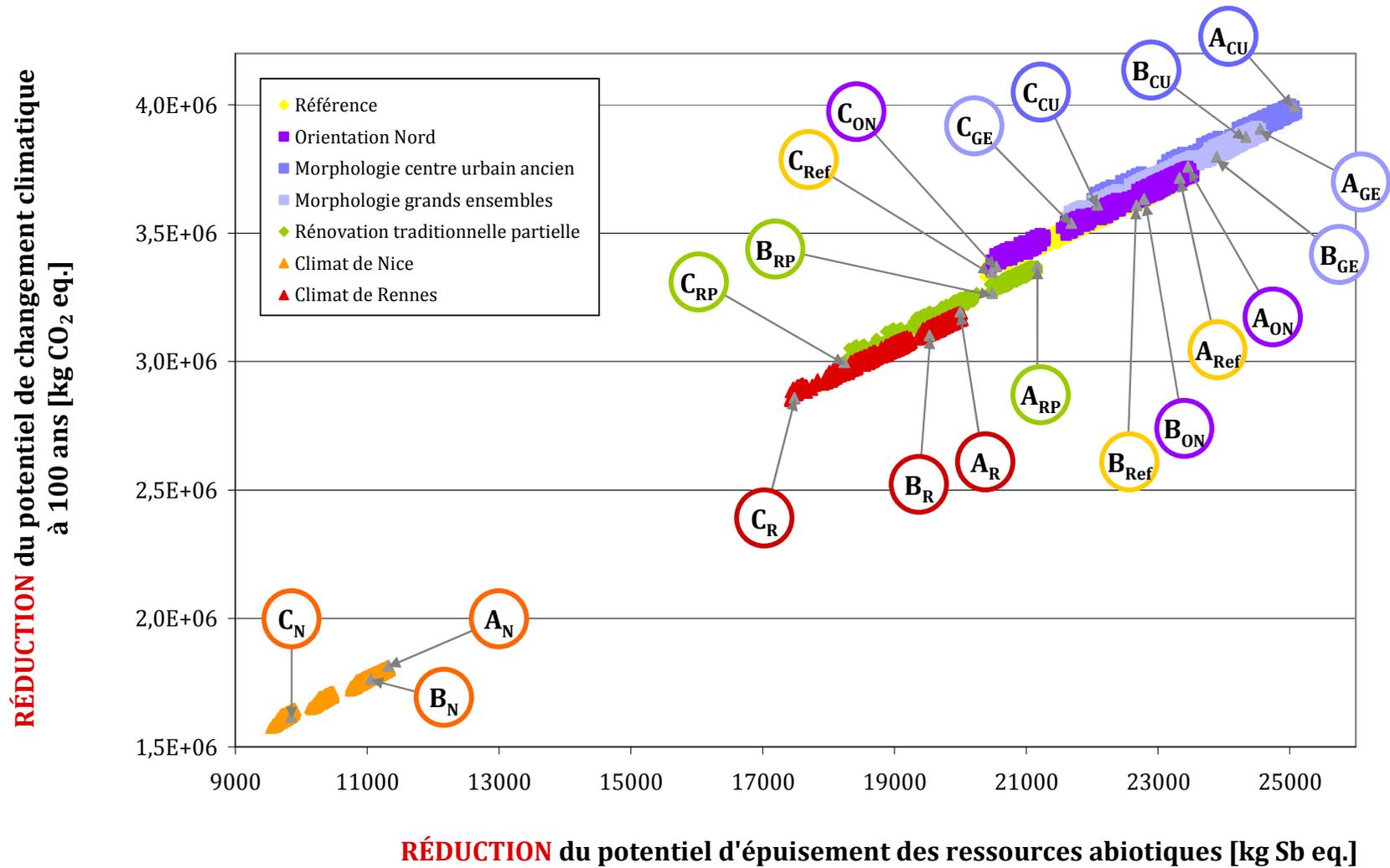


Figure 182. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques » et « réduction du potentiel de changement climatique à 100 ans »

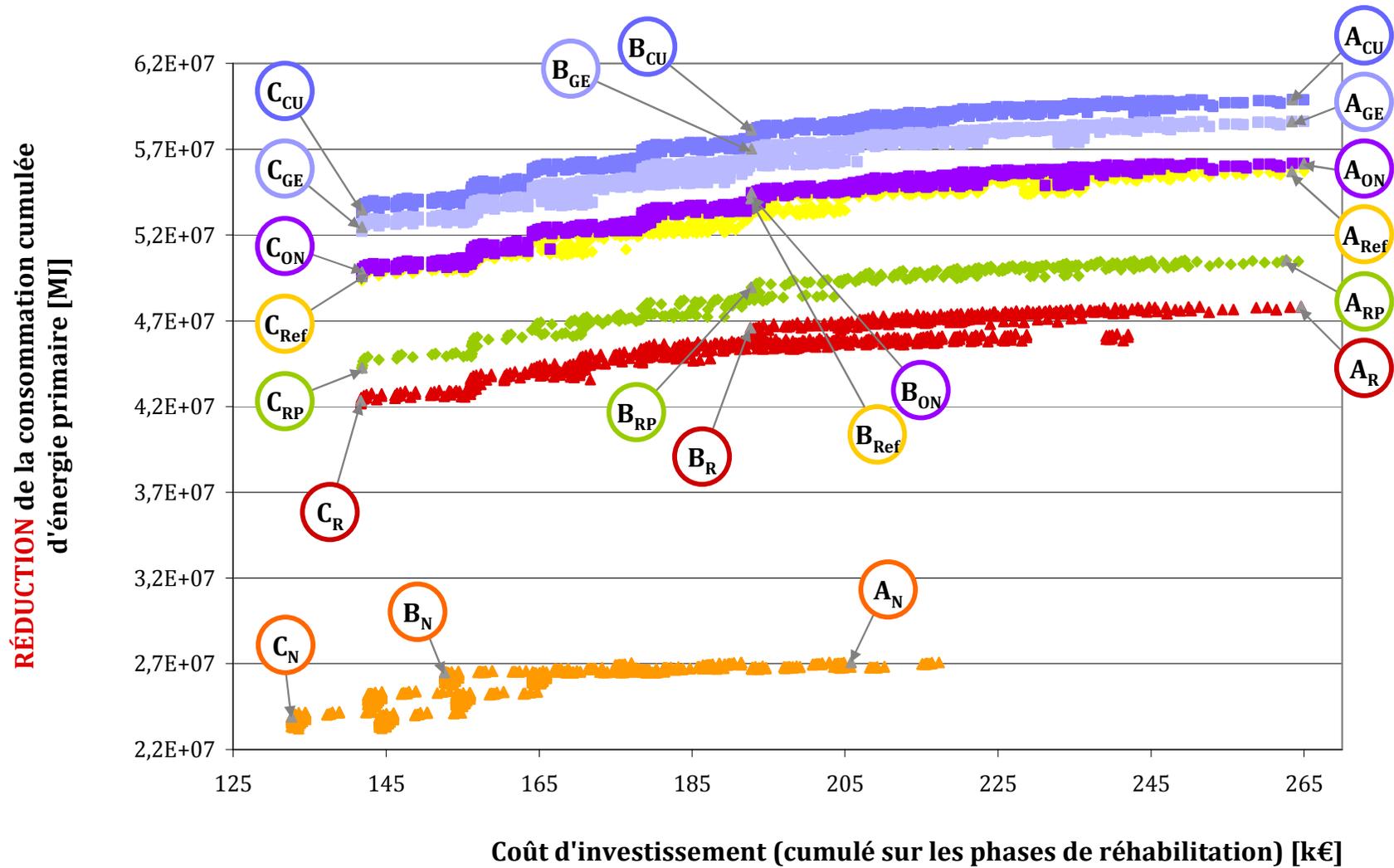


Figure 183. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation) » et « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire »

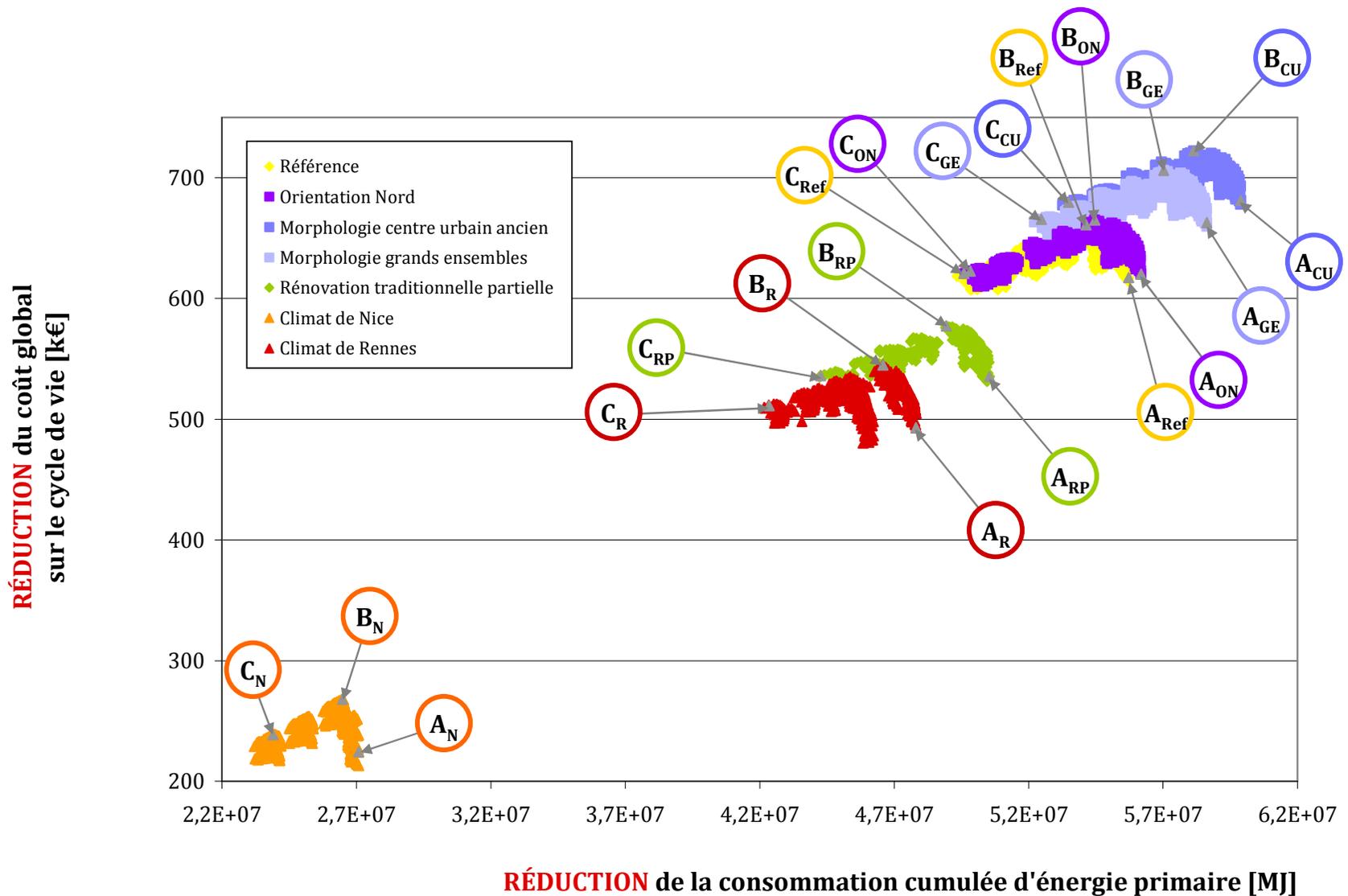


Figure 184. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » et « réduction du coût global sur le cycle de vie »

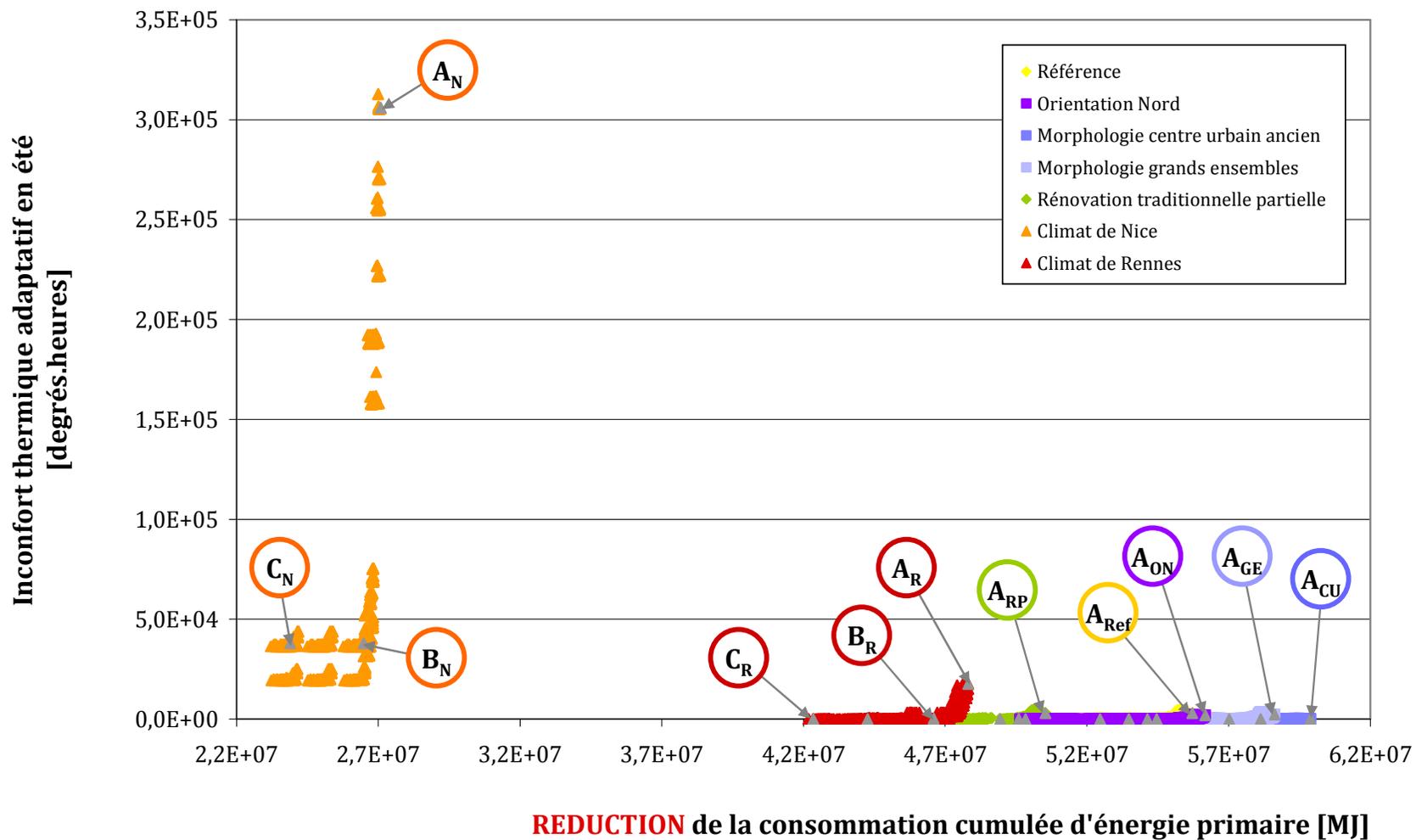


Figure 185. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » et « inconfort thermique adaptatif en été »

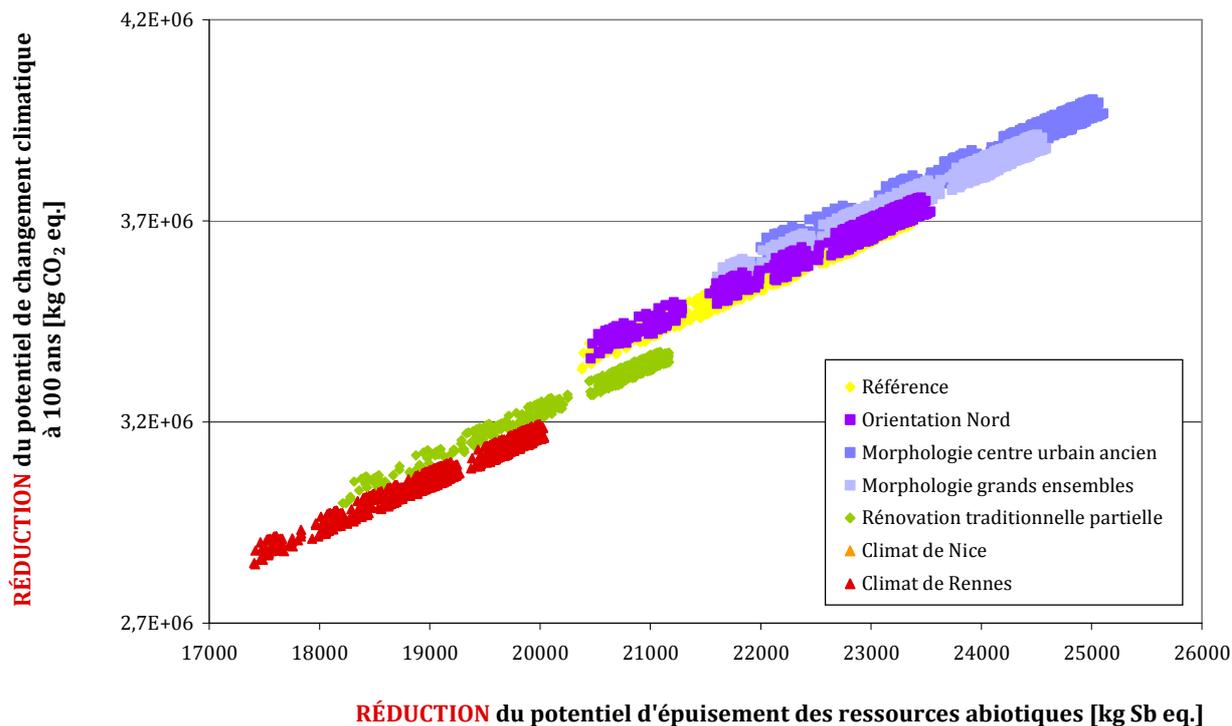


Figure 186. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques » et « réduction du potentiel de changement climatique à 100 ans » (NICE exclu)

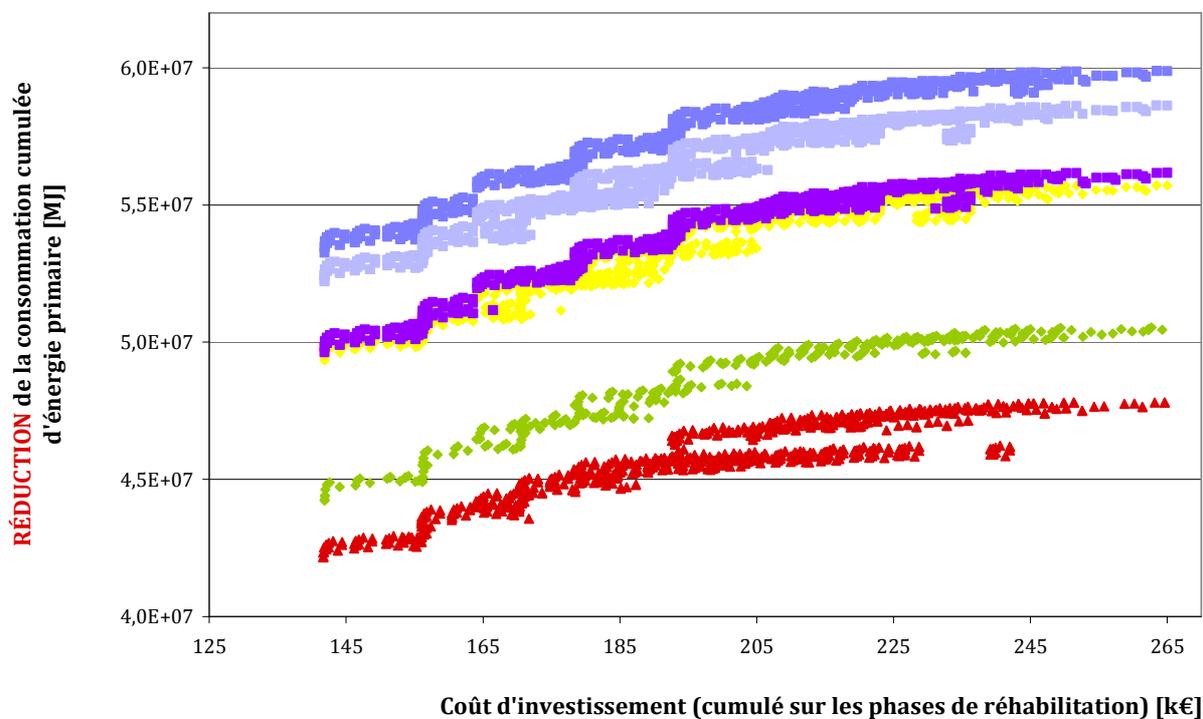


Figure 187. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation) » et « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » (NICE exclu)

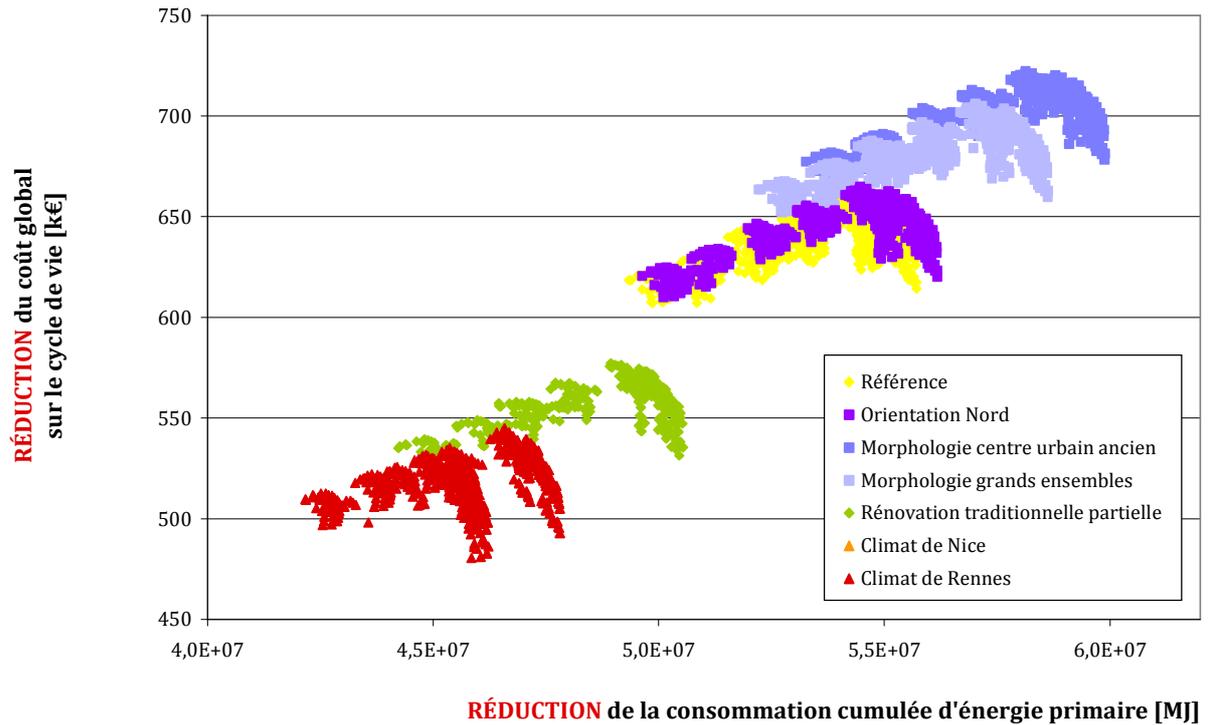


Figure 188. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » et « réduction du coût global sur le cycle de vie » (NICE exclu)

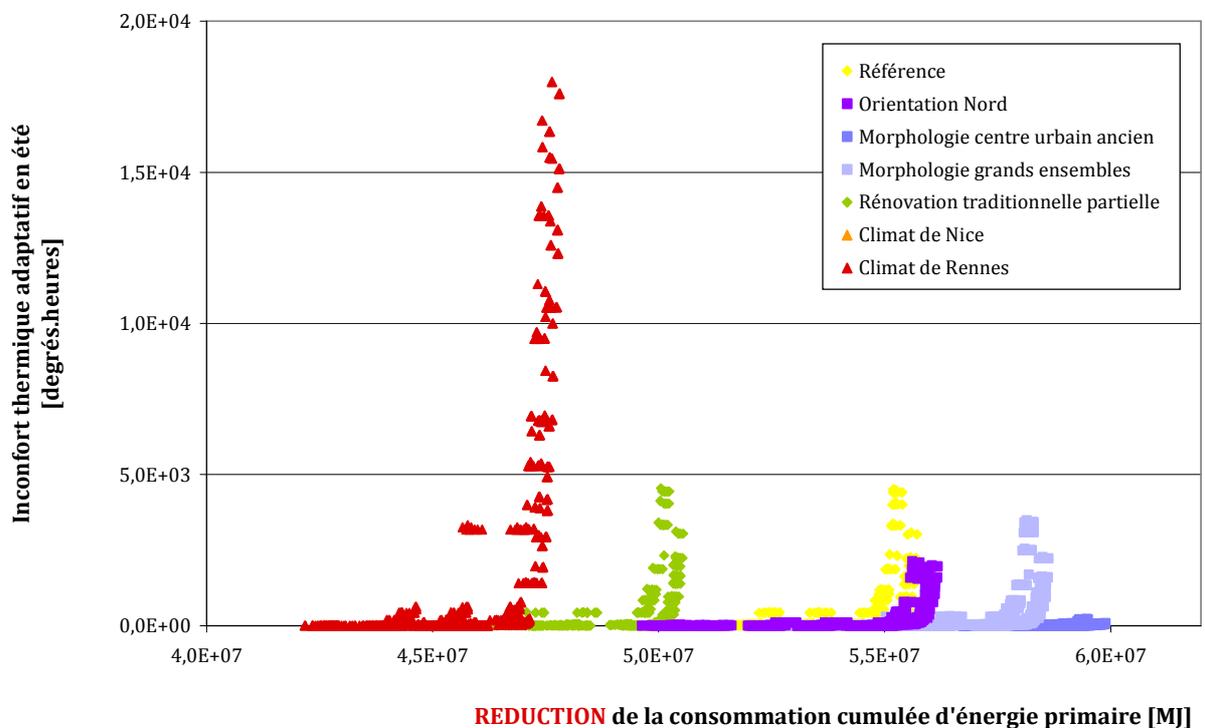


Figure 189. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » et « inconfort thermique adaptatif en été » (NICE exclu)

### 5.3.5 Conclusion sur les typologies de bâtiments en réhabilitation

La question des typologies de bâtiments est une problématique récurrente de l'étude des parcs de bâtiments. Les contributions existantes s'inscrivent principalement dans l'une des deux approches suivantes : typologie descriptive a priori ou classification statistique a posteriori. Fondamentalement différentes par leur principe, les volumes de données requis, la fraction du parc précisément étudiée, ces deux approches focalisent néanmoins les analyses sur des paramètres descriptifs et les performances liées à l'état avant réhabilitation des bâtiments existants.

L'optimisation multicritère permet de porter un regard différent sur la problématique des typologies en proposant une différenciation des bâtiments suivant la nature des programmes de réhabilitation efficaces, conjuguée aux performances atteintes sur les critères de décision.

Une étude de cas simplifiée a permis de mettre en œuvre cette approche sur un bâtiment collectif résidentiel : la barre Grimaud. Les résultats ont souligné que des bâtiments en apparence très similaires (visuellement) peuvent recouvrir des situations de réhabilitation bien différentes, tant en termes de nature des interventions que de performances des programmes de réhabilitation. En particulier, ont été mises en évidence l'influence du climat local, des transformations successives sur les cycles de maintenance et rénovation, de l'environnement urbain proche responsable de masques au rayonnement solaire.

L'étude des typologies par optimisation multicritère est cependant intrinsèquement dépendante des critères et des variables de décision considérés. L'introduction d'objectifs complémentaires ou de technologies de réhabilitation différentes est alors propre à modifier les comparaisons. Cette approche n'a pas vocation à fonder une classification étendue et définitive des types de bâtis existants. Elle vise bien davantage à contribuer aux réflexions sur le sujet, en questionnant les limites des méthodes traditionnelles.

## 5.4 Conclusion

Les parcs de bâtiments sont des objets de recherche complexes. L'étude de leur composition, de leurs dynamiques d'évolution et la définition de stratégies de réhabilitation soulèvent de nombreuses questions, dont les aspects de modélisation et de représentation des différents bâtiments constitutifs, abordés dans ce Chapitre.

Sur le plan de la modélisation, les approches top-down ou bottom-up de la littérature permettent de répondre à des questions très diverses. En particulier, elles offrent de simuler l'influence de certains paramètres ou décisions sur l'évolution des performances des parcs, dont les consommations énergétiques moyennes annuelles, par exemple.

Pour dépasser la recherche itérative de stratégies efficaces de réhabilitation, l'algorithme génétique développé à l'échelle des bâtiments a été étendu à celle du parc. Ainsi, sur une base multicritère et sur le cycle de vie des constructions, peuvent être identifiées des stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle, définissant simultanément la séquence et la nature des interventions sur un ensemble de bâtiments. Les surfaces de compromis déterminées sont porteuses d'informations riches, à destination des décideurs.

Les développements actuels sont limités par des temps de calcul importants, permettant à ce stade d'envisager principalement des parcs réduits composés de quelques constructions simpli-

fiées. Cette limitation est intimement liée au recours à la simulation thermique dynamique pour l'évaluation des besoins de chaleur et des niveaux de confort thermique. L'émergence prochaine de modèles de parc détaillés, à la granularité du bâtiment, conjuguée à l'importance des enjeux, renforce le besoin de recherche sur des méthodes d'évaluation énergétique rapides et aux résultats maîtrisés. L'approche d'optimisation proposée pourra alors avantageusement exploiter ces techniques pour définir des stratégies optimales sur des parcs de grande dimension.

Par ailleurs, l'échelle des parcs offre des degrés de liberté complémentaires en termes de variables d'action, par rapport à celle du bâtiment. L'espace de recherche peut ainsi être étendu et les études complétées sur la possibilité d'installation de chaudières collectives ou de raccordements au réseau de chaleur urbain, par exemple.

La modélisation des parcs soulève également nécessairement la problématique de représentation des bâtiments existants, individuellement ou par recours à des typologies à définir. Les classifications typologiques traditionnelles des bâtiments – descriptives a priori ou statistiques a posteriori – peuvent trouver un support de réflexion par l'optimisation multicritère. Au-delà des caractéristiques descriptives et des performances avant réhabilitation, l'étude de la composition des parcs peut alors s'enrichir des distinctions en termes de nature et de performances des programmes de réhabilitation, suivant les bâtiments considérés.

L'introduction de l'optimisation multicritère dans la réflexion permet de questionner le paradigme de définition des typologies, en établissant un lien explicite entre l'espace de décision et l'espace des objectifs.

Enfin, la réhabilitation de l'existant commande d'intégrer de manière croissante une évaluation de la valeur multi-attributs des bâtis existants et des programmes de réhabilitation, à l'échelle des parcs plus encore qu'à celle des bâtiments. La qualité pérenne d'un environnement construit ne se mesure évidemment pas uniquement en termes énergétique, environnementaux, économiques et de confort thermique. Les parcs de bâtiments représentent un capital économique, physique, social et culturel considérable (Kohler et Hassler, 2002). Ces deux dernières dimensions doivent être appréhendées et intégrées dans la définition de stratégies d'interventions.

# Conclusion et perspectives

La réhabilitation énergétique constitue un formidable enjeu du développement durable mais aussi une problématique complexe, réclamant d'intervenir sur le patrimoine bâti, sur notre cadre de vie, en garantissant une performance énergétique permettant la rentabilité des investissements, en préservant et contribuant aux conditions de confort des occupants.

Ces travaux de thèse ont permis de développer des connaissances en termes de méthodologie d'optimisation multicritère, appliquée à la réhabilitation énergétique et séquentielle, et d'évolution d'un parc de bâtiments. Ces connaissances constituent une contribution à l'aide à la décision sur la définition de programmes efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle, sur une base multicritère et sur le cycle de vie des bâtiments existants ou des parcs bâtis.

L'exercice de la conclusion réclame de dresser le bilan des travaux entrepris, puis d'en esquisser quelques perspectives. Les développements suivants proposent quelques éléments.

## Bilan des travaux

Depuis l'audit de l'existant jusqu'à la mesure en œuvre des performances atteintes, la réhabilitation énergétique suppose un processus de conception incluant plusieurs étapes.

Ces travaux de doctorat se sont concentrés exclusivement sur la définition, en conception, de stratégies de réhabilitation, à partir des résultats supposés acquis de l'audit énergétique.

## Stratégies de réhabilitation et aide à la décision

Dans une perspective de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants, la définition de stratégies efficaces constitue une problématique complexe d'aide à la décision, combinatoire et multicritère.

Les programmes de réhabilitation énergétique séquentielle sont définis comme des permutations de mesures de réhabilitation élémentaires, modélisées par des variables discrètes. Ils visent de manière intégrée : la réduction des besoins de chaleur par l'isolation thermique de l'enveloppe, l'efficacité des systèmes et l'intégration d'une production d'origine renouvelable.

En réhabilitation comme en construction neuve, la conception d'une opération doit satisfaire à de multiples objectifs, potentiellement contradictoires. Dans ces travaux, les performances des programmes de réhabilitation sont évaluées sur la poursuite du cycle de vie des bâtiments en termes : de bilan énergétique et environnemental; de bilan économique et financier au sens des investissements comme du coût global, de confort thermique en été.

Un modèle de cycle de vie a été construit pour évaluer les performances des programmes de réhabilitation potentiels, sur ces fonctions objectifs. Ce modèle utilise des données sur les impacts environnementaux liés aux matériaux et aux procédés, en particulier énergétiques. De plus, la

simulation thermique dynamique est mobilisée pour le calcul des besoins horaires de chauffage et ainsi que des températures intérieures. Par conséquent, les fonctions objectifs considérées sont implicites.

Dans une perspective d'aide à la décision, la nature mathématique du problème modélisé nous a conduits vers l'application de méthodes d'optimisation multicritère. En particulier, deux techniques adaptées au traitement du problème ont été identifiées : les algorithmes génétiques (métaheuristique stochastique) et la programmation dynamique (technique d'optimisation exacte).

### **Identification de stratégies efficaces par algorithme génétique**

La contribution de l'optimisation multicritère à l'aide à la décision pour la réhabilitation énergétique séquentielle a tout d'abord été illustrée par l'approche par algorithme génétique.

Fondée sur l'algorithme NSGA II, celle-ci a été construite à partir d'une représentation particulière des solutions, sous la forme deux chromosomes. Le premier code la composition du programme de réhabilitation, soit la combinaison de mesures de réhabilitation. Le second représente la séquence des interventions dans le temps.

Des opérateurs adaptés de croisement et de mutation ont ensuite été sélectionnés. Le croisement à un point suffit à générer le génotype des enfants sur le génome composition. Le croisement de Davis a été utilisé sur les permutations définissant les séquences d'interventions.

Une étude de cas a permis de démontrer le principe de cette approche et d'exhiber un ensemble de solutions non-dominées, sur une base multicritère et sur le cycle de vie du bâtiment à réhabiliter, ici une barre de logements collectifs dit « barre Grimaud ».

Identification de solutions efficaces et description d'une surface de compromis fournissent alors une information très riche à destination des décideurs, qui peuvent mesurer l'influence des variations marginales d'une performance donnée sur les autres critères de décision ainsi que sur la nature des stratégies efficaces de réhabilitation.

Sur l'étude de cas de la barre Grimaud, le nécessaire compromis entre investissement et réduction des impacts environnementaux a été mis en évidence ainsi que les corrélations linéaires entre certains critères environnementaux.

Les stratégies identifiées assurent de bonnes conditions de confort thermique en été, dans le cadre du scénario d'occupation défini et en dehors des épisodes de très fortes chaleurs.

Un minimum en termes de coût global sur le cycle de vie a été identifié. Distinct des programmes maximisant la performance énergétique en usage, celui-ci propose une réduction mesurée des besoins énergétiques avant le remplacement du système de chauffage.

La problématique du phasage des interventions est complexe et doit tenir compte des interactions entre les mesures. L'analyse des performances dans le temps a montré que des séquences différentes peuvent conduire à des stratégies non-dominées et donc non comparables. Ces différentes remarques sont à analyser au regard des hypothèses de modélisation, et en particulier suivant le rendement de la production de chaleur avant et après réhabilitation.

### **Optimisation exacte, qualification des solutions approchées et études de sensibilité**

Si les optimisations conduites par algorithme génétique ont souligné une forme de reproductibilité des résultats, il demeure que les métaheuristiques stochastiques sont des méthodes certes efficaces mais approchées, ne garantissant donc pas l'atteinte du front de Pareto exact.

La qualification des solutions approchées et la perspective d'études de sensibilité a donc motivé l'étude de techniques d'optimisation multicritère exacte. Une approche par programmation dynamique a ainsi été développée.

La représentation du problème sous la forme d'un graphe séquentiel – dont les états séquentiels représentent les combinaisons de mesures mises en œuvre précédemment et les décisions, les mesures de réhabilitation pouvant être choisies – a permis d'appliquer le théorème de Bellman à la recherche de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielles.

Sur l'étude de cas de la barre Grimaud, fil rouge de ce manuscrit, la connaissance des solutions exactes a permis de souligner la qualité des solutions de l'approche génétique, de disqualifier les approches court-termistes comme l'algorithme glouton, et de démontrer l'intérêt de la réhabilitation par rapport au scénario de l'inaction.

Sur ce bâtiment résidentiel collectif, les études de sensibilité se sont focalisées sur 3 paramètres de modélisation : les consignes de températures pour le chauffage, l'évolution des prix de l'énergie consommée en usage, les durées de vie des composants de réhabilitation.

Les stratégies proches de l'optimum en coût global, démontrent alors une bonne robustesse aux variations mesurées du comportement des occupants.

Les stratégies privilégiant un coût d'investissement limité – et donc une moindre performance énergétique – se révèlent très sensibles à l'évolution des prix de l'énergie consommée en usage, ce qui peut dégrader considérablement leur performance en coût global sur le cycle de vie.

L'établissement de scénarios de maintenance est une problématique complexe. L'introduction de cycles de rénovation réguliers est cependant de nature à modifier sensiblement la nature des solutions identifiées. La recherche de solutions optimisant le bilan environnemental et le coût global encourage donc à progresser vers des durées de vie longues, par rapport aux niveaux de 20 à 30 ans, qui conduisent à des solutions de moindre performance énergétique.

## **Stratégies de réhabilitation sous contraintes d'investissement**

La réalité opérationnelle des projets de réhabilitation imposant des contraintes budgétaires sur les investissements, celles-ci ont ensuite été introduites dans la recherche de stratégies efficaces de réhabilitation, sous la forme de calendriers de financement pluriannuels.

Le traitement des contraintes en optimisation génétique multicritère constitue une problématique complexe, ayant fait l'objet de nombreux travaux au niveau académique.

La préservation du caractère multicritère de l'optimisation – permettant l'identification d'une surface de compromis – nous a conduits à développer une approche basée sur le tournoi sous contraintes, mobilisant également la réparation de solutions non-admissibles et une loi d'évolution sur le nombre de ces solutions au sein de la population courante.

La méthode proposée a été mise en œuvre pour compléter l'étude de cas sur la barre Grimaud. Sous le respect d'un calendrier de financement imposant une contrainte d'investissement limité à 70 k€ par phase de réhabilitation, plusieurs mesures de réhabilitation pouvaient alors être mises en œuvre lors de la même phase d'intervention.

L'évolution générationnelle des solutions admissibles et d'un nombre contrôlé d'individus non-admissibles ont permis l'identification de solutions de réhabilitation admissibles de bonne qualité ainsi que la description d'une surface de compromis.

Etant donné le niveau de contrainte imposé dans cette étude de cas, il apparaît que, de par leur nature, les solutions identifiées sous contraintes de financement semblent peu différentes de celles de l'optimisation multicritère libre, au phasage des travaux près.

D'autres approches prometteuses d'optimisation multicritère sous contraintes pourraient être construites, notamment à partir de la réparation systématique des enfants non-admissibles.

### **Extension aux parcs bâtis existants**

Enfin, ces travaux dédiés à l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation ont dépassé l'échelle du bâtiment pour s'intéresser aux parcs bâtis existants. Objets de recherche complexes, l'étude de leur composition, de leurs dynamiques d'évolution et la définition de stratégies de réhabilitation soulèvent de nombreuses questions de modélisation.

Sur les parcs existants, les modèles bottom-up de physique du bâtiment permettent certes une évaluation des performances énergétiques et environnementales atteintes, sous différents scénarios de réhabilitation, mais imposent une recherche itérative.

Pour dépasser l'exploration itérative de l'espace de décision, l'algorithme génétique développé à l'échelle des bâtiments a été étendu à celle du parc, par une adaptation de la représentation des solutions et des opérateurs de variation associés. Chaque solution, programme de réhabilitation sur le parc, est représenté par un ensemble de couples de chromosomes « composition » et « phasage ». Chaque couple de chromosomes code la combinaison de mesures de réhabilitation et la séquence des interventions, associée à un bâtiment donné du parc.

Ainsi, sur une base multicritère et sur le cycle de vie des constructions, peuvent être identifiées des stratégies efficaces de réhabilitation énergétique, définissant simultanément la séquence et la nature des interventions sur un ensemble de bâtiments. Les surfaces de compromis déterminées sont porteuses d'une grande richesse d'information, à destination des décideurs.

La modélisation des parcs soulève également nécessairement la problématique de représentation des bâtiments existants, individuellement ou par recours à des typologies à définir.

Les classifications typologiques traditionnelles des bâtiments – descriptives a priori ou statistiques a posteriori – peuvent alors profiter des approches d'optimisation. L'optimisation multicritère exacte – par programmation dynamique, par exemple – permet de déterminer puis de comparer les solutions de réhabilitation de différents bâtiments, en termes de nature et de performances des interventions. Les éventuelles distinctions typologiques sont alors fondées au-delà des caractéristiques descriptives et des performances avant réhabilitation.

Par conséquent, l'introduction de l'optimisation multicritère dans la réflexion permet de questionner le paradigme de définition des typologies, en établissant un lien explicite entre l'espace de décision et l'espace des objectifs.

A partir de configurations visuellement semblables de la barre Grimaud, différentes situations de réhabilitation ont ainsi été identifiées en fonction du contexte climatique, de l'environnement urbain et des masques proches, de l'état physique actuel du bâtiment tenant compte des interventions de maintenance et de rénovation opérées sur les constructions existantes.

Ainsi ces travaux constituent une contribution à l'aide à la décision pour l'identification de stratégies efficaces de réhabilitation énergétique séquentielle, sur une base multicritère et sur le cycle de vie, à l'échelle du bâtiment ou d'un parc existant. Des méthodes approchée, par algorithme génétique, et exacte, par programmation dynamique ont été appliquées à la réhabilitation

de constructions existantes et comparées. L'introduction de l'optimisation exacte a permis de mener des études de sensibilité et de questionner les approches traditionnelles de classification typologique. L'approche par algorithme génétique a été étendue au cas de l'optimisation sous contraintes (limitations budgétaires des investissements) et des parcs de bâtiments.

## **Perspectives**

Ces travaux de thèse ne portent aucunement l'ambition d'une vision définitive sur une problématique qui bien qu'appliquée demeure très complexe.

Les développements actuels ne sont ainsi pas exempts d'un certain nombre de limitations, ce qui esquisse logiquement des perspectives pour les contributions à venir.

Intégration de méthodes d'évaluation rapides, études de sensibilité et d'incertitudes, extension des espaces de recherche et de décision, valeur multi-attributs sociale, culturelle et d'usage des bâtiments existants, positionnement de ces approches d'optimisation dans le processus d'aide à la décision sont autant de champs laissés largement ouverts dans ces travaux.

### **Intégration de méthodes d'évaluation approchées, rapides et maîtrisées**

Les approches par algorithme génétique, et plus encore par programmation dynamique, réclament à ce stade des temps de calculs non-négligeables voire considérables (quelques jours à plusieurs semaines). Cette limitation permet difficilement d'envisager l'étude de la réhabilitation d'un bâtiment sur un espace de recherche de grande dimension, ou celle d'un parc constitué de plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de constructions modélisées en détail.

Les temps de calcul sont aujourd'hui intimement liés au recours à la simulation thermique dynamique, pour l'évaluation des besoins de chaleur et du confort thermique. La détermination des besoins de chaleur, au pas de temps horaire, permet par exemple de calculer les consommations d'énergie, à charge partielle pour la production de chaleur.

Or, l'émergence prévisionnelle de larges bases de données (cadastre énergétique), cohérentes et détaillées à la granularité du bâtiment, conjuguée à l'importance des enjeux, renforce le besoin de recherche sur des méthodes d'évaluation énergétique approchées, rapides et aux résultats maîtrisés. Simulation thermique statique, plans d'expériences ou exploitation de surfaces de réponse par la méthode kriging sont à considérer. L'analyse des bâtis existants pourra ainsi pleinement profiter de modèles détaillés ascendants sur des parcs de bâtiments.

L'approche d'optimisation proposée pourra alors avantageusement exploiter ces techniques pour définir des stratégies optimales sur des parcs de grande dimension, par exemple.

### **Etudes de sensibilité et d'incertitudes**

L'évaluation des performances des stratégies de réhabilitation a conduit à construire un modèle de cycle de vie, introduisant différents paramètres, hypothèses et modèles de calcul dont l'influence sur la nature et les performances des solutions demeure à ce stade peu explorée.

Certains chapitres de la thèse ont initié l'étude de la sensibilité des résultats, à différents paramètres de modélisation ou relatifs à la configuration initiale du bâtiment. Ces études de sensibilité et d'incertitudes doivent être poursuivies.

L'influence de différents paramètres de modélisation mérite ainsi d'être étudiée, dont l'état physique des bâtiments avant réhabilitation, les variations climatiques ou les données économiques.

Dans le contexte actuel, il serait très intéressant de quantifier l'influence du changement climatique local sur les stratégies efficaces de réhabilitation énergétique, contribuant ainsi à l'analyse de la résilience des solutions de réhabilitation.

L'influence des coûts financiers des différents composants de réhabilitation et leur évolution dans le temps peuvent aussi faire l'objet d'intéressantes études de sensibilité.

Ces paramètres conditionnent potentiellement tant la nature que les performances de programmes de réhabilitation efficaces pouvant être identifiés par optimisation.

Sur le plan de la modélisation, force est de constater une hétérogénéité importante des modèles utilisés, depuis une modélisation très simplifiée pour l'estimation des consommations énergétiques relatives à la production d'ECS (eau chaude sanitaire) jusqu'à la simulation thermique dynamique, mobilisée pour l'évaluation des besoins de chauffage. L'influence de ces différences en termes de précision des modèles pourrait être investiguée.

De la même manière, les coûts financiers sont ici introduits en termes d'ordre de grandeur et de manière très approchée. A ce stade, ils dépendent peu du phasage et des interactions des différentes interventions de réhabilitation, et sont indépendants des spécificités du programme. Des modèles plus précis pourront donc être intégrés.

Les travaux de thèse visaient principalement le développement de méthodes et outils d'aide à la décision. Des études de sensibilité et d'incertitudes permettront de renforcer la robustesse des conclusions sur les études de cas, tant en termes de performances que de nature des solutions.

## **Extension des espaces de décision et des objectifs**

Par définition, toute approche d'optimisation ne permet d'identifier que des solutions appartenant à l'espace de décision défini et répondant aux objectifs considérés.

Aussi, si ces travaux ont permis d'étudier des méthodes d'aide à la décision pour la réhabilitation des bâtis existants, les solutions exhibées demeurent néanmoins directement dépendantes des variantes de mesures de réhabilitation proposées et des critères de décision introduits.

Sur la base des méthodes proposées, des études complémentaires pourront donc considérer l'extension de l'espace de recherche ou l'intégration de fonctions objectifs complémentaires.

L'extension de l'espace de recherche peut viser à introduire des mesures de réhabilitation complémentaires, de manière statique ou dynamique, à l'échelle du bâtiment ou à celle du parc.

A l'échelle du bâtiment, différentes alternatives de systèmes de chauffage pourraient ainsi être étudiées, incluant pompes à chaleur, chaudière à bois, etc. La fermeture des loggias, la déconstruction puis l'intégration de balcons sans ponts thermiques peuvent être considérées.

L'échelle des parcs offre des degrés de liberté supplémentaires sur les variables d'action. Suivant les configurations, la possibilité d'installation de chaudières collectives ou de raccordements au réseau de chaleur urbain peuvent être analysées. Des atriums peuvent être envisagés entre plusieurs bâtiments et servir d'espaces tampons.

En termes dynamiques, l'évolution des bâtiments sur leur cycle de vie impose des interventions de rénovation et de maintenance, à intervalles réguliers. On peut légitimement supposer que les technologies de demain auront progressé par rapport à celles d'aujourd'hui. La définition de l'espace de décision pourrait alors s'inspirer de technologies prospectives pour intégrer une dy-

namique d'évolution temporelle des techniques et systèmes, suivant différents horizons temporels. Les mesures de réhabilitation proposées dépendraient de l'année de leur mise en œuvre.

Par ailleurs, l'étude des solutions de réhabilitation pourrait être enrichie par l'introduction de fonctions objectives complémentaires. Cette intégration ne nécessite a priori aucune modification des méthodes d'optimisation mais simplement leur couplage avec d'autres fonctions objectives, éventuellement évaluées à partir d'outils différents.

Sans aucune difficulté, le bilan environnemental des solutions peut être optimisé sur des indicateurs complémentaires de l'analyse de cycle de vie comme la toxicité humaine, le potentiel d'eutrophisation, de production d'ozone photochimique ou encore la production de déchets, etc. En dehors des indicateurs environnementaux, la valeur immobilière des bâtiments existants en fonction de leur performance énergétique, de leur durée de vie fonctionnelle, du contexte urbain local, de la connexité avec les systèmes de transport pourrait apporter une perspective différente, dans le cas de la planification des investissements sur un parc.

Poursuivant sur la diversification des critères de décision, la section suivante expose quelques perspectives sur la complexité de l'évaluation de la valeur attachée aux bâtiments existants.

### **Valeur multidimensionnelle des bâtis existants**

Bien que les performances des stratégies de réhabilitation aient été évaluées suivant différents critères de décision, les objectifs introduits ne donnent cependant qu'une représentation partielle de la valeur des bâtis existants.

La qualité pérenne d'un environnement construit ne saurait se mesurer uniquement en termes énergétique, environnementaux, économiques ou de confort thermique.

Comme le soulignent N. Kohler et U. Hassler (2012), les parcs de bâtiments représentent un capital économique, physique mais aussi social et culturel considérable. Ces deux dernières dimensions, parfois moins bien appréhendées, doivent être pleinement intégrées à la définition de stratégies d'interventions.

La Tour Bois Le Prêtre est un parfait exemple des limites d'une rénovation strictement technique. Intervenues au début des années 90, soit 30 ans après la livraison du bâtiment, les travaux de mise aux normes et de rénovation technique s'étaient alors concentrés exclusivement sur : l'isolation par l'extérieur, la sécurité, le chauffage, la pose d'une grille d'entrée, la réfection des façades. Ces interventions, représentant des investissements conséquents, n'ont pourtant pas prévenu la nécessaire transformation radicale des conditions de confort et d'habitabilité des 100 logements en site occupé, dès 2005.

Outre l'enjeu d'une requalification technique et architecturale, « la valeur d'usage doit être repensée car ses habitats, conçus il y a plusieurs décennies, ne sont souvent plus adaptés aux modes de vie actuels » François Pelegrin.

Il est aussi nécessaire de donner aux besoins des occupants une place centrale dans la définition des interventions, pour espérer susciter l'adhésion.

Une étude de la Banque Mondiale (2002) a ainsi souligné les motivations des propriétaires pour engager des travaux, par ordre de priorité : amélioration du logement (dont confort intérieur et remplacement des fenêtres), réparations d'urgence pour garantir la valeur immobilière du bien (étanchéité à l'eau de la toiture) et enfin, économies d'énergie.

Ainsi, il s'agit « d'embarquer la réhabilitation énergétique avec la revalorisation ou la requalification globale du bâtiment, voire de son environnement urbain » (Pouget, 2011). L'enjeu de la réhabilitation des bâtiments existants n'est pas seulement énergétique et environnemental, il est également social, économique et culturel. Il s'agit globalement de la qualité du cadre de vie, à court, moyen et long termes et pour les générations à venir. Chaque programme de réhabilitation doit donc faire l'objet d'une réflexion transversale. Comment gérer l'héritage culturel ? Comment préserver et revaloriser notre patrimoine ? Comment adapter nos lieux de vie aux exigences du futur ?

### **Positionnement de l'optimisation par rapport à l'aide à la décision**

Ces considérations fondamentales rendent presque superflue la question du positionnement des méthodes d'optimisation dans le processus d'aide à la décision pour la réhabilitation énergétique des bâtiments existants.

Toute optimisation ne sait en effet identifier des solutions efficaces que sur un espace de décision donné et en fonction de critères de décision quantitatifs ou semi-quantitatifs spécifiés. Or, au-delà des aspects énergétiques, le système de valeur complexe et multidimensionnel, en partie qualitatif, attaché au bâti existant et au cadre de vie qu'il représente, rend bien entendu illusoire toute ambition de définition de solutions pertinentes et durables de réhabilitation, à partir de la seule optimisation.

Le rôle des méthodes d'optimisation est donc bien davantage de proposer un appui au dialogue concourant entre maîtrise d'ouvrage, architecture et ingénierie, pour préciser la définition de variantes architecturales des projets, sous certaines dimensions techniques et énergétiques.

***After climbing a great hill,  
one only finds that there are many more hills to climb.***

***Nelson Mandela***



# Bibliographie

- ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (2011). Les chiffres clés du bâtiment : énergie-environnement.
- AFNOR. (1995). Ambiance thermique modérée. Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. NF EN ISO 7730.
- AFNOR (2004). Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction. NF P 01010.
- AFNOR (2007). Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. NF EN 15251.
- AFNOR (1990). Ergonomie - Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail. NF X35-103.
- Al-Homoud, MS. (1997). Optimum thermal design of office buildings. *International Journal of Energy Research*, 21(10), pp.941–57.
- Alanne, K. (2004). Selection of renovation actions using multi-criteria ‘knapsack’ model, *Automation in Construction* 13, pp.377– 391.
- Alanne, K., Salo, A., Saari, A. and Gustafsson, S. I. (2007). Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems. *Energy and Buildings*, 39, pp.1218–1226.
- Aydinalp-Koksal, M., Ugursal, VI. (2008). Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modelling end-use energy consumption in the residential sector. *Applied Energy*, 85(4), pp.271–96.
- Back, T., Hoffmeister, F., Schwefel, H.-P. (1991). A survey of evolution strategies, in: R.K. Belew, L.B. Booker (Eds.), *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1991, pp.2–9.
- Bacot, P., Neveu, A., Sicard, J. (1984). Analyse modale des phénomènes thermiques en régime variable dans le bâtiment. *Revue Générale de Thermique*, no 267, Paris
- Banque Mondiale (2002). Implementation Completion Report on a Loan in the Amount of \$10 million to the Government of Lithuania for an Energy Efficiency/Housing Pilot Project. The World Bank, Washington, DC.
- Barichard, V. (2003). Approches hybrides pour les problèmes multi-objectifs. Thèse de doctorat, Université d'Angers.
- Barnthouse, L., Fava, J., Humphreys, K., Hunt, R., Laibson, L., Noesen, S., Norris, G., Owens, J., Todd, J., Vigon, B., Weitz, K., Young, J. (1998). *Life cycle impact assessment: the state-of-the-art*. 2nd ed. Pensacola, FL: SETAC Press.
- Barrier, A., Gilgen, A. (1970). *Natürliche Belichtung von Wohnungen*. Cités par E. Grandjean (12) Zürich : Institutes für Orts-, Regional- und Landesplanung.

- Bay, Y. (2009). Etude expérimentale et numérique d'une installation d'eau chaude solaire individuelle gérée au fil du soleil. Thèse de doctorat. Université de Savoie.
- Becker, R., Goldberger, I. and Paciuk, M. (2007). Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation. *Building and Environment*, 42(9), pp.3261–3276.
- Bellman, R. (1954). The Theory of Dynamic Programming. *Bull. Amer. Math. Soc.*, pp.503-515.
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton University Press, New Jersey.
- Berthiau, G. (1994). La méthode du recuit simulé pour la conception des circuits électroniques : adaptation et comparaison avec d'autres méthodes d'optimisation. Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Paris.
- Berthiau, G., Siarry, P. (2001). Etat de l'art des méthodes d'optimisation globale. *RAIRO-Operations Research*, tome 35, n°3, pp.329-365.
- Blengini, G.A., di Carlo, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 42(8), pp.69-80.
- Blondeau, P., Sperandio, M. and Allard, F. (2002). Multi-criteria analysis of ventilation in summer period. *Building and Environment*, 37(2), pp165–176
- Bouchlaghem, N.M., Letherman, K.M. (1990). Numerical optimization applied to the thermal design of buildings. *Building and environment*, 1990, vol 25, pp 117-125.
- Bouchlaghem, N. (2000). Optimising the design of building envelopes for thermal performance. *Automation in Construction* 10(1), pp.101–112.
- Bouyssou, D., Jacquet-Lagrèze, E., Perny, P., Slowinski, R., Vanderpooten, D., Vincke, P. (2001). *Aiding decisions with multiple criteria*. Kluwer.
- Boardman, B., Darby, S., Killip, G., Hinnells, M., Jardine, C., Palmer, S., Sinden, G., et al. (2005). *40% house*. Oxford: ECI, University of Oxford.
- Brockhoff, D, Zitzler, E. (2009). An Introduction to evolutionary multi objective optimization. Présentation à l'Ecole des Ponts ParisTech, 3 décembre 2009.
- Brun, A., Spitz, C., Wurtz, E. (2009). Analyse du comportement de différents codes de calcul dans le cas de bâtiments à haute efficacité énergétique. IXème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la Thermique des Systèmes, 18-20 mai 2009, Lille
- Bullier, A., Sanchez, T., Le Teno, J.F., Carassus, J., Ernest, D., Pancrazio, L. (2011). ECEEE 2011 Summer study, Energy efficiency first : The foundation of a low-carbon society.
- Caccavelli, D., Gugerli, H. (2002). TOBUS – a European diagnosis and decision-making tool for office building upgrading. *Energy and Buildings*, 34, pp.113-119.
- Candas, V. (2000). Confort thermique. *Techniques de l'Ingénieur*, BE9085.
- Carraway, R.L., Morin, T.L., Moskowitz, H. (1990). Generalized dynamic programming for multicriteria optimization. *European Journal of Operational Research*, 44(1), pp.95–104.
- CETE Lyon : Centre d'études techniques de l'Equipement (2006). *Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments. Généralités et sensibilisation*
- Chabot, B. (2005). *La méthode TEC d'analyse économique*. ENSAM Mastere SYSER
- Chelouah, R. (2000). Adaptation aux problèmes à variables continues de plusieurs métaheuristiques d'optimisation combinatoire : la méthode tabou, les algorithmes génétiques et les méthodes hybrides.

Application en contrôle non destructif. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, France.

Chen, Z., Clements-Croome, D., Hong, J., Li, H. and Xu, Q. (2006). A multi-criteria lifespan energy efficiency approach to intelligent building assessment. *Energy and Buildings*, 38(5), pp.393–409

Clarke, J.A. (2001). *Energy Simulation in Building Design*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, London

Coello Coello, C.A. (2000). Use of a self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems, *Comput. Ind.*, 41(2), pp.113–127.

Coello Coello, C.A. (2002). Theoretical and Numerical Constraint-Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms : A Survey of the State of the Art (2002). *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 191, pp.1245-1287.

Coello Coello, C.A., Lechuga, M.S. (2002). MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization. In *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*, 2002. CEC '02.

Cohon, J. L. (1985). Multicriteria programming: brief review and application. In J. S. Gero (Ed.), *Design optimization*, pp.163-191. New York: Academic Press.

Coit, D.W., Smith, A.E. (1996). Penalty guided genetic search for reliability design optimization. *Special Issue on Genetic Algorithms. Computers and Industrial Engineering*, 30(4), pp.895-904.

Coley, D.A., Schukat, S. (2002). Low-energy design: combining computer based optimization and human judgement. *Building and Environment*, 37(12), pp.1241–1247.

Collette, Y., Siarry, P. (2002). *Optimisation multiobjectif*. Eyrolles, 2002.

COSTIC : Centre scientifique et technique des industries climatiques (2007). *Solutions de production d'eau chaude sanitaire électrique, individuel et collectif*.

Courant, R. (1943). Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bull. Am. Math. Soc.*, 49, pp.1–23.

D'Cruz, N. A. and Radford, A. D. (1987). A multi-criteria model for building performance and design. *Building and Environment* 22(3), pp.167–179.

Darwin, C. (1959). *On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favored races in the struggle for life*. Murray, London.

Davis, L. (1985). Applying adaptive algorithms to epistatic domains. In *Proc. Intl. Joint Conference on Artificial Intelligence*.

De Dear, R., Brager, G., Cooper, D. (1997). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*. ASHRAE: Final report, RP- 884, March 1997.

Deb, K. (2000). An efficient constraint handling method for genetic algorithms. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 186, (2-4), pp.311-338.

Deb, K. (2001). *Multi objective optimization using evolutionary algorithms*, Wiley.

Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., Meyarivan, T. (2000). A fast and elitist multi objective genetic algorithm for multiobjective optimization: NSGA II. *Proceedings of the parallel problem solving from nature VI*

Derwent, R.G., Jenkin, M. E. (1990). *Hydrocarbon involvement in photochemical ozone formation in Europe*. Harwell, United Kingdom Atomic Energy Authority.

- Diakaki, C., Grigoroudis, E., Kolokotsa, D. (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40, pp.1747–1754.
- Dittmar, A., Delhomme, G., Pauchard, T. (1995). Le corps humain. Un système thermique complexe. In proceedings from Congrès S.F.T. 3-41. Ed Elsevier Penot F. & Saulnier J.B
- Doukas, H., Patlitzianas, K.D., Iatropoulos, K., Psarras, J. (2007). Intelligent building energy management system using rule sets. *Building and Environment*, 42(10), pp.3562–3569.
- Dréo, J., Petrowski, A., Siarry, P., Taillard, E. (2003). Métaheuristiques pour l'optimisation difficile. Recuit simulé, recherché avec tabous, algorithmes évolutionnaires et algorithmes génétiques, colonies de fourmis. Eyrolles.
- Duffie, Beckman (1980). Solar engineering of thermal processes. Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin, Madison.
- Duharcourt, P. (1969). Introduction a la programmation dynamique. *Revue économique*, Vol. 20, No. 2, pp.182-234. Published by: Sciences Po University Press
- EC: European Community (2003). Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings, L1/65, Official Journal of the European Communities.
- EERE (2008). Building energy software tools directory. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Department of Energy.
- Ehrgott., M. (2000). Multicriteria optimization. In *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, volume 491. Springer, 2000.
- Ehrgott, M., Gandibleux, X. (2000). A survey and annotated bibliography of multiobjective combinatorial optimization. *OR Spektrum*, 22, pp.425–460.
- Fanger, P.O. (1970). Thermal Comfort. Danish Technical Press, 1970.
- Farahbakhsh, H., Ugursal, V.I., Fung, A.S. (1998). A residential end-use energy consumption model for Canada. *International Journal of Energy Research*, 22(13), pp.1133–43.
- Favre, B., Peuportier, B. (2012). Using dynamic programming optimization to maintain comfort in building during summer periods. International conference on Sustainability in Energy and Buildings 2012, Stockholm.
- Fels, M. (1986). PRISM : an introduction. *Energy and Buildings*, 9(1–2), pp.5–18.
- Firth, S.K., Lomas, K.J., Wright, A.J. (2010). Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis. *Building Research & Information*, 38(1), 25.
- Fonseca, C.M, Fleming, P. (1995). An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. *Evol. Comput.*, 3(1), pp.1–16.
- Frischknecht, R., et al. (1996). Ökoinventare für Energie systeme, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 1996, 1817 p
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.J., Doka, G., Heck, T., Hellweg, S., et al. (2004). Overview and methodology, ecoinvent report No. 1. Dübendorf, Swiss: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Gama Caldas, L., Norford, L.K. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction*, 11, pp.173–184.

- Gandibleux, X., Vancoppenolle, D., Tuytens, D. (1998) A first making use of GRASP for solving MOCO problems. Technical report. University of Valenciennes, France. Paper presented at MCDM 14, Charlottesville, VA.
- Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G. (1994). A Tabu Search Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Management Sci.*, 40, pp.1276-1290.
- Gero, J. S., Neville, D. C. and Radford, A. D. (1983). Energy in context: A multi-criteria model for building design. *Building and Environment*, 18(3), pp.99–107.
- Gholap, A. K. and Khan, J. A. (2007). Design and multi-objective optimization of heat exchangers for refrigerators. *Applied Energy*, 84(12), pp.1226–1239.
- Gibberd, J. (2012). Ecological Footprint (EF) and Human Development Index (HDI) capability for sustainable development trajectories. In proceedings from the Smart and Sustainable Built Environment International Conference, Sao Paulo, 2012.
- Glover, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, 8(1), pp.156–166.
- Glover, F., Laguna, M. (1997). *Tabu search*. Kluwer Academic Publishers.
- Goedkoop, M., and Spriensma, R. (2000). *The Eco-indicator 99 : A damage oriented method for life cycle impact assessment*. PRE Consultants, Amersfoort, the Netherlands, 142 p.
- Gomes, F., Brière, R., Habert, G., Feraille, A., Lasvaux, S., Tessier, C. (2012). Environmental evaluation of reinforcing bars sold on the French market. In proceedings of the LCA and construction 2012 conference, Nantes.
- Greening, L.A., Greene, D.L., Difiglio, C. (2000). Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey. *Energy Policy*, 28(6-7), pp.389-401.
- Guinée, J.B., Heijungs, R. (1995). A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product Life Cycle Assessment, *Environ. Toxicol. Chem*, 14(5), pp.917-925.
- Guinée, J.B., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M.A.J., Lindeijer, E., Roorda, A.A.H., Weidema, B.P. (2001). *Life cycle assessment; an operational guide to the ISO standards; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands*, 704 p.
- Hadj-Alouane, A.B., Bean, J.C. (1997). A Genetic Algorithm for the Multiple-Choice Integer Program. *Operations Research*, 45, pp.92-101.
- Haimes, Y.Y., Lasdon, L.S., Wismer, D.A. (1971). On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization. *IEEE transactions on systems, man and cybernetics*, 1(3), pp.296-297.
- Hass, R., Biermayr, P. (2000). The rebound effect for space heating: empirical evidence from Austria. *Energy Policy*, 28 (6-7), pp.403-410.
- Hauglustaine, J.M., Azar, S. (2001). Interactive tool aiding to optimise the building envelope during the sketch design. In: Lamberts R, Negarao COR, Hensen J, editors. *Proceedings of the Seventh International IBPSA Conference*. IBPSA; 2001. p.387–94.
- Heijungs, R., Guinée, J.B., Huppes, G., Lankreijer, R.M., Udo de Haes, H.A., Wegener Sleeswijk, A., Ansems, A.M.M., Eggels, P.G., van Duin, R., de Goede, H.P. (1992). *Environmental Life Cycle Assessment of Products; Guide; Report Nr. 9266*, CML, Leiden, 96 p.

- Hens, H., Verbeeck, G., Verdonck, B. (2001). Impact of energy efficiency measures on the CO<sub>2</sub> emissions in the residential sector, a large scale analysis. *Energy and Buildings*, 33, pp.275–81.
- Herfray, G. (2011). Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers. Thèse de doctorat, Mines ParisTech.
- Holland, J.H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems*, 2nd edition. MIT press.
- Homaifar, A., Lai, S.H.Y., Qi, X. (1994). Constrained optimization via genetic algorithms. *Simulation*, 62(4), pp.242–254.
- Hong, T., Chou, S.K., Bong, T.Y. (2000). Building simulation: an overview of developments and information sources. *Building and Environment*, 35(4), pp.347–61.
- Huang, Y.J., Brodrick, J. (2000). A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire building stock. In: *Proceedings of the 2000 ACEEE summer study on energy efficiency in buildings*, Pacific Grove.
- IEA: International Energy Agency (2008a). *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency*.
- IEA: International Energy Agency (2008b). *Towards a Sustainable Energy Future*, IEA program of work on climate change, clean energy and sustainable development.
- International Panel on Climate Change (IPCC) (1994). Scientific assessment working group of IPCC. Radiative forcing of climate change. World meteorological organization and United Nations Environment Programme (UNEP), 28 p.
- IPCC, Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Xiaosu, D. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, July 2001, 892 p.
- IPCC, Foster, P.M. (2007). Change in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tigor, M., Miller, H.L., *Climate Change 2007: The physical basis. Contribution of the working group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press
- IPCC (2007). Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers.
- ISO (1984). *Moderate Thermal Environments – Determination of PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. ISO Standard 7730-84, ISO, Geneva.
- ISO (2004). *Performance thermique des bâtiments. Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage des locaux*. NF EN ISO 13790.
- ISO (2006a). *Environmental management, life cycle assessment, principles and framework*. NF EN ISO 14040.
- ISO (2006b). *Environmental management, life cycle assessment, requirements and guidelines*. NF EN ISO 14044.
- Itard, L., Meijer, F., Vrans, E., Hoiting, H. (2008). *Building Renovation and Modernisation in Europe: State of the art review*. EraBuild report, OTB, Delft University, Delft.
- Joffre, A. (2004). *Énergie solaire thermique dans le bâtiment. Chauffe-eau solaires. Techniques de l'ingénieur*.
- Johnston D. (2003). *A physically based energy and carbon dioxide emission model of the UK housing stock*. Ph.D. thesis. Leeds Metropolitan University, UK; 2003.

- Judkoff, R., Neymark, J. (1995). International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic method, NREL/TP-472-6231. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Karlin, S. (1955). The structure of dynamic programming models. *Naval Res. Log. Quart.*, 2, pp.285-294.
- Kavgic, M., Mavrogianni, A., Mumovic, D., Summerfield, A., Stevanovic, Z., Djurovic-Petrovic, M. (2010). A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45, pp.1683-1697.
- Kazarlis, S., Patrdis, V. (1997). Varying Fitness Functions in Genetic Algorithms : Studying the Rate of Increase of the Dynamic Penalty Terms. In A. E. Eiben, T. Bäck, M. Schoenauer and H.-P. Schwefel editors, *Parallel Problem Solving from Nature V-PPSN V*, Amsterdam, The Netherlands, 1998. Springer-Verlag. Research, 45, pp.92-101.
- King, R.T.F.A., Rughoopth, H.C.S., Deb, K. (2011). Solving the multiobjective environmental/economic dispatch problem with prohibited operating zones using NSGA-II. *Communications, Computers and Signal Processing*, pp.298-303.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. (1982). Optimization by simulated annealing, *Research Report RC 9355*. IBM, Yorktown Heights, NY.
- Kofoworola, O.F., Gheewala, S.H. (2008). Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, pp.498-511.
- Kohler, N. (1986). Analyse énergétique de la construction, utilisation et démolition des batiments. EPFL. Thèse n°623, Lausanne.
- Kohler, N., Hassler, U. (2002). The building stock as a research object. *Building research and information*, 30(4), pp.226-236.
- Kohler, N., Hassler, U. (2012). Aternative scenarios for energy conservation in the building stock. *Building research and information*, 40(4), pp.401-416.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G., Kalaitzakis, K. and Antonidakis, E. (2001). Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupants' thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy and Buildings*, 33(6), pp.531-543.
- Kolokotsa, D., Diakaki, C., Grigoroudis, E., Stavrakakis, G. and Kalaitzakis, K. (2009). Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings. *Advances in building energy research* 3(1), pp.121-146.
- Liepins, G.E., Potter, W.D. (1991). A genetic algorithm approach to multiple-fault diagnosis, in: L. Davis (Ed.), *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp.237-250.
- Manahan S. (2000). *Environmental chemistry*, Boca Raton, Lewis Publishers, 2000, 898 p.
- Madow, L., Millan, E. (1996). Goal programming and heuristic search. In R. Caballero, F. Ruiz, and R. Steuer, editors, *Secont Int. Conf. on multi-objective programming and goal programming MOP GP'96*, pp.48-56. Torremolinos, Spain.
- Marszal, A.J., Heiselberg, P., Bourrelle, J.S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings* 43, pp.971-979.
- Martinaitis V., Rogoza, A. and Bikmaniene, I. (2004). Criterion to evaluate the “twofold benefit” of the renovation of buildings and their elements. *Energy and Buildings*, 36(1), pp.3-8.

- Matos, G.R., Wagner, L.A. (1998). Consumption of materials in the United States, 1900–1995: Annual Review of Energy and the Environment, 23, pp.107–122.
- Meijer, F., Itard, L. and Sunikka-Blank, M. (2009). Comparing European residential building stocks: performance, renovation and policy opportunities. Building Research & Information, 37(5-6), Special Issue: Research on Building Stocks.
- Méthode Th-BCE (2012) - Rapport d'étude n° ESE/DE/PEB - 2010.021RE – Février 2010.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.R., Rosenbluth, M.N., Teller, A., Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. J. Chem. Phys., 21.
- Michalewicz, Z. (1996). Genetic algorithms + data structures = evolution programs. Springer, Berlin
- Michalewicz, Z., Attia, N.F. (1994). Evolutionary optimization of constrained problems, in: Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming, World Scientific, Singapore, pp.98–108.
- Michelson, C., Müller-Michelson, S. (2010). Energieeffizienz im Altbau: Werden die Sanierungspotenziale überschätzt? Ergebnisse auf Grundlage des ista-IWH-Energieeffizienzindex. Wirtschaft im Wandel, 9, pp.447-455.
- Miettinen, K. (1999). Nonlinear multiobjective optimization. Kluwer Academic Publishers
- Miles, M.E., Haney, R.L.J. and Berens, G. (1996) Real Estate Development Principles and Process, Urban Land Institute (ULI), Washington, DC.
- MIT (1997). Energy technology availability: review of longer term scenarios for development and deployment of climate-friendly technologies. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology Energy Laboratory; 1997.
- Moran MJ. (1982). Availability analysis: a guide to efficient energy use. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Moujalled, B. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de doctorat, INSA Lyon.
- Mousseau, V. (2010). Preference elicitation for MCDA, an introduction. 10th MCDA Summer School, Ecole Centrale Paris, July 2010.
- Murray, C., Lopez, A. (1996). The Global Burden of Disease, WHO, World Bank and Harvard School of Public Health, Boston, 990p.
- Natarajan, S., Levermore, G.J. (2007). Predicting future UK housing stock and carbon emissions. Energy Policy, 35(1), pp.5719–27.
- Nemhauser, G.L. (1966). Introduction to dynamic programming. John Wiley and Sons, New York.
- Nielsen, T.R. (2002). Optimization of buildings with respect to energy and indoor environment. Thèse de doctorat. Danmarks Tekniske Universitet, Lygby, Denmark.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2008). Measuring material flows and resource productivity.
- Othmani, I. (1998). Optimisation multicritère : Fondements et Concepts. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 1998.
- Paredis, J. (1994). Co-evolutionary constraint satisfaction, in: Proceedings of the 3rd Conference on Parallel Problem Solving from Nature, Springer, New York, pp.46–55.
- Paule, B., Bouvier, F., Courret, G. (2008).Éclairage naturel. Techniques de l'ingénieur, C3315.

- Peippo, K., Lund, P.D., Vartiainen, E. (1999). Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings. *Energy and Buildings*, 29, pp.189-205.
- Pernodet Chanterelle, F. (2010). Méthode d'optimisation multicritère de scénarios de réhabilitation de bâtiments tertiaires. Application à l'évaluation de dispositifs de rafraîchissement hybride. Thèse de doctorat CSTB, ENTPE.
- Peuportier, B. (2001). Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single-family houses in the French context. *Energy and Buildings*, 33(4), pp.43-50.
- Peuportier, B. (2004). Deliverable D5 : final technical report including monitoring results and analysis, REGEN-LINK, site 4 La Noue. OPHLM de Montreuil et ARMINES, 76 p.
- Peuportier, B. (2008). Eco-conception des bâtiments et des quartiers : bâtir en préservant l'environnement. Presses de l'Ecole des Mines ParisTech.
- Peuportier, B., Blanc-Sommereux, I. (1990). Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. *International Journal of Solar Energy*, 8, pp.109-120.
- Peuportier, B., Kellenberger, D., Anink, D., Mötzl, H., Anderson, J., Vares, S., et al. (2004). Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools. In proceedings from Warsaw: Sustainable Building Conference.
- Peuportier, B., Thiers, S., Guiavarch, A. (2011). Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. Conférence SDEWES 2011, Dubrovnik.
- Peuportier, B., Vorger, E., Herfray, G. (2012). LCA application in urban design. In proceedings of the LCA and construction 2012 conference, Nantes.
- Polster, B. (1995). Contribution à l'étude de l'impact environnemental des batiments par analyse de cycle de vie. Thèse de doctorat. Ecole des Mines de Paris.
- Polster, B., Peuportier, B., Blanc-Sommereux, I., Diaz Pedregal, P., Gobin, C., Durand, E. (1996). Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design. *Solar Energy*, 57, pp.219-230.
- Popovici, E.C. (2006). Contribution to the life cycle assessment of settlements. PhD Thesis, MINES ParisTech.
- Pouget, A. (2011). Le guide ABC, Amélioration thermique des bâtiments collectifs construits de 1850 à 1974. Les éditions parisiennes (EDIPA), 350 pages.
- Radford, A. D. and Gero, J. S. (1980). Tradeoff diagrams for the integrated design of the physical environment in buildings. *Building and Environment*, 15(2), pp.3-15.
- Reeves, C. R. (1993). Using genetic algorithms with small population. In proceedings of the fifth international conference on genetic algorithms.
- Reklaitis, G. V., Ravindran, A. Ragsdell, K. M. (1983). Engineering optimization methods and applications, Wiley.
- Rey, E. (2004). Office building retrofitting strategies: Multi-criteria approach of an architectural and technical issue. *Energy and Buildings*, 36(4), pp.367-372.
- Rivers, N., Jaccard, M. (2005). Combining top-down and bottom-up approaches to energy-economy modelling using discrete choice methods. *The Energy Journal*, 26(11), pp.83-106.
- Rogers, A. Prigel-Bennett, A. (1999). Genetic drift in genetic algorithms selection schemes. *IEEE Transactions on evolutionary computation*.

- Romero, C. (1991). *Handbook of critical issues in goal programming*. Oxford, UK, Pergamon Press.
- Rosenfeld, Y. and Shohet, I. M. (1999). Decision support model for semi-automated selection of renovation alternatives. *Automation in Construction*, 8(4), pp.503–510.
- Roulet, C. A., Flourentzou, F., Labben, H. H., Santamouris, M., Koronaki, I., Dascalaki, E. and Richalet, V. (2002). ORME: A multi-criteria rating methodology for buildings. *Building and Environment*, 37(6), pp.579–586.
- Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*, Ed. Economica
- Rutman, E., Inard, C., Bailly, A. and Allard, F. (2005). A global approach of indoor environment in an air-conditioned office room. *Building and Environment*, 40(1), pp.29–37.
- Santana-Quintero, L.V., Hernandez-diaz, A.G., Molina, J., Coello Coello, C.A., Caballero, R. (2010). DEMORS: A hybrid Multi-Objective Optimization Algorithm using Differential Evolution and Rough Set Theory for Constrained Problems. *Computers and Operations Research archive*, 37(3).
- Sauvageon, R. (2008). *Isolation thermique par l'extérieur*. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon.
- Schott, J.R. (1995). *Fault tolerant design using single and multicriteria genetic algorithm optimization*. Thèse de master, Massachusetts Institute of Technology.
- Schulze Darup, B. (2005). *Jean-Paul-Platz 4 in Nürnberg – energetische Gebäudesanierung mit Faktor 10. Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitforschung*. WBG Nürnberg GmbH
- Shah, V.P., Col Debella, D., Ries, R.J. (2008). Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the United States. *Energy and Buildings*, 40(5), pp.03-13.
- Shaviv, E., Yezioro, A., Capeluto, I.G., Peleg, U.J., Kalay, Y.E. (1996). Simulations and knowledge-based computer-aided architectural design (CAAD) systems for passive and low energy architecture. *Energy and Buildings*, 23(3), pp.57–69.
- Shorrock, L.D., Dunster, J.E. (1997). The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock. *Energy Policy*, 25(12), pp.1027–37.
- Siarry, P. (1986). *La méthode du recuit simulé : application à la conception de circuits électroniques*. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- Sidler, O. (2009). *La rénovation à très basse consommation d'énergie des bâtiments existants*. Formation Institut NegaWatt.
- Siedlecki, W., Sklanski, J. (1989). Constrained genetic optimization via dynamic reward-penalty balancing and its use in pattern recognition, in: J.D. Schaffer (Ed.), *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, George Mason University, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, pp.141–150.
- Snakin, J.P.A. (2000). An engineering model for heating energy and emission assessment: the case of North Karelia, Finland. *Applied Energy*, 67, pp.353–81.
- SOeS: Service de l'observation et des statistiques (2010). *Bilan énergétique de la France pour 2010*. Commissariat général au développement durable.
- Spears, W.M. (1998). *The role of mutation and recombination in evolutionary algorithms*. Ph. D. Thesis. George Mason University.
- Stern, N. (2006). *The economics of climate change*. Cambridge University Press.

- Summerfield, A.J., Lowe, R.J., Oreszczyn, T. (2010). Two models for benchmarking UK domestic delivered energy. *Building Research & Information*, 38, pp.12–24.
- Sun, M., Stam, A., Steuer, R. (1996). Solving multiple objective programming problems using feed-forward artificial neural networks: The interactive FFANN procedure. *Management Science*, 42(6), pp.835–849.
- Swan, L.G., Ugursal, V.I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp.1819–35.
- Talbi, E. (2001). *Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire multiobjectif : Etat de l'art*, Lille : LIFL.
- Thellier, F. (1999). *L'Homme et de son environnement Thermique. Modélisation. Habilitation à Diriger des Recherches*. Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Thiers, S., Peuportier, B. (2012). Energy and environmental assessment of two high energy performance residential buildings. *Building and Environment*, 51, pp.276-284.
- Thomsen, A., Van der Flier, K. (2009). Replacement or renovation of dwellings: the relevance of amore sustainable approach. *Building Research and Information*, 37(5-6), pp.649–659.
- Ilungu, E.L., Teghem, J., Fortemps, P.H., Tuytens, D. (1999). MOSA Method: A tool for solving multiobjective combinatorial optimization problems. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 8, pp.221–236.
- UNEP: United Nations Environment Program (2003). *Industry and environment* April September.
- UNEP: United Nations Environment Program (2006). *Sustainable Building and Construction Initiative*. Information note.
- USGS: United States Geological Survey (2002). *Materials in the economy*, 1221-508.
- Vanderpooten, D. (2008). Introduction à l'aide multicritère à la décision » chap.12 dans *Précis de recherche opérationnelle*, 6e édition Dunod, Paris.
- Vanderpooten, D. (2011). *Aide multicritère à la décision et optimisation multiobjectif*. Journée multicritère/multiobjectif, Nancy, 21 septembre 2011
- Vincenti, A., Ahmadian, M.R., Vannucci, P. (2010). BIANCA: a genetic algorithm to solve hard combinatorial optimisation problems in engineering. *Journal of global optimization*, 48(3), pp.399-421.
- Vincke, Ph. (1992). *Multicriteria decision aid*. J. Wiley, New York.
- Von Winterfeldt, D., Edwards, W. (1986). *Decision analysis and behavioral research*. Cambridge University Press
- Wallbaum, H., Jakob, M. (2009). *Vorstudie zum Gebäudeparkmodell Schweiz – Machbarkeitsuntersuchung anhand des neuen SIA-Effizienzpfades Energie*.
- Wang, W., Zmeureanu, R. and Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*, 40(11), pp.1512–1525.
- WBCSD: World business council for sustainable development (2009). *Transforming the Market: Energy Efficiency in Buildings report*. In the scope of the EEB project (Energy Efficiency in Buildings).
- Wetter M. (2001). GenOpt—A generic optimization program. In: Lamberts R, Negarao COR, Hensen J, editors. *Proceedings of the Seventh International IBPSA Conference*. IBPSA, pp.601–608.
- Wilde, P. and van der Voorden, M. (2004). Providing computational support for the selection of energy saving building components. *Energy and Buildings*, 36(8), pp.749–758.

Wilson, D., Swisher, J. (1993). Exploring the gap: top-down versus bottom-up analyses of the cost of mitigating global warming. *Energy Policy*, pp.249–63.

Wong, J. K. W. and Li, H. (2008). Application of the analytic hierarchy process (AHP) in multi-criteria analysis of the selection of intelligent building systems. *Building and Environment*, 43(1), pp.108–125.

Woolley, T., Kimmins, S., Harrison, P., Harrison, R. (1997). *Green building handbook: a guide to building products and their impact on the environment*. London: E&FN Spon.

Wright, J.A., Loosemore, H.A., Farmani, R. (2002). Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 34, pp.959-972.

WWF: World Wildlife Foundation (2006). *Living planet report*.

Yettou1, F., Gama1, A., Hamouda, C. and Malek, A. (2008). Etude et réalisation d'un banc d'essai pour un chauffe-eau solaire à circulation forcée dans la région des Hauts Plateaux. *Revue des Energies Renouvelables*, 11, pp.119–128.

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(11), pp.33-40.

Zitzler, E., Deb, K., Thiele, L. (1999). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Technique 70*, Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of technology (ETH) Zurich.

Zhu, Y. (2006). Applying computer-based simulation energy auditing: A case study. *Energy and Buildings*, 38 (5), pp.421–428.

Znouda, E., Ghrab-Morcos, N., Hadj-Alouane, A. (2007). Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms. *Energy and Buildings*, 39, pp.148–153.

# **Annexes**

# Annexe A

## Indicateurs environnementaux

Cette annexe se donne pour objectif de présenter les principaux thèmes et indicateurs environnementaux considérés pour évaluer le bilan environnemental des programmes de réhabilitation, par analyse de cycle de vie (ACV).

Ces contenus ont été élaborés à partir de diverses références, dont ils sont largement inspirés (Peuportier B., 2008 ; Popovici E.C., 2006 ; Herfray G., 2011).

### 6.1 Introduction

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthodologie internationale et normalisée (ISO 14040-44) d'évaluation environnementale, applicable à tout produit, procédé ou service. L'ACV comprend traditionnellement 5 étapes, dont la dernière est considérée facultative.

En premier lieu, il s'agit de préciser les objectifs de l'étude, ce qui conduit à définir une unité fonctionnelle et à préciser les frontières du système étudié.

La deuxième phase ou « analyse de l'inventaire » aboutit à la production d'un inventaire de cycle de vie (ICV). Un ICV est une liste pouvant compter plusieurs centaines de flux élémentaires entrants et sortants (substances ou énergies), quantifiés sur le cycle de vie du système étudié. Sur cette seule base, il est alors difficile de comparer des solutions potentielles. La phase d'analyse d'impact (troisième étape de l'ACV) consiste donc à agréger les inventaires en un certain nombre d'indicateurs modélisant des préoccupations environnementales actuelles et jugés pertinents pour représenter le bilan environnemental global du système étudié.

Les indicateurs environnementaux sont calculés à partir de modèles d'agrégation, intégrant les connaissances actuelles sur chaque substance et ses effets. Pour une problématique environnementale donnée, un indicateur de potentiel somme, sur les substances contribuant à la catégorie d'impact, les produits des quantités de flux par le facteur de caractérisation correspondant. Le facteur de caractérisation représente l'influence de la substance sur la catégorie d'impact considérée. L'équation suivante illustre la formule générale d'un indicateur environnemental (orienté problème) :

$$I_j = \sum_{i \in \{flux\}} (C_{i,j} \cdot F_i)$$

Avec :

- $I_j$  : Indicateur d'impact j ;
- $C_{i,j}$  : Facteur de caractérisation du  $i^{\text{ème}}$  flux élémentaire pour le  $j^{\text{ème}}$  indicateur ;

- $F_i$  : Quantité de flux élémentaire  $i$  ;

Nous rappelons que les indicateurs environnementaux et les indicateurs portant sur la consommation cumulée d'énergie primaire, considérés dans ces travaux, sont ceux du logiciel d'analyse de cycle de vie du bâtiment EQUER. Ces indicateurs ont été considérés pertinents pour représenter le bilan environnemental des bâtiments sur leur cycle de vie (Popovici, 2006).

Ces indicateurs sont listés dans le tableau ci-dessous :

Indicateurs d'impact	Unité	Légende
Consommation cumulée d'énergie primaire	MJ	CUMULATIVE ENERGY
Consommation d'eau	m <sup>3</sup>	WATER
Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques	kg eq. Sb	ABIOTIC DEPLETION
Potentiel de changement climatique à 100 ans	tonne eq. CO <sub>2</sub>	GWP100
Potentiel d'acidification	kg eq. SO <sub>2</sub>	ACIDIFICATION
Potentiel d'eutrophisation	kg eq. PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	EUTROPHICATION
Potentiel de formation d'ozone photochimique	kg eq. C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	SMOG
Dommages causés aux écosystèmes	PDF m <sup>2</sup> an	ECOTOXICITY
Dommages sur la santé humaine	DALY	HUMAN HEALTH
Déchets non radioactifs	tonne eq.	WASTE
Déchets radioactifs	dm <sup>3</sup>	RADIOACTIVE WASTE
Odeurs	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	ODOUR

**Tableau 47. Indicateurs environnementaux (implémentés dans le logiciel EQUER)**

Ces indicateurs représentent différentes catégories d'impact :

- **Ressources et déchets** : consommation cumulée d'énergie primaire, consommation d'eau, potentiel d'épuisement des ressources abiotiques, déchets radioactifs ou non ;
- **Ecosystème** : Potentiel de changement climatique, potentiel d'acidification atmosphérique, potentiel de formation d'ozone photochimique, potentiel d'eutrophisation des eaux, écotoxicité ;
- **Santé humaine** : dommages sur la santé humaine, odeurs.

Par ailleurs, ils peuvent être différenciés entre :

- **Indicateurs « simples »** : mesurant directement la contribution du système à la consommation des ressources ou à la génération de déchets ;
- **Indicateurs de potentiel ou intermédiaires (orientés problèmes)** : ces indicateurs, aussi appelés « mid-points », modélisent et quantifient un impact potentiel, qui ne se produira pas nécessairement. Ils ne cherchent pas à en expliciter les conséquences finales (ex. potentiel de changement climatique) ;
- **Indicateurs de volume critique** : ces indicateurs évaluent les effets qui dépendent de la concentration en polluants et dont la nocivité diffère en fonction de cette concentration (ex. odeurs) ;

- **Indicateurs orientés dommages** : qualifiés de « end-points », ils intègrent davantage les effets aval pour évaluer un impact final et non un effet intermédiaire (ex. dommages sur la santé humaine, liés à différents impacts potentiels).

S'ils sont moins reliés à un impact final, les indicateurs de potentiel sont souvent jugés plus fiables que les indicateurs de dommages, car plus directement reliés aux flux élémentaires. La transition entre impacts potentiels et dommages repose sur des modèles complexes, aux incertitudes accrues et dont les bases scientifiques apparaissent moins établies. Ils apparaissent cependant plus lisibles, concrétisant formellement des conséquences environnementales d'un procédé sur la santé humaine, la perte de biodiversité, par exemple. Les indicateurs de volumes critiques sont régulièrement décriés en raison d'une limitation importante : ils ne tiennent pas compte de la durée de vie et de la dégradation des polluants dans les différents milieux.

L'ensemble d'indicateurs exhibé permet par ailleurs de quantifier des impacts environnementaux à différentes échelles, depuis l'échelle planétaire ou globale (ex. changement climatique), jusqu'à l'échelle locale (ex. odeurs), en passant par l'échelle régionale (ex. acidification atmosphérique).

Enfin, cet ensemble d'indicateurs est issu de différentes méthodes d'impact, établissant les modélisations et méthodes de calcul. Les indicateurs environnementaux exhibés dans le Tableau 47 et les thèmes correspondants, font l'objet des sous parties suivantes.

La quatrième phase d'une ACV correspond à l'interprétation des résultats, et fait généralement appel à des études de sensibilité. La dernière étape concerne l'exploitation des résultats et peut conduire à reconsidérer les phases précédentes, de manière itérative.

## 6.2 Consommation cumulée d'énergie primaire

Les différentes chaînes énergétiques ne présentent pas les mêmes rendements. Le kWh d'électricité consommé au compteur (énergie finale) mobilise davantage d'énergie en production, transformation, distribution que le kWh de chaleur à partir de gaz naturel, par exemple.

L'énergie primaire est définie comme l'énergie contenue dans les ressources naturelles (charbon, pétrole, gaz naturel, bois, uranium) n'ayant subi aucune transformation anthropogénique (Frischknecht et al., 1996).

Dans une perspective d'analyse de cycle de vie, la demande cumulée d'énergie primaire ou CED (Cumulative Energy Demand) (Frischknecht et al., 2004) représente la consommation d'énergie primaire sur le cycle de vie du système étudié. Elle prend en compte tant les usages directs de l'énergie, que les usages indirects ou énergie grise, liés par exemple à la production de matériaux de construction.

$$\text{CUMULATIVE ENERGY} = \sum_i \text{CED}_i \cdot q_i$$

Avec :

- $q_i$  : Quantité de source d'énergie  $i$  consommée [unité] (kg, m<sup>3</sup> ou MJ) ;
- $\text{CED}_i$  : Valeur énergétique de la source d'énergie  $i$  [MJ/unité].

En termes d'énergie primaire, les sources d'énergie sont généralement subdivisées en cinq catégories : énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), nucléaire, biomasse, hydraulique et autres sources d'énergie renouvelables (éolien, solaire, géothermique).

Le rapport de conversion entre énergie primaire et énergie finale (consommée par l'utilisateur final) dépend évidemment du type de ressource mobilisé pour la production d'énergie finale. Dans le cas des énergies fossiles combustibles, la CED correspond à la capacité maximale de production de chaleur pouvant être extraire de la ressource (en MJ/kg ou MJ /m<sup>3</sup>), représentée par le PCS (pouvoir calorifique supérieur). Concernant le nucléaire, la CED est modélisée par l'énergie moyenne qui peut être générée dans une centrale nucléaire moderne, étant donné l'état des technologies actuelles. Pour les énergies renouvelables, l'énergie primaire correspondante dépend des spécificités de chaque source : énergie mécanique potentielle pour l'hydraulique, l'énergie radiative collectée par la centrale pour le thermique, etc. Pour les renouvelables, on considère que la CED est égale à 1 MJ/MJ.

### **6.3 Consommation d'eau**

Si la ressource globale est très abondante sur Terre, la répartition et l'accès à l'eau sur la surface du globe demeure très inégaux. Même dans les régions où la ressource hydrique n'est pas menacée en moyenne sur l'année, l'approvisionnement en eau peut être problématique durant certaines périodes. Il est donc important d'en maîtriser les consommations.

L'indicateur sur la consommation d'eau est un indicateur « simple » issu de l'analyse des quelques flux élémentaires concernant la quantité d'eau consommée (eau de rivière, nappes phréatiques, eau de mer, etc.). Sur le cycle de vie du système étudié, cet indicateur représente la somme des volumes d'eau consommés [m<sup>3</sup>].

### **6.4 Potentiel d'épuisement des ressources abiotiques**

Le développement de nos sociétés modernes a accéléré les rythmes de consommation en matières premières, dont certaines tendent à devenir rares : pétrole, mercure, cadmium, étain, nickel, plomb, zinc, cuivre, etc. L'épuisement des ressources est bien entendu une préoccupation environnementale mais affectant aussi directement les sphères économique et sociétale. L'augmentation des prix et l'épuisement de certaines ressources influencent nos modes de vie et les produits de consommation de demain.

Les ressources abiotiques admettent différentes définitions. On considère ici qu'il s'agit des éléments du tableau périodique, dans leurs conditions standards d'existence, et dans toutes leurs configurations naturelles, biomasse exceptée.

L'épuisement des ressources abiotiques est une problématique complexe à évaluer, sa définition actuelle est issue de différents travaux. Dans un premier temps (Heijungs & al, 1992), le facteur de caractérisation de chaque ressource était défini comme le rapport entre les ressources extraites et les réserves exploitables restantes pour cette ressource. Ce premier modèle a ensuite été affiné, afin de prendre en compte le taux d'extraction des substances considérées. Guinée et Heijungs (1995) ont alors défini l'indicateur ADP (Abiotic Depletion Potential) :

$$\text{ABIOTIC DEPLETION} = \sum_i \text{ADP}_i \cdot m_i$$

Avec :

- $m_i$  : Masse de substance  $i$  consommée ou émise dans le processus étudié [kg] ;
- $\text{ADP}_i$  : Facteur de caractérisation pour le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques de la substance  $i$  [kg équivalent Antimoine (Sb) / kg]

Les facteurs de caractérisation correspondent à des réserves ultimes (au-delà des réserves économiquement exploitables) et intègrent une vitesse d'extraction. L'ADP de la ressource  $i$  est calculée en kg d'équivalent antimoine par kg, selon l'expression suivante (Guinée, 2001) :

$$\text{ADP}_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \cdot \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}}$$

Avec :

- $R_i$  : Réserves ultimes de la ressource  $i$  [kg] ;
- $DR_i$  : Taux d'extraction de la ressource  $i$  [kg/an] ;
- $R_{ref}$  : Réserves ultimes en antimoine [kg] ;
- $DR_{ref}$  : Taux d'extraction de l'antimoine [kg/an].

Ce mode de calcul de l'indicateur a été étendu aux énergies fossiles, considérés comme des ressources. On obtient alors l'indicateur  $\text{ADP}_{\text{fossil energy}}$  exprimé en kg/MJ (sa valeur est aujourd'hui calculée à  $4,8 \cdot 10^{-4}$  kg/MJ). L'ADP de chaque carburant est obtenu en multipliant ce facteur de caractérisation par la quantité d'énergie consommée.

## 6.5 Potentiel de changement climatique

L'effet de serre ou changement climatique planétaire est aujourd'hui un phénomène bien connu, d'échelle planétaire et certainement une des problématiques environnementales les mieux appréhendées par le grand public. L'effet de serre est un mécanisme naturel, aujourd'hui amplifié par des sources d'origines anthropiques, qui a permis à notre planète de maintenir sa température moyenne à un niveau propice au développement de la vie (autour de 15°C) sur ces 10 000 dernières années, contre -18°C en l'absence d'effet de serre.

Une fraction importante du rayonnement solaire reçu est réfléchi par l'atmosphère ou la surface de la Terre, ou réémise sous la forme d'un rayonnement infrarouge par la surface terrestre. Cependant, certains gaz, aérosols et particules, présents dans l'atmosphère, les gaz à effet de serre (GES), plus transparents au rayonnement solaire qu'à l'infrarouge, absorbent une partie de cette réémission. Lorsque leur concentration augmente, ils participent alors à l'accroissement de la température moyenne globale de la planète.

Le développement industriel de nos sociétés modernes est responsable de consommations croissantes d'énergies fossiles, dont la combustion a contribué et contribue encore à l'augmentation des concentrations en GES dans l'atmosphère (55% de l'accroissement de l'effet de serre sur la décennie 80), conduisant à une hausse progressive de la température moyenne de la planète.

Ces concentrations croissantes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont sources de nombreuses préoccupations : modification du climat local et global, risque croissant d'événements climatiques extrêmes, fonte des glaciers continentaux et polaires et élévation du niveau des mers, développement de maladies et perte de biodiversité.

Il existe deux types de contributions à l'effet de serre :

- Les **effets directs**, qui intensifient le forçage radiatif. Les substances contributrices sont notamment les gaz qui absorbent le rayonnement infrarouge, ou qui sont dégradés sous la forme de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et ayant une durée de vie suffisamment longue pour produire un effet significatif. Parmi ces gaz, on retrouve le : dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), ozone (O<sub>3</sub>) et les hydrocarbures chlorés, bromés et fluorés.
- Les **effets indirects**, qui peuvent être positifs ou négatifs (amplifiant ou réduisant respectivement l'importance de l'effet de serre). Certains mécanismes participent à la production de substances ayant des effets directs, à partir de gaz tels que : le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), les différents composés organiques non méthaniques, le méthane. En termes d'effets négatifs, les halogènes contribuent à limiter l'effet de serre mais sont responsables de la diminution de la couche d'ozone stratosphérique. D'autres gaz comme dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) ou les aérosols sont à prendre en compte.

L'impact d'une activité sur le changement climatique peut être évalué à partir de l'indicateur de potentiel GWP (Global Warming Potential), issu des travaux du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, IPCC en anglais). Sur une base pluriannuelle, le GIEC met à jour une liste d'indicateurs, sur plusieurs échelles de temps (20, 100 et 500 ans), constituant les « meilleures estimations provisoires » de la contribution de différents gaz au potentiel de changement climatique (IPCC, 1994 ; IPCC, 2001 ; IPCC, 2007).

$$GWP_T = \sum_i GWP_{T,i} \cdot m_i$$

Avec :

- **T** : Durée sur laquelle le GWP est évalué (20, 100 ou 500 ans) [années] ;
- **m<sub>i</sub>** : Masse de substance i émise dans le processus étudié [kg] ;
- **GWP<sub>T,i</sub>** : Facteur de caractérisation sur une durée T, pour le potentiel de changement climatique de la substance i [kg équivalent CO<sub>2</sub> / kg].

Le facteur de caractérisation est calculé comme le rapport entre la hausse d'absorption infrarouge due à l'émission d'un kilogramme de la substance considérée et de celle due à l'émission d'une même quantité de CO<sub>2</sub>, intégrées sur l'échelle de temps considérée :

$$GWP_{T,i} = \frac{\int_0^T a_i \cdot c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) dt}$$

Avec :

- $a_i$  : Forçage radiatif par unité de hausse de la concentration dans l'atmosphère du gaz à effet de serre  $i$  [ $W/(m^2 \cdot kg)$ ] ;
- $c_i(t)$  : Concentration dans l'atmosphère du gaz  $i$  à l'instant  $t$  [ $kg/m^3$ ] ;

Les valeurs de GWP dépendent des propriétés optiques des gaz, au travers du facteur d'absorption du rayonnement infrarouge émis par la Terre et donc du forçage radiatif.

Le modèle du facteur de caractérisation fait clairement apparaître l'importance du devenir des substances, au travers de l'évolution de leur concentration dans le temps. Pour une substance donnée, cette évolution temporelle dépend de sa dégradation, de son immobilisation, ainsi que de son transport selon plusieurs voies (l'air, les sols, l'eau et les sédiments), eux-mêmes fonctions du domaine d'émission (la plupart des modèles considèrent trois domaines : l'air, les sols, les eaux) et l'intensité de son intensité.

Le facteur temps apparaît également au niveau de la durée d'évaluation, qui doit être adaptée au à la constante de temps caractérisant l'évolution du système climatique étudié. Ainsi pour prendre en compte les effets du changement climatique sur la température continentale, on choisit traditionnellement une durée de 100 ans. C'est à cette échelle que s'établit l'équilibre entre la température continentale et celle de l'atmosphère. L'équilibre thermique des océans nécessite plutôt une durée d'étude de 500 ans, liés aux courants et mécanismes internes. Une durée de 100 ans est considérée dans ces travaux car elle correspond à la durée de vie du  $CO_2$ , principale émission de GES dans le secteur du bâtiment.

Si le principal vecteur de l'effet de serre demeure la vapeur d'eau, sa concentration dans l'atmosphère n'a pas subi d'évolution notable, sur les derniers siècles. De plus, la vapeur d'eau est caractérisée par une très faible durée de vie. Ce gaz n'est donc pas considéré dans l'indicateur de potentiel de réchauffement global, qui intègre une cinquantaine de GES.

## 6.6 Potentiel d'acidification

L'acidification atmosphérique est un impact environnemental d'échelle régionale. En effet, les substances qui en sont responsables sont des produits caractérisés par une durée de vie de quelques jours, ce qui n'autorise pas leur transport à l'échelle planétaire.

Ces substances génèrent ou contribuent à l'émission d'ions hydrogène  $H^+$ , qui lavent les anions présents dans le système considéré (Manahan, 2000). Les émissions de dioxyde de soufre ou oxydes d'azote d'origine anthropique, sont transformées en sulfates ou en nitrates, voire en acide sulfurique ou nitriques dans les nuages, et retombent avec les eaux de pluie.

L'acidification d'un milieu conduit à la dégradation des écosystèmes. Avec l'acidité des eaux, les capacités neutralisantes sont diminuées, l'intégrité de la faune et de la flore est mise à mal.

Par ailleurs, les infrastructures et productions humaines sont sensibles aux attaques acides : dégradation des façades, des revêtements, etc.

Il existe deux voies induisant ce phénomène. La voie sèche conduit à un dépôt et une accumulation de particules ou de gaz sur la végétation, les sols ou à la surface de l'eau. La voie humide repose sur la dissolution des composés acides dans les eaux de pluie ou dans des substances gazeuses condensées, qui influent alors sur la qualité des eaux et par voie de conséquence sur les écosystèmes aquatiques et terrestres. Il est bien important de distinguer l'acidification directe et l'acidification potentielle, où les anions responsables sont stockés dans la biomasse et ne seront que potentiellement rejetés.

Les composés responsables du potentiel d'acidification sont principalement :

- Les acides (HCl ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), responsables d'une acidification directe ;
- Les acides anhydres comme le SO<sub>2</sub>, qui peuvent redevenir des acides en présence d'eau (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ;
- Les substances rejetant des ions hydrogène au cours de transformations chimiques (transformation d'ammoniac en nitrates, par exemple).

L'indicateur d'impact utilisé a été défini par Heijungs (1992) :

$$\text{ACIDIFICATION} = \sum_i AP_i \cdot m_i$$

Avec :

- $m_i$  : Masse de substance i intervenant dans le processus étudié [kg] ;
- $AP_i$  : Facteur de caractérisation pour le potentiel d'acidification de la substance i [kg équivalent SO<sub>2</sub> / kg].

Pour une substance donnée, le facteur de caractérisation est donné par la quantité d'ions H<sup>+</sup> produits par la substance considérée, rapportée à la même quantité pour le SO<sub>2</sub> :

$$AP_i = \frac{\eta_i}{\eta_{SO_2}}$$

Avec :  $\eta_i$  : Quantité d'ions H<sup>+</sup> potentiellement produits par unité de masse de substance i [moles/kg] ;

Ce modèle évalue l'acidification maximale potentielle à laquelle une substance peut participer. L'acidification réelle, soit la quantité d'ions H<sup>+</sup> qui sera effectivement produite, dépend des conditions et des milieux dans lesquels les substances sont émises, transportées et dégradées. Plusieurs méthodes ont alors été développées pour affiner le modèle précédent et notamment prendre en compte les différences locales de sensibilité à l'acidification.

## 6.7 Potentiel d'eutrophisation

L'eutrophisation est un phénomène d'enrichissement des milieux aquatiques en macronutriments, sels minéraux (azote et phosphore notamment), à l'échelle régionale.

Cet enrichissement peut être lié à l'activité agricole (engrais azotés ou phosphatés), à certains procédés industriels, à l'usage de lessives ou de détergents aux phosphates, par exemple.

Il a pour conséquence une augmentation de la croissance du plancton et des plantes aquatiques de surface, ce qui entraîne un appauvrissement en oxygène et une opacification des eaux, modifiant l'équilibre de l'écosystème aquatique préexistant. Ainsi, à la surface des lacs concernés, on observe une baisse de la concentration d'O<sub>2</sub> et une hausse de celle de H<sub>2</sub>S (liée à la décomposition de la biomasse), ce qui à terme induit la disparition de tous les organismes aquatiques.

L'indicateur d'impact utilisé a été défini par Guinée et al. (2001) :

$$\text{EUTROFICATION} = \sum_i EP_i \cdot m_i$$

Avec :

- $m_i$  : Masse de substance  $i$  intervenant dans le processus étudié [kg] ;
- $EP_i$  : Facteur de caractérisation pour le potentiel d'eutrophisation de la substance  $i$  [kg équivalent PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> / kg].

Pour une substance donnée, le facteur de caractérisation est donné par le modèle suivant :

$$EP_i = \frac{v_i}{M_i} \cdot \frac{M_{PO_4^{3-}}}{v_{PO_4^{3-}}}$$

Avec :

- $M_i$  : Masse de substance  $i$  intervenant dans le processus étudié [kg] ;
- $v_i$  : Contribution potentielle d'une mole de substance  $i$  au phénomène d'eutrophisation

La contribution potentielle est calculée à partir d'une composition chimique moyenne des organismes aquatiques, considérés comme étant représentatifs. Les seules émissions considérées sont celles des composés azotés et phosphorés, en considérant que les quantités disponibles concernant les autres nutriments nécessaires au développement de la biomasse ne constituent pas un facteur limitant. Dans ces conditions, la production d'une mole de biomasse nécessite 16 moles d'azote et une mole de phosphore.

Cette méthode de calcul présente quelques lacunes, puisqu'elle ne s'intéresse ni au mode d'émission, ni aux conditions particulières du milieu susceptibles d'influencer le déroulement du phénomène (quantité de nutriments limitée,...). Des travaux sont menés en ce sens. A ce jour, aucune approche ne fait l'objet d'un consensus.

## 6.8 Potentiel de formation d'ozone photochimique

La formation d'ozone photochimique affecte la qualité de l'air et présente des risques sanitaires avérés. L'élévation des concentrations en ozone touche particulièrement les jeunes enfants et les personnes âgées, pour lesquelles on constate alors une hausse de près de 20% des hospitalisations en lien avec des maladies respiratoires chroniques.

Le smog d'été ou formation d'ozone photochimique désigne la réaction chimique de dégradation de certains polluants primaires, sous l'effet des rayons ultra-violet. Les photo-oxydants formés (dont ozone et peroxyacétylnitrate (PAN)) sont potentiellement nocifs pour l'homme, les écosystèmes et les cultures. Ces photo-oxydants se forment dans la troposphère par oxydation des composés organiques volatils (COVs) ou de monoxyde de carbone (CO), en présence de composants oxygénés (radicaux OH principalement), d'oxydes azotés (NO<sub>x</sub>) et de lumière.

On désigne en général ce phénomène par « smog d'été », par opposition au smog d'hiver, riche en composés inorganiques, particules, monoxyde de carbone ou composés soufrés. Il concerne les COV contenant de l'hydrogène ou des doubles liaisons, en général classés comme hydrocarbures ou comme COV.

L'indicateur environnemental est le potentiel de contribution à la production d'ozone troposphérique (Guinée et al., 2001), modélisé comme suit :

$$SMOG = \sum_i POCP_i \cdot m_i$$

Avec :

- $m_i$  : Masse de substance  $i$  intervenant dans le processus étudié [kg] ;
- $POCP_i$  : Facteur de caractérisation pour le potentiel de formation d'ozone photochimique de la substance  $i$  [kg équivalent éthylène / kg].

Le POCP est évalué à partir de modèles qui simulent à la fois les conditions physiques de l'air dans lequel est produit l'ozone et les réactions chimiques de formation. Il est obtenu par différence, en simulant la formation d'ozone pour deux quantités de gaz  $i$  différentes, dans les mêmes conditions. Le même calcul est effectué dans le cas de l'éthylène, gaz de référence. La différence de quantité d'ozone produite dans les deux cas permet de calculer le POCP :

$$POCP_i = \frac{\Delta F_i}{M_i} \cdot \frac{M_{C_2H_4}}{\Delta F_{C_2H_4}}$$

Avec :

- $M_i$  : Quantité totale de gaz  $i$  considérée [moles] ;
- $\Delta F_i$  : Différence des quantités d'ozone produite pour les deux quantités de gaz  $i$  considérées [moles] ;

Heijungs utilise pour sa définition du POCP le modèle de la United Kingdom Atomic Energy Authority (Derwent et Jenkin, 1990) (mis à jour en 1996, 1998 et 1999), qui se base notamment sur des modèles de transport sur cinq jours des COV en Europe.

## 6.9 Dommages causés aux écosystèmes

Les dommages causés aux écosystèmes sont évalués par la méthode Eco-Indicator 99 (Goedkoop et Spriensma, 2000), qui est une approche orientée dommage de l'impact environnemental. Il s'agit ici de concrétiser formellement les conséquences en termes de dommages sur les écosystèmes de différents impacts orientés problème dont : le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophisation, l'usage des sols et leur conversion, l'émission de substances écotoxiques. Goedkoop a proposé une méthode de pondération de ces différents impacts pour les agréger en un indicateur unique.

Les dommages causés aux écosystèmes sont caractérisés par les espèces affectées sur une certaine zone, via un indicateur exprimé sur deux unités :

- le pourcentage d'espèces potentiellement affecté, sur une certaine surface de territoire et pendant une certaine durée (PAF : Potentially Affected Species), concernant l'écotoxicité et basé sur des fonctions dose-réponse pour chaque polluant. Le PAF explicite la part d'espèces vivant sous une pression de substances nocives (toxiques) [PAF.m<sup>2</sup>.an] ;
- et la fraction potentiellement disparue, sur une certaine surface de territoire et pendant une certaine durée (PDF : Potentially Disappeared Fraction of species), reliée à l'acidification, l'eutrophisation et l'usage des terres. Le PDF traduit la part d'espèces qu'il est peu probable de trouver dans une région, à cause de conditions défavorables.

La valeur en PAF peut être convertie en PDF avec l'hypothèse suivante :

$$1 \text{ PDF} = 10 \text{ PAF}$$

En ce qui concerne l'écotoxicité, on calcule le PAF pour les plantes et les espèces animales peu évoluées. On calcule aussi le PDF des plantes. Les dommages causés aux espèces plus évoluées (mammifères, oiseaux) ne peuvent pas être calculés et ne sont pas pris en compte. On considère généralement que les dommages aux plantes et espèces peu évoluées sont représentatifs pour cette catégorie. Pour la plupart des substances, on calcule les dommages à l'échelle de l'Europe, hormis pour les gaz à effet de serre ou les gaz attaquant la couche d'ozone et à longue durée de vie, qui sont pris en compte à une échelle mondiale.

## 6.10 Dommages sur la santé humaine

Les dommages sur la santé humaine sont évalués par la méthode Eco-Indicator 99 (Goedkoop et Spriensma, 2000), approche orientée dommage de l'impact environnemental. De même que pour les dommages sur les écosystèmes, il s'agit ici de concrétiser formellement les conséquences en termes de dommages sur la santé humaine de différents impacts orientés problème dont : le potentiel de changement climatique, la diminution de la couche d'ozone stratosphérique, les radiations ionisantes, les substances cancérigènes, la formation d'ozone photochimique, le smog d'hiver. Goedkoop a proposé une méthode prenant en compte ces différents impacts pour les agréger en un indicateur unique.

Les dommages sur la santé humaine intègrent à la fois les maladies et les décès et sont caractérisés par un indicateur unique : le DALY (Disability Adjusted Life Years). Le DALY traduit le nombre d'années de vies perdues ajustées par le handicap, pour un individu, à cause des différents impacts liés aux pollutions (« quantitative indication burden of disease that reflects the total amount of healthy life lost, to all causes, whether from premature mortality or from some degree of disability during a period of time », (world bank, 1993)).

Le DALY distingue et fait la somme des :

- Années vécues avec handicap (YLD : Years Lived Disabled) ;
- Années perdues par mortalité prématurée (YLL : Years of Life Lost).

$$\text{DALY} = \text{YLD} + \text{YLL}$$

Les années vécues avec handicap sont mises à la même échelle que les années de vie perdue via des facteurs d'équivalence qui dépendent de la gravité du handicap.

A partir de l'analyse du devenir des substances dans les différents compartiments du milieu, l'étude de l'exposition, des effets et des dommages, le DALY est alors évalué. Ainsi, sachant qu'un niveau d'exposition donné (dose) engendre une augmentation quantifiée du risque de développer un certain type de cancer, il est possible d'obtenir des données sur l'âge moyen des personnes susceptibles de développer ce cancer, le risque moyen de décès, et ainsi calculer les valeurs des YLD et YLL, selon la méthodologie développée par Murray et Lopez (1996).

## 6.11 Déchets non radioactifs

Le secteur du bâtiment est fortement producteur de déchets inertes. Au niveau mondial, on considère que la Construction est responsable dans le monde d'environ 40% des déchets générés, en volume. Par conséquent, il est important de prendre en compte cet impact.

L'indicateur proposé se base directement sur la masse de déchets générée  $W$  [kg] :

$$\text{WASTE CREATION} = W$$

Cet indicateur, très simple à mettre en œuvre, n'introduit cependant aucune différenciation entre les types de déchets générés. En dehors des déchets dangereux (explosifs, inflammables, corrosifs ou toxiques), certains produits sont inertes, d'autres sont à même de polluer les sols ou les eaux par lixiviation, par exemple. Dans le cas où des données spécifiques sont disponibles, un indicateur plus élaboré peut être construit à partir de facteurs de caractérisation. Ainsi, en France, la législation distingue trois types de déchets (déchets ménagers, déchets industriels normaux et spéciaux), qui requièrent différents types de traitements (en termes de sécurité, d'étanchéité ou de coûts par exemple). Il peut être intéressant de différencier dans les calculs d'impacts ces trois catégories (Peuportier, 2008).

## 6.12 Radiations ionisantes et déchets radioactifs

Un certain nombre de pays ont choisi de baser une part de leur production électrique sur des centrales nucléaires. En dehors des applications militaires, les sociétés civiles sont donc responsables de production de déchets nucléaires et par voie de conséquence de leur traitement et de leur gestion sur des temps longs.

Cette catégorie d'impact concerne aussi bien l'émission de substances radioactives que l'exposition directe à des radiations, qui ont un impact sur la santé humaine et celle des animaux. L'activité radioactive, mesurée en Becquerels, représente le nombre de désintégrations par seconde des corps radioactifs. L'activité radioactive décline naturellement au cours du temps. La demi-vie d'une substance correspond à une baisse de cette activité de moitié.

En l'absence de consensus scientifique sur la prise en compte de cet impact, la plupart des analyses n'en font pas mention. Le logiciel d'ACV de bâtiment EQUER comme la norme NF P 01010 (AFNOR, 2004) introduisent néanmoins un indicateur sur la quantité de déchets radioactifs générés. En effet, électricité consommée en France étant majoritairement d'origine nucléaire, les bâtiments, sur leur cycle de vie, se trouvent nécessairement responsables de la production de déchets radioactifs.

Polster (1995) propose alors un indicateur qui se base sur l'approche de Ecoinvent (Frischknecht et al., 1996), qui évalue l'impact des déchets radioactifs par leur volume, permettant de visualiser les capacités de stockage qu'ils vont mobiliser :

$$\text{RADIOACTIVE WASTE} = V_{rw}$$

Avec  $V_{rw}$  : le volume de déchets radioactifs générés sur le cycle de vie du système étudié.

Un tel indicateur constitue évidemment une modélisation simpliste face à la complexité de la problématique des déchets radioactifs. Il existe en effet différents types de déchets nucléaires, caractérisés par leur activité radioactive et le temps de stockage nécessaire à la diminution des radiations en deçà d'un niveau où ils peuvent être banalisés, qui varie de 30 à 10000 ans.

Cependant, la prise en compte des quantités constitue un premier pas, en l'absence de véritable indicateur concernant l'exposition à des radiations. Elle permet d'éviter un transfert d'impact et notamment de ne pas négliger les impacts spécifiques de l'énergie nucléaire, ce à quoi conduiraient des analyses fondées sur des indicateurs comme le potentiel de changement climatique.

## 6.13 Odeurs

La notion d'odeur est une problématique locale complexe à étudier et à quantifier. Les modèles utilisés dans ces travaux sont basés sur la méthode des volumes critiques. Ils se basent sur des valeurs seuils pour les concentrations en substances. Sous des conditions standards, ces valeurs seuils représentent les concentrations pour lesquelles 50% d'un échantillon représentatif de la population peut distinguer la présence des substances olfactives dans un mélange d'air, par rapport à un air pur (Heijungs et al., 1992).

Le modèle est alors simplement basé sur la somme, sur les flux élémentaires, du rapport entre la quantité de substance et la valeur seuil d'odeur définie (OTV, odour threshold value). Les émissions dans l'air et dans l'eau sont différenciées :

$$\text{ODOUR AIR} = \sum_i \frac{m_{i,\text{air}}}{\text{OTV}_{i,\text{air}}}$$

$$\text{ODOUR WATER} = \sum_i \frac{m_{i,\text{water}}}{\text{OTV}_{i,\text{water}}}$$

Avec :

- $\text{OTV}_{i,\text{air}}$  : Seuil d'odeur dans l'air pour la substance  $i$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ;
- $m_{i,\text{air}}$  : Quantité de substance  $i$  émise dans l'air [ $\text{kg}$ ] ;
- $\text{OTV}_{i,\text{water}}$  : Seuil d'odeur dans l'eau pour la substance  $i$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] ;
- $m_{i,\text{water}}$  : Quantité de substance  $i$  émise dans l'eau [ $\text{kg}$ ] ;

# Annexe B

## Hypothèses de coûts économiques

Cette annexe présente les principales hypothèses retenues pour les coûts économiques des procédés associés aux matériaux et composants de bâtiments considérés, ainsi que pour l'évolution des coûts des différentes énergies dans le temps.

### 7.1 Production et mise en œuvre des composants

Les principales hypothèses économiques sur les coûts de production et de mise en œuvre des composants (matériaux, systèmes) considérés figurent dans le tableau ci-dessous :

Composant	Prix [€]	Par unité	Source
Bitume	2,1	kg	SOPREMA
Gravier concassé	25,8	tonne	Etudes de prix
Béton	42,7	tonne	Etudes de prix
Mortier	47,0	tonne	Etudes de prix
Carrelage céramique	6,9	kg	CASTORAMA
Laine minérale	43,0	kg	POUGET CONSULTANTS
Plaque de plâtre de type BA13	872	tonne	Etudes de prix
Enduit	0,4	kg	CASTORAMA
Fenêtre simple vitrage PVC	150	m <sup>2</sup>	POUGET CONSULTANTS
Polystyrène extrudé (XPS)	15,7	kg	Etudes de prix
Polyuréthane	22,8	kg	Etudes de prix
Fenêtre double vitrage be bois	350	m <sup>2</sup>	POUGET CONSULTANTS
Fenêtre triple vitrage be bois	475	m <sup>2</sup>	ENERTECH
Système solaire thermique	1000	m <sup>2</sup>	ENERTECH
VMC simple flux hygro-B	5,84	m <sup>2</sup> (SHAB)	FBE CIBLE
VMC double flux	34,1	m <sup>2</sup> (SHAB)	ENERTECH
Chaudière gaz naturel à condensation	*	kW	Etudes de prix

**Tableau 48. Hypothèses de couts de production et mise en œuvre des composants du bâtiment**

NB. be = Basse émissivité

\* Le prix des chaudières gaz naturel à condensation est déterminé en fonction de la puissance nominale de l'équipement suivant la relation suivante :

$$\text{Prix} = 63.P_{\text{NOMINALE}} + 1965$$

## 7.2 Traitement en fin de vie des composants

Les principales hypothèses économiques sur les coûts de traitement en fin de vie des composants (matériaux, systèmes) considérés figurent dans le tableau ci-dessous :

Composant	Prix [€]	Par unité	Source
Mise en décharge (déchet inerte)	66,9	tonne	ADEME
Incinération fenêtre simple vitrage PVC	10	m <sup>2</sup>	ADEME
Incinération fenêtre double vitrage bois	10	m <sup>2</sup>	ADEME
Incinération fenêtre triple vitrage bois	10	m <sup>2</sup>	ADEME

Tableau 49. Hypothèses de coûts de traitement en fin de vie des composants du bâtiment

## 7.3 Evolution des coûts de l'énergie

L'usage des bâtiments est responsable de consommations énergétiques sur plusieurs dizaines d'années. Il semble donc indispensable d'intégrer un scénario d'évolution du coût des énergies dans le temps.

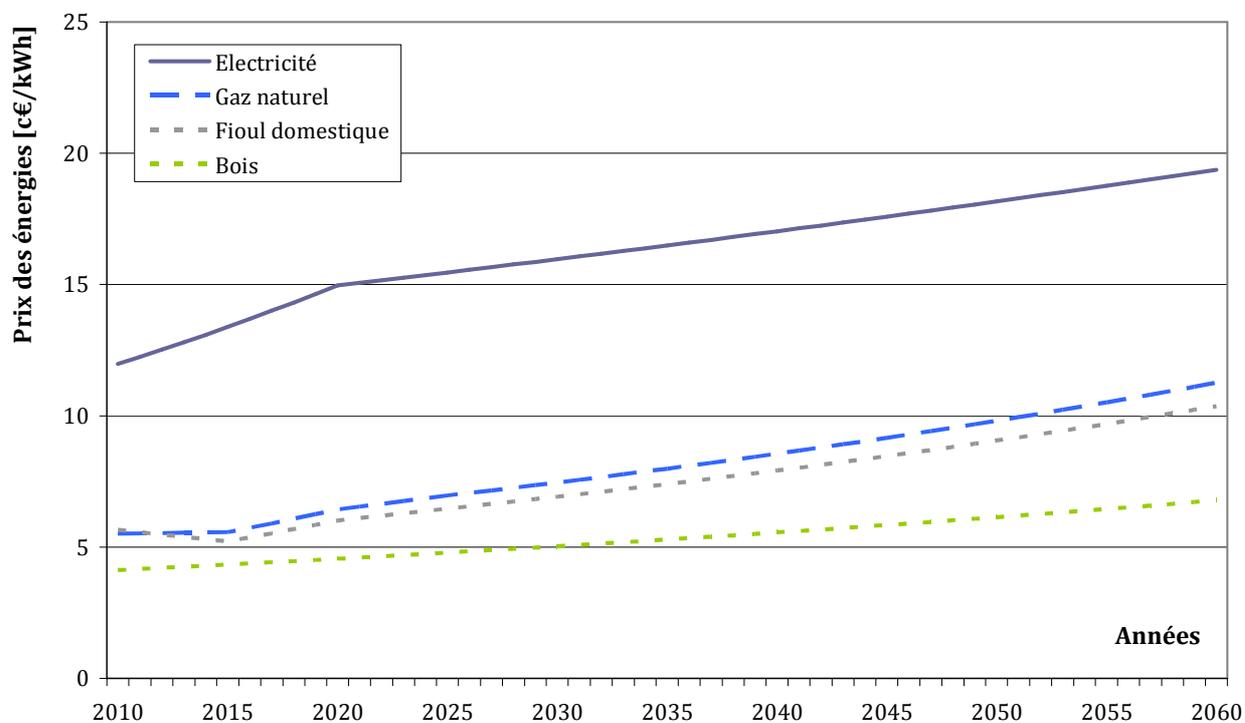


Figure 190. Scénarios d'évolution du prix des énergies sur la période 2010-2060

Ce scénario a été établi à partir de données prospectives fournies par le CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement). En France, ces projections sont celles utilisées par la DGEC (Direction Générale de l'Energie et du Climat, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie), en 2010, pour la période 2010-2030.

La méthodologie de projections consiste à calculer un taux de croissance annuel moyen par période, à partir des estimations disponibles sur une période donnée et à prolonger ces projections selon les mêmes taux de croissance.

Pour l'électricité, le taux de croissance annuel moyen sur la période 2010-2030 est calculé à partir des données d'Enerdata ; les chiffres sont alors prolongés sur 2030-2060 en conservant le taux de croissance annuel moyen de la période 2020-2030.

Pour le gaz et le fioul, les projections de l'AIE sur l'évolution du prix de production du gaz et du pétrole pour le fioul permettent d'évaluer le taux de croissance annuel moyen sur la période 2025-2030 que l'on utilise pour prolonger les projections sur 2030-2060.

# Annexe C

## Limites de la pondération

Cette annexe a pour objectif d'illustrer certaines des limitations de la méthode de pondération visant à transformer un problème multicritère en problème monocritère, par agrégation des fonctions objectifs. Cette transformation n'est pas neutre sur la nature des solutions qui peuvent alors être identifiées.

### 8.1 Présentation de l'étude de cas

Nous nous proposons d'illustrer ces limitations sur l'étude d'un exemple simplifié fictif. Nous comparons ici différentes stratégies de réhabilitation (C1, C2, C3 et C4) de bâtiment, dont les performances ont été évaluées sur deux objectifs à minimiser (O1 et O2) et sont rappelées dans le Tableau 50. Ces solutions sont représentées graphiquement sur la figure ci-dessous.

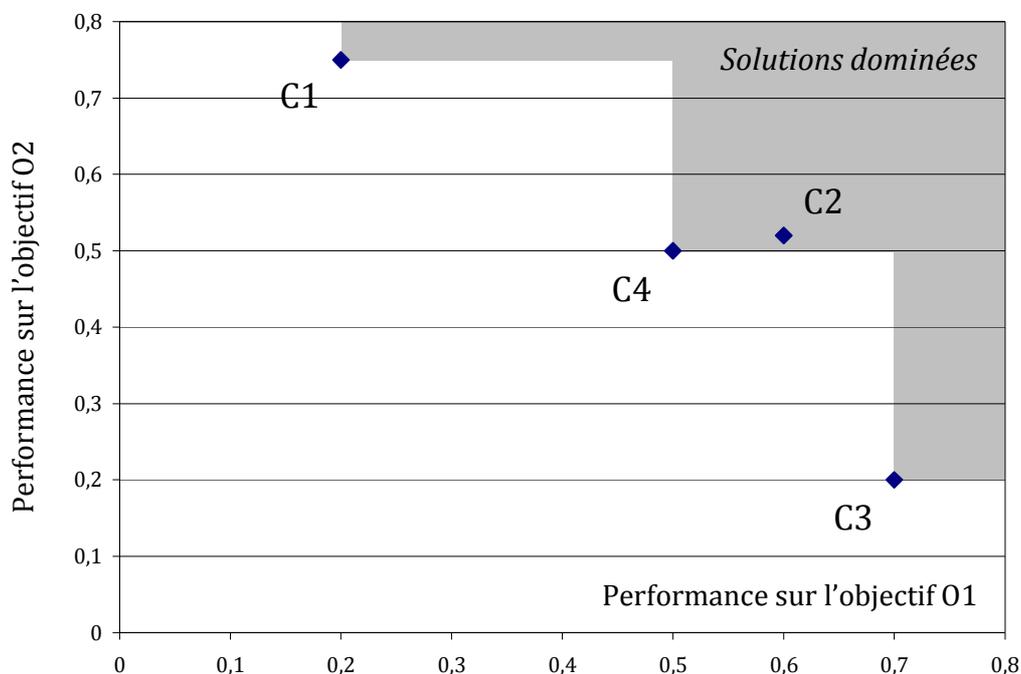


Figure 191. Représentation des solutions et relation de dominance de Pareto

Stratégies de réhabilitation				
Objectifs	C1	C2	C3	C4
O1	0,20	0,60	0,70	0,50
O2	0,75	0,52	0,20	0,50

Tableau 50. Performances des solutions C1 à C4 sur les objectifs O1 et O2

Par application de la relation de dominance de Pareto, il apparaît que la solution C2 est dominée par la solution C4, au sens de Pareto ; les performances de C2 étant supérieures à celle de C4 sur les deux critères du problème de minimisation. Cette remarque est évidente par simple lecture graphique. Les solutions C1, C3 et C4 sont non-dominées et appartiennent donc au front de Pareto du problème.

## 8.2 Pondération et solutions efficaces

Toute solution obtenue par optimisation monocritère à partir d'une méthode de pondération est nécessairement efficace (non dominée au sens de Pareto).

### Démonstration

En reprenant le formalisme de la partie 1.6.2.1,

$$\begin{array}{l}
 \text{Minimiser} \quad f_{\Sigma}(x) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot f_i(x) \\
 \text{tel que} \quad \forall j \in [1..M], g_j(x) \leq 0 \\
 \text{avec} \quad x \in X, f(x) \in \mathfrak{R}^N, g(x) \in \mathfrak{R}^M
 \end{array}$$

Par l'absurde, on suppose que  $x$  une solution optimale non efficace du problème.

Il existe alors nécessairement une solution  $x'$  qui la domine ( $x$  est une solution dominée).

Par définition,

$$\begin{cases}
 \forall i \in [1..N], 0 \leq f_i(x') \leq f_i(x) \\
 \exists j \in [1..N], 0 \leq f_j(x') < f_j(x)
 \end{cases}$$

Donc

$$f(x') = \sum_{i=1}^N w_i \cdot f_i(x') < \sum_{i=1}^N w_i \cdot f_i(x) = f(x)$$

Or,  $x$  est solution du problème de minimisation, donc :

$$f(x') \geq f(x)$$

Il y a nécessairement contradiction,  $x$  est nécessairement une solution efficace.

Cette remarque est importante car elle garantit que les solutions identifiées via la pondération appartiennent au front de Pareto du problème.

### 8.3 Sensibilité des solutions au choix des pondérations

Sur ce problème à deux critères, on se propose d'étudier la sensibilité des solutions au choix des coefficients de pondération.

On suppose que les pondérations sont normalisées. On a alors :

$$w_2 = 1 - w_1$$

On a :

$$\begin{cases} f(C1) = 0,20.w_1 + 0,75.w_2 \\ f(C3) = 0,70.w_1 + 0,20.w_2 \\ f(C4) = 0,50.w_1 + 0,50.w_2 \end{cases}$$

On en déduit que :

$$\begin{cases} f(C1) = 0,75 - 0,55.w_1 \\ f(C3) = 0,20 + 0,50.w_1 \\ f(C4) = 0,50 \end{cases}$$

Représentons alors graphiquement la valeur de ces solutions en fonction du premier coefficient de pondération.

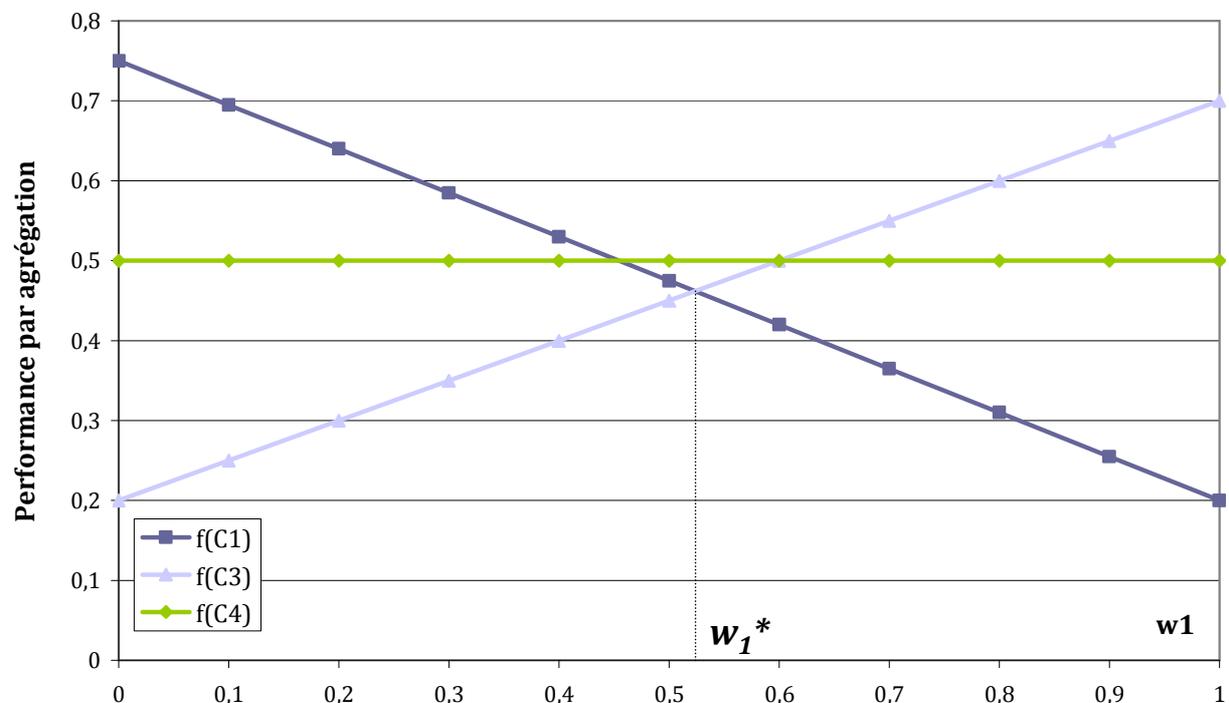


Figure 192. Sensibilité des solutions au choix des coefficients de pondération ( $w_1$ )

Au sens de la somme pondérée, il apparaît que la solution optimale est :

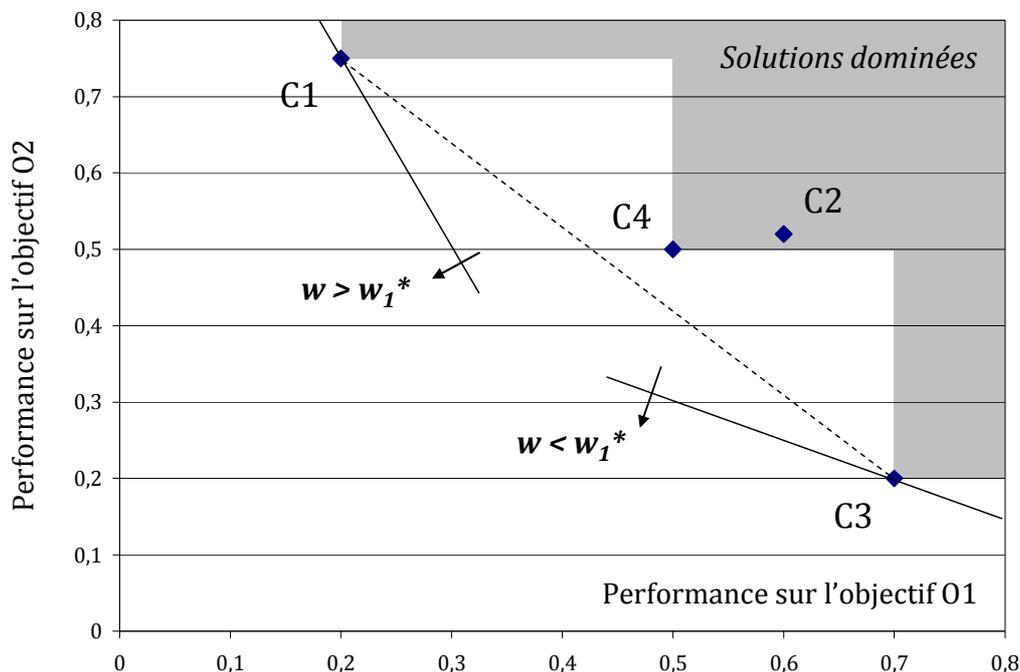
- La solution C3, pour des valeurs de  $w_1$  appartenant à l'intervalle  $[0 ; w_1^*]$  ;
- La solution C1, pour des valeurs de  $w_1$  appartenant à l'intervalle  $[w_1^* ; 1]$  ;
- La solution C4 ne réalise jamais l'optimum.

Avec  $w_1^* \approx 0,524$

Ainsi, de très légères variations des coefficients de pondération peuvent conduire à des solutions radicalement différentes. Autour de  $w_1^*$ , la solution optimale bascule de C1 sur C3. Ces deux solutions sont pourtant très différentes en termes de performances : C1 minimise l'objectif 1, C3 minimise l'objectif 2.

Par ailleurs, notons que, du point de vue du décideur, les jeux de coefficients de pondération  $(0,52 ; 0,48)$  ou  $(0,53 ; 0,47)$  pour le couple  $(w_1 ; w_2)$  sont vraisemblablement équivalents. Pourtant, ils impliquent des décisions très différentes.

Le choix et l'interprétation des coefficients de pondération est non-intuitive. Ne privilégier aucun des critères de décision pourraient conduire à proposer naturellement le jeu de pondérations suivant :  $(0,5 ; 0,5)$ . L'intuition pourrait conduire à considérer la solution C4, équilibrée par ses performances sur les deux critères  $(0,50 ; 0,50)$ , comme optimale. Pourtant, dans ce cas, l'optimum est la solution C3.



**Figure 193. Solutions non dominées et convexité du front de Pareto**

Par ailleurs, bien que la solution C4 soit non-dominée, aucun des jeux de facteurs de pondération ne la fait apparaître comme solution optimale. C4 est une solution non supportée par la combinaison linéaire convexe des points C1 et C3 (Figure 193).

Suivant les caractéristiques de convexité du front de Pareto et la nature du problème d'optimisation (minimisation ou maximisation), certaines solutions efficaces peuvent ne pas être obtenues comme solutions optimales d'une somme pondérée. Elles peuvent pourtant être parmi les plus intéressantes !

## 8.4 Conclusion

En conclusion, on retiendra notamment que bien que la pondération soit extrêmement simple à mettre en œuvre, elle présente plusieurs limitations importantes :

- La pondération impose une logique totalement compensatoire.
- L'interprétation des coefficients de pondération est complexe. Si les critères de décision ne sont pas exprimés sur la même échelle, ni dans la même unité, les coefficients de pondération représentent alors simultanément un taux de substitution (entre les critères, logique compensatoire) et un facteur d'échelle.
- Il est difficile de choisir a priori les coefficients de pondération. Cette remarque est d'autant plus importante que, du point de vue de la décision, de faibles variations des pondérations, apparemment non significatives, peuvent pourtant conduire à des solutions très différentes.
- Suivant la convexité et le type de problème d'optimisation, certaines des solutions non dominées ne peuvent être identifiées par pondération.

# Annexe D

## Classement en fronts de Pareto

Cette annexe a pour objectif de présenter quelques unes des techniques de programmation permettant de classer un ensemble de solutions en fronts de Pareto successifs. En particulier, l'algorithme de Kung et al. (1975) a été implémenté pour servir la sélection pour remplacement de l'algorithme génétique NSGA II.

La détermination d'un front de Pareto au sein d'un ensemble de solutions est une question récurrente du point de vue algorithmique. Différentes procédures sont exposées dans la littérature (Deb, 2001). Les suivantes sont caractérisées par des performances très inégales.

### Procédure « naïve et lente »

Chacune des solutions est comparée à l'ensemble des solutions considérées, dans l'espace des objectifs. La complexité de cet algorithme est en  $O(N.n^2)$ , où  $n$  et  $N$  sont les nombres de solutions et d'objectifs, respectivement.

### Procédure « de mise à jour continue »

Une liste des solutions non dominées est actualisée continuellement. Chaque solution non exploitée de l'ensemble des solutions est comparée uniquement avec l'ensemble des solutions de la liste de non-domination courante. La complexité de cet algorithme est en  $O(N.n^2)$  également. Cependant, il nécessite moitié moins de comparaisons que la « méthode naïve et lente ».

### Algorithme de Kung et al. (1975)

La méthode proposée par Kung est certainement la moins intuitive mais aussi la plus efficace des trois. Elle s'effectue en 2 étapes :

- L'ensemble des solutions est trié par ordre décroissant de performance sur le 1er objectif. Cet ensemble trié constitue une population d'individu notée :

$P$

Soient  $T, B$  deux sous ensembles de la population  $P$ .

- Récursivement, et suivant le principe « diviser pour mieux régner », on applique une procédure notée :

$Front(P) : P \rightarrow M$

si  $\text{Card}(P)=1$  alors  $M = P$

si  $\text{Card}(P) \neq 1$  alors 
$$\left\{ \begin{array}{l} T = \text{Front}\left(\left\{P^{(1)}, \dots, P^{(\text{Card}(P)/2)}\right\}\right) \\ B = \text{Front}\left(\left\{P^{(\text{Card}(P)/2+1)}, \dots, P^{(\text{Card}(P))}\right\}\right) \end{array} \right.$$

Si la  $i^{\text{ème}}$  solution non dominée de B est non dominée par l'ensemble des solutions non dominées de T, alors :

$$M = T \cup \{i\}$$

La complexité de l'algorithme est de  $\mathbf{O(n(\log(n))^{N-2})}$ .

La procédure d'identification du front non-dominé implémentée dans ces travaux de thèse est celle de Kung et al.

# Annexe E

## Inputs du logiciel d'optimisation

Cette annexe présente les données d'entrée nécessaires au logiciel développé pour l'optimisation multicritère des stratégies de réhabilitation énergétique séquentielle.

A l'échelle bâtiment, ou à celle du parc, les approches d'optimisation multicritère ont implémentées en langage Delphi, directement dans le cœur de calcul de simulation thermique dynamique COMFIE, et couplées au modèle de cycle de vie présenté au chapitre 1 pour l'évaluation des performances des solutions.

Nous ne revenons pas ici sur les fichiers .PLP créés sous PLEIADES pour modéliser les bâtiments étudiés, à l'état initial, et évidemment nécessaires à la conduite de l'optimisation.

### 10.1 Eventails de réhabilitation

Voici ci-dessous le format du fichier texte (.txt) renseignant les variables de décision dans le cadre de l'étude de cas MSS.

```
// Le nom du fichier texte explicite le type de bâtiment auquel l'éventail de mesures de réhabilitation
s'applique.
// Nom du fichier texte pour le type de bâtiment "BatTypei" : EventailRehabilitation_BatTypei.txt
=====
// Mesure de réhabilitation sur : Composition Groupe de parois 1 (ex. Façade NORD)
// Composition de paroi à remplacer
Composition Façade NORD
// Inclinaison paroi (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)
90
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ;
NORD 180° ou -180°)
-180, -135.0001
135.0001, 180
// Possibilité isolation thermique ITE
TRUE
// Possibilité isolation thermique ITI
FALSE
// Nom du matériau d'isolation thermique ITE
Laine de verre
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITE : liste d'épaisseurs en cm
10, 15, 20
// Nom du matériau d'isolation thermique ITI
Laine de verre
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITI : liste d'épaisseurs en cm
```

0  
// Matériaux et épaisseurs : coté extérieur ITE, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Enduit extérieur, 2  
// Matériaux et épaisseurs : entre ITE et ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Béton lourd, 15  
// Matériaux et épaisseurs : coté intérieur ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Lame d'air 0.9 à 1.1 cm, -1, Placoplatre BA 13, -1

---

---

// Mesure de réhabilitation sur : Composition Groupe de parois 2 (ex. Façade EST)  
// Composition de paroi à remplacer  
Composition Façade EST  
// Inclinaison paroi (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)  
90  
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ;  
NORD 180° ou -180°)  
-135.0001, -90  
-90, -44.9999  
// Possibilité isolation thermique ITE  
TRUE  
// Possibilité isolation thermique ITI  
FALSE  
// Nom du matériau d'isolation thermique ITE  
Laine de verre  
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITE : liste d'épaisseurs en cm  
10, 15, 20  
// Nom du matériau d'isolation thermique ITI  
Laine de verre  
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITI : liste d'épaisseurs en cm  
0  
// Matériaux et épaisseurs : coté extérieur ITE, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Enduit extérieur, 2  
// Matériaux et épaisseurs : entre ITE et ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Béton lourd, 15  
// Matériaux et épaisseurs : coté intérieur ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Lame d'air 0.9 à 1.1 cm, -1, Placoplatre BA 13, -1

---

---

// Mesure de réhabilitation sur : Composition Groupe de parois 3 (ex. Façade SUD)  
// Composition de paroi à remplacer  
Composition Façade SUD  
// Inclinaison paroi (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)  
90  
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ;  
NORD 180° ou -180°)  
-44.9999, 0  
0, 44.9999  
// Possibilité isolation thermique ITE  
TRUE  
// Possibilité isolation thermique ITI  
FALSE  
// Nom du matériau d'isolation thermique ITE

Laine de verre  
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITE : liste d'épaisseurs en cm  
10, 15, 20  
// Nom du matériau d'isolation thermique ITI  
Laine de verre  
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITI : liste d'épaisseurs en cm  
0  
// Matériaux et épaisseurs : coté extérieur ITE, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Enduit extérieur, 2  
// Matériaux et épaisseurs : entre ITE et ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Béton lourd, 15  
// Matériaux et épaisseurs : coté intérieur ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Lame d'air 0.9 à 1.1 cm, -1, Placoplatre BA 13, -1

=====  
// Mesure de réhabilitation sur : Composition Groupe de parois 4 (ex. Façade OUEST)  
// Composition de paroi à remplacer  
Composition Façade OUEST  
// Inclinaison paroi (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)  
90  
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ;  
NORD 180° ou -180°)  
44.999, 90  
90, 135.0001  
// Possibilité isolation thermique ITE  
TRUE  
// Possibilité isolation thermique ITI  
FALSE  
// Nom du matériau d'isolation thermique ITE  
Laine de verre  
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITE : liste d'épaisseurs en cm  
10, 15, 20  
// Nom du matériau d'isolation thermique ITI  
Laine de verre  
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITI : liste d'épaisseurs en cm  
0  
// Matériaux et épaisseurs : coté extérieur ITE, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Enduit extérieur, 2  
// Matériaux et épaisseurs : entre ITE et ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Béton lourd, 15  
// Matériaux et épaisseurs : coté intérieur ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)  
Lame d'air 0.9 à 1.1 cm, -1, Placoplatre BA 13, -1

=====  
// Mesure de réhabilitation sur : Composition Groupe de parois 5 (ex. Plancher HAUT)  
// Composition de paroi à remplacer  
Composition Plancher HAUT  
// Inclinaison paroi (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)  
0  
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ;  
NORD 180° ou -180°)  
0

```

0
// Possibilité isolation thermique ITE
TRUE
// Possibilité isolation thermique ITI
FALSE
// Nom du matériau d'isolation thermique ITE
Polyuréthane
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITE : liste d'épaisseurs en cm
15, 20, 30
// Nom du matériau d'isolation thermique ITI
Polyuréthane
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITI : liste d'épaisseurs en cm
0
// Matériaux et épaisseurs : coté extérieur ITE, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)
Calcaire ferme, 3, Bitume pur, 0.4
// Matériaux et épaisseurs : entre ITE et ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)
Béton lourd, 15
// Matériaux et épaisseurs : coté intérieur ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)
Placoplatre BA 13, -1
=====

// Mesure de réhabilitation sur : Composition Groupe de parois 5 (ex. Plancher BAS)
// Composition de paroi à remplacer
Composition Plancher BAS
// Inclinaison paroi (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)
180
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ;
NORD 180° ou -180°)
0
0
// Possibilité isolation thermique ITE
TRUE
// Possibilité isolation thermique ITI
FALSE
// Nom du matériau d'isolation thermique ITE
Polystyrène extrudé
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITE : liste d'épaisseurs en cm
10, 15, 20
// Nom du matériau d'isolation thermique ITI
Polystyrène extrudé
// Variantes de réhabilitation sur l'isolation thermique ITI : liste d'épaisseurs en cm
0
// Matériaux et épaisseurs : coté extérieur ITE, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)

// Matériaux et épaisseurs : entre ITE et ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)
Béton lourd, 15
// Matériaux et épaisseurs : coté intérieur ITI, de l'extérieur vers l'intérieur (NomMateriau ou NonElement, EpaisseurMateriau ou 0 "-1" si élément) (Epaisseurs en cm)
Mortier, 5, Carrelage, 1
=====

```

STOP VARIANTES COMPOSITION PAROIS

// Mesure de réhabilitation sur : Groupe d'ouvertures 1 (ex : Ouvertures NORD)  
// Type d'ouverture FENETRE à remplacer  
Fenetre NORD  
Porte Fenetre NORD  
// Inclinaison de la surface vitrée par rapport à l'horizontale (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)  
90  
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ; NORD 180° ou -180°)  
-180, -135.0001  
135.0001, 180  
// Variantes de types d'ouvertures pour les FENETRES  
BBC-Double-vitrage peu émissif argon, Passif-Triple vitrage peu émissif argon  
// Correspondance automatique pour les PORTE FENETRES  
BBC-Double-vitrage peu émissif argon, Passif-Triple vitrage peu émissif argon  
// Variantes de surfaces de vitrage : (x100%, facteur multiplicatif sur la taille des vitrages par rapport à la configuration de référence)  
0.8, 1, 1.5  
=====

=====

// Mesure de réhabilitation sur : Groupe d'ouvertures 1 (ex : Ouvertures EST)  
// Type d'ouverture FENETRE à remplacer  
Fenetre EST  
Porte Fenetre EST  
// Inclinaison de la surface vitrée par rapport à l'horizontale (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)  
90  
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ; NORD 180° ou -180°)  
-135.0001, -90  
-90, -44.9999  
// Variantes de types d'ouvertures pour les FENETRES  
BBC-Double-vitrage peu émissif argon, Passif-Triple vitrage peu émissif argon  
// Correspondance automatique pour les PORTE FENETRES  
BBC-Double-vitrage peu émissif argon, Passif-Triple vitrage peu émissif argon  
// Variantes de surfaces de vitrage : (x100%, facteur multiplicatif sur la taille des vitrages par rapport à la configuration de référence)  
0.8, 1, 1.25, 1.5  
=====

=====

// Mesure de réhabilitation sur : Groupe d'ouvertures 1 (ex : Ouvertures SUD)  
// Type d'ouverture FENETRE à remplacer  
Fenetre SUD  
Porte Fenetre SUD  
// Inclinaison de la surface vitrée par rapport à l'horizontale (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90 si surplomb)  
90  
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ; NORD 180° ou -180°)  
-44.9999, 0  
0, 44.9999  
// Variantes de types d'ouvertures pour les FENETRES  
BBC-Double-vitrage peu émissif argon, Passif-Triple vitrage peu émissif argon  
// Correspondance automatique pour les PORTE FENETRES  
BBC-Double-vitrage peu émissif argon, Passif-Triple vitrage peu émissif argon  
// Variantes de surfaces de vitrage : (x100%, facteur multiplicatif sur la taille des vitrages par rapport à la configuration de référence)  
0.8, 1, 1.25, 1.5

```
=====
// Mesure de réhabilitation sur : Groupe d'ouvertures 1 (ex : Ouvertures OUEST)
// Type d'ouverture FENETRE à remplacer
Fenetre OUEST
Porte Fenetre OUEST
// Inclinaison de la surface vitrée par rapport à l'horizontale (en degrés, 0=horizontal ; 90=vertical ; >90
si surplomb)
90
// Orientations des parois sur lesquelles la mesure s'applique (Plein SUD 0° ; EST -90° ; OUEST 90° ;
NORD 180° ou -180°)
44.9999, 90
90, 135.0001
// Variantes de types d'ouvertures pour les FENETRES
BBC-Double-vitrage peu émissif argon, Passif-Triple vitrage peu émissif argon
// Correspondance automatique pour les PORTE FENETRES
BBC-Double-vitrage peu émissif argon, Passif-Triple vitrage peu émissif argon
// Variantes de surfaces de vitrage : (x100%, facteur multiplicatif sur la taille des vitrages par rapport à la
configuration de référence)
0.8, 1, 1.25, 1.5
=====
```

#### STOP VARIANTES OUVERTURES

```
=====
// Ventilation : ETAT INITIAL
// TYPE_VENTIL, DEBIT_VENTIL (vol/h, debit equivalent)
```

Simple\_flux, 0.6,

```
// Ventilation : VARIANTES REHABILITATION
// TYPE_VENTIL, DEBIT_VENTIL (vol/h, debit equivalent)
```

Hygro\_B, 0.5,  
Double\_flux, 0.3,  
STOP VARIANTES

#### STOP VARIANTES VENTILATION

```
=====
// Chauffage : ETAT INITIAL
// TYPE_EQUIPEMENT, TYPE_ENERGIE, ANCIENNETE, P_NOMINALE [kW], PERTES_A_VIDE
[kW], ETA_30% [0;1], ETA_100% [0;1]
```

Chaudiere, fioul\_domestique, sup\_10\_ans, 70, 3, 0.65, 0.8,

```
// Chauffage : ETAT INITIAL
// TYPE_EQUIPEMENT, TYPE_ENERGIE, ANCIENNETE, P_NOMINALE [kW], PERTES_A_VIDE
[kW], ETA_30% [0;1], ETA_100% [0;1]
```

Chaudiere\_a\_condensation, gaz\_naturel, inf\_10\_ans, 70, 1, 0.95, 0.9,  
STOP VARIANTES

#### STOP VARIANTES CHAUFFAGE

```
=====
// Production eau chaude sanitaire : ETAT INITIAL
// % Couverture solaire [0;1], Surface panneaux [m2]
```

0, 0,

// Production eau chaude sanitaire : VARIANTES  
// % Couverture solaire [0;1], Surface panneaux [m2]

0.3620, 28.64,  
0.5448, 42.96,  
0.7240, 57.28,  
STOP VARIANTES

=====

STOP VARIANTES PRODUCTION ECS

=====

FIN ACQUISITION EVENTAIL

## 10.2 Paramétrage de l'algorithme génétique NSGA II

Ci-dessous, les paramètres de l'optimisation génétique :

// REHAPARCS : Constantes ALGORITHME GENETIQUE

```
ACTIVE_AG = TRUE;
Echelle_BATIMENT = TRUE;
Echelle_PARC = FALSE;
ACTIVE_AG_contraintes = FALSE;
NB_bits_alleles_MAX = 6; (*Codage de 64 allèles différents *)
NB_mesures_reha_MAX = 25; (* NB gènes du chromosome composition *)
NB_mesures_reha_MAX_PARC = NB_mesures_reha_MAX * MAX_TYPES_BAT;
```

{Taille des populations}

```
TAILLE_population = 200; (* WARNING : PAIR *)
TAILLE_reproduction = 200;
```

{Génération - Critère d'arrêt}

```
MAX_generation = 100;
```

{Probabilités de croisement et de mutations}

```
ACTIVE_operateurs_EVOLUTIONNAIRES = FALSE;
ACTIVE_operateurs_GENETIQUES = TRUE;
```

```
PROBA_croisement_compo_EVOLUTIONNAIRE = 80;
PROBA_croisement_compo_GENETIQUE = 80;
PROBA_croisement_ordre = 80;
PROBA_mutation_EVOLUTIONNAIRE = 1;
PROBA_mutation_GENETIQUE = 1;
PROBA_mutation_ordre = 1;
```

# Table des figures

<i>Figure 1. Disponibilité en années des réserves mondiales prouvées pour différents minéraux (sous un scénario de croissance nulle de la demande) (USGS, 2007 ; Fraunhofer ISI, 2009) .....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 2. Réductions cumulées sur la période 2000-2030 (gauche) et 2000-2100 (droite), pour différentes mesures de maîtrise des émissions de GES (GIEC, 2007).....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 3. Répartition des logements collectifs en fonction des dates de construction (Pouget, 2011).....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 4. Exemple de réhabilitation à haute performance énergétique « Das Nurnberger 3-Liter Haus » Jean Paul Platz 4 (Schulze Darup, 2005).....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 5. Représentation des espaces de décision et des objectifs correspondant, pour un problème à 3 paramètres et deux fonctions objectifs. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figure 6. Position de l'isolant (ITE et ITI) et incidence sur les ponts thermiques.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 7. Illustration de quelques techniques de mise en œuvre de l'isolation thermique par l'extérieur (ITE) sur les façades (adapté de Sauvageon (2008)).....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 8. Illustrations fenêtres performantes, Pose d'une menuiserie double vitrage en attente de l'isolation par l'extérieur (gauche), Fenêtre double vitrage à menuiserie mixte bois-aluminium (centre, source Bieber), Fenêtre triple vitrage à menuiserie bois (droite, source Bieber).....</i>	<i>37</i>
<i>Figure 9. Ventilation double flux en logement collectif.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 10. Illustration d'un système de chauffe-eau solaire à appoint intégré (COSTIC, 2007).....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 11. Approche adaptative du confort thermique et représentation des mécanismes (De Dear et al., 1997; Pernodet, 2010).....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 12. Méthodologie d'analyse de cycle de vie en 4 étapes (NF ISO 14040-44, 2006).....</i>	<i>55</i>
<i>Figure 13. Modèle LCA LCC, sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment réhabilité.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 14. Illustration d'une façade multicouche (Exemple de mur type IV - DTU 23.1).....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 15. Barre Grimaud, vue de la façade Sud.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 16. Barre Grimaud, saisie de la géométrie du 1er étage sous Alcyone.....</i>	<i>70</i>
<i>Figure 17. Barre Grimaud, illustration 3D des zones thermiquement homogènes .....</i>	<i>70</i>
<i>Figure 18. Evolution du rendement de la chaudière fioul existante en fonction du taux de charge.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 19. Evolution du rendement sur PCS de la chaudière gaz en fonction du taux de charge.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 20. Influence de la mise en œuvre d'une isolation thermique sur les façades (ITE 200mm) en fonction de la configuration courante du bâtiment.....</i>	<i>83</i>
<i>Figure 21. Illustration de la relation de dominance de Pareto (Problème de minimisation) .....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 22. Front de Pareto et solutions dominées sur un problème de minimisation à deux objectifs.....</i>	<i>86</i>
<i>Figure 23. Point idéal et point Nadir sur une minimisation à deux objectifs.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 24. Processus d'aide à la décision basés sur des simulations itératives.....</i>	<i>88</i>
<i>Figure 25. Construction d'une fonction de valeur (extrait de von Winterfeldt et Edwards (1986)).....</i>	<i>91</i>
<i>Figure 26. Classification des méthodes d'optimisation multicritère (adapté de Collette et al., 2003 ; Talbi, 2001).....</i>	<i>102</i>

<i>Figure 27. Illustration de la représentation des solutions pour les algorithmes génétiques ou évolutionnaires .....</i>	<i>117</i>
<i>Figure 28. Principe d'un algorithme génétique (extrait de Dréo et al., 2003) .....</i>	<i>118</i>
<i>Figure 29. Représentation du périmètre de l'hypercube (en dimension 2), pour quelques solutions non-dominées d'un problème de minimisation à deux objectifs.....</i>	<i>122</i>
<i>Figure 30. Deux objectifs pour la recherche de solutions multicritère (exemple d'un problème de minimisation à deux objectifs) .....</i>	<i>124</i>
<i>Figure 31. Représentation du génotype d'un programme de réhabilitation énergétique séquentielle....</i>	<i>130</i>
<i>Figure 32. Croisement évolutionnaire sur le chromosome composition .....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 33. Croisement génétique sur un gène donné (gène X) du chromosome composition .....</i>	<i>133</i>
<i>Figure 34. Exemple de permutations non-admissibles par un croisement à 1 point de coupure.....</i>	<i>133</i>
<i>Figure 35. Croisement de Davis sur le chromosome 1 et construction de l'enfant E1 .....</i>	<i>134</i>
<i>Figure 36. Mutation évolutionnaire sur le chromosome composition.....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 37. Mutation génétique sur un gène du chromosome composition .....</i>	<i>136</i>
<i>Figure 38. Mutation sur le chromosome ordre .....</i>	<i>137</i>
<i>Figure 39. Evolution générationnelle des performances optimale et moyenne pour chaque objectif.....</i>	<i>141</i>
<i>Figure 40. Evolution générationnelle de l'optimum en consommation cumulée d'énergie primaire, sur les individus de la génération courante.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure 41. Evolution générationnelle de la moyenne en consommation cumulée d'énergie primaire, sur les individus de la génération courante.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure 42. Evolution générationnelle de l'optimum en coût global sur le cycle de vie, sur les individus de la génération courante.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure 43. Evolution générationnelle de la moyenne en coût global sur le cycle de vie, sur les individus de la génération courante.....</i>	<i>143</i>
<i>Figure 44. Evolution générationnelle de l'optimum en coût d'investissement, sur les individus de la génération courante.....</i>	<i>143</i>
<i>Figure 45. Evolution générationnelle de la moyenne en coût d'investissement, sur les individus de la génération courante.....</i>	<i>143</i>
<i>Figure 46. Progression des fronts de solutions non-dominées sur les générations d'individus, exemple du compromis entre coûts d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire .....</i>	<i>144</i>
<i>Figure 47. Evolution du front de Pareto sur différentes génération.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 48. Fronts de Pareto entre le coût d'investissement et la consommation cumulée d'énergie primaire .....</i>	<i>149</i>
<i>Figure 49. Fronts de Pareto entre le coût global et la consommation cumulée d'énergie primaire .....</i>	<i>150</i>
<i>Figure 50. Fronts de Pareto entre la consommation cumulée d'énergie primaire et le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques.....</i>	<i>150</i>
<i>Figure 51. Fronts de Pareto entre la consommation cumulée d'énergie primaire et l'inconfort thermique adaptatif en été.....</i>	<i>150</i>
<i>Figure 52. Isolation des façades et compromis investissement/énergie.....</i>	<i>152</i>
<i>Figure 53. Isolation des façades et compromis énergie/coût global.....</i>	<i>152</i>
<i>Figure 54. Isolation des façades et compromis énergie/ressources.....</i>	<i>152</i>
<i>Figure 55. Isolation des façades et compromis investissement/acidification .....</i>	<i>153</i>
<i>Figure 56. Isolation des façades et compromis énergie/confort thermique.....</i>	<i>153</i>
<i>Figure 57. Types de fenêtres et compromis investissement/énergie.....</i>	<i>154</i>

<i>Figure 58. Types de fenêtres et compromis énergie/coût global .....</i>	<i>154</i>
<i>Figure 59. Types de fenêtres et compromis énergie/ressources .....</i>	<i>154</i>
<i>Figure 60. Système de ventilation et compromis investissement/énergie .....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 61. Système de ventilation et compromis énergie/coût global.....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 62. Système de ventilation et compromis énergie/ressources.....</i>	<i>155</i>
<i>Figure 63. Fraction solaire de production de l'ECS et compromis investissement/énergie .....</i>	<i>156</i>
<i>Figure 64. Fraction solaire de production de l'ECS et compromis énergie/coût global.....</i>	<i>156</i>
<i>Figure 65. Fraction solaire de production de l'ECS et compromis énergie/ressources.....</i>	<i>156</i>
<i>Figure 66. Impacts relatifs des différentes phases du cycle de vie et intervalles de variation.....</i>	<i>159</i>
<i>Figure 67. Phase de remplacement du chauffage et compromis ressources/changement climatique .....</i>	<i>160</i>
<i>Figure 68. Phase de remplacement du chauffage et compromis énergie/acidification .....</i>	<i>160</i>
<i>Figure 69. Phase de remplacement du chauffage et compromis acidification/confort thermique.....</i>	<i>160</i>
<i>Figure 70. Evolution temporelle cumulée des consommations cumulées d'énergie primaire.....</i>	<i>162</i>
<i>Figure 71. Evolution temporelle cumulée du potentiel de changement climatique à 100 ans.....</i>	<i>162</i>
<i>Figure 72. Evolution temporelle cumulée du potentiel d'acidification .....</i>	<i>162</i>
<i>Figure 73. Evolution temporelle cumulée du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques.....</i>	<i>163</i>
<i>Figure 74. Evolution temporelle cumulée des coûts d'investissement .....</i>	<i>163</i>
<i>Figure 75. Evolution temporelle du coût global sur la poursuite du cycle de vie.....</i>	<i>163</i>
<i>Figure 76. Evolution générationnelle de l'optimum en consommation cumulée d'énergie primaire, sur les individus de la génération courante, pour les 3 optimisations conduites.....</i>	<i>165</i>
<i>Figure 77. Evolution générationnelle de la moyenne en consommation cumulée d'énergie primaire, sur les individus de la génération courante, pour les 3 optimisations conduites.....</i>	<i>166</i>
<i>Figure 78. Evolution générationnelle de l'optimum en coût d'investissement, sur les individus de la génération courante, pour les 3 optimisations conduites.....</i>	<i>166</i>
<i>Figure 79. Evolution générationnelle de la moyenne en coût d'investissement, sur les individus de la génération courante, pour les 3 optimisations conduites.....</i>	<i>166</i>
<i>Figure 80. Evolution sur les générations d'individus des performances optimale et moyenne, pour chaque objectif, pour 3 optimisations différentes (simulation 1, 2 et 3).....</i>	<i>167</i>
<i>Figure 81. Comparaison des fronts de Pareto obtenus à la génération 100 pour les 3 simulations. ....</i>	<i>168</i>
<i>Figure 82. Représentation d'un graphe séquentiel.....</i>	<i>175</i>
<i>Figure 83. Recherche de plus court chemin sur un graphe séquentiel, à partir du théorème de Bellman .....</i>	<i>180</i>
<i>Figure 84. Graphe séquentiel multicritère (étudié en exemple).....</i>	<i>181</i>
<i>Figure 85. Recherche de plus court chemin sur un graphe séquentiel, à partir du théorème de Bellman, en MULTICRITERE .....</i>	<i>182</i>
<i>Figure 86. Graphe séquentiel pour la réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments.....</i>	<i>186</i>
<i>Figure 87. Comparaison des fronts de Pareto pour le compromis entre investissement et énergie .....</i>	<i>190</i>
<i>Figure 88. Comparaison des fronts de Pareto pour le compromis entre énergie et coût global.....</i>	<i>190</i>
<i>Figure 89. Comparaison des fronts de Pareto pour le compromis entre investissement et coût global .</i>	<i>191</i>
<i>Figure 90. Comparaison des fronts pour le compromis entre ressources et changement climatique.....</i>	<i>191</i>
<i>Figure 91. Comparaison des fronts pour le compromis entre énergie et confort thermique .....</i>	<i>191</i>
<i>Figure 92. Comparaison des fronts de Pareto approché par algorithme génétique (génération 100) ou exact par programmation dynamique .....</i>	<i>192</i>

<i>Figure 93. Comparaison des fronts de Pareto approché par algorithme glouton ou exact par programmation dynamique.....</i>	<i>197</i>
<i>Figure 94. Algorithme glouton et solutions exactes, compromis ressources/changement climatique ....</i>	<i>198</i>
<i>Figure 95. Algorithme glouton et solutions exactes, compromis investissement énergie .....</i>	<i>198</i>
<i>Figure 96. Algorithme glouton et solutions exactes, compromis énergie/coût global.....</i>	<i>198</i>
<i>Figure 97. Algorithme glouton et solutions exactes, compromis énergie/confort thermique .....</i>	<i>199</i>
<i>Figure 98. Comparaison des performances cumulées dans le temps d'une solution de l'algorithme glouton et de la solution exacte de la programmation dynamique correspondant à l'optimum en coût global.....</i>	<i>201</i>
<i>Figure 99. Scénario de l'inaction face au compromis ressources/changement climatique.....</i>	<i>203</i>
<i>Figure 100. Scénario de l'inaction face au compromis investissement/énergie.....</i>	<i>204</i>
<i>Figure 101. Scénario de l'inaction face au compromis énergie/coût global .....</i>	<i>204</i>
<i>Figure 102. Scénario de l'inaction face au compromis énergie/inconfort thermique adaptatif.....</i>	<i>204</i>
<i>Figure 103. Compromis ressources / changement climatique et consigne de chauffage .....</i>	<i>207</i>
<i>Figure 104. Compromis investissement / énergie et consigne de chauffage.....</i>	<i>207</i>
<i>Figure 105. Compromis énergie / coût global et consigne de chauffage .....</i>	<i>207</i>
<i>Figure 106. Compromis énergie / confort thermique en été et consigne de chauffage.....</i>	<i>208</i>
<i>Figure 107. Influence d'une augmentation de la consigne de chauffage, sur une solution optimale à 19°C.....</i>	<i>210</i>
<i>Figure 108. Températures de consigne et compromis entre ressources et changement climatique.....</i>	<i>212</i>
<i>Figure 109. Températures de consigne et compromis entre investissement et énergie .....</i>	<i>212</i>
<i>Figure 110. Températures de consigne et compromis entre énergie et coût global.....</i>	<i>212</i>
<i>Figure 111. Solutions, variantes de réhabilitation des FACADES et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global.....</i>	<i>214</i>
<i>Figure 112. Solutions, variantes de réhabilitation de la TOITURE et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global.....</i>	<i>215</i>
<i>Figure 113. Solutions variantes de réhabilitation du PLANCHER BAS et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global.....</i>	<i>216</i>
<i>Figure 114. Solutions, variantes de réhabilitation des FENETRES et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global.....</i>	<i>217</i>
<i>Figure 115. Solutions, variantes de réhabilitation de VENTILATION et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global.....</i>	<i>218</i>
<i>Figure 116. Solutions, variantes de réhabilitation sur l'ECS et températures de consigne, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global.....</i>	<i>219</i>
<i>Figure 117. Scénarios d'évolution du prix du gaz et de l'électricité, sur la période 2010-2060 .....</i>	<i>220</i>
<i>Figure 118. Scénarios d'évolution du prix des énergies et surfaces de compromis entre coût global, consommation cumulée d'énergie primaire et coût d'investissement .....</i>	<i>222</i>
<i>Figure 119: Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur les FACADES et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global.....</i>	<i>224</i>
<i>Figure 120. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur la TOITURE et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global.....</i>	<i>224</i>
<i>Figure 121. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur le PLANCHER BAS et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global .....</i>	<i>225</i>

<i>Figure 122. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur les FENETRES et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global.....</i>	<i>225</i>
<i>Figure 123. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur les systèmes de VENTILATION et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global .....</i>	<i>226</i>
<i>Figure 124. Solutions efficaces, variantes de réhabilitation sur la fraction solaire (FS) de PRODUCTION D'ECS et scénarios d'évolution des prix de l'énergie, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global .....</i>	<i>226</i>
<i>Figure 125. Représentation des fronts de Pareto, suivant les scénarios de remplacement des équipements, sur la poursuite du cycle de vie du bâtiment .....</i>	<i>230</i>
<i>Figure 126. Scénarios de maintenance et compromis ressources / changement climatique .....</i>	<i>231</i>
<i>Figure 127. Scénarios de maintenance et compromis investissement / énergie.....</i>	<i>231</i>
<i>Figure 128. Scénarios de maintenance et compromis énergie / coût global .....</i>	<i>231</i>
<i>Figure 129. Scénarios de maintenance et compromis énergie / inconfort thermique.....</i>	<i>232</i>
<i>Figure 130. Comparaison des performances cumulées dans le temps de deux solutions efficaces du scénario « DVC diff. » : <math>B_{DV}</math> (optimum en coût global de DVC diff.), <math>B_{50&gt;DV}</math> (programme de réhabilitation optimum en coût global du scénario DVC 50) .....</i>	<i>237</i>
<i>Figure 131. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les FACADES, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie....</i>	<i>238</i>
<i>Figure 132. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la TOITURE, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie....</i>	<i>239</i>
<i>Figure 133. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur le PLANCHER BAS, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie....</i>	<i>240</i>
<i>Figure 134. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les OUVERTURES, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie....</i>	<i>241</i>
<i>Figure 135. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la VENTILATION, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie....</i>	<i>242</i>
<i>Figure 136. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la PRODUCTION D'ECS, compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire, coût d'investissement et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>243</i>
<i>Figure 137. Représentation de la loi d'évolution sur le nombre d'individus non-admissibles, conservés au maximum au sein de la population courante .....</i>	<i>265</i>
<i>Figure 138. Ensemble des solutions admissibles non-dominées de la génération 200.....</i>	<i>268</i>
<i>Figure 139. Ensembles des solutions non-dominées admissibles ou non-admissibles, sur différentes générations (2,5,10,20,50,100), compromis entre épuisement des ressources et changement climatique .....</i>	<i>270</i>
<i>Figure 140. Ensembles des solutions non-dominées admissibles ou non-admissibles, sur différentes générations (2,5,10,20,50,100), compromis entre investissement et consommation d'énergie primaire</i>	<i>270</i>
<i>Figure 141. Ensembles des solutions non-dominées admissibles ou non-admissibles, sur différentes générations (2,5,10,20,50,100), compromis entre consommation d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>271</i>
<i>Figure 142. Ensembles des solutions non-dominées admissibles ou non-admissibles, sur différentes générations (2,5,10,20,50,100), compromis entre consommation d'énergie primaire et inconfort thermique adaptatif en été.....</i>	<i>271</i>
<i>Figure 143. Solutions particulières et front admissible efficace à la génération 200 Compromis entre épuisement des ressources et potentiel de changement climatique .....</i>	<i>274</i>
<i>Figure 144. Solutions particulières et front admissible efficace à la génération 200 Compromis entre investissement et consommation cumulée d'énergie primaire .....</i>	<i>275</i>

<i>Figure 145. Solutions particulières et front admissible efficace à la génération 200</i>	
<i>Compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>275</i>
<i>Figure 146. Solutions particulières et front admissible efficace à la génération 200</i>	
<i>Compromis entre consommation d'énergie primaire et inconfort thermique adaptatif en été.....</i>	<i>275</i>
<i>Figure 147. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les FACADES</i>	
<i>Compromis entre coût d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire.....</i>	<i>277</i>
<i>Figure 148. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les FACADES</i>	
<i>Compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>277</i>
<i>Figure 149. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur le PLANCHER BAS</i>	
<i>Compromis entre coût d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire.....</i>	<i>278</i>
<i>Figure 150. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur le PLANCHER BAS</i>	
<i>Compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>278</i>
<i>Figure 151. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les OUVERTURES</i>	
<i>Compromis entre coût d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire.....</i>	<i>279</i>
<i>Figure 152. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur les OUVERTURES</i>	
<i>Compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>279</i>
<i>Figure 153. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la VENTILATION</i>	
<i>Compromis entre coût d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire.....</i>	<i>280</i>
<i>Figure 154. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la VENTILATION</i>	
<i>Compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>280</i>
<i>Figure 155. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la PRODUCTION D'ECS</i>	
<i>Compromis entre coût d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire.....</i>	<i>281</i>
<i>Figure 156. Solutions efficaces et variantes de réhabilitation sur la PRODUCTION D'ECS</i>	
<i>Compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>281</i>
<i>Figure 157. Solutions efficaces admissibles et nombre de phases de réhabilitation</i>	
<i>Compromis entre potentiel d'épuisement des ressources et potentiel de changement climatique.....</i>	<i>282</i>
<i>Figure 158. Solutions efficaces admissibles et nombre de phases de réhabilitation</i>	
<i>Compromis entre coût d'investissement et consommation cumulée d'énergie primaire.....</i>	<i>282</i>
<i>Figure 159. Solutions efficaces admissibles et nombre de phases de réhabilitation</i>	
<i>Compromis entre consommation cumulée d'énergie primaire et coût global sur le cycle de vie.....</i>	<i>283</i>
<i>Figure 160. Solutions efficaces admissibles et nombre de phases de réhabilitation</i>	
<i>Compromis entre consommation d'énergie primaire et inconfort thermique adaptatif en été.....</i>	<i>283</i>
<i>Figure 161. Montants d'investissement à chaque phase de réhabilitation pour les solutions efficaces</i>	
<i>admissibles (génération 200) comportant 3 PHASES de réhabilitation.....</i>	<i>285</i>
<i>Figure 162. Montants d'investissement à chaque phase de réhabilitation pour les solutions efficaces</i>	
<i>admissibles (génération 200) comportant 4 PHASES de réhabilitation.....</i>	<i>285</i>
<i>Figure 163. Montants d'investissement à chaque phase de réhabilitation pour les solutions efficaces</i>	
<i>admissibles (génération 200) comportant 5 PHASES de réhabilitation.....</i>	<i>285</i>
<i>Figure 164. Approches ascendantes et descendantes de modélisation énergétique des parcs</i>	
<i>de bâtiments (adapté de Kavgic et al., 2010).....</i>	<i>293</i>
<i>Figure 165. Représentation du génome des solutions : programmes de réhabilitation énergétique</i>	
<i>séquentielle, à l'échelle du parc de bâtiments.....</i>	<i>300</i>
<i>Figure 166. Croisement évolutionnaire à 1 point sur le génome COMPOSITION et génération de</i>	
<i>l'information génétique de deux individus enfants.....</i>	<i>305</i>
<i>Figure 167. Croisement de DAVIS sur le génome PHASAGE</i>	
<i>et génération de l'information génétique de deux individus enfants.....</i>	<i>306</i>
<i>Figure 168. Décomposition 3D du bâtiment "house" en zones thermiques homogènes.....</i>	<i>308</i>
<i>Figure 169. Plan du bâtiment "house".....</i>	<i>308</i>

<i>Figure 170. Décomposition 3D du bâtiment "dwelling" en zones thermiques homogènes .....</i>	<i>309</i>
<i>Figure 171. Plan des appartements au 1<sup>er</sup> étage du bâtiment "dwelling" .....</i>	<i>309</i>
<i>Figure 172. Evolution sur les générations des performances optimale et moyenne, pour chaque fonction objectif, sur les solutions de la population courante .....</i>	<i>311</i>
<i>Figure 173. Projection de l'ensemble des solutions non-dominées de la génération 100 sur les plans définis par les couples de critères.....</i>	<i>314</i>
<i>Figure 174. Solutions particulières et compromis entre le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques et le potentiel de changement climatique à 100 ans.....</i>	<i>316</i>
<i>Figure 175. Solutions particulières et compromis entre le coût d'investissement et la consommation cumulée d'énergie primaire .....</i>	<i>317</i>
<i>Figure 176. Solutions particulières et compromis entre la consommation cumulée d'énergie primaire et le coût global sur le cycle de vie .....</i>	<i>317</i>
<i>Figure 177. Solutions particulières et compromis entre la consommation cumulée d'énergie primaire et l'inconfort thermique adaptatif en été.....</i>	<i>317</i>
<i>Figure 178. Barre Grimaud et masques proches de la « Morphologie de grands ensembles » (Ombres portées le 31 décembre à 14h00).....</i>	<i>332</i>
<i>Figure 179. Barre Grimaud et masques proches de la « Morphologie de centre urbain ancien » (Ombres portées le 31 décembre à 14h00).....</i>	<i>332</i>
<i>Figure 180. Barre Grimaud et répartition des ouvertures suivant l'orientation Cas de référence (à gauche) et cas à orientation Nord (à droite).....</i>	<i>333</i>
<i>Figure 181. Représentation 3D de la barre Grimaud suivant la répartition des ouvertures Cas de référence (à gauche) et cas à orientation Nord (à droite) Les ombres portées sont représentées pour une journée quelconque à 12h00.....</i>	<i>333</i>
<i>Figure 182. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques » et « réduction du potentiel de changement climatique à 100 ans » .....</i>	<i>343</i>
<i>Figure 183. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation) » et « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » .....</i>	<i>344</i>
<i>Figure 184. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » et « réduction du coût global sur le cycle de vie » .....</i>	<i>345</i>
<i>Figure 185. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » et « inconfort thermique adaptatif en été ».....</i>	<i>346</i>
<i>Figure 186. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction du potentiel d'épuisement des ressources abiotiques » et « réduction du potentiel de changement climatique à 100 ans » (NICE exclu).....</i>	<i>347</i>
<i>Figure 187. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « coût d'investissement (cumulé sur les phases de réhabilitation) » et « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » (NICE exclu) .....</i>	<i>347</i>
<i>Figure 188. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » et « réduction du coût global sur le cycle de vie » (NICE exclu) .....</i>	<i>348</i>
<i>Figure 189. Configurations de la barre Grimaud et projections des fronts de Pareto sur le compromis entre « réduction de la consommation cumulée d'énergie primaire » et « inconfort thermique adaptatif en été » (NICE exclu).....</i>	<i>348</i>
<i>Figure 190. Scénarios d'évolution du prix des énergies sur la période 2010-2060 .....</i>	<i>389</i>
<i>Figure 191. Représentation des solutions et relation de dominance de Pareto .....</i>	<i>391</i>

<i>Figure 192. Sensibilité des solutions au choix des coefficients de pondération (<math>w_1</math>)</i> .....	393
<i>Figure 193. Solutions non dominées et convexité du front de Pareto</i> .....	394

# Liste des tableaux

<i>Tableau 1. Une classification des actions pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments, adaptée de (Kolokotsa et al, 2009) (Marszal et al, 2011) (Diakaki, 2008).</i>	33
<i>Tableau 2. Conductivité thermique de différents matériaux d'isolation (source : logiciel Pléiades).</i>	35
<i>Tableau 3. Débits de ventilation dans les logements en France (Arrêtés du 24 mars 1982 et du 28 octobre 1983).</i>	38
<i>Tableau 4. Indicateurs environnementaux (implémentés dans le logiciel EQUER).</i>	51
<i>Tableau 5. Indicateurs de performance économique</i>	53
<i>Tableau 6. Indicateur sur le confort thermique d'été de l'occupant.</i>	53
<i>Tableau 7. Nomenclature des variables du modèle de rendement à charge partielle</i>	63
<i>Tableau 8. Systèmes de ventilation et auxiliaires.</i>	66
<i>Tableau 9. Systèmes de chauffage et auxiliaires</i>	66
<i>Tableau 10. Production ECS et auxiliaires</i>	67
<i>Tableau 11. Barre Grimaud, détail de la composition des murs de façade</i>	71
<i>Tableau 12. Barre Grimaud, détail de la composition des murs intérieurs.</i>	72
<i>Tableau 13. Barre Grimaud, détail de la composition de la toiture terrasse</i>	72
<i>Tableau 14. Barre Grimaud, détail de la composition des planchers intermédiaires</i>	72
<i>Tableau 15. Barre Grimaud, détail de la composition du plancher bas, sur vide sanitaire</i>	72
<i>Tableau 16. Barre Grimaud, détail de la composition des ouvrants.</i>	73
<i>Tableau 17. Barre Grimaud, détail des ponts thermiques</i>	73
<i>Tableau 18. Barre Grimaud, rendements de la production d'ECS par les chauffe-bains gaz.</i>	75
<i>Tableau 19. Barre Grimaud, performances énergétiques avant réhabilitation</i>	76
<i>Tableau 20. Barre Grimaud, confort thermique avant réhabilitation</i>	76
<i>Tableau 21. Mesures élémentaires de réhabilitation pour la barre Grimaud (espace de recherche 1).</i>	77
<i>Tableau 22. Mesures élémentaires de réhabilitation pour la barre Grimaud (espace de recherche 2).</i>	78
<i>Tableau 23. Barre Grimaud, matériaux d'isolation</i>	78
<i>Tableau 24. Barre Grimaud, détail de la composition des ouvrants.</i>	79
<i>Tableau 25. Barre Grimaud, débit de ventilation contrôlée, suivant les systèmes de ventilation</i>	80
<i>Tableau 26. Détail des programmes de réhabilitation A, B et C</i>	147
<i>Tableau 27. Détail des programmes de réhabilitation B et B'</i>	161
<i>Tableau 28. Mesures élémentaires de réhabilitation pour la barre Grimaud (espace de recherche 2).</i>	189
<i>Tableau 29. Performances optimales et moyennes des ensembles de solutions non-dominées</i>	194
<i>Tableau 30. Détail des programmes de réhabilitation B et G</i>	199
<i>Tableau 31. Détails des programmes de réhabilitation A<sub>19</sub>, A<sub>22</sub>, A<sub>24</sub>, B<sub>19</sub>, B<sub>22</sub>, B<sub>24</sub>, C<sub>19</sub>, C<sub>22</sub>, C<sub>24</sub> en termes de variantes de mesures de réhabilitation et de phasage des travaux</i>	209
<i>Tableau 32. Détail des programmes de réhabilitation de types A, B et C</i>	223

Tableau 33. Durées de vie moyenne considérées pour les composants introduits en réhabilitation .....	228
Tableau 34. Détails des programmes de réhabilitation $A$ , $A_{DV}$ , $B$ , $B_{DV}$ , $B'_{DV}$ , $C$ , $C_{DV}$ en termes de variantes de mesures de réhabilitation et de phasage des travaux .....	234
Tableau 35. Détail des programmes de réhabilitation séquentiels sous contraintes $A$ , $B$ et $C$ .....	273
Tableau 36. Avantages et inconvénients des approches ascendantes et descendantes de modélisation énergétique des parcs de bâtiments (traduit de Kavgić et al., 2010).....	294
Tableau 37. Mesures et variantes de réhabilitation : Espace de recherche 2 .....	307
Tableau 38. Composition et phasage des programmes de réhabilitation $A$ , $B$ et $C$ .....	319
Tableau 39. Paramètres de caractérisation des typologies de bâtiments pour différents modèles de parcs basés sur la physique du bâtiment [1/2] .....	324
Tableau 40. Paramètres de caractérisation des typologies de bâtiments pour différents modèles de parcs basés sur la physique du bâtiment [2/2] .....	325
Tableau 41. Consommations énergétiques de chauffage, en fonction des périodes de construction, pour différents bâtiments collectifs résidentiels de la ville de Bâle [ $MJ/m^2.an$ ] (extrait de Wallbaum et Jakob, 2009). .....	326
Tableau 42. Dispositions et caractéristiques du bâti par typologie Exemple du type 3 post-haussmannien – Période 1 : 1850-1914 (extrait de Pouget, 2011). .....	327
Tableau 43. Configurations de bâtiments étudiées et différences par rapport à la barre Grimaud de référence.....	331
Tableau 44. Détail des programmes de réhabilitation $A_{Ref}$ , $A_{ON}$ , $A_{CU}$ , $A_{GE}$ , $A_{RP}$ , $A_N$ et $A_R$ en termes de variantes sur les combinaisons de mesures de réhabilitation et sur le phasage des interventions.....	336
Tableau 45. Détail des programmes de réhabilitation $B_{Ref}$ , $B_{ON}$ , $B_{CU}$ , $B_{GE}$ , $B_{RP}$ , $B_N$ et $B_R$ en termes de variantes sur les combinaisons de mesures de réhabilitation et sur le phasage des interventions.....	337
Tableau 46. Détail des programmes de réhabilitation $C_{Ref}$ , $C_{ON}$ , $C_{CU}$ , $C_{GE}$ , $C_{RP}$ , $C_N$ et $C_R$ en termes de variantes sur les combinaisons de mesures de réhabilitation et sur le phasage des interventions.....	338
Tableau 47. Indicateurs environnementaux (implémentés dans le logiciel EQUER) .....	375
Tableau 48. Hypothèses de coûts de production et mise en œuvre des composants du bâtiment .....	388
Tableau 49. Hypothèses de coûts de traitement en fin de vie des composants du bâtiment .....	389
Tableau 50. Performances des solutions C1 à C4 sur les objectifs O1 et O2.....	392