# THÈSE

**En vue de l'obtention du**

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

**Délivré par :**

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

**Discipline ou spécialité :**
Génie Industriel

---

**Présentée et soutenue par :**
**Jesús Manuel BARRAGAN FERRER**
Le lundi 15 juillet 2013

**Titre :**

Méthode de formulation et de résolution de problèmes d'écoconception inventive : application au Génie des Procédés

---

**École doctorale :**
Systèmes (EDSYS)

**Unité de recherche :**
Laboratoire de Génie Chimique, UMR 5503
Département Procédés et Systèmes Industriels

**Directeur(s) de Thèse :**
M. Jean-Marc LE LANN
M. Stéphane NEGNY

**Rapporteurs :**
M. Jean-Pierre NADEAU
M. Mauricio CAMARGO

**Autre(s) membre(s) du Jury**
M. Emmanuel CAILLAUD, Président du jury
Mme Céline BRYON-PORTET, Examinateur
M. Jean-Marc LE LANN, Examinateur
M. Stéphane NEGNY, Examinateur
M. Jean-Pierre NADEAU, Rapporteur
M. Mauricio CAMARGO, Rapporteur

# REMERCIEMENTS

Tout d'abord j'adresse mes remerciements aux différents organismes qui ont mis les moyens financiers pour l'aboutissement de cette thèse : à la DGEST, CONACYT, DGRI-SEP et au gouvernement des États- Unis Mexicaines.

Je remercie les Professeurs Jean-Pierre NADEAU et Mauricio CAMARGO PARDO pour m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse et pour la pertinence de leurs commentaires. Je remercie également les professeurs Emmanuel CAILLAUD et Céline BRYON-PORTET d'avoir participés en tant qu'examinateurs.

Je remercie le Professeur Jean Marc LE LANN, Directeur de l'ENSIACET d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse. J'exprime toute ma gratitude à mon co-directeur de thèse, Stéphane NEGNY, pour son encadrement et ses conseils pendant ces années de thèse. Je remercie également Guillermo CORTES ROBLES pour sa confiance, son soutien et ses conseils.

Je voudrais exprimer mes plus sincères remerciements à l'ensemble des doctorants et tout le personnel du Département de Génie industriel à l'ENSIACET et notamment à mes collègues : Ali, Antonio, Benoît, Fernando, Guillermo, Jose Luis, Juliette, Marco, Maria B., Marianne, Mayra, Moisés, Nayiri, Philipe, Raul, René, Sayed, Stéphane, Sofia, Weifen, Yvonne et You pour les bons moments passés pendant mon séjour en France. Je remercie également mes amis hors de l'ENSIACET : Alejandra, Claire, Daniela, Dennisse, Fernandita, Ileana, Jorge, Lety, Liz, Mika, Vedran et Veronica.

Un grand merci à mes collègues de bureau: Antony, El Awady ATALLA EL AWADY ATTIA, Eduardo, Ferenc, Guillaume, Jean-Stéphane et Lazlo pour avoir la patience de travailler à mes cotés.

Un gran agradecimiento a mi Madre y mi Padre que son mi ejemplo a seguir, a mi abuela Blandina (Q.E.P.D) que no pude despedirme de ella personalmente pero sus recuerdos perduran por siempre, a mis hermanos que siempre están a mi lado y a mi familia que me han apoyado a lo largo de todo este tiempo.

En fin, je voudrais remercie à Diana, mon épouse, et à sa famille pour tout son soutien.

# RESUME

**Titre :** Méthode de formulation et de résolution de problèmes d'écoconception inventive : application au Génie des Procédés

Actuellement, l'industrie chimique est confrontée au défi de la production durable qui exige une évolution depuis la réduction de polluants pour les procédés existants vers une écologie industrielle qui permet l'équilibre entre le développement économique, sociale et environnemental. Ajouté aux exigences actuelles pesant sur la conception des procédés, la prise en compte des contraintes environnementales dès la phase amont du processus de conception. Cette exigence clé couplée aux enjeux actuels pour la conception préliminaire ont conduit à des changements par rapport à la conception classique des procédés, il y a un accent accru sur la recherche d'innovation et d'éco-innovation pour développer des nouveaux concepts, de nouvelles technologies et de nouveaux procédés. La question centrale sur la façon d'améliorer la créativité dans la phase de conception préliminaire nécessite des recherches plus poussées sur les méthodologies d'aide à la génération de solutions innovante et éco-innovante.

Ainsi, dans le cadre de cette thèse, nous avons développé une méthodologie pour la formulation et la résolution de problèmes d'éco-innovation basée sur une approche à base de conflits. Ce cadre permet de traiter les exigences multi-objectifs et la nature combinatoire complexe de la phase de recherche de concepts de solutions. La méthodologie développée reflète la nature des problèmes à traiter avec de nombreuses contradictions (conflits) à résoudre simultanément. Dans ce contexte, les méthodes actuelles atteignent rapidement leurs limites car elles ne résolvent qu'un seul conflit à la fois. Or il devient très difficile (voire impossible) de faire émerger une contradiction unique des situations problématiques complexes telles que nous en rencontrons en génie des procédés.

La méthodologie proposée pour traiter la problématique de multi-contradictions pour l'écoconception se divise en deux étapes principales. D'un part, une première cadre d'analyse pour la formulation des contradictions en s'appuyant sur une version adaptée d'OTSM-TRIZ. Il permet la représentation graphique d'un problème et intégré une méthode pour limiter la situation aux contradictions principales. D'un autre part, la résolution des contradictions principales se décompose en deux sous étapes. Dans un premier temps, la résolution individuelle de chaque contradiction au travers d'un outil alliant la simplicité conceptuelle des contradictions de TRIZ et les solutions concrètes que proposent les effets et phénomènes de la physique, chimie, biologie. Dans un deuxième temps, nous proposons un processus d'agrégation des solutions afin d'obtenir une solution finale plus intégrée. Un cas d'étude sur la réduction des polluants en sortie d'étape de gazéification de la biomasse est présenté afin d'illustrée l'approche.

**MOTS CLES :** *Production durable, Eco-innovation, Ecoconception, TRIZ, OTSM, Résolution de plusieurs contradictions.*

# ABSTRACT

**Titre:** *A Method for the formulation and solution of eco-innovation design problems: the application to process engineering*

In recent years, the chemical industry is facing the challenge of sustainable production in order to create a balance between the economic, social and environmental development. This shift requires an evolution from the reduction of pollutants for existing processes to industrial ecology. In the design process, this shift demands that the current requirements and the environmental constraints should be taken into account in the early stages. At these stages, however, there is an increased emphasis on innovation and eco-innovation to develop new concepts, new technologies and new processes, thereby limiting the problem-solving ability of the traditional design methodologies. Hence, there is a great necessity for new methodologies in order to develop innovative and eco-innovative solutions.

Consequently, in this research, we developed a methodology for the formulation and solution of eco-innovation problems based on a conflict approach. This framework can handle multi-objective requirements with the combinatorial complexity of the search phase of solution concepts. Thus, the methodology considers the problem of solving many contradictions (conflicts) simultaneously. In this context, current approaches quickly reach their limits because they solve one conflict at a time or it is very difficult to define only one contradiction in complex problems, such as those in process engineering.

The proposed methodology for treating the problem of multi-contradictions for eco-design is divided into two main steps. On one hand, an analytical framework for the formulation of contradictions based on an adapted version of OTSM-TRIZ, which provides a graphical representation of a problem and integrated method to reduce the problem situation to the main contradictions. On the other hand, the resolution of contradictions which is itself divided into two sub-steps. At first, the resolution of each individual contradiction through a tool that combines conceptual simplicity of TRIZ contradictions and the practical solutions using the physics, chemical and biological effects and phenomena. In a second step, we propose an aggregation process solution to obtain a more integrated final solution. A case study about the reduction of pollutants at output stage gasification of biomass is presented to illustrate this approach.

.

**KEYWORDS :** *Sustainable production, Eco-innovation, Eco-design, TRIZ, OTSM, Contradictions.*

# TABLE DE MATIERES


**1 LA PRODUCTION DURABLE ET L'ECOCONCEPTION DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE ..... 1**

**1.1 Introduction ..... 2**

**1.2 La production durable ..... 3**

1.2.1 Lutte antipollution et traitement des pollutions ..... 4
1.2.2 Production moins polluante ..... 5
1.2.3 L'écoefficacité ..... 7
1.2.4 Cycle de vie vert ..... 8
1.2.5 La production en boucle fermée ..... 9
1.2.6 L'écologie industrielle ..... 10

**1.3 Évolution de la conception vers l'écoconception. ..... 11**

1.3.1 La conception en Génie des Procédés ..... 11
1.3.2 Rappels historiques sur l'écoconception ..... 14
1.3.3 Avantages de l'écoconception ..... 14
1.3.4 Typologie de l'écoconception ..... 15
1.3.5 Quelques outils d'écoconception ..... 18
1.3.6 Le processus d'éco conception dans les étapes préliminaires ..... 21
1.3.7 La problématique de l'écoconception dans les étapes préliminaires de la conception. ..... 22

**1.4 Conclusion ..... 22**

**2 DE L'INNOVATION A L'ECOINNOVATION POUR UNE PRODUCTION DURABLE ..... 25**

**2.1 Introduction ..... 26**

**2.2 L'innovation ..... 27**

2.2.1 Définition ..... 27
2.2.2 Processus d'innovation ..... 29
2.2.3 L'innovation en Génie des Procédés ..... 31
2.2.4 L'innovation basée sur les connaissances ..... 33
2.2.5 L'innovation assistée par ordinateur (L'IAO) le support pour l'innovation ... 35

**2.3 De l'innovation à l'écoinnovation ..... 37**

2.3.1 Définition ..... 37
2.3.2 Ecoinnovation en Produit-Procédés ..... 40
2.3.3 Méthodes et outils d'écoinnovation ..... 41

**2.4 Positionnement des travaux ..... 42**

**2.5 Conclusion ..... 43**

**3 DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE FORMULATION DE CONTRADICTIONS ..... 45**

**3.1 Introduction ..... 46**

**3.2 L'évolution de la théorie TRIZ ..... 46**

3.2.1 OTSM-TRIZ ..... 46
3.2.2 OTSM -TRIZ et la production durable ..... 52

**3.3 Formulation des contradictions ..... 54**

3.3.1 Etape 1 : Description de la problématique ..... 55
3.3.2 Etape 2 : Réseau de problèmes ..... 59
3.3.3 Le réseau des problèmes ..... 72
3.3.4 Définition des problèmes principaux ..... 73

**3.4 Etape 3 : Contradictions ..... 73**

3.4.1 Etape 3.1 et 3.2 : Réseau de contradictions et réseau de paramètres ..... 73

**3.5 Modélisation des ressources ..... 78**

**3.6 Conclusion ..... 81**

**4 METHODE DE RESOLUTION DES CONTRADICTIONS APPLICATION A L'ECOCONCEPTION ..... 83**

**4.1 Introduction ..... 84**

**4.2 Processus de résolution ..... 86**

4.2.1 Etape 1 : Modélisation et résolution des contradictions ..... 87
4.2.2 Etape 2 : Recherche de solutions spécifiques ..... 95
4.2.3 Etape 3 : Association de solutions spécifiques du réseau de solutions ..... 102
4.2.4 Etape 4 : Evaluation des solutions ..... 104
4.2.5 Solutions retenues ..... 116

**4.3 Conclusion ..... 117**

**5 APPLICATION DE LA DEMARCHE A LA GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE ..... 119**

**5.1 Présentation du cas d'etude ..... 120**

**5.2 Etape 1 : Description de la problématique ..... 124**

5.2.1 Etape 1.1 : Le modèle « TONGS » environnemental ..... 124
5.2.2 Etape 1.2 : Collecte d'information ..... 125

**5.3 Etape 2 : Réseau de problèmes ..... 128**

5.3.1 Etape 2.1 : Analyse de la situation problématique et Développement du réseau de problèmes ..... 128
5.3.2 Etape 2.2 : Définition des problèmes principaux ..... 137

**5.4 Etape 3 : Contradictions ..... 138**

5.4.1 Etape 3.1 : Développement du réseau de contradictions ..... 138
5.4.2 Etape 3.2 : Développement du réseau de paramètres spécifiques ..... 139
5.4.3 Etape 3.3 : Modélisation des ressources ..... 140

**5.5 Etape 4 : Modélisation et résolution des contradictions ..... 140**

5.5.1 Etape 4.1 : Utilisation des outils de TRIZ ..... 140
5.5.2 Etape 4.2 : Définition de l'action désirée ..... 145
5.5.3 Etape 4.3 : Définition de la fonction ..... 145

**5.6 Etape 5 : Recherche de solutions spécifiques ..... 145**

5.6.1 Etape 5.1 : Recherche des effets et phénomènes comme effet solution . 145
5.6.2 Etape 5.2 : Génération de solutions spécifiques ..... 146
5.6.3 Etape 5.3 : Réseau de solutions ..... 148

**5.7 Etape 6 : Association de solutions ..... 149**

5.7.1 Etape 6.1 : Association de solution du réseau de solutions ..... 149

**5.8 Etape 7: Evaluation de la solution ..... 151**

5.8.1 Etape 7.1 : Evaluation et analyse des solutions spécifiques ..... 151
5.8.2 Etape 7.2 : Amélioration de la solution spécifique ..... 154
5.8.3 Etape 7.3 et 7.4 : La solution retenue ..... 155

**5.9 Conclusion ..... 156**

**6 CONCLUSION ..... 157**

**7 BIBLIOGRAFIE ..... 165**

**ANNEXE 1 : LA THEORIE TRIZ ..... 177**

ANNEXE 2 : GUIDE DE SOLUTION AUX DIFFERENTS TYPES D'INTERACTION DANS UN PROBLEME INVENTIF ..... 211

ANNEXE 3 : PROGRAMMATION PAR CONTRAINTES ..... 229

# INDEX DES FIGURES


Figure 1.1 : Evolution de la production durable. ..... 4
Figure 1.2 : Lutte antipollution ..... 4
Figure 1.3 : La production moins polluante ..... 6
Figure 1.4 : Rapport entre valeur et environnement ..... 7
Figure 1.5 : Systèmes de gestion environnementale. ..... 8
Figure 1.6 : Analyse du cycle de vie vert ..... 9
Figure 1.7: Production en boucle fermée. ..... 9
Figure 1.8 : Représentation d'un parc éco-industriel ..... 10
Figure 1.9 : Le cycle de vie d'un procédé et d'un produit. ..... 12
Figure 1.10 : Processus de conception de Cooper. ..... 13
Figure 1.11 : Classification d'écoconception selon Charter. ..... 16
Figure 1.12 : Classification de l'écoconception de Brezet ..... 17
Figure 1.13: Relations entre les types d'écoconception et les étapes du processus de conception. ..... 18
Figure 2.1: Principe des 3P. ..... 26
Figure 2.2: Processus d'innovation selon. ..... 31
Figure 2.3: Etapes initiales de la démarche de conception ..... 31
Figure 2.4 : Le paradoxe de la conception ..... 35
Figure 2.5: Les différentes parties d'un IAO ..... 36
Figure 2.6: Axes de l'écoinnovation. ..... 39
Figure 2.7: Relation entre la production durable et les axes de l'écoinnovation. ..... 40
Figure 3.1 : Evolution de la théorie TRIZ ..... 47
Figure 3.2 : Les technologies du modèle fractal OTSM-TRIZ pour la résolution de problèmes complexes ..... 48
Figure 3.3 : Réseau de problèmes. ..... 49
Figure 3.4 : Réseau des contradictions. ..... 50
Figure 3.5 : Réseau des paramètres spécifiques ..... 51
Figure 3.6 : Processus de résolution. ..... 52
Figure 3.7 : Les actions de la production durable. ..... 52
Figure 3.8 : Le processus d'écoconception. ..... 53

Figure 3.9 : Etapes du processus de formulation de contradictions. ..... 55
Figure 3.10 : Le modèle « TONGS ». ..... 56
Figure 3.11 : Le modèle « TONGS » environnemental. ..... 57
Figure 3.12 : Description de la situation problématique. ..... 58
Figure 3.13 : Collecte d'information. ..... 59
Figure 3.14 : Les trois étapes de l'analyse de la situation problématique. ..... 60
Figure 3.15 : Exemple du modèle de la transition des états qualitatifs et le modèle d'action. ..... 60
Figure 3.16 : Représentation de l'état d'un système. ..... 61
Figure 3.17 : La transition entre états qualitatifs. ..... 62
Figure 3.18 : Transition Etat actuel - Etat désiré. ..... 63
Figure 3.19 : L'analyse de l'état actuel- état désiré et les stratégies de solution. ..... 63
Figure 3.20 : Transition Etat actuel - Etat non désiré. ..... 64
Figure 3.21 : Exemple d'un état non désiré. ..... 65
Figure 3.22 : Transition entre deux états désirés. ..... 65
Figure 3.23 : Stratégies pour les deux états désirés d'un couteau. ..... 66
Figure 3.24 : La fenêtre des états qualitatifs. ..... 66
Figure 3.25 : Modèle d'action. ..... 68
Figure 3.26 : Action utile manquante. ..... 68
Figure 3.27 : Exemple d'introduction d'une action utile manquante. ..... 68
Figure 3.28 : Action utile insatisfaisante. ..... 69
Figure 3.29 : Les stratégies à suivre dans l'extraction de charbon. ..... 70
Figure 3.30 : L'action néfaste et les stratégies à suivre. ..... 70
Figure 3.31 : Modélisation du transport des billes de métal. ..... 71
Figure 3.32 : L'action néfaste et les stratégies à suivre. ..... 71
Figure 3.33 : La fenêtre du modèle d'action. ..... 72
Figure 3.34 : Le réseau de problèmes et l'ensemble de la situation problématique. ..... 73
Figure 3.35 : identification d'un problème principal. ..... 73
Figure 3.36 : Le modèle EAV et la contradiction. ..... 75
Figure 3.37 : Les relations spatiales et temporelles entre les paramètres en conflit. ..... 75
Figure 3.38 : Réseau des contradictions. ..... 76
Figure 3.39 : Réseau des paramètres. ..... 76

Figure 3.40 : La formulation de la contradiction. ..... 77
Figure 3.41 : Représentation du réseau du paramètre. ..... 77
Figure 3.42 : Représentation de la solution du problème de bassin ..... 78
Figure 3.43 : Identification des ressources. ..... 79
Figure 3.44 : Cycle de vie de la publicité sous forme papier. ..... 80
Figure 3.45 : Analyse de la publicité en papier. ..... 80
Figure 3.46 : Sac poubelle comme support de publicité. ..... 81
Figure 4.1 : Plusieurs contradictions et plusieurs interprétations d'une contradiction. ..... 84
Figure 4.2 : Evolution des systèmes techniques. ..... 86
Figure 4.3 : Etapes du processus de résolution de contradictions. ..... 86
Figure 4.4 : Processus de résolution détaillé et les outils associés. ..... 87
Figure 4.5 : Etape 1 : Modélisation et résolution des contradictions. ..... 88
Figure 4.6 : Nouvelle matrice de résolution des contradictions techniques ..... 91
Figure 4.7 : Réseau de paramètres. ..... 91
Figure 4.8 : Contradiction technique générale. ..... 92
Figure 4.9 : Matrice de résolution des contradictions techniques. ..... 93
Figure 4.10 : Contradiction physique. ..... 93
Figure 4.11 : Représentation d'un effet physique et de ses fonctions associées. ..... 97
Figure 4.12 : Exemple de l'application d'une fonction. ..... 98
Figure 4.13 : Base d'effets et relation entre fonctions générales, effets et ressources. ..... 98
Figure 4.14 : Processus de recherche des effets solution. ..... 99
Figure 4.15 : Adaptation de la solution générale à la situation spécifique. ..... 100
Figure 4.16 : Eléments descriptifs d'une solution spécifique. ..... 100
Figure 4.17 : Différentes solutions spécifiques dans un réseau de solutions. ..... 101
Figure 4.18 : Réseau de ressources extrait du réseau de solutions. ..... 101
Figure 4.19 : Nouvelle recherche d'effets solution. ..... 102
Figure 4.20 : Comparaison entre deux solutions. ..... 103
Figure 4.21 : Utilisation de la PPC pour vérifier des éléments similaires. ..... 104
Figure 4.22 : Analyse et évaluation des solutions spécifiques. ..... 108
Figure 4.23 : Résultat de l'évaluation. ..... 108
Figure 4.24 : Critères à améliorer pour une solution spécifique. ..... 109
Figure 4.25 : Solutions potentielles à considérer ..... 109

Figure 4.26 : Evaluation et analyse des critères indispensables. ..... 110
Figure 4.27 : Evaluation et analyse des critères environnementaux. ..... 110
Figure 4.28 : Evaluation et analyse des objectifs et exigences. ..... 111
Figure 4.29 : Evaluation et analyse des ressources matérielles. ..... 111
Figure 4.30 : Evaluation et analyse des ressources énergétiques ..... 112
Figure 4.31 : Décomposition du problème. ..... 113
Figure 4.32 : Comparaison entre critères. ..... 113
Figure 4.33 : Détermination de l'importance des critères. ..... 114
Figure 4.34 : Importance de chaque critère comme facteur de pondération. ..... 114
Figure 4.35 : Evaluation des solutions spécifiques. ..... 115
Figure 4.36 : Modèle d'évaluation et sélection des solutions spécifiques. ..... 116
Figure 4.37 : Couplage de solutions retenues pour former une solution finale. ..... 117
Figure 5.1: Représentation schématique des mécanismes dans le procédé. ..... 121
Figure 5.2 : Gazéifieur à la vapeur à double lit fluidisé circulant interne. ..... 123
Figure 5.3: Modèle « TONGS » environnemental pour la gazéification. ..... 125
Figure 5.4 : Le procédé de gazéification de la biomasse. ..... 125
Figure 5.5 : Formation des goudrons. ..... 126
Figure 5.6 : Méthodes secondaires pour la purification des gaz. ..... 127
Figure 5.7 : Le réseau de problèmes. ..... 129
Figure 5.8 : Analyse de la branche sur la production du gaz de synthèse propre. .. 131
Figure 5.9 : Analyse de la génération de polluants. ..... 132
Figure 5.10 : Analyse des effets de l'augmentation de la température dans la chambre de gazéification. ..... 132
Figure 5.11 : Analyse des effets de l'augmentation de la température dans la chambre de combustion. ..... 133
Figure 5.12 : Analyse des conséquences du nettoyage du gaz de synthèse. ..... 133
Figure 5.13 : Analyse de l'utilisation d'un filtre à manches pour le nettoyage du gaz de synthèse. ..... 134
Figure 5.14 : Analyse de la fusion du filtre à manches. ..... 135
Figure 5.15 : Analyse sur les fines particules solides. ..... 136
Figure 5.16 : Analyse sur l'utilisation d'un dispositif thermique pour l'élimination des goudrons. ..... 136
Figure 5.17 : Analyse de l'éventualité d'ajouter un dispositif de lavage pour la purification du gaz de synthèse ..... 137

Figure 5.18 : Problèmes retenus pour développer le réseau des contradictions. ..... 137
Figure 5.19 : Réseau de contradictions du problème. ..... 139
Figure 5.20 : Réseau de paramètres du problème d'élimination des goudrons et cendres. ..... 139
Figure 5.21 : Contradictions techniques et principes associés ..... 141
Figure 5.22 : Formulation de la contradiction physique associée à l'élimination des cendres. ..... 142
Figure 5.23 : Formulation de la contradiction physique associée à l'élimination des goudrons. ..... 142
Figure 5.24 : Modèle pour l'élimination des cendres. ..... 143
Figure 5.25 : Modèle standard du problème. ..... 144
Figure 5.26 : Utilisation de membranes céramiques pour l'élimination des cendres. ..... 146
Figure 5.27 : La flottation pour l'élimination des cendres. ..... 147
Figure 5.28 : La séparation électrique pour l'élimination des cendres. ..... 147
Figure 5.29 : La séparation magnétique pour l'élimination des cendres. ..... 147
Figure 5.30 : Craquage thermique pour l'élimination des goudrons. ..... 148
Figure 5.31 : Craquage Catalytique pour l'élimination des goudrons. ..... 148
Figure 5.32 : Le réseau de solution. ..... 149
Figure 5.33 : Points de similitude entre les solutions. ..... 150
Figure 5.34 : Similitudes entre les solutions. ..... 150
Figure 5.35 : Nouveau système pour l'élimination des cendres et goudrons. ..... 151
Figure 5.36 : Evaluation des critères indispensables pour l'élimination des cendres. ..... 152
Figure 5.37 : Evaluation des critères indispensables pour l'élimination des goudrons. ..... 152
Figure 5.38 : Evaluation de critères environnementaux pour l'élimination des cendres. ..... 152
Figure 5.39 : Evaluation des critères environnementaux pour l'élimination des goudrons. ..... 153
Figure 5.40: Evaluation des objectifs et exigences pour l'élimination des cendres. ..... 153
Figure 5.41: Evaluation des objectifs et exigences pour l'élimination des goudrons. ..... 153

Figure 5.42: Evaluation des ressources pour l'élimination des cendres. ..... 154
Figure 5.43: Evaluation des ressources pour l'élimination des goudrons. ..... 154
Figure 5.44: Utilisation de serpentin. ..... 155
Figure 5.45: Amélioration du nouveau système pour l'élimination de cendres et goudrons. ..... 155
Figure 6.1 : Modèles et Connaissances de TRIZ ..... 161

# INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Actions pour une production moins polluante. ..... 5
Tableau 1.2 : Moyens de changements des actions pour une production moins polluante ..... 6
Tableau 3.1 : Les quatre types d'actions. ..... 67
Tableau 3.2 : l'identification des ressources. ..... 80
Tableau 4.1: Fonctions générales et spécifiques. ..... 90
Tableau 4.2 : Différents types d'énergie, substances et propriétés des substances. ..... 90
Tableau 4.3 : les 46 paramètres. ..... 92
Tableau 4.4 : Evaluation des critères indispensables. ..... 105
Tableau 4.5 : Critères environnementaux. ..... 105
Tableau 4.6 : Critères d'évaluation des objectifs et exigences du problème. ..... 106
Tableau 4.7 : Critères d'évaluation de ressources ..... 106
Tableau 5.1: Comparaisons des différentes configurations de réacteurs de gazéification. ..... 122
Tableau 5.2 : Recensement des ressources. ..... 140
Tableau 5.3 : Définition de l'action ou caractéristique désirée. ..... 145
Tableau 5.4 : Définition de la fonction désirée. ..... 145
Tableau 5.5 : Les effets solution pour l'élimination des cendres. ..... 146
Tableau 5.6 : Les effets solution pour l'élimination des goudrons. ..... 146

# GLOSSAIRE DE TERMES ET ACRONYMES UTILISES

ACV : Analyse de Cycle de Vie

CT : Contradiction technique

DCT : Operateurs Dimension-Temps-Coût

EAV : Elément - Attribut – Valeur

IAO : L'Innovation Assistée par Ordinateur

OTSM : Théorie générale de la pensée avancée

PPC : Programmation par contraintes

PSC : Problème de satisfaction de contraintes

QFDE : Déploiement des fonctions qualité pour l'environnement

RFP : Réseau de flux des problèmes

RIF : Résultat Idéal Final

SEPD : La solution environnementale la plus désirée

TRIZ : L'acronyme russe de Théorie de résolution de problèmes inventifs

# INTRODUCTION GENERALE

## Contexte de la Recherche

L'augmentation de la population mondiale associée au développement économique rapide des pays émergents rendent impossible l'extension de notre modèle industriel et de nos technologies : la consommation de matière première et les impacts environnementaux générés deviendront inacceptables. Ces deux derniers points engendrent des phénomènes importants : la montée des préoccupations environnementales et la recherche de modèles de croissance durable et écologiquement soutenables (à noter que les plans économique et sociétal ont également leur importance mais non abordés dans ce manuscrit).
L'industrie chimique et l'industrie des procédés doivent apporter leurs contributions à cette évolution en proposant des solutions pour rendre leur développement plus durable. Elles devront faire face à de nombreuses exigences : produire plus en consommant moins de ressources, produire plus propre, plus respectueux de l'environnement. C'est en intégrant ces contraintes et d'autres (raréfaction des ressources fossiles, des ressources en eau et plus largement de toutes les ressources, recours à une meilleure utilisation de l'énergie et à des énergies de substitution…) qui pèsent sur ces industries que l'on pourra répondre durablement aux besoins actuels sans compromettre ceux des générations futures. Ainsi, le génie des procèdes peut apporter des réponses grâce au développement de concepts, méthodologies et technologies pour relever un tel défi.

## Objectif des travaux de recherche

Dans ce contexte industriel sensible, l'écoinnovation est un levier pour passer d'une vision de la croissance verte en une réalité car elle est la clé du développement et du déploiement de technologies plus respectueuses de l'environnement et plus largement pour le développement durable. Une méthode et un outil d'aide à l'écoinnovation (prenant en considération à la fois les aspects technologiques et environnementaux) apporterait une première réponse pour faciliter, accélérer et améliorer la conception tant au niveau des opérations unitaires que du procédé dans son ensemble. A l'heure actuelle en génie des procédés, aucune approche traitant de cette problématique n'a été développée. Ainsi l'objectif principal de ce travail et de proposer une méthode est un outil d'aide à la résolution de problèmes inventifs en intégrant la dimension environnementale. C'est grâce à l'écoinnovation que l'on pourra par exemple réduire la dispersion de produits toxiques, augmenter la durabilité et la recyclabilité des matériaux, ou maximiser l'usage durable des ressources renouvelables.

Pour aborder l'ecoinnovation, il faut intégrer la dimension environnementale dès la phase de conception préliminaire et plus spécifiquement la phase de recherche de concepts pour favoriser la proposition de solution plus inventive réduisant considérablement les impacts environnementaux. En effet, les intégrer dans les étapes suivantes du processus de conception, aurait pour conséquence de remettre

en question des décisions prises et donc de générer des coûts supplémentaires et d'allonger cette phase de conception. De plus, il faut également intégrer une vision sur l'ensemble du cycle de vie et ne pas se limiter au périmètre du procédé de production.

## Positionnement des travaux

Ces travaux s'inscrivent dans la thématique liée à la conception innovante des procédés, réalisés dans le Département Procédés et Systèmes Industriels du Laboratoire de Génie Chimique. Une des finalités de ces recherches est de proposer une méthode et de créer un outil pour la conception innovante en génie des procédés. L'objectif actuel est de proposer un prototype de « Computer Aided Innovation » (CAI) ciblé sur l'étape de conception préliminaire et plus particulièrement sur les phases d'analyse et de résolution de problèmes, figure A.1. Dans un travail précédent, G. Cortes Robles a proposé un couplage entre une méthode de gestion des connaissances (Raisonnement à Partir de Cas) et des outils de la théorie TRIZ afin d'accélérer le processus de résolution de problème.

Ce travail de thèse s'intéresse plus particulièrement à l'intégration des aspects environnementaux pour aboutir à une démarche d'écoinnovation. La méthode proposée intègre également la phase d'analyse du problème non traitée précédemment. Dans notre approche, les étapes d'analyse et de résolution de problème s'appuient sur des outils de TRIZ adaptés et couplés à d'autres outils réalisés durant cette thèse, notamment pour la résolution de problèmes formulés à l'aide de plusieurs contradictions.

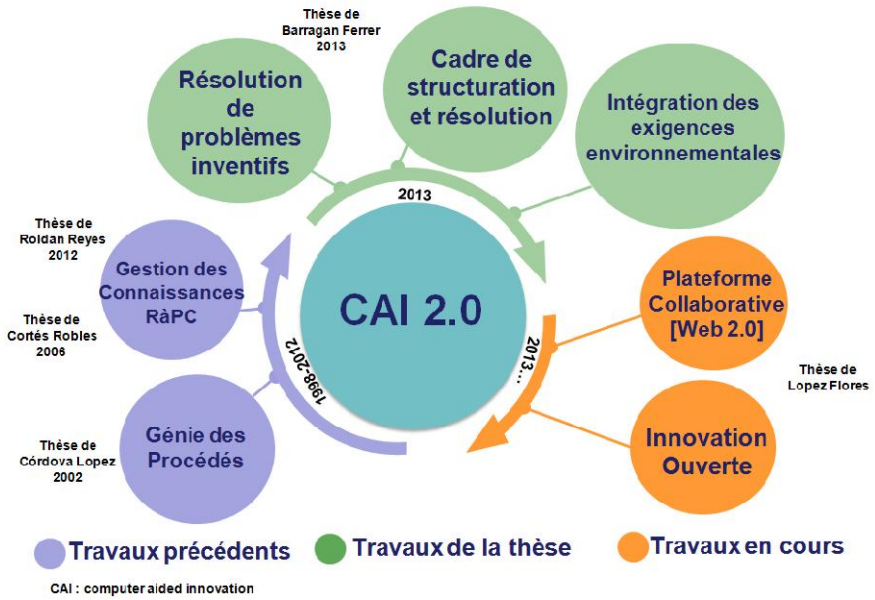



*Figure A.1: Positionnement de la thèse*

A noter que des travaux sont en cours de réalisation pour l'intégration de tous les résultats de ces recherches dans un outil qui traitera également des aspects collaboratifs et des problématiques liées à l'innovation ouverte (Thèse de López Flores).

## Organisation du manuscrit

La thèse s'articule autour de cinq chapitres. Les deux premiers chapitres permettent de situer les travaux de recherche dans le contexte actuel mais aussi par rapport aux méthodes et outils existants. Le premier chapitre se focalise sur la production durable et l'écoconception dans l'industrie chimique. Le second est plus particulièrement dédié à l'innovation et l'écoinnovation pour une production durable. Les chapitres 3 et 4 expliquent les fondements de l'approche proposée ainsi que les outils utilisés. Enfin, une étude de cas, présentée dans le chapitre 5, sur la réduction de polluants en sortie du procédé de gazéification de la biomasse permet de démontrer l'efficacité de l'approche proposée.

Le premier chapitre a pour objectif de donner un aperçu de la production durable dans l'industrie chimique et l'importance d'introduire les contraintes liées à cette production durable dans l'étape de conception préliminaire. Dans un premier temps, ce chapitre présente l'évolution de la mise en œuvre industrielle du concept de production durable allant de l'amélioration du traitement de la pollution en sortie de procédé jusqu'à l'écologie industrielle. Ce chapitre se poursuit en proposant une synthèse bibliographique sur les différents outils pour aborder l'écoconception. L'analyse de ces outils démontre leurs limites lorsqu'il s'agit de donner une dimension inventive à la solution recherchée d'une part, et pour certains leur inadaptabilité au génie des procédés d'autre part.

Après une présentation du processus d'innovation, le chapitre 2 s'intéresse à l'écoinnovation en raison de son importance en tant que moteur du développement durable. Une analyse des méthodes et outils existants, permet d'identifier les problèmes et limites liés à ces outils (centrés produits et manque de prise en compte des aspects environnementaux dans la phase de résolution) et ainsi de bien positionner la problématique de nos travaux.

Le troisième chapitre présente les fondements de la méthode proposée. Il décrit le processus pour la phase d'analyse et de structuration du problème. Ce processus est composé de trois étapes principales : Description de la problématique, Réseau de problèmes, Contradictions. Les sous étapes sont également détaillées ainsi que les outils utilisés : soit des outils existants mais adaptés à notre objectif, soit spécifiquement créés. Ce processus s'appuie fortement sur celui de la méthode OTSM qui a été revue et complétée pour répondre aux exigences de notre problématique.

Le quatrième chapitre est le pendant du chapitre précédent mais dédié à la phase de résolution du problème. Tout comme précédemment, un processus de résolution composé de quatre étapes principales est proposé : Modélisation et Résolution des contradictions, Recherche de Solutions spécifiques, Association de solutions, Evaluation des solutions. Afin de faciliter la mise en œuvre des différentes étapes, des outils ont été créés : matrice étendue de résolution des contradictions (introduction des paramètres d'éco-efficacité), analyse temporelle et spatiale, guide de résolution selon l'interaction champs-substances… Dans ce chapitre, on propose

également une première approche pour essayer de résoudre un problème formulé à l'aide de plusieurs contradictions.

Le dernier chapitre présente l'application du processus complet d'écoconception inventive au travers d'une étude de cas sur la réduction de l'émission de polluants dans le gaz de synthèse produit lors de la gazéification de la biomasse. Cette étude de cas se focalise plus spécifiquement sur le procédé à double lit fluidisé circulant. L'exemple reprend toutes les étapes et sous étapes des chapitres 3 et 4, ainsi que les outils de résolutions utilisés. Au final, un nouveau concept d'appareil multifonctionnel permettant d'intensifier les phénomènes physiques et chimiques est proposé. Il s'agit d'intégrer directement dans la chambre de combustion du lit fluidisé (pour tirer profit d'un champ thermique), un réacteur-séparateur qui non seulement réduit les polluants dans le gaz de synthèse mais augmente également la production par conversion des polluants en hydrogène valorisable.

Enfin, des conclusions et perspectives générales sur la méthode d'écoconception inventive sont présentées et discutées.

CHAPITRE 1

# LA PRODUCTION DURABLE ET L'ECOCONCEPTION DANS L'INDUSTRIE CHIMIQUE

## 1.1 INTRODUCTION

De nous jours l'industrie des procédés a été et est toujours considérée comme une industrie avec une mauvaise image, pourtant de nombreux efforts ont été développés pour la changer. Au cours du temps, au même titre que d'autres types d'industries, l'industrie chimique a réalisé de nombreux efforts pour relever le défi de la réduction de l'émission de polluants, et notamment grâce aux développements de nouvelles technologies. Plus largement dans le contexte mondial actuel, l'extension de notre modèle de production et de nos technologies est impossible : la consommation de matière première et les impacts environnementaux en seraient insupportables. Par conséquent, un nouveau défi apparait celui de la production durable qui exige une évolution depuis la réduction de l'extraction de matière première vers une écologie industrielle qui permet l'équilibre entre le développement économique, social et écologique.
A l'instar d'autres industries, l'industrie des procédés va devoir opérer des changements importants pour rendre son développement durable. Les principales contraintes qui influeront sur cette mutation sont :

- La raréfaction des ressources fossiles qui impliquera une optimisation énergétique des procédés et la substitution des sources actuelles par des énergies renouvelables.
- La nécessité d'économiser toutes les ressources (eau, métaux rares, terres rares…) qui deviendra une contrainte forte. Cela obligera à réduire l'utilisation de ressources naturelles (fabriquer ce que nous extrayons), à utiliser des ressources renouvelables, à accroître l'utilisation de ressources recyclées.
- La recherche de techniques pour extraire et rendre utilisables des ressources moins concentrées ou de moindre qualité.
- La réduction des émissions de pollution qui va affecter les performances à atteindre par les procédés. Ceci aura des conséquences sur les choix de procédé, leur contrôle, et la révision du choix du mode de production : déconcentrée et centralisée.

Toutes ces contraintes sont également l'occasion d'élargir le champ de l'industrie des procédés avec par exemple le développement de nouvelles applications, nouveaux produits, pour rendre cette industrie plus durable. Les procédés devront posséder des performances optimisées (catalyse, intensification, intégration énergétique…), des impacts environnementaux réduits. De la même façon les produits issus de cette industrie devront avoir des impacts environnementaux globaux réduits (intégration de la chaîne logistique directe, chaîne logistique inverse et chaîne de valorisation). Outre les enjeux de la production durable, la prise en compte de ces contraintes offre des opportunités de progrès technologiques importants.
En retour ces contraintes vont donc induire de nouvelles demandes au niveau de la conception. Cela se traduit par le développement de méthodes et d'outils d'aide à l'écoconception pour concevoir des produits et procédés répondant à ces nouvelles contraintes. Néanmoins, ceci va obligatoirement impliquer un certain niveau d'innovation afin d'améliorer les systèmes déjà existants ou le développement de nouveaux systèmes. Ce dernier implique une remontée de la prise en compte de ces contraintes vers la phase amont du processus de conception (i.e. la phase de recherche de concept). Ainsi dans ce chapitre, nous commencerons par discuter le

concept de production durable. La section 3 aborde l'évolution de la conception vers l'écoconception. Enfin, la conclusion esquisse une première problématique de ce travail.

## 1.2 LA PRODUCTION DURABLE

A la fin des années 80, afin de réduire les impacts environnementaux et de créer une société durable, démarre une politique pour le développement durable (IUCN 1980). Une société durable représente un équilibre entre la création de richesse et un développement technologique qui répond aux besoins de la société, tout en réduisant considérablement son impact sur l'environnement. Le développement durable s'articule autour de trois axes : la protection de l'environnement, la richesse économique et l'équité sociale (OECD 2010). Dans le monde industriel, le développement durable est interprété comme la production durable. Le concept de production durable apparait dès la conférence des Nations Unis sur l'environnement en 1992 comme une réponse à l'inquiétude sur la dégradation de l'environnement associée à la croissance économique (OECD 2010). A partir de ce moment, plusieurs définitions sur la production durable ont été données, par exemple celle proposée par « The Lowell Centre for Suistaintable Production » : « *La production durable est la création de biens et de services en utilisant des systèmes et des procédés qui sont : non polluants, qui utilisent efficacement les ressources naturelles et l'énergie, qui réduisent les émissions de gaz à effet de serre et plus largement les incidences sur l'environnement, qui soient économiquement viables, qui soient sûrs et sains pour les travailleurs, les collectivités et les consommateurs, et gratifiants sur le plan social pour tous les travailleurs. L'objectif est de satisfaire nos besoins fondamentaux en biens et services tout en entraînant une meilleure qualité de vie et en veillant à laisser suffisamment de ressources naturelles aux générations futures* » (OECD 2010). Comme l'indique la définition précédente, la production durable exige une production industrielle plus propre, favorisée par des procédés plus efficaces appuyés par des systèmes industriels afin qu'ils soient plus respectueux de l'environnement, couplés à une utilisation plus efficace de l'énergie et des ressources naturelles. Ces technologies développées afin de répondre aux exigences de la production durable sont aussi connues sous le nom de technologies « vertes » ou écotechnologies.

La mise en œuvre industrielle du concept de production durable a suivi une évolution progressive allant du perfectionnement du traitement de la pollution en sortie de procédé jusqu'à l'écologie industrielle afin de prévenir la pollution sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes industriels, par la mise en œuvre de différentes solutions et méthodes. Cette évolution est illustrée sur la figure 1.1, les étapes sont détaillées dans les paragraphes suivants.

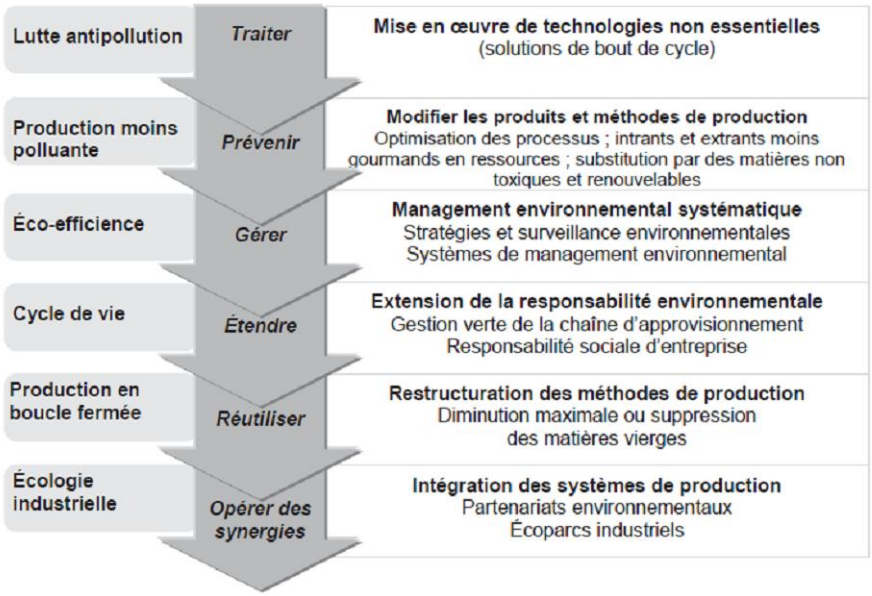



*Figure 1.1 : Evolution de la production durable (OECD 2010).*

### 1.2.1 *Lutte antipollution et traitement des pollutions*

Tout d'abord, l'évolution de la production durable commence par la lutte contre la pollution et le traitement des pollutions comme une réponse aux réglementations de plus en plus strictes. Les solutions mises en œuvre ont pour objectif de réduire ou contrôler les dommages environnementaux dans les étapes finales des procédés de fabrications. Plus précisément, elles visent à réduire ou éliminer les polluants en sortie des procédés déjà existants, c'est-à-dire, à améliorer leur performance environnementale (figure 1.2). Elles sont souvent qualifiées de technologies ou de solutions de « fin de cycle » (end of pipe). Par conséquent, les investissements sont essentiellement réalisés pour la construction de procédés de traitement et de contrôle des effluents et de polluants (OECD 2010). Ces investissements étaient souvent mal perçus par les industriels, car ils augmentaient les coûts et donc avaient un effet néfaste sur la rentabilité et la croissance économique.

Néanmoins, dans ce type d'actions, les solutions aux problèmes environnementaux sont uniquement curatives, à court terme et les bénéficies peuvent s'avérer illusoires (Ashford 1994). En effet, la pollution est plutôt vue comme une conséquence irréparable des entreprises. En conséquence, les solutions proposées sont temporaires et d'ampleur limitée. Il est souvent nécessaire de trouver des solutions qui impliquent d'aller plus loin que le simple contrôle de polluants. Les systèmes de traitement des eaux usées, des COV, le captage du $CO_2$ en sont des exemples.

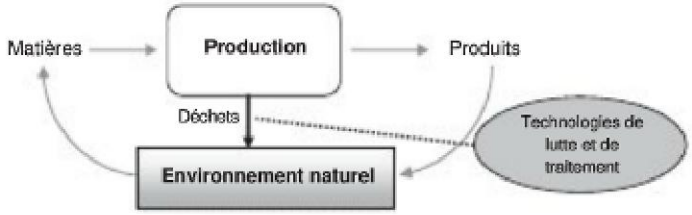



*Figure 1.2 : Lutte antipollution (OECD 2010).*

### 1.2.2 *Production moins polluante*

Une réponse plus préventive aux problèmes environnementaux, consiste à développer des procédés moins polluants, plus précisément « *l'utilisation continue d'un procédé productif et un produit qui contribuent à la prévention de la pollution des milieux environnementaux (air, eau, sol), la réduction des sources de déchets, et la réduction des risques pour la santé humaine et l'environnement* » (Ashford 1994). Ce concept repose sur le principe de précaution où l'on cherche à anticiper les effets néfastes grâce à une stratégie environnementale intégrée. En général, cette étape repose sur l'identification et le suivi de la prévention de la production des polluants au travers de l'implémentation d'actions nécessaires qui doivent être mises en place pour conduire à des changements au niveau organisationnel dans le procédé de production (OECD 2010). Le tableau 1.1 indique les domaines d'actions pour réduire l'émission des polluants dans les procédés proposés par (Ashford 1994), (OECD 2010).

| Domaines d'action | Description |
|---|---|
| Les Bonnes Pratiques | Les actions nécessaires pour améliorer et générer des bonnes pratiques professionnelles et la maintenance. |
| Optimisation des procédés | L'action destinée à améliorer l'utilisation des ressources (matières et énergies). |
| Substitution de matières premières | Les actions de remplacement des matières toxiques par des matières plus écologiques. |
| Nouvelle technologies | L'implémentation de nouvelles technologies qui permettent une diminution de l'utilisation des ressources, des émissions de polluants. |
| Conception de nouveaux produits | Les actions pour créer de nouveaux produits moins polluants en considérant la globalité du cycle de vie. |

*Tableau 1.1 : Actions pour une production moins polluante.*

La production moins polluante cherche à utiliser de façon plus efficiente les ressources tout en limitant la production de déchets.

Ainsi, pour la mise en place des actions mentionnées ci-dessus, trois moyens différents sont utilisés (tableau 1.2) (Ashford 1994) .

| Moyens | Description |
|---|---|
| Changements d'attitudes. | La diminution de l'émission de polluants n'implique pas seulement le changement de technologies, mais il s'agit aussi d'influencer des changements de vision entre production industrielle et environnement. Le changement d'attitude invite à repenser les procédés industriels et les produits avec comme objectif de réduire la pollution. |

| | |
|---|---|
| Applications du savoir-faire | L'application du savoir-faire pour améliorer les bonnes pratiques, l'optimisation des procédés, l'implémentation de nouvelles techniques de gestion de l'environnement. |
| Amélioration de la technologie | L'amélioration de la technologie implique la modification du procédé ou de la technologie de fabrication, changement de matières premières, modification du produit final et la réutilisation des matières provenant des matériaux de déchets générés ou recyclés. |

*Tableau 1.2 : Moyens de changements des actions pour une production moins polluante (Ashford 1994).*

Les avantages de la production moins polluante sont selon (Fresner et al. 2010) :

- La réduction des déchets et d'émission de polluants au travers de la diminution de l'utilisation de matières et d'énergie aboutit à des avantages économiques.
- La réduction des déchets et d'émission de polluants au travers d'une l'analyse plus détaillée et précise du procédé de production génère la recherche de concepts plus innovants.

En résumé, la production moins polluante peut se percevoir comme une stratégie pour un développement économique et une protection de l'environnement. De plus, sa mise en œuvre et les opérations utilisées sont moins coûteuses à long terme que leurs équivalentes dans la lutte antipollution, grâce à la réduction des matières premières, du gaspillage d'énergie et des déchets générés, mais aussi de tous les coûts associés à leurs traitements (Ashford 1994). En conséquence, le secteur industriel et en particulier le génie de procèdes considère l'importance de l'implémentation d'une telle stratégie, car sa croissance continue et progressive implique aussi l'amélioration des performances environnementales et non simplement un compromis entre les aspects économiques et environnementaux. Enfin, la production moins polluante s'accompagne souvent d'un changement organisationnel (figure 1.3) (OECD 2010). Toutefois, tout comme dans le cas précédent, sa portée reste limitée au périmètre de l'entreprise.

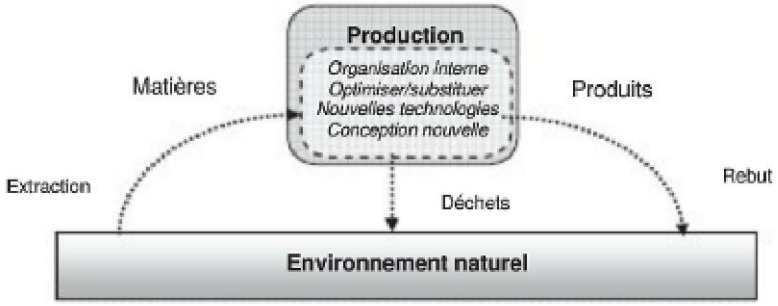



*Figure 1.3 : La production moins polluante (OECD 2010).*

### 1.2.3 *L'écoefficacité*

Une fois que la production moins polluante est mise en œuvre, le critère économique est intégré afin de créer une évolution continue de création de la valeur avec moins d'impact sur l'environnement. Cela implique un processus d'amélioration continue dans l'efficacité industrielle, c'est-à-dire, la compétitivité et la rentabilité doivent être accompagnées d'une amélioration des performances environnementales (le rapport coût-efficacité). Par conséquence, le concept d'écoefficacité, qui est une mesure relative entre le rapport de la performance économique et la performance environnementale d'un produit, procédé ou service, (figure 1.4), a été proposé afin d'aider les entreprises à améliorer leur contribution vers une production durable (OECD 2010). Le concept d'écoefficacité ou de l'efficacité environnementale, fait référence à la fois à l'économie et l'écologie (Berneman et al. 2009), « il *consiste à offrir des biens et des services à des prix compétitifs qui répondent aux besoins des consommateurs et leur apportent une qualité de vie, tout en réduisant progressivement les impacts environnementaux et la quantité des ressources naturelles nécessaires tout au long du cycle de vie des produits pour atteindre finalement un niveau qui soit en harmonie avec ce que peut supporter durablement la planète »* (WBCSD 2000). Grâce à la mise en place d'une telle stratégie, les entreprises voient de façon plus positive les actions en faveur de l'environnement. Elles continuent à améliorer leurs résultats et positions concurrentielles grâce à une meilleure gestion (optimisation de la production, efficacité énergétique, etc.).

$$\textbf{L'éco-efficacité} = \frac{\text{La valeur du produit ou procédé}}{\text{L'influence sur l'environnement}}$$

*Figure 1.4 : Rapport entre valeur et environnement (WBCSD 2000).*

De nos jours, l'importance de l'écoefficacité se fait plus cruciale dans le monde industriel. L'écoefficacité s'intéresse à trois objectifs principaux (WBCSD 2000) :

- La réduction de la consommation des ressources, qui concerne la réduction de l'utilisation d'énergie, des matériaux, des ressources naturelles mais aussi l'augmentation de la recyclabilité et la durabilité du produit.
- Réduire l'impact environnemental, cela implique des actions sur les entrées et sorties d'un procédé de production, d'un côté la réduction des émissions de polluants à la sortie et de l'autre l'utilisation de ressources renouvelables.
- Ajouter de la valeur à un produit ou un service, par une augmentation de leurs fonctionnalités.

Afin de suivre de manière systématique l'amélioration continue de l'efficacité environnementale, les entreprises mettent en œuvre des méthodes et stratégies comme, par exemple le système de management environnemental ISO 14045 ou Eco-Management and Audit Scheme (OECD 2010). Ce type de systèmes est composé de quatre étapes (figure 1.5) : 1) planifier 2) mettre en œuvre 3) suivre et vérifier, 4) examiner et améliorer (Perotto et al. 2008). Ainsi, il permet de fixer des objectifs de réduction des impacts environnementaux et d'assurer leur suivi (Berneman et al. 2009). En outre, il existe des indicateurs de l'écoefficacité dénommés facteurs, comme par exemple le facteur X qui évalue l'écoefficacité d'un

produit développé par rapport au produit le mieux référencé sur le marché (Aoe 2003). De plus, il est aussi possible de mesurer l'écoefficacité en utilisant d'autres méthodes qui permettent de mesurer la productivité des ressources telles que l'empreinte écologique ou l'analyse de flux de matières. Enfin l'utilisation des indicateurs de l'écoefficacité favorise la compréhension des systèmes et de leurs performances, ils aident à éclairer la prise de décisions dans la sélection ou la modification d'un système et ils permettent de mesurer le progrès du système vers les objectifs fixés (OECD 2010).

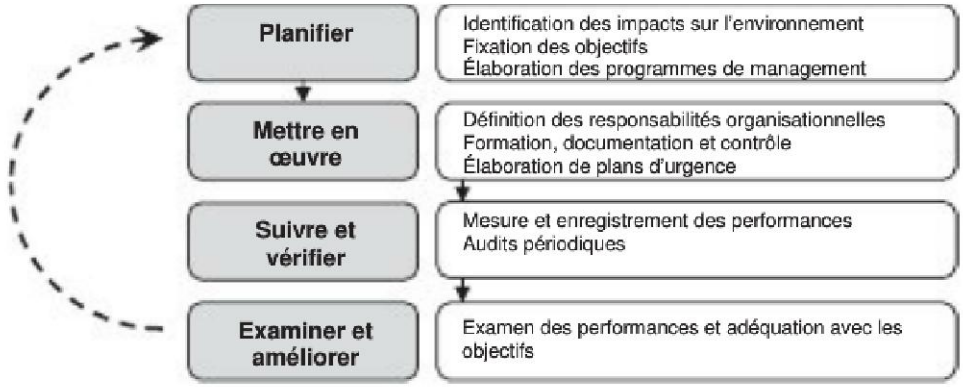



*Figure 1.5 : Systèmes de gestion environnementale (OECD 2010).*

Pour mettre en œuvre, un système de gestion environnementale ou pour améliorer l'écoefficacité, la WBCSD (WBCSD 2000) a proposé sept paramètres à considérer ou actions à réaliser :

1. La réduction de l'intensité en matière.
2. La réduction de l'intensité énergétique.
3. La réduction de la dispersion de produits toxiques.
4. L'augmentation de la recyclabilité des matériaux.
5. La maximisation de l'usage durable des ressources renouvelables.
6. L'extension de la viabilité des produits.
7. L'augmentation de l'intensité des services.

Ainsi, l'écoefficacité permet de favoriser la production durable et dans le même temps augmente la compétitivité des entreprises, elle contribue également à la réalisation d'économies. En revanche, l'écoefficacité prend seulement en compte les aspects économiques et écologiques sans considérer le progrès social. Donc, le défi actuel est de considérer simultanément les trois éléments.

### 1.2.4 *Cycle de vie vert*

L'analyse du cycle de vie vert est une approche qui implique l'évaluation de l'impact environnemental d'un produit ou procédé sur l'ensemble de son cycle de vie. Les résultats permettent la prise de décisions pour l'amélioration ou le développement d'un produit ou procédé existant tout en regardant la réduction des ressources et de l'impact environnemental. La différence avec la production moins polluante est qu'elle impose aux entreprises un élargissement du périmètre d'action : de l'extraction des matières premières jusqu'au retrait du produit en passant par les étapes de conception et de consommation (OECD 2010). De nos jours, cette

approche est largement utilisée dans le monde industriel comme celui de la recherche. L'analyse consiste à assurer une production durable durant toute la vie d'un produit et d'un procédé et dans le même temps une prise de conscience par les entreprises sur la responsabilité environnementale de ce qu'ils produisent. La figure 1.6 représente le cycle de vie vert.

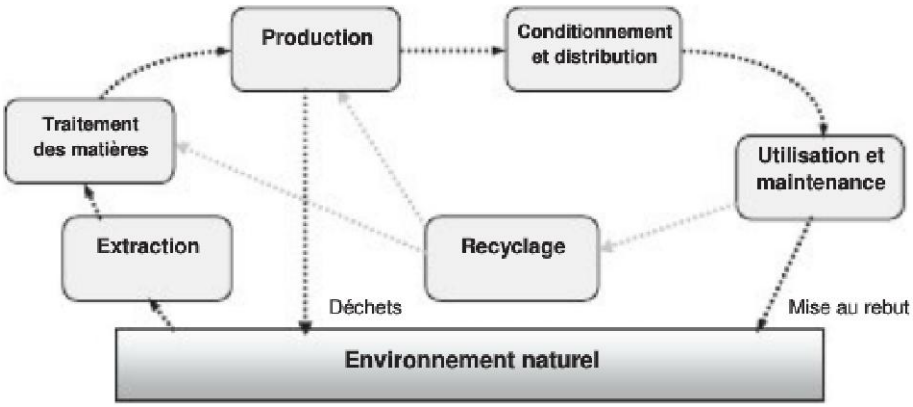



*Figure 1.6 : Analyse du cycle de vie vert (OECD 2010).*

### 1.2.5 *La production en boucle fermée*

La production en boucle fermée présente une grande similitude avec l'analyse du cycle de vie, mais s'en diffère par le fait qu'elle considère un cycle presque autosuffisant, où les sources de matières premières et les flux de déchets sont minimaux (figure 1.7). Ce type de démarche implique la capacité à réutiliser ou recycler d'une façon ou d'une autre une grand partie des composants d'un procédé ou système en fin de vie (OECD 2010). Pour développer ce type de production en boucle fermée il faut l'intégrer depuis le processus de conception. Ainsi, le processus de conception doit considérer tout le cycle de vie d'un produit ou procédé et faciliter la diminution de l'utilisation de matières premières et énergie dans toutes ses étapes, mais aussi faciliter son recyclage et sa réutilisation (OECD 2010). Il faut intégrer le fait d'aller vers une approche circulaire (et non linéaire) et plus systématique dans laquelle le système est conçu en imaginant une perspective de réutilisation (sous une forme ou une autre) en fin de vie.

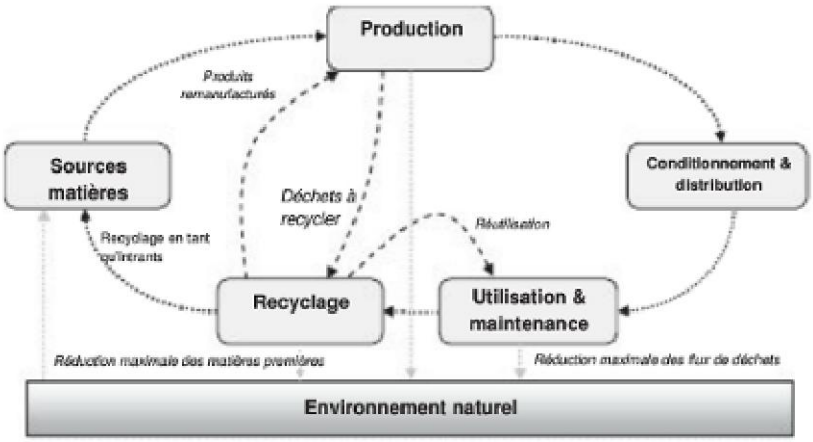



*Figure 1.7: Production en boucle fermée(OECD 2010).*

### 1.2.6 *L'écologie industrielle*

Finalement, dans sa vision la plus poussée la production durable arrive à un point d'évolution qui permet, d'une certaine manière, une interdépendance harmonieuse, l'autosuffisance et l'auto-organisation entre les activités industrielles, la société en général et son propre environnement (OECD 2010). Le but est d'implémenter une démarche globale et multidisciplinaire qui permet une interaction, entre les industries, la société et l'environnement, similaire à celle d'un écosystème. Cette symbiose industrielle est dénommée parcs éco-industriels : *il s'agit d'une zone où les entreprises coopèrent pour optimiser l'usage des ressources, notamment en valorisant mutuellement leurs déchets (les déchets d'une entreprise servant de matière première pour une autre)* (figure 1.8) (Erkman et ECHO–Martigny 2004). Ces parcs permettent une amélioration dans la performance économique tout en réduisant le plus possible les déchets et les pollutions (OECD 2010). L'exemple le plus connu est le plus ancien éco-parc industriel qui se trouve dans la ville de Kalundborg au Danemark. il s'est progressivement développé au travers de la coopération entre des entreprises : une centrale de charbon utilise le butane disponible dans une raffinerie, la municipalité de Kalundborg utilise l'excédent de chaleur de la centrale pour chauffer des logements, une usine de plaques de plâtre utilise les cendres de la centrale pour alimenter la production de ciments et une usine d'acide sulfurique utilise le soufre liquide issu des opérations de désulfurisation de la raffinerie (OECD 2010)…

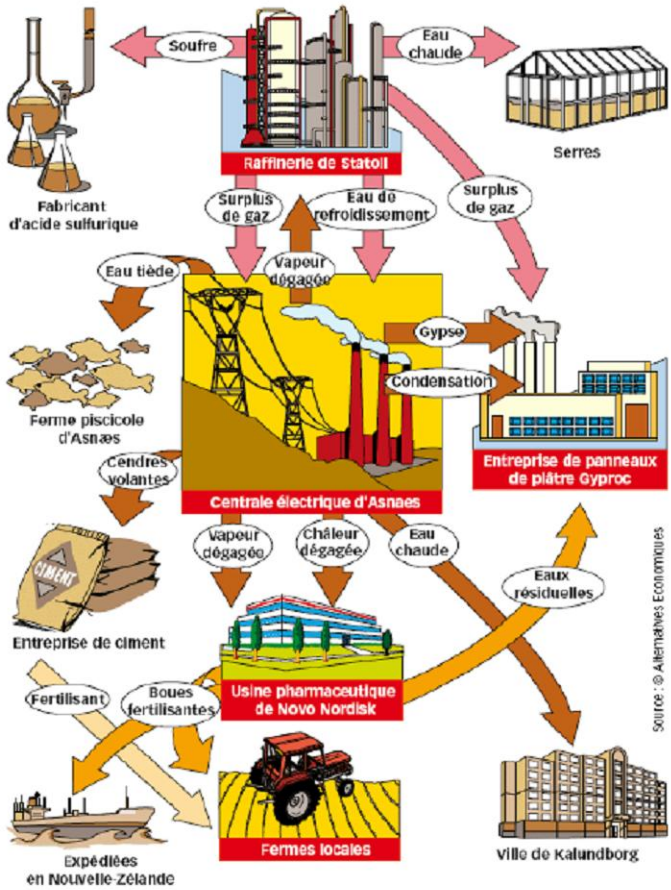



*Figure 1.8 : Représentation d'un parc éco-industriel (Alternatives Economiques 2009).*

De nos jours, dans le domaine industriel, et particulièrement dans l'industrie chimique qui nous concerne, un des principaux buts est le développement et l'amélioration substantielle des systèmes industriels (produits et procédés) afin de créer une production durable qui représente un équilibre autour des trois axes de la production durable. Ceci implique un développement équilibré particulièrement d'un point de vue économique et environnemental des systèmes industriels. Ce développement exige un certain niveau d'innovation (écoinnovation) des systèmes industriels. Ainsi, afin de mettre en œuvre des stratégies en vue d'une production durable trois éléments sont clés : les systèmes industriels, leur cycle de vie et l'écoinnovation. Ces éléments seront abordés dans les sections suivantes.

## 1.3 ÉVOLUTION DE LA CONCEPTION VERS L'ECOCONCEPTION.

Actuellement, il est donc nécessaire d'inclure les exigences environnementales dès les phases amont du processus de conception. Pour répondre à ces nouvelles exigences, le concept d'écoconception a été développé. Plusieurs définitions ont été proposées, nous retenons la définition du « National Research Council », citée par (Knight et Jenkins 2009): «*l'intégration systématique des considérations environnementales dans la conception des produits, procédés et processus ».* Le but de l'écoconception est une responsabilité environnementale (Kengpol et Boonkanit 2011) et dans le même temps la création de produits ou procédés de grande valeur économique, sociale et écologique, grâce à : la réduction des coûts de fabrication, l'identification de nouvelles alternatives, la réduction de l'émission de polluants, une meilleure utilisation des ressources. L'écoconception est considérée comme la clé pour la production durable (Knight et Jenkins 2009). En résumé, l'écoconception est une extension de la conception où les contraintes environnementales sont non seulement intégrées dans le processus de conception mais elles jouent un rôle prépondérant dans la conception du produit mais aussi dans les critères de choix.

### 1.3.1 *La conception en Génie des Procédés*

La figure 1.9 présente le cycle de vie d'un procédé et d'un produit ainsi que leur liaison. Il faut souligner que les temps de cycle entre le procédé et le produit sont différents. Le cycle de vie d'un produit est plus court pour deux raisons : il est en perpétuelle transformation et en constante amélioration ou nouveau développement. Le cycle de vie d'un procédé est plus long car, son amélioration ou un nouveau développement est plus complexe parce qu'ils doivent intégrer la conception du produit à transformer et sa propre conception.




*Figure 1.9 : Le cycle de vie d'un procédé et d'un produit.*

De part cette forte interaction entre les deux cycles de vie, en génie des procédés un projet de conception nécessite souvent de mener conjointement les étapes de développement du produit et le développement du procédé de fabrication. Dans cette discipline, le couple produit/procédé est fortement lié car les méthodes et les conditions opératoires utilisées au niveau du laboratoire sont rarement adaptées à la production de masse, notamment pour des raisons économiques et techniques. Par conséquent, la conception du procédé de fabrication peut influencer le mode d'obtention du produit : choix des matières premières, choix des voies de synthèse, choix des techniques de séparation, choix des conditions opératoires…
Lorsque le plan de synthèse (assimilable à la conception produit) a atteint un certain degré d'avancement, les informations nécessaires (conditions opératoires, données cinétiques…) sont transmises à l'ingénieur procédé pour la conception de l'atelier de fabrication. La conception de procédés chimiques nécessite la sélection d'une série d'étapes de traitement de la matière et de leur intégration pour former un système complet de fabrication. Il faut donc définir les différentes opérations unitaires, choisir le réacteur, les agencer (choix du train de séparation), dimensionner les divers appareillages, optimiser le procédé et enfin envisager son contrôle et sa commande. La conception du procédé est complexe de par les phénomènes physiques mis en jeu, mais aussi par la prise en compte d'une grande variété de contraintes traitées progressivement.

Dans tous les domaines techniques, les chercheurs et ingénieurs de conception notent une nette augmentation de la complexité des systèmes, pour satisfaire au mieux l'ensemble des exigences croissantes provenant de l'ensemble des acteurs du cycle de vie mais aussi du monde normatif. Il devient difficile de trouver une solution répondant à l'ensemble de ces exigences. Viennent également s'ajouter des contraintes liées aux nouveaux défis à relever comme celui du développement durable. A la complexification des produits s'ajoute la complexification de la technologie et plus largement des procédés, pour répondre aux nouvelles exigences des produits d'une part et aux exigences de production actuelle (environnementales, énergétiques, économiques, sécurité…) d'autre part. Toutes les évolutions technologiques liées à l'intensification des procédés en sont un exemple illustratif. Au cours du temps, les transformations continuelles du produit sont aussi une des causes de sa complexification grandissante.

Concernant l'aspect produit, il existe de nombreuses descriptions du déroulement de l'activité de conception issues aussi bien du monde industriel ou normatif que du monde académique. (Scaravetti 2004) a examiné ces différentes démarches ainsi que les différents modèles associés, pour en dégager les caractéristiques communes mais également leurs spécificités. Parmi toutes ces démarches de référence, il est à noter les travaux les plus communément cités à savoir la conception axiomatique (Suh 1990), l'approche systématique de (Pahl et Beitz 1996) ainsi que les travaux de (Ulrich et Eppinger 2000) sur l'approche modulaire.

Pour la conception procédé, (Cooper 2005) a proposé une démarche générale de conception intégrant les aspects produits, procédés et technologiques dès les premières phases de la conception, figure 1.10. Ce processus est couramment employé dans les industries, après avoir été adaptés aux besoins et à l'environnement de l'entreprise. Il est composé de plusieurs étapes se concluant de jalons de décision regroupant les parties prenantes et les différents décisionnaires (techniques, production, logistique, sécurité…). A chaque jalon, les décisionnaires peuvent soit passer à l'étape suivante, soit arrêter momentanément le projet en attendant que les problèmes critiques soient résolus, soit arrêter complètement le projet. A chaque revue, le risque s'amenuise et les divers éléments se précisent.

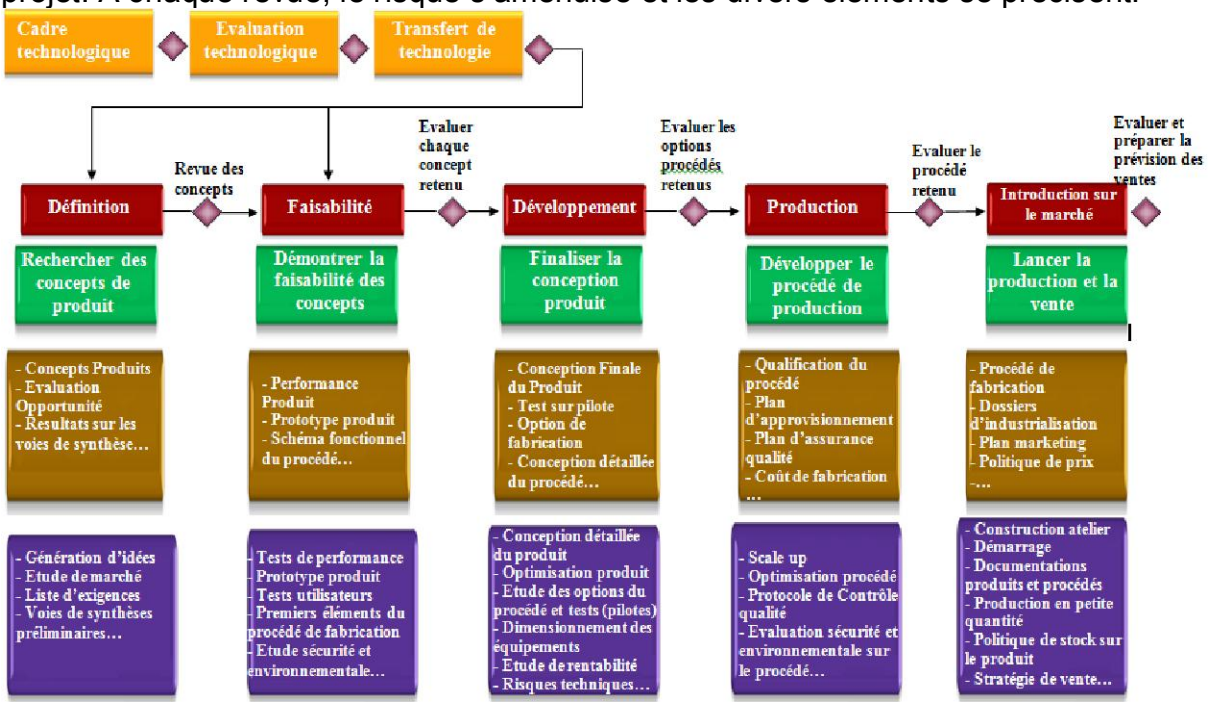



*Figure 1.10 : Processus de conception de Cooper (Cooper 2005).*

Bien que cette démarche reprenne les mêmes éléments que les processus précédents (orientés produits), elle possède l'avantage d'introduire la conception du procédé de fabrication dans les étapes amont du développement produit afin de diminuer le temps de conception. Par rapport à la démarche de (Seider et al. 2004), elle possède également l'avantage d'intégrer une réflexion sur la technologie dès les premières phases de la conception produit. La première étape nommée Cadre technologique, a pour objectif de réaliser une veille technologique et scientifique, de générer des idées et d'évaluer les alternatives pour la conduite du projet de développement technologique. L'étape d'Evaluation de la technologie est plus

étendue, son objectif est de démontrer la faisabilité technologique, c'est-à-dire de montrer que la nouvelle technologie fonctionne correctement et mérite une plus grande attention. Durant le Transfert de technologie, une étude expérimentale et/ou de modélisation complète est menée afin de faire progresser la technologie et de justifier ses applications potentielles. Lorsque ce transfert de technologie est susceptible d'avoir lieu (durant les étapes de Définition ou de Faisabilité du développement produit), il s'accompagne d'un effort important sur la conception produit. (Seider et al. 2010) ont adapté cette démarche pour le génie des procédés et l'ont déclinée pour différents types de produits chimiques.

### 1.3.2 *Rappels historiques sur l'écoconception*

L'intégration de l'environnement dans le développement de produits ou de procédés débute dans les années 1970. Son objectif est de diminuer la quantité de déchets solides qui se retrouvent dans les sites d'enfouissement. Selon Millet (1995) « cette approche consiste à poser que les impacts environnementaux occasionnés par le produit seront minimisés si l'on réalise le bouclage des flux de matières intervenant dans la phase de fin de vie ». Des chercheurs américains s'intéressent à des démarches d'élaboration de produits ou procédés, visant à réduire l'impact environnemental en minimisant cinq critères : l'énergie, la matière, les déchets solides, les rejets dans l'eau et les rejets dans l'air. Cette approche multicritères cherche à intégrer les bilans matières (issus de l'industrie chimique), aux bilans énergétiques (développés à la suite du choc pétrolier) pour avoir une vision plus complète des ressources utilisées. Plus tard apparait la prise en compte des rejets générés.
C'est au début des années 80 que l'intérêt pour ces analyses d'impact revient (création de la Society of Environmental Toxicology And Chemistry, SETAC) avec l'objectif de développer et promouvoir des outils d'évaluation d'impact environnemental. Ces analyses intègrent une vision plus complète des impacts générés. Toutes ces analyses nommées : écobilan, écoprofil… sont peu ou prou regroupées sous l'appellation Analyse de Cycle de Vie (ACV). En 1991, la SETAC (SETAC 1991) publie un rapport dans lequel sont définis les premiers éléments d'une méthode pour effectuer des ACV. Aujourd'hui, il existe de nombreux logiciels pour les réaliser à partir de bases de données différentes. L'ACV est devenue l'outil principal pour appréhender toutes les dimensions écologiques d'un produit ou procédé.

Selon le WBCSD (WBCSD 2000), la mise en œuvre de l'éco efficience nécessite la mise en place d'une structure de base incluant :

- L'implantation d'un système de gestion environnementale : pour assurer la gestion et le suivi de l'amélioration environnementale continue.
- L'intégration de la pensée cycle de vie : afin de favoriser une meilleure compréhension des relations entre les activités.
- L'écoconception : pour intégrer les aspects environnementaux dès la conception des produits.
- Une gestion de la chaine d'approvisionnement : pour intégrer les aspects environnementaux chez les fournisseurs et collaborateurs de l'entreprise.

### 1.3.3 *Avantages de l'écoconception*

L'écoconception est considérée comme la composante primordiale pour l'intégration de la préoccupation environnementale dans le développement de produits, procédés

et services (Berneman et al. 2009). Néanmoins, dans le monde industriel, il subsiste un grand scepticisme sur les bénéfices d'une implémentation d'une démarche d'écoconception car une telle démarche est considérée comme générant des dépenses qui peuvent affecter la rentabilité de l'entreprise au lieu procurer des avantages. En effet, de tous les leviers pour l'écoconception, c'est l'argument économique auquel les entreprises sont le plus sensibles. Pour intéresser les industriels, il faut d'une part démontrer que la démarche n'est pas incompatible avec l'obligation de rentabilité et d'autre part démontrer comment cette démarche peut contribuer à améliorer son bilan financier. Dans leur rapport Berneman (Berneman et al. 2009) mettent en évidence certains avantages à intégrer une telle démarche :

- Possibilité de répondre aux besoins changeants des consommateurs qui sont de plus en plus exigeants en ce qui concerne les questions environnementales ;
- Possibilité d'être choisi plus facilement comme fournisseur car pour certaines entreprises la performance environnementale est un critère de sélection ;
- Possibilité d'améliorer la qualité du produit et de mieux le différencier. L'écoconception permet de développer des produits, procédés et services avec moins d'impact environnemental ce qui peut les différencier de la concurrence ;
- Possibilité accrue de fidéliser les consommateurs. L'écoconception peut permettre de créer un lien entre les consommateurs et le produit grâce à l'intérêt des consommateurs pour les produits plus écologiques ;
- Renforcer l'image de l'enterprise. La préoccupation d'une entreprise par l'environnement peut se traduire en l'amélioration de son image et générer de meilleurs revenus ;
- Plus forte créativité ou capacité d'innovation de l'entreprise. L'implémentation d'une démarche d'écoconception peut favoriser une plus grande créativité et une capacité d'innover de par la recherche de nouveau concepts ;
- Plus grande mobilisation et une plus grande satisfaction de la main d'œuvre. Une démarche d'écoconception peut sensibiliser les employés aux questions environnementales et qui peut se traduire par une plus forte implication dans la conception des produits plus écologiques.
- Réduction des coûts grâce à l'utilisation, la ré-conception ou l'optimisation des produits et procédés ce qu'implique une réduction de l'utilisation de matériaux ou leur remplacement par des matières recyclées moins coûteuses ;
- Réduction de la toxicité. L'écoconception considère la substitution de matières toxiques afin de réduire le risque dans la production, l'utilisation et lors de la fin de la vie d'un produit.

Ainsi, l'écoconception s'avère comme une démarche qui présente plus de bénéfices qu'une simple dépense ou obligation pour une entreprise. Néanmoins, une telle démarche implique toujours un grand défi pour toute entreprise car plusieurs paradigmes sur l'écoconception doivent être surmontés.

### 1.3.4 *Typologie de l'écoconception*

Dans le but d'obtenir une description et une compréhension plus complètes de l'écoconception, certains auteurs ont énoncé différentes classifications. Plus particulièrement, Charter et Brezet (Chick et Charter 1997) (Brezet et al. 2001) ont considéré les bénéfices environnementaux pour élaborer deux classifications : selon le type d'innovation et selon l'amélioration de l'écoefficacité obtenue.

Selon Charter (Chick et Charter 1997) l'écoconception peut être classée en quatre étapes en fonction du type d'innovation (figure 1.11), également connues sous le terme des 4R:

1. **Réparer** : les produits et les procédés existants sont modifiés ou il existe déjà leurs remplaçants pour répondre aux exigences environnementales.
2. **Raffiner** : ce type de conception donne lieu à des améliorations dans la conception du produit ou procédé, caractérisées par des changements pour utiliser des matières plus écologiques ou des matériaux avec une durée de vie allongée.
3. **Reconcevoir** : dans ce type de conception, les différentes étapes du cycle de vie du produit ou procédé sont prises en considération. Le but est de réduire l'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie. Par conséquent, le produit ou procédé doit être reconfiguré et de nouveaux concepts de solution doivent être proposés.
4. **Repenser** : ce type d'écoconception exige de véritables changements, avec la recherche de nouveaux concepts de solutions. Elle donne lieu à la recherche de solutions de remplacement des systèmes existants ou de nouveaux moyens de satisfaire les exigences du client.

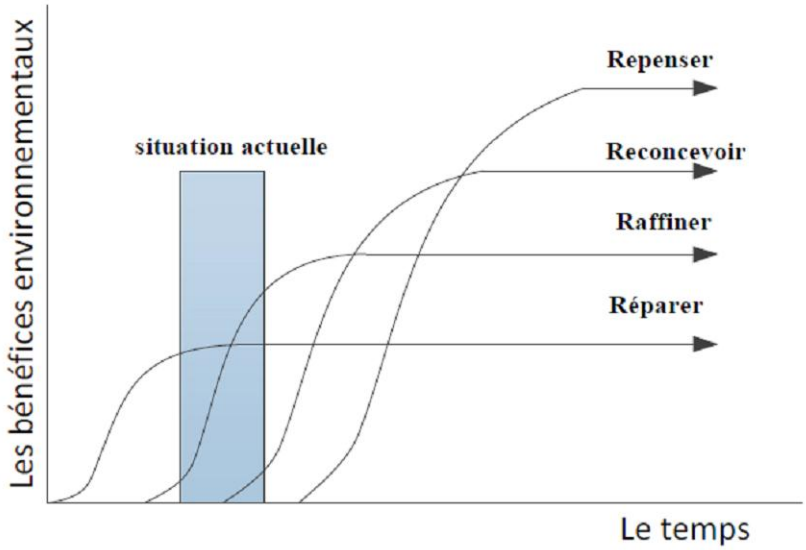



*Figure 1.11 : Classification d'écoconception selon Charter ( adaptée par Sherwin et Evans 1998).*

Tout comme Charter, Brezet a proposé une classification de l'écoconception (figure 1.12) selon l'amélioration de l'écoefficacité obtenue (Brezet et al. 2001) :

1. **Amélioration du système** : ce type d'écoconception correspond à des améliorations incrémentales du système. Elles sont considérées comme des solutions curatives qui cherchent à limiter les impacts déjà engendrés par la conception du système.
2. **Redéfinition du système** : ce type d'écoconception concerne des changements plus approfondis dans la conception du système afin de réduire son impact sur l'environnement mais le système maintient ses caractéristiques fondamentales et son mode de fonctionnement.

3. **Innovation fonctionnelle** : ce type d'écoconception cherche une redéfinition de la fonctionnalité du système pour réduire son impact environnemental. Cette étape implique sa substitution par un nouveau système qui réalise la même fonction. Ainsi, on cherche un système alternatif qui donne le même résultat mais avec des caractéristiques différentes que le système antérieur. Il est basé sur un concept de fonctionnement différent.
4. **Innovation du système** : ce type d'écoconception correspond à des changements plus radicaux. Cela peut se traduire par un remplacement total du système par des systèmes avec une écoefficacité supérieure. Dans ce cas, le concept du système est nouveau, l'utilisateur doit apprendre de nouvelles pratiques et une nouvelle infrastructure sera nécessaire. Par exemple, la substitution de véhicules à moteur à combustion interne par des systèmes qui utilisent du méthanol et de l'hydrogène implique une nouvelle structure du système et de nouvelles pratiques.

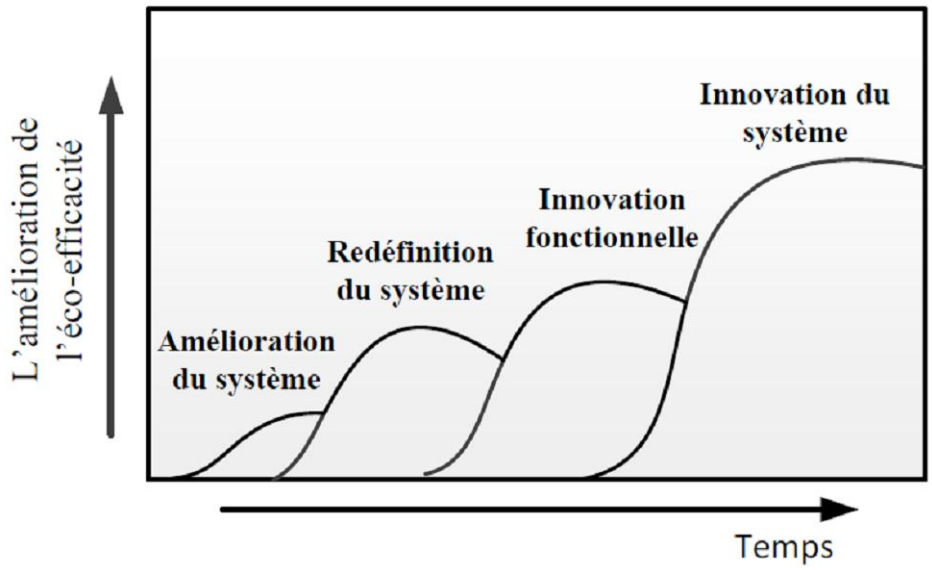



*Figure 1.12 : Classification de l'écoconception de Brezet (Brezet et al. 2001).*

Ainsi, les différents types d'écoconception décrivent les différentes modifications possibles qu'un système peut subir afin de réduire son impact environnemental. Il convient de noter que les deux classifications (Charter et Brezet) présupposent que les premières améliorations sont faites sur le système existant. Néanmoins, les différents types d'écoconception peuvent être aussi implémentés durant tout le processus de conception du système avec certaines restrictions selon le degré de liberté sur les décisions possibles. Ce dernier diminue à mesure que le processus de conception progresse. Ainsi, par exemple, dans l'étape de recherche de concepts on peut implémenter de véritables changements (Innovation du système) ou de simples améliorations. Par contre, dans l'étape de fabrication la liberté de décision est très limitée et on ne peut réaliser que de simples améliorations, figure 1.13. Cette situation implique que les changements les plus significatifs ne peuvent être réalisés que dans les étapes préliminaires de conception.

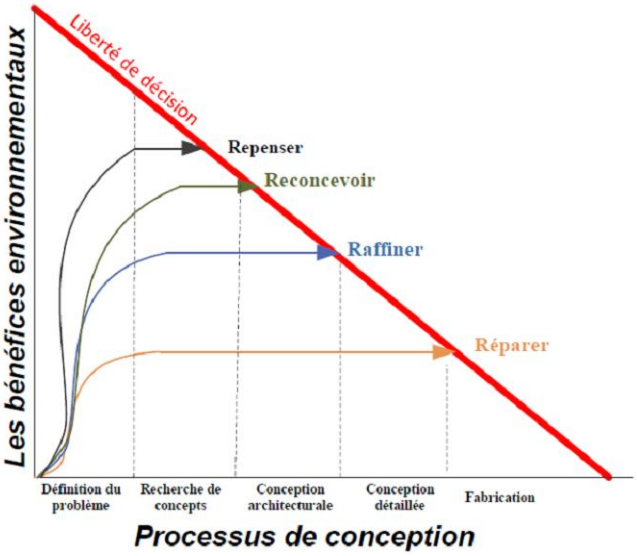



*Figure 1.13: Relations entre les types d'écoconception et les étapes du processus de conception.*

L'écoconception est un grand défi actuel pour toute entreprise. Néanmoins, différents outils pour la mise en œuvre ont été élaborés pour les différents types d'écoconception. Certains seront décrits dans la section suivante.

### 1.3.5 *Quelques outils d'écoconception*

Dans le but d'aider les concepteurs à intégrer les contraintes environnementales dans le processus de conception ou d'écoconception, plusieurs outils ont été développés parmi les plus communément utilisés, nous pouvons citer :

**Les outils pour l'évaluation et identification des impacts environnementaux :**

**Analyse de Cycle de Vie (ACV)** : C'est une méthode complexe et complète qui est largement utilisée pour évaluer les impacts environnementaux potentiels sur le cycle de vie complet d'un produit ou d'un procédé (Arvanitoyannis 2008). L'ACV est un support aux concepteurs dans la sélection de matières, matériaux ou des autres composants d'un produit (Bhamra et al. 1999). Pour ce faire, il est nécessaire de posséder une connaissance exhaustive et détaillée de l'ensemble des matières utilisées et de leur quantité. L'ACV est utile dans l'étape de conception détaillée. La définition des composants et les informations nécessaires pour réaliser une ACV sont seulement disponibles dans cette étape. En effet dans les étapes amont du processus de conception, il subsiste trop d'incertitudes et d'incomplétudes sur les données pour réaliser une ACV pertinente.

**Analyse Exergétique** : Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie chimique pour évaluer l'efficacité des flux de matières et d'énergie d'un procédé. Elle est souvent utilisée pour évaluer l'impact environnemental des systèmes et des procédés, pour détecter les améliorations possibles à exploiter sur un système (Asprion et al. 2011). Toutefois, elle ne fournit pas de solutions concrètes pour améliorer les systèmes, donc les solutions sont basées sur l'expérience des concepteurs.

**Analyse de l'Eco-valeur** : Cette méthodologie, qui est une extension de l'analyse de la valeur, est considérée plus globale car elle évalue chacune des fonctions désirées du système du point du vue de l'impact environnemental, des performances et des coûts (Sakao et al. 2006). Les résultats de cette évaluation sont des recommandations sur des fonctions à réaliser et celles à négliger. Le but de cette méthodologie est d'aider à la conception d'un système qui réponde aux exigences du client (à travers des fonctions à réaliser) avec un moindre coût économique et impact environnemental.

**Analyse des effets environnementaux** : Méthode qualitative, qui est une modification de l'analyse des modes de défaillances et de leur criticité, qui aide le concepteur à identifier et évaluer l'impact environnemental d'un produit dans les étapes préliminaires du processus de conception. Le but de cette méthode est de prévenir ou éliminer les effets environnementaux négatifs de façon simple et économique. Cette méthode est facile à apprendre et à utiliser, mais l'évaluation est très subjective ou parfois utilisée de façon incorrecte (Lindahl 2001).

**Analyse Pinch** : Basée sur des principes thermodynamiques, cette analyse est utilisée pour l'amélioration de la performance de différents processus de production en termes de conservation de l'énergie et de la réduction des déchets. Son objectif est d'identifier des courants qui ont besoin d'apport ou d'évacuation d'énergie et de les intégrer dans un même système. Cette analyse est également utilisée dans l'identification de pertes de pression, la production d'électricité par exemple. Néanmoins, cette analyse présente certains désavantages : besoin de données de bonne qualité, nécessité d'un haut niveau de compétences et d'expérience (Kumana 2002)

**Conception matricielle MET** : Cet outil permet d'évaluer de façon qualitative l'impact environnemental d'un système selon trois critères : les matériaux, l'énergie et la toxicité (MET). Le but est de faire émerger les problèmes environnementaux les plus importants sur l'ensemble du cycle de vie d'un système, puis de les utiliser pour définir des stratégies d'amélioration (Byggeth et Hochschorner 2006). Ainsi, les trois critères sont placés sur les lignes de la matrice et sur les colonnes les étapes du cycle de vie du système. A l'intersection sont décrits tous les types de problèmes environnementaux qu'un système pourrait causer. Un désavantage est la difficulté de définir tous les problèmes dans toutes les cellules de la matrice.

**Eco Check-list de conception** : Il s'agit d'une liste de contrôle composée d'une série de questions pour aider le concepteur à évaluer un produit ou un procédé d'un point de vue environnemental et sur l'ensemble de son cycle de vie. Toutefois, ces lignes directrices ne sont pas utiles pour la résolution de problèmes concrets (Sakao 2007). Un exemple d'un outil d'éco check-list est « Volvo's Black, Grey, and White Lists » qui contient les différentes substances chimiques qui ne peuvent pas être utilisées « liste noir », les substances dont l'utilisation doit être limitée « liste verte » et les substances permises ou qui peuvent êtres substituées par des substances issues d'autres listes « liste blanche » (Byggeth et Hochschorner 2006) .

**QFDE** : Le Déploiement des Fonctions Qualité pour l'Environnement est une méthode qui intègre les exigences du consommateur et les exigences

environnementales dès le début du processus de conception, ce qui permet d'identifier les options d'améliorations d'un point de vue environnemental (Sakao et al. 2001). La QFDE est divisé en quatre étapes : dans les phases 1 et 2, les exigences du consommateur et les contraintes environnementales sont mises en corrélation avec les fonctions de qualité. Ensuite elles sont associées aux composants du système à améliorer. Ces relations sont pondérées afin de définir les plus importantes selon certains objectifs, dans le cas présent, les objectifs environnementaux. Enfin les composants les plus importants sont considérés comme des unités fonctionnelles à améliorer. Dans la phase 3 les différentes solutions pour améliorer les unités fonctionnelles sont générées et dans la phase 4 les solutions sont évaluées par rapport aux exigences définies dans la phase 1. Un désavantage de la méthode est que le processus de la proposition de solutions est basé sur les expériences du concepteur.

**L'éco compas** : Cet outil se présente sous la forme d'un schéma en toile d'araignée et permet de réaliser une évaluation des nouvelles solutions de conception par rapport à la conception originale (où le modèle de base) à travers 6 critères environnementaux et de conception : intensité des matériaux, Intensité énergétique, extension des fonctions et des services, risque sur l'environnement et la santé, conservation des ressources et réutilisation et valorisation des déchets. Ainsi, l'évaluation se réalise selon le pourcentage d'amélioration ou de dégradation en utilisant une échelle de 1 à 5 où le système actuel est situé au niveau 2. Si la solution proposée dégrade un critère on le rétrograde à la valeur 1 mais s'il existe une amélioration, on l'augmente proportionnellement au pourcentage d'amélioration, c'est-à-dire, un impact double (valeur 3), triple (valeur4) etc. ..(Fussler 1997).

**Roue des stratégies de l'écoconception** : En anglais «Life-cycle Design Stratégie-Wheel » (Brezet et Hemel 1997). Cette roue sert pour diagnostiquer l'état actuel d'un système pour stimuler de nouvelles idées sur la façon dont un système peut devenir plus écologique en suivant des stratégies d'écoconception. Ainsi, au travers de 8 axes d'évaluation il est possible de définir les orientations à suivre afin de réduire les impacts environnementaux. Ces axes sont : 1) Développer des nouveaux concepts, 2) Choisir des matériaux à faible impact, 3) Réduire l'utilisation de matériaux, 4) Optimiser les flux de matières, 5) Optimiser la distribution, 6) Réduire les impacts liés à l'utilisation, 7) Améliorer la durée de vie du produit et 8) Favoriser son traitement en fin de vie.

**Les outils pour la génération de solutions:**

**Guidelines de conception** : Ce sont différents guides qui contiennent des principes, orientations, normes et outils pour fournir une aide aux concepteurs sur les aspects environnementaux à prendre en compte dans le conception d'un produit (Knight et Jenkins 2009). Les guidelines peuvent être divisés en 4 stratégies principales : conception pour la dématérialisation, conception pour la désintoxication, conception pour la revalorisation et conception pour la protection du capital et renouvellement (Fiksel 2009). Un exemple de ce type de guidelines est le Design for Environnement proposé par bombardier qui est basé sur les 10 règles d'or de Luttropp (Lagerstedt et Luttropp 2006). Un désavantage de ce type de guidelines est qu'ils ne proposent pas des guides sur les outils spécifiques à utiliser lorsque le concepteur est confronté à des problèmes concrets (Sakao 2007).

**L'optimisation multicritère** : C'est une méthode couramment utilisée dans l'écoconception des procédés industriels dont les variables environnementales sont traitées comme des contraintes de l'optimisation, avec au même niveau d'importance que d'autres contraintes comme le coût et le profit. Elles peuvent également être traitées comme des objectifs dans la sélection et conception d'un procédé tout en considérant la faisabilité économique. Parmi les désavantages de l'optimisation multicritère, on peut citer : le besoin de données de bonne qualité, sa difficulté d'utilisation dans les étapes préliminaires de la conception, sa dépendance à la superstructure définie à priori.

**Théorie de résolution de problèmes inventifs :** (TRIZ en est l'acronyme russe). Bien que la théorie TRIZ dans sa forme classique ne soit pas un outil spécifiquement dédié à l'écoconception, des concepts comme l'idéalité peuvent être parfaitement adaptés au concept d'écoefficacité. En effet le système idéal est le système qui n'existe pas alors que la fonction est réalisée, il a donc un coût environnemental nul. Certes entre la vision idéale et la réalité, il y a un fossé mais la solution va bien vers une économie de moyen. L'utilisation des ressources y participe également, car elle permet de résoudre un problème en utilisant son environnement.
De plus, TRIZ permet de « prévoir » le futur développement d'un système technique et d'améliorer les paramètres de performance d'un système sans dégrader les autres. Ainsi les lois d'évolution participent chacune à leur façon à cette démarche. De même, la vision multi écrans permet d'étudier les différentes étapes du cycle de vie du produit. Ainsi dans une démarche d'écoconception, TRIZ a sa place pour atteindre des solutions à la fois innovante et économe en ressources. Il existe des outils qui intègrent des éléments de la théorie TRIZ pour construire des systèmes d'aide à l'écoconception comme, par exemple, Eco-MAL'IN proposé par Samet (Samet 2010).

### 1.3.6 *Le processus d'écoconception dans les étapes préliminaires*

Pour aboutir à des améliorations environnementales qui facilitent l'évolution à travers les différentes étapes de la production durable, l'écoconception doit être adaptée pour devenir une partie naturelle du processus de conception et de préférence le plutôt possible dans ce processus (Lagerstedt 2003). Cette affirmation est soutenue par différents auteurs (Bhamra et al. 1999), (Luttropp et Lagerstedt 1999), (Lindahl 2006). En effet, les étapes préliminaires de la conception sont des étapes critiques où les critères environnementaux doivent être considérés et intégrés car entre 80 % et 90% des coûts économiques et environnementaux d'un système sont définis dans ces étapes. En revanche, dans les étapes suivantes il devient extrêmement difficile de réaliser des modifications sur les performances environnementales des systèmes (Sherwin et Evans 1998). Selon la norme ISO/TR 14062 l'intégration des aspects environnementaux dans la conception d'un produit et le développement d'un procédé doit être réalisée le plus tôt possible afin de faciliter la flexibilité, de faire des changements et des améliorations (Kengpol et Boonkanit 2011). En conséquence, il est préférable de prendre en compte les aspects environnementaux dans les étapes préliminaires au travers l'utilisation d'outils existants ou le développement de nouveaux outils afin de faciliter la démarche d'écoconception. Néanmoins, ceci

implique un grand défi car cette intégration présente plusieurs difficultés détaillées dans la section suivante.

### 1.3.7 *La problématique de l'écoconception dans les étapes préliminaires de la conception.*

Dans l'écoconception, il existe également des obstacles :

- Plusieurs méthodes et outils d'écoconception ont été développés pour réduire l'impact environnemental des produits ou procédés. Néanmoins, la plupart d'entre eux sont centrés sur l'amélioration (l'optimisation) et la ré-conception incrémentale (Chang et Chen 2004). Les solutions proposées atteignent rapidement leurs limites, seulement surmontables par une innovation de rupture. En conséquence le développement d'outils permettant de générer des concepts avec un haut degré d'innovation est nécessaire.
- Le manque d'information détaillée et le grand niveau d'ambiguïté et d'incertitude du produit ou procédé sont des caractéristiques de l'étape préliminaire de conception (Lagerstedt 2003), (Scaravetti 2004). Mais la plupart des outils d'écoconception exigent un grand nombre d'information, comme par exemple l'analyse du cycle de vie, pas toujours disponible en conception préliminaire (Bhamra et al. 1999). Il est donc indispensable de disposer des outils capables de générer des solutions inventives tout en intégrant ces difficultés sur la quantité et la qualité de l'information.

Comme on peut le noter, l'écoconception exige la mise en œuvre de solutions innovantes et de préférence dans les étapes de conception préliminaire. Dans cette phase, l'étape de recherche de concepts est primordiale car les concepteurs y génèrent des concepts de solutions qui seront ensuite évalués, puis les ou la solution retenue sera étudiée plus en détail dans l'étape de conception architecturale. Néanmoins, une démarche d'écoconception dans l'étape de recherche de concepts est considérée comme risquée car le passage de l'idée au concept, puis à un objet exige la prise de décisions en se basant sur de la connaissance incertaine et incomplète et surtout elle s'appuie sur l'expérience du concepteur. De plus, sur les aspects environnementaux ces connaissances et expériences sont parfois très faibles et le risque est d'autant plus important. Donc, le vrai défi est d'un côté l'implémentation de l'écoconception pour une production durable dans l'étape de recherche de concepts et de l'autre développé un outil capable de supporter l'écoconception avec des solutions innovantes dans cette étape.

## 1.4 CONCLUSION

Les feuilles de route, telles que Pipame (2010), SusChem (2011) et les Technologies clés 2015 (2011), ont toutes encouragé les ingénieurs des industries des procédés à déployer des approches écoinnovantes afin de soutenir à la fois une production durable et intelligente (innovation et connaissance). Mais comme le souligne Venselaar sur la transition vers un génie des procédés durable : « *on peut le faire, c'est souvent rentable sur le long terme mais ça ne se fait pas* ». Cependant, trois stratégies 'durables' sont connues :

- le 'saupoudrage vert / greenwashing', qui privilégie la communication à l'action d'ingénierie,

- le 'verdissement / greening' qui rassemble la substitution de molécules et l'amélioration des procédés,
- la 'ré-ingénierie' qui suppose une réévaluation des besoins et des solutions possibles à la lumière du contexte durable.

Malgré son intérêt pour la production durable, la pratique de ré-ingénierie est peu fréquente en génie de procédés. Visant de nouveaux produits et procédés, elle augmente leur risque opérationnel et financier. De plus, l'intervention même des ingénieurs en chimie et génie des procédés est encore trop centrée sur la recherche de solutions strictement technologiques et trop peu consciente des dimensions socio-économiques et environnementales indissociables de la perspective globale d'un développement durable. Il faut donc constater le manque de travaux de recherche conjuguant les points de vue procédés et écoinnovation. D'où l'absence de méthodologies et d'outils pouvant accélérer ces industries dans leur transition. L'objectif de ce travail est donc de construire un cadre formel et des outils pour un génie des procédés écoinnovant. Ces méthodes et ces outils offriront une réponse plus efficiente aux futurs problèmes à travers un meilleur partage et une meilleure gestion des savoirs, de la connaissance et de l'innovation. Ce cadre devra également favorisait une collaboration plus systématique entre l'ensemble des acteurs impliqués, pour résoudre les problèmes d'écoinnovation dans les industries du génie des procédés. Mais avant de présenter les fondements de la démarche proposée, il convient de s'intéresser à une synthèse bibliographique des travaux en innovation et écoinnovation en génie des procédés.

CHAPITRE 2

# DE L'INNOVATION A L'ECOINNOVATION POUR UNE PRODUCTION DURABLE

## 2.1 INTRODUCTION

Dans le domaine du Génie des Procédés, les industries de transformation de la matière et de l'énergie ont admis le principe des 3P (Peuple, Profit, Planète). Celui-ci stipule que le développement durable passe obligatoirement par des progrès simultanés dans les trois domaines suivants : économie, environnemental et social (figure 2.1). Ce principe des 3P a pour conséquence directe d'imposer des contraintes sur les procédés :

- Contraintes sociétales : sécurité, respect de l'environnement…
- Contraintes économiques : diminution des coûts de production, de maintenance…
- Contraintes techniques : exigence de qualité, de flexibilité, de traçabilité…

Dans cet environnement très contraint, les systèmes de production sont constamment complexifiés et il devient souvent difficile de les concevoir. Le moindre défaut de conception peut s'avérer néfaste et générer des conséquences irréversibles sur l'une des contraintes précédentes : non-respect de normes environnementales, surcoûts, défauts de qualité. L'expansion des activités économiques est forcément accompagnée d'un effort environnemental croissant, incluant les problèmes énergétiques, de sécurité, de diminution des ressources… Dans ce contexte industriel sensible, l'innovation et l'écoinnovation sont une aide pour passer d'une vision de la croissance verte en une réalité car elles sont la clé du développement et du déploiement de technologies plus respectueuses de l'environnement.

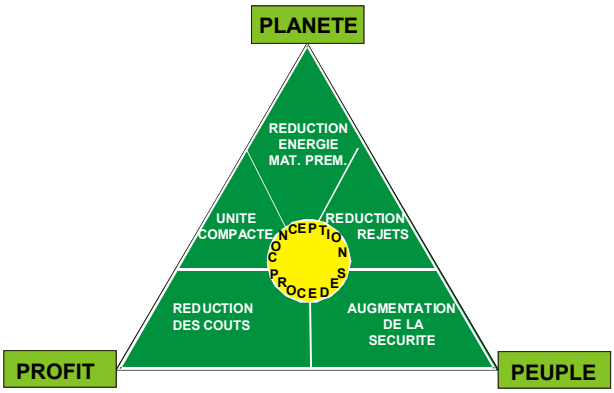



*Figure 2.1: Principe des 3P.*

Pour comprendre l'apport de l'écoinnovation pour la production durable, il faut commencer par aborder l'innovation et la façon dont elle est traitée en génie des procédés. Dans une seconde partie ce chapitre se focalisera plus spécifiquement sur l'écoinnovation et dressera un état de l'art de la recherche sur ce sujet. La dernière partie positionnera la problématique de ce travail de recherche par rapport à cet état de l'art.

## 2.2 L'INNOVATION

L'innovation est fondamentale pour le développement de la société et la rénovation du domaine industriel (Hüsig et Kohn 2009). Elle est considérée comme la source du progrès technologique et de la croissance économique car elle signifie la transformation d'une idée vers un produit, procédé ou service commercialisé (Chandy et al. 2006). Cette transformation implique d'un côté une modification ou une amélioration de ce qui existe déjà, de l'autre la création et l'introduction sur un marché d'un concept nouveau.

### 2.2.1 *Définition*

Le terme innovation peut paraître assez flou à cause d'une part à une confusion entre innovation, invention, découverte scientifique et d'autre part à cause de l'ambigüité sur le terme lui-même qui peut désigner à la fois le système, le processus voire les deux.
Le terme innovation a donné lieu à de multiples définitions. Selon l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE 2005), l'innovation se définit *"comme l'ensemble des démarches scientifiques, technologiques, organisationnelles, financières et commerciales qui aboutissent, ou sont censées aboutir à la réalisation de produits ou procédés technologiquement nouveaux ou améliorés."* Un produit nouveau fait référence à un produit dont les caractéristiques technologiques ou les utilisations prévues présentent des évolutions significatives par rapport aux produits actuels : technologie radicalement nouvelle, technologie existante mais avec de nouvelles applications. Par exemple : le lancement d'un nouveau détergent utilisant une formule chimique existante qui n'était utilisée auparavant que comme intermédiaire pour la production de revêtements.
Un produit amélioré est un produit existant dont les fonctionnalités sont augmentées ou les performances accrues (utilisation de composants plus performants, modification partielle de ces propriétés). L'innovation technologique de procédé porte sur des modifications sur les équipements, sur le mode et l'organisation de la production y compris l'ensemble de la chaîne logistique.

Une définition plus récente de l'innovation est celle du Manuel d'Oslo : l'innovation peut se décrire comme la « *mise en œuvre de produits (bien ou services), procédés, méthodes de commercialisation ou méthodes organisationnelles dans les pratiques de l'entreprise, le lieu de travail ou les relations extérieures nouveaux ou sensiblement améliorés* » (OECD 2010). Cependant la définition qui semble être partagée par l'ensemble du monde industriel est la suivante : « *L'innovation permet à toute entreprise ou organisation d'avoir un avantage substantiel sur un marché grâce une évolution significative dans son organisation (via des méthodes ou outils) ou par la délivrance sur un marché d'un produit, procédé ou service nouveau augmentant la satisfaction de chacun et de se positionner par rapport à la concurrence* ». Une innovation sera accomplie dès lors qu'elle a été introduite sur un marché (innovation produit) ou utilisée dans un procédé de production (innovation procédé), ou dans un processus d'organisation (innovation processus). Elle est donc en liaison directe avec la réussite sur un marché. En effet, ce dernier en est le juge de paix car il valide l'innovation : parce qu'elle répond bien à un besoin identifié ou exprimé et parce que

la démarche utilisée a bien répondu aux exigences. Suite à cette définition et d'après (Boldrini, 2005), trois points principaux émergent :

- Pas d'innovation sans réussite sur un marché.
- Pas d'innovation sans conception.
- Pas d'innovation sans processus d'innovation au sein d'une entreprise innovante.

L'activité d'innovation peut s'analyser autour de trois dimensions (OECD 2010):

1. **La cible** : elle fait référence à l'objet de l'innovation. Elle peut faire référence au produit (bien ou service), au procédé (mode de production), au processus (organisation et pilotage des activités), ou au modèle économique.
2. **Le mécanisme** : il traduit le degré de changement sur la cible. Qu'il soit technologique ou non, le changement peut être qualifié de modification (amélioration mineure), reconception (changement significatif, ajout de nouvelles fonctionnalités), alternative (substitut aux systèmes existants offrant de meilleures performances ou ouvrant de nouveaux marchés), création (système complètement nouveau).
3. **L'impact** : il sert à mesurer les effets de l'innovation suivant des critères prédéfinis : économiques, sécurité de fonctionnement, environnement…

Néanmoins, la définition précédente n'indique pas le degré d'innovation, c'est-à-dire la profondeur des transformations engendrées. Classiquement, la graduation de l'innovation est réalisée selon deux catégories (Dewar et Dutton 1986) : innovation incrémentale ou de rupture. La principale différence entre les deux types d'innovation est la nouveauté des connaissances intégrées dans une innovation. En effet, l'innovation incrémentale d'un système utilise des connaissances dans son propre domaine technologique. Au contraire, l'innovation radicale utilise des connaissances d'autres domaines ou des connaissances basées sur une nouvelle découverte (Dewar et Dutton 1986). La classification de (Henderson et Clark 1990) et (Tushman et O'Reilly 2002) va au-delà de la simple différentiation classique entre innovation incrémentale et innovation de rupture. Ces auteurs proposent quatre catégories, de l'innovation de la plus mineure à la plus significative 'que l'on peut relier à la dimension liée au mécanisme) :

- Innovation incrémentale : l'amélioration porte sur un des sous-systèmes du système mais ne touche ni aux fonctionnalités principales ni à l'architecture (et aux liens entre sous-systèmes) du système. Elle relève de l'amélioration continue de produits ou procédés dans le cadre de trajectoires d'évolution déjà définies. Elle cherche souvent à répondre aux exigences dictées par le marché afin de satisfaire au mieux les clients.
- Innovation modulaire : un sous-système nouveau ou un concept nouveau est introduit.
- Innovation architecturale : il s'agit d'une reconfiguration du système existant, les sous-systèmes sont assemblés différemment et peuvent être modifiés suite à ces changements.
- Innovation par rupture : c'est une rupture par rapport à la technologie existante (déviation de la trajectoire initiale de développement). Elle est en général le résultat de recherches à long terme. Ce type d'innovation est plus de l'initiative de l'entreprise et plus particulièrement de sa R&D.

Toutefois, les innovations majeures ne représentent qu'un faible pourcentage des innovations à cause du délai de création et du coût financier de R&D. Suite à son analyse de brevets (Altshuller 1996) a classé les brevets selon 5 niveaux d'inventivité, et il constate que les inventions incrémentales constituent 77% des avancées technologiques, 23% pour les inventions majeures. Il faut également souligner que très souvent, une invention par rupture génère de nombreuses inventions incrémentales (inventions en grappes). Pour un produit, elle peut conduire à une période prolongée de progrès important. L'analyse d'Altshuller indique également qu'une grande partie des problèmes rencontrés dans un domaine ont déjà été résolus dans un autre domaine. Par conséquence, le transfert et la réutilisation des connaissances d'un domaine technologique à un autre peuvent s'avérer très utiles pour proposer des solutions nouvelles afin d'améliorer les systèmes techniques (Terninko et al. 1998). Dans ces conditions, une méthode qui faciliterait ce transfert et cette réutilisation serait d'une grande importance pour aider les concepteurs à proposer des concepts inventifs et pour accélérer le processus de génération d'idées.

Une entreprise doit mener de front plusieurs politiques d'innovation une plutôt incrémentale ou modulaire l'autre architecturale ou par rupture. Avec la première, elle fidélise ses clients et assure sa bonne santé financière sur le court terme. L'importance économique de l'innovation incrémentale a été trop souvent sous-estimée. Une entreprise peut avoir une supériorité en R&D et néanmoins perdre du terrain par rapport à ses concurrents. Inversement, une entreprise peut devenir leader sur un produit sans avoir eu l'idée originale mais parce qu'elle propose des innovations incrémentales (sur le produit, sur sa production…) qui lui procure des avantages concurrentiels. Mais à trop mettre l'accent sur l'innovation incrémentale, elle s'expose à l'arrivée sur le marché de nouvelles générations de produits concurrents. Par conséquent, elle doit également initier un programme d'innovation plus en profondeur pour proposer des technologies radicalement nouvelles en intégrant la possibilité que ces nouvelles générations de produit rendent obsolètes les produits existants. L'innovation par rupture est souvent synonyme de prise de risques importants. Par frilosité, certaines entreprises hésitent à prendre ces risques préférant rester dans la satisfaction des exigences clients ce qui les fragilise et génère des difficultés sur le long terme (Christensen, 2003). L'innovation constitue donc l'un des leviers pour la compétitivité des entreprises, mais elle doit être répétée et entretenue pour pérenniser l'activité d'une entreprise (Hatchuel et Le Masson 2001).

### 2.2.2 *Processus d'innovation*

Le processus d'innovation regroupe un ensemble d'activités complexes et diversifiées. Sous le terme activité, on regroupe l'ensemble des démarches scientifiques, technologiques, organisationnelles et commerciales qui mènent à la réalisation d'un produit ou d'un procédé innovant. Initialement, le processus d'innovation était considéré comme purement linéaire avec comme point de départ la recherche scientifique allant progressivement d'étape en étape jusqu'à la commercialisation. Dans ce modèle, l'innovation prend sa source dans les activités de recherche fondamentale : modèle d'innovation poussée par la science (science push) ou la technologie (Technological Push), (Dodgson 2000). Ce processus conduit à des problèmes de délai et de qualité car les acteurs intervenant

linéairement, ils se focalisent uniquement sur leurs préoccupations. Ce processus plus approprié à l'innovation dite par rupture, nécessite une étape primordiale d'anticipation de futures technologies et besoins. Le risque d'échec est important si le besoin a été mal anticipé ou erroné, ou si le produit n'arrive pas dans la bonne fenêtre temporelle sur le marché.
Le second modèle linéaire a été construit suite à l'analyse d'innovations développées pour satisfaire une demande du marché (Demand Pull Model). Ce modèle s'apparente plus à l'innovation incrémentale pour des améliorations sur le court terme (Fernez-Walsh 2001). L'inconvénient majeur de ces deux modèles provient de la linéarité de leurs processus. En effet, de par la diversité des activités et des acteurs, en réalité ces processus comportent de nombreuses boucles de rétroactions (OCDE 2005 et MacGregor et al. 2006).
Actuellement, les modèles de processus d'innovation sont appréhendés comme un processus de transformation de la connaissance (Roper et al. 2008), avec des grandes étapes clés : sourcer la connaissance, transformation physique de la connaissance, génération de plus-value par exploitation de l'innovation. Basé sur les travaux précédents (Penide et al. 2010) proposent le modèle le plus générique et abouti, figure 2.2. Dans ce modèle chaque processus de réalisation est ponctué par un jalon qui permet de statuer sur l'activité « a priori achevée » et ainsi définir la suite du processus : arrêt de celui-ci, passage au processus de réalisation suivant, rétroaction vers un processus de réalisation précédent…(le processus global, les sous processus et les jalons sont détaillés dans l'article).
Bien que volontairement macroscopique (afin d'être générique) ce processus comporte de nombreux avantages :

- Il peut s'appliquer autant à l'innovation incrémentale que par rupture. La différence majeure est prise en compte au niveau du flux d'entrée du processus ('problèmes rencontrés' ou 'idées, intention'). Suite au jalon d'évaluation de la problématique, si une solution innovante peut être facilement identifiée, il n'est pas nécessaire de dérouler l'ensemble du processus.
- Il s'appuie sur la connaissance pour générer des innovations. Or, lors de son analyse de brevets (Altshuller 1996) a constaté que les innovations découlaient d'un nombre limité d'invariants de conception. En effet, 95% des inventions sont transférables d'une discipline à l'autre. Il faut donc identifier cette connaissance et surtout la transformer et l'adapter à la problématique rencontrée.
- Ce processus a été bâti en s'appuyant sur un exemple du génie des procédés, et plus particulièrement sur de la chimie fine avec le développement d'un nouveau médicament. Par conséquent, il est particulièrement adapté à notre domaine d'application.

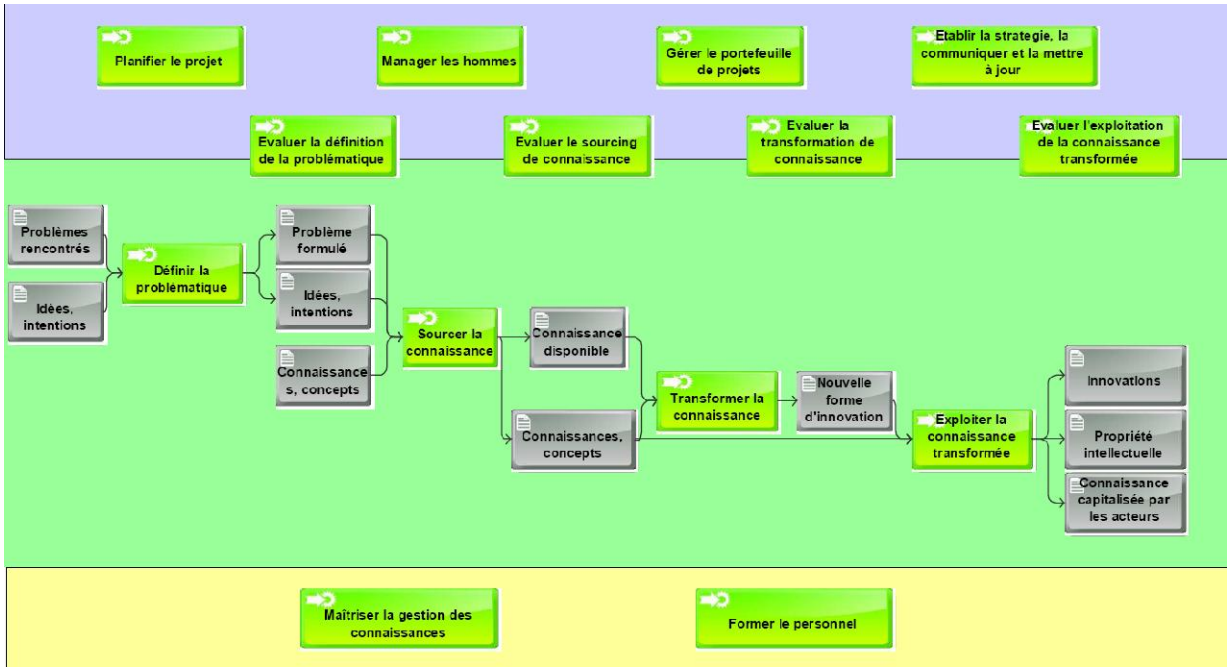



*Figure 2.2: Processus d'innovation selon (Penide et al. 2010).*

### 2.2.3 *L'innovation en Génie des Procédés*

Lors du lancement d'un nouveau projet de conception, la question de l'effort d'innovation plutôt orienté produit et/ou procédé apparait inéluctablement. Pour illustrer ce propos, la figure 2.3 reprend les phases initiales du processus de conception classiquement utilisé en génie des procédés. Dans une approche générale, (Cooper 2005) a proposé une démarche de conception intégrant les aspects produits, procédés et technologiques dès les premières phases de la conception. (Seider et al. 2010) ont adapté cette démarche pour le génie des procédés et l'ont déclinée pour chaque type de produits chimiques.

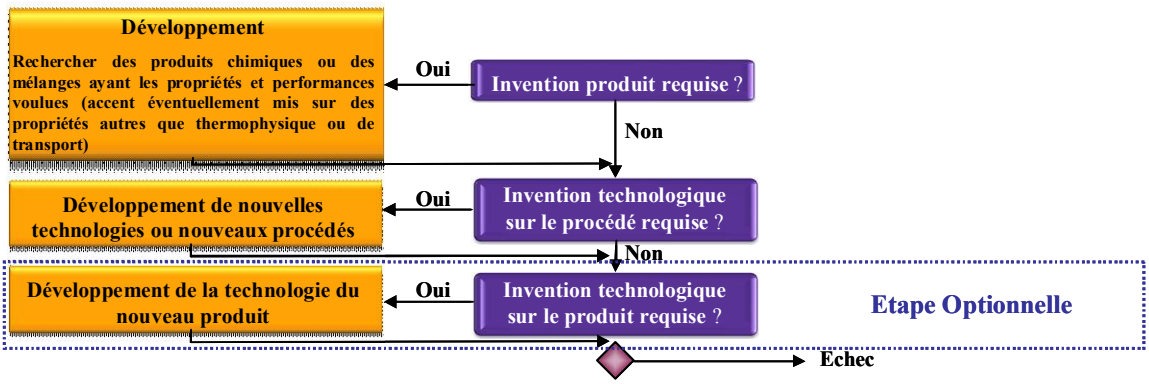



*Figure 2.3: Etapes initiales de la démarche de conception (Seider et al. 2010).*

Les produits de base et les produits industriels passent par les deux premières interrogations de la figure 2.3 puis continuent le processus de conception. En

revanche, pour les produits dédiés à la grande consommation, une étape additionnelle peut être requise.

**Produits de base**

De nombreux produits chimiques, et plus particulièrement les produits de spécialité, sont fabriqués en petite quantité, la conception cherche à identifier les produits ou mélanges qui auront les propriétés désirées : résistance, porosité, efficacité du principe actif… Le challenge est ici plutôt orienté vers la recherche de molécules, matériaux ou mélanges appropriés pour satisfaire des spécifications qui correspondent étroitement aux besoins client (film de polymère qui protège les appareils électroniques ayant un fort échange thermique et une faible solubilité à l'eau, solvant respectueux de l'environnement, lubrifiant à faible viscosité…). La production est souvent réalisée avec un procédé discontinu avec rarement des inventions associées.

D'autres produits de base sont fabriqués en grande quantité dans des procédés continus. Comme ils englobent des molécules bien définies dans des appareils bien connus, la conception a plutôt comme objectif d'améliorer les procédés existants par l'introduction de nouvelles technologies issues des avancées générales en génie des procédés mais rarement grâce à une invention spécifique à ces procédés.

Pour cette catégorie, l'innovation est très centrée sur le produit. Même si elle est présente, l'innovation procédé reste mineure.

**Produits Industriels**

L'élaboration de polymères organiques pour les semi-conducteurs compatibles avec les échelles de taille des composants électroniques, la fabrication de microsphères (diamètre de 50-100 µm) pour contrôler la libération de pesticides (ou médicaments), substrats de verre minces avec des propriétés spécifiques (surface parfaitement lisse, résistance aux rayures, faible déformation notamment à la température…) pour les écrans LCD, sont autant d'exemples qui démontrent le besoin en invention sur les produits. Cependant pour atteindre ces propriétés désirées, il est souvent nécessaire d'inventer ou d'améliorer des technologies de production : micro-mélange, micro-émulsion stable, appareil avec fort débit d'extrusion pour obtenir des diamètres ou épaisseurs uniformes… Pour cette catégorie de produit, l'innovation touche à la fois les produits et les procédés. A noter que l'innovation en procédé n'est pas exclusivement une conséquence de l'innovation produit. La réciproque est tout aussi vraie, les inventions sur certains procédés ont permis d'améliorer les produits (amélioration d'un extrudeur qui permet la production de fibres rainurées).

**Produits de grande consommation**

Les produits précédents sont ensuite modifiés soit pour être soit directement vendus, soit pour être intégrés en tant que sous-système dans un système plus complexe. Afin de satisfaire les exigences des clients, il est alors nécessaire de revoir voire d'inventer de nouveaux dispositifs de production pour obtenir la configuration adéquate du produit ce qui inclut : la formulation du produit chimique industriel qu'il faut parfois adapter aux produits spécifiques, l'introduction de (ou en tant que) dispositifs secondaires ou de soutien qui font partie intégrante de la formulation du produit final. A titre d'exemple : sur un appareillage nouveau mettre en place les capteurs et le système d'alarme pour piloter l'opération, pour les écrans flexibles mise en place de réseaux de transistors en couches minces en utilisant un polymère semi-conducteur…

A noter que ces modifications ne sont pas du domaine de la chimie mais bien du génie des procédés et du génie industriel car elles permettent aux produits issus de l'industrie chimique de répondre aux exigences du marché de par leur mise en forme, leurs propriétés...
Au travers des nouveaux médicaments, carburants, cosmétiques, produits agroalimentaires, produits à usage direct (colles, détergents), le génie des procédés génèrent des innovations en proposant des propriétés nouvelles, des usages nouveaux, moins d'effets secondaires… Ce type de produits offre de nouvelles opportunités pour l'innovation produit et procédé.

### 2.2.4 *L'innovation basée sur les connaissances*

Les connaissances scientifiques et techniques constituent les points d'appui essentiels du processus d'innovation (OCDE 2005). Que la source des connaissances soit externe (open innovation) ou interne, l'entreprise cherche à les transformer et à les adapter à ses problématiques de façon à produire des innovations ainsi que de nouvelles connaissances. Dans le processus de la figure 2.2, la connaissance apparait clairement dans le sous processus de réalisation et surtout dans les activités de support.
Dans l'innovation, il y a une interaction entre les possibilités du marché (traduites sous forme d'une problématique) et la base de connaissances de l'entreprise. Cette dernière étant constituée à l'aide de recherches et de développements antérieurs (théoriques et pratiques). Lorsqu'un nouveau problème est identifié, dans un premier temps l'entreprise puise dans sa propre base de connaissances puis élargit sa recherche vers des sources externes ; base de brevets, littérature scientifique, expertise, laboratoires de recherche, entreprises… En cas de succès de résolution, la base interne est enrichie de façon à pouvoir transmettre des connaissances scientifiques actualisées et des évolutions technologiques de pointe.

Pour innover, d'une part et à cause de la complexité grandissante des problèmes techniques d'autre part, les ingénieurs doivent faire appel à un large corpus de connaissances. Placée au cœur du processus d'innovation, la connaissance de conception peut se classer en trois catégories : connaissance sur le système, sur la méthode de conception et enfin sur le processus. Les connaissances sur le système ont été largement étudiées via différentes techniques de modélisation des connaissances : modèles mathématiques, techniques d'intelligence artificielle. La plupart d'entre elles sont spécifiques à un produit donné. Avec l'évolution rapide des technologies, il est plus avantageux de capitaliser sur la méthode de conception que sur le système lui-même, car la technologie devient rapidement obsolète. Sur cet aspect également des techniques issues de l'intelligence artificielle sont largement présentes dans la littérature. Actuellement la recherche sur la gestion des connaissances dans le processus de conception se scinde en deux niveaux : les activités de conception et la logique de conception (Zha et Dhu 2006). Les matrices DSM (Design Structure Matrix) ont été créées pour modéliser les activités de conception (Bonjour 2006) avec des efforts de recherche pour les faire évoluer. La recherche sur la logique de conception étant plus complexe, peu d'études se sont intéressées à ce sujet (Zha et Dhu 2006).
La conception d'un produit ou d'un procédé pose obligatoirement la contradiction suivante : les concepteurs doivent être peu contraints de façon à être créatifs et doivent être contraints pour répondre aux exigences du problème.

Dans les projets d'innovation, les possibilités de choix sont très ouvertes, par conséquent les risques liés à l'incertitude et à l'incomplétude sont très importants. Ceci se traduit par un intérêt croissant vers le besoin d'instrumentation dédiée aux phases amont du projet c'est-à-dire vers la phase de recherche de concepts. Cette phase devient déterminante dans la réussite d'une invention car elle conditionne à plus d'un titre l'avenir du produit ou procédé (Lenfle 2004).
La transformation et l'adaptation des connaissances nouvelles mobilisent de nombreuses ressources (OCDE 2005), (Penide et al. 2010) :

- Des experts métiers aux compétences diversifiées.
- Des outils de génération d'idées, de simulation ainsi que du matériel pour fabriquer les produits désirés, les prototypes et pour les campagnes d'essais et tests.
- Des outils de gestion des connaissances pour la capitalisation et la réutilisation.

Les activités de conception sont devenues une partie cruciale du processus d'innovation (Perrin 2001). Cependant, la conception innovante n'est étudiée que depuis peu par les chercheurs voire très ponctuellement en génie des procédés. L'activité de conception innovante est complexe et décisive. Toutefois, c'est à travers elle que les solutions à mettre en œuvre sont déterminées afin de réaliser un système conforme aux exigences. De nombreuses décisions sont arrêtées durant cette activité. Remettre en cause l'un des choix génère un allongement conséquent de l'activité de conception. Il est donc primordial de réaliser des choix judicieux pour éviter d'itérer et pour converger plus rapidement vers une solution pertinente. Or l'exploitation de l'expérience et la connaissance acquises lors des conceptions antérieures permet de diminuer fortement les délais puisque lorsqu'on vise des innovations incrémentales, modulaires voire architecturales certains choix ne sont plus ni à faire, ni à remettre en cause. A noter que plus le degré d'innovation recherché est élevé moins il est souhaitable de s'appuyer sur les conceptions antérieures. Dans ce contexte, il est souhaitable de disposer d'approches et d'outils d'aide à la conception exploitant connaissances et savoir faire. Les entreprises considèrent la connaissance comme le principal moteur de l'innovation (Nonaka et Takeuchi 1995) et comme un composant essentiel dans le processus de conception. Malgré la prise de conscience de l'apport concurrentiel que peut générer un système de gestion des connaissances mais peu d'entreprises se lancent dans la mise en place d'un tel outil. La raison principale est qu'il faut un temps considérable pour extraire, formaliser, actualiser et maintenir cette connaissance. De plus un tel projet ne génère pas une valeur ajoutée immédiate et donc devient très coûteux par rapport à la réalité économique basée sur du court terme.
Néanmoins, la connaissance est à l'origine d'un paradoxe présenté sur la figure 2.4. Au début du processus de conception d'un système technologique, la connaissance dont on dispose sur le système est limitée, c'est-à-dire, il existe des imprécisions et incomplétudes sur les données et la connaissance disponibles. C'est d'autant plus vrai, lorsqu'on cherche à innover. Puis, le déroulement des étapes du processus conduit à un accroissement de la connaissance et de la précision des données sur le système. Enfin, quand le concepteur arrive à l'étape finale du processus de conception, il possède une grande connaissance du problème, en revanche, le degré de liberté sur les décisions diminue au fur à mesure des étapes de conception. Au début le concepteur possède une grande liberté parce que peu de décisions ont été prises, mais lorsqu'on aborde l'étape de fabrication le moindre changement génère des coûts conséquents. Donc, le paradoxe du processus de

conception s'exprime comme : « *Plus on apprend, moins on a de liberté pour utiliser ce que l'on connait* ». Ainsi, il est préférable de générer une grande quantité de connaissances et de données sur un système dès les premières étapes de la conception pour anticiper le plus en amont possible les changements afin de limiter les risques et les coûts liés à ces changements (Ullman 2009).
L'imprécision et le type des variables nécessaires dans les étapes de conception déterminent le type de méthodes et outils développés et utilisés dans chacune d'entre elles. A titre d'exemple, dans l'étape de clarification du problème où les variables sont linguistiques des méthodes telles que la matrice de développement des fonctions qualités sont utilisées. Au contraire, dans la phase de conception détaillée où les variables sont numériques des modèles phénoménologiques ou des modèles d'optimisation sont souvent nécessaires.

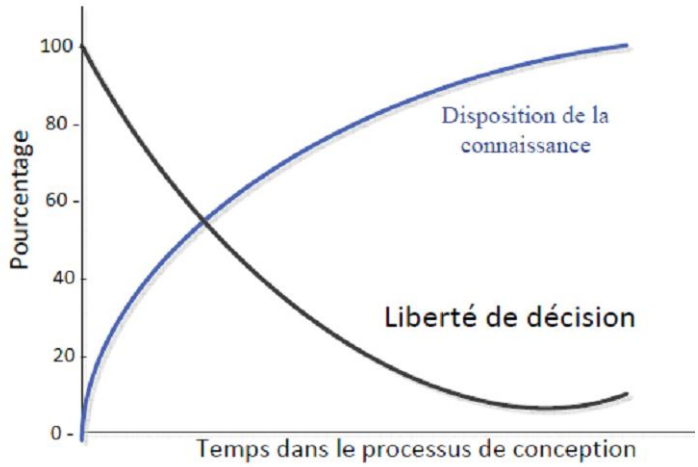



*Figure 2.4 : Le paradoxe de la conception (Ullman 2009).*

### 2.2.5 *L'innovation assistée par ordinateur (L'IAO) le support pour l'innovation*

Comme décrit précédemment, le processus d'innovation est complexe, itératif, nécessite de l'interactivité et est composé de plusieurs tâches (Hüsig et Kohn 2009). Actuellement, les entreprises cherchent à améliorer ce processus afin de générer des idées inventives et de les transformer en un produit dans un délai minimal. Néanmoins, la génération de solutions inventives exige souvent une grande quantité de connaissances issues d'une collaboration interdisciplinaire entre différents domaines de la science. Ainsi, avec la nécessité de faciliter le passage entre les différentes activités du processus, de gérer l'ensemble des données et des connaissances, de faciliter l'échange entre les différents acteurs, des outils informatiques ont été créés. Ces outils sont connus sous le terme de systèmes d'aide à l'innovation assistée par ordinateur (l'IAO) ou en anglais «Computer Aided Innovation ». Ils forment un nouveau domaine dans les technologies assistées par ordinateur (Leon 2009). Ces systèmes ont pour but de supporter les entreprises tout au long du processus d'innovation et de faciliter la création et l'acquisition des connaissances au travers d'un outil collaboratif. Ils visent également à rendre plus faciles les activités de recherche d'information, telles que l'analyse de brevets, l'analyse de réseaux de documents. La majorité des IAO connus s'appuient soit directement sur la théorie TRIZ, soit sur des méthodes spécifiques mais ayant les méthodes et outils de TRIZ pour base. Les raisons principales de l'utilisation de TRIZ sont qu'elle permet de systématiser l'invention, et sa faculté de pouvoir prédire le

future développement des systèmes technologiques (Hüsig et Kohn 2009). D'autres systèmes d'innovation assistée par ordinateur utilisent des méthodologies d'innovation comme le Design axiomatique, le Brainstorming, la Pensée latérale, etc. (Leon 2009).
Les IAO sont divisés en trois parties principales. La première cherche à traiter des problèmes stratégiques de l'entreprise. Dans une seconde partie, on cherche à gérer les idées : de leur génération, à leur évaluation en passant par leur analyse. Finalement la dernière partie, consiste en la protection intellectuelle. La figure 2.5 résume ces trois parties. Selon (Hüsig et Kohn 2009) les IAO possèdent les avantages suivants :

- Ils améliorent l'efficience car ils facilitent le processus de prise de décision et facilitent la collecte et la diffusion d'information.
- Ils améliorent l'efficacité car ils peuvent améliorer la qualité, la précision de l'information au moment opportun.
- Ils améliorent les compétences car ils facilitent la compréhension du processus d'innovation et le transfert des connaissances existantes dans différents processus d'innovation.
- Ils favorisent la créativité car ils aident dans la capture, la construction et la création de connaissances dans le processus créatif. Il est à noter qu'ils favorisent également le travail collaboratif entre les divers métiers intervenant dans le processus.




*Figure 2.5: Les différentes parties d'un IAO (Hüsig et Kohn 2009).*

Actuellement, les technologies IAO gagnent en importance grâce aux avancées actuelles faites dans le domaine des technologies de l'information et de la communication. Ainsi, les IAO peuvent être d'une grande aide dans l'écoconception afin de générer des solutions écoinnovantes qui facilitent le développement des systèmes industriels vers la production durable. Néanmoins, par rapport à ce sujet les IAO ont été peu exploités et donc des travaux supplémentaires sont nécessaires afin d'utiliser les technologies IAO pour la production durable.

Deux catégories principales d'IAO existent (Hüsig et Kohn 2011) :
**« IAO fermés » (close CAI) :** ce type de technologies est basé sur des logiciels développés au travers de nouveaux outils ou des outils déjà existants (CAD, CAE, CAM), des méthodologies (TRIZ, QFD, FMEA), mais aussi grâce à l'introduction de

nouveaux concepts d'innovation comme par exemple l'ingénierie concourante, et des nouvelles technologies. Leur objectif est de faciliter le développement de la stratégie d'innovation de l'entreprise, la génération des idées et la protection intellectuelle. Avec ces nouveaux outils, les nouvelles idées et la connaissance utilisée pendant le processus d'innovation sont créées, dans une grande majorité, avec des sources internes à l'entreprise.

**« IAO ouverts » (open CAI) :** ce type d'IAO se compose des éléments technologiques et stratégiques. D'un côté les éléments technologiques sont construits sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication basées sur la Web 2.0 telles que : le « cloud computing », les interfaces d'interactivité type Ajax et le web sémantique afin de faciliter le flux de connaissances interne et externe à l'entreprise. De l'autre côté, au niveau stratégique, la perception de l'innovation des entreprises change d'une innovation fermée « close CAI » développée au sein de l'entreprise à une innovation ouverte « open innovation » où l'entreprise interagit avec des organisations ou des entreprises externes afin d'augmenter sa capacité à innover. Ce type d'innovation se caractérise par la création de réseaux de collaboration entre entreprises, universités, clients, fournisseurs et la concurrence afin d'accroître l'espace des connaissances utilisables pour le développement d'une innovation.

De nos jours, les IAO ouverts présentent un avantage principal : le processus d'innovation ne repose plus sur l'entreprise. Cela améliore favorablement la créativité et le nombre d'idées générées lors du développement d'un produit. Ces produits répondent plus précisément aux exigences des clients car ces derniers font partie intégrante du processus. De plus, l'utilisation des nouvelles formes d'évaluation des idées avec la participation des différents participants (clients, experts, fournisseurs, etc.) améliore la transition invention-innovation en augmentant les chances de réussite sur un marché. Pourtant, il reste quelques défis à surmonter : la propriété intellectuelle, le partage des gains potentiels entre les participants, la construction du réseau de participants et sa coordination, l'intégration des IAO dans les entreprises afin d'améliorer le processus d'innovation. A condition d'intégrer de nouvelles approches plus spécifiques pour l'analyse et la résolution de problème, les IAO peuvent être également utilisés afin d'aider faciliter l'écoinnovation en vue de favoriser la production durable.

## 2.3 DE L'INNOVATION À L'ÉCOINNOVATION

Dans cette section nous allons nous intéresser à l'écoinnovation en raison de son importance en tant que moteur du développement durable. De nos jours, de nombreuses entreprises ont commencé à utiliser l'écoinnovation comme le moyen de générer de nouvelles améliorations sur les produits et procédés afin de réaliser le passage de la lutte antipollution vers l'écologie industrielle (OCDE 2010). Pour comprendre le rôle de l'écoinnovation dans la production durable, il faut en comprendre les mécanismes qui la favorisent.

### 2.3.1 *Définition*

De nos jours, en considérant que la protection de l'environnement doit aller de pair avec croissance économique, de nombreuses entreprises cherchent à réaliser des

améliorations radicales afin d'intégrer des pratiques environnementales dans leurs pratiques habituelles (OECD 2009). Ce changement implique de nouveaux défis pour le développement et l'amélioration de produits, procédés et services. Pour ce faire, l'écoinnovation est un des moyens pour opérer ce changement. L'écoinnovation a fait objet de plusieurs définitions, en voici quelque unes :

- Le Plan d'action en faveur de l'écotechnologie (ETAP) définit l'écoinnovation comme (OCDE 2010) : « *la production, l'assimilation ou l'exploitation d'une nouveauté dans des produits, des procédés de production, des services ou des méthodes de management d'entreprise qui vise, tout au long du cycle de vie, à empêcher ou diminuer nettement les risques environnementaux, les pollutions et d'autres répercussions négatives découlant de l'utilisation de ressources (y compris énergétiques*) ».
- Klemmer (Klemmer et al. 1999) définit l'écoinnovation comme « *toutes les actions des acteurs de la société qui appliquent ou introduisent de nouvelles idées, comportements, produits qui contribuent à une réduction de l'impact environnemental ou à atteindre certains objectifs de l'écologie durable ».*

Ainsi, le but est d'aider les entreprises à faciliter la relation entre les actions de recherche pour avoir la capacité d'améliorer ou de créer des technologies plus respectueuses de l'environnement et de les introduire sur le marché. Cette tendance non seulement impacte la technologie mais aussi l'innovation au niveau organisationnelle et commerciale. L'écoinnovation se définit donc comme « *l'orientation ou la vision des changements sociétaux et technologiques nécessaires pour parvenir au développement durable »* (OCDE 2010). Ainsi l'ecoinnovation peut être vue comme un moyen de guider les entreprises vers le développement durable en préservant leur compétitivité à travers le développement ou la création de technologies vertes.

Tout comme l'innovation, suite à une analyse des recherches relatives à l'éco-innovation, l'OCDE propose trois grandes dimensions pour analyser l'écoinnovation (OCDE, 2010) :

- **L'objectif** : cet axe concerne les 5 principaux domaines d'application de l'écoinnovation, qui peuvent être associés à un changement technologique (points 1 et 2) ou non (points 3 à 5) : 1) les produits (biens ou services), 2) les méthodes ou procédés de production, 3) les méthodes de commercialisation, 4) la stratégie organisationnelle, 5) les institutions comme par exemple, les normes ou les valeurs culturelles.
- **Le mécanisme** : Ces mécanismes sont les mêmes que pour l'innovation mais leur finalités et leurs contraintes intègrent plus spécifiquement les exigences liées aux aspects environnementaux.
- **L'impact** : fait référence aux conditions environnementales ou aux gains environnementaux potentiels qui résultent de l'interaction entre l'objectif et le mécanisme. L'impact peut prendre la forme d'une amélioration mineure, comme par exemple la réduction d'un élément contaminant, jusqu'à l'élimination totale d'un dommage environnemental. L'évaluation de cet impact revêt une grande importance car elle détermine l'amélioration sur les conditions environnementales dues à cette itération. Dans certains domaines, l'impact est associé au concept de « facteur » qui évalue la performance technologique par rapport à l'efficience énergétique ou à l'utilisation des ressources.

Ces trois dimensions peuvent être utilisées pour concevoir et analyser les stratégies que les entreprises peuvent adopter pour implémenter un plan d'action d'écoinnovation afin de développer une production durable. La figure 2.6 illustre la relation entre les domaines d'application de l'objectif, les types de mécanisme et l'impact de l'ecoinnovation (gains environnementaux potentiels) aussi bien pour les aspects technologiques que non technologiques (commercialisation, organisations…). En général, l'ampleur de l'impact environnemental suit les mécanismes de l'écoinnovation. Par exemple, les gains environnementaux potentiels avec une modification sont le plus souvent moins importants que ceux provenant d'une création.

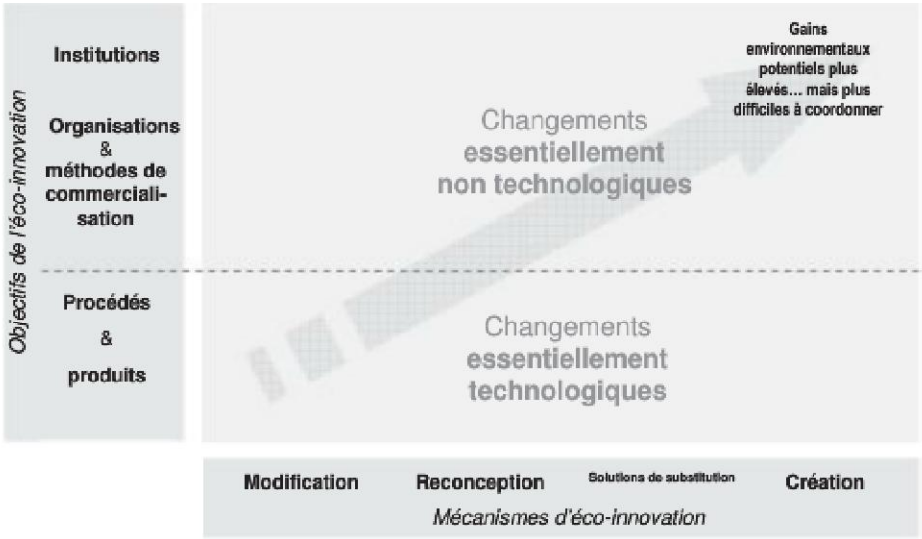



*Figure 2.6: Axes de l'écoinnovation (OCDE 2010).*

**L'écoinnovation et la production durable**

L'existence d'un lien entre les différentes stratégies pour la production durable et l'écoinnovation apparait clairement, par exemple, la lutte antipollution peut être liée à la modification des produits et procédés ; la production moins polluante peut être associée à la mise en œuvre de changements plus intégrés comme la reconception du produit ou procédé, l'éco efficacité et le cycle de vie vert sont liés aux mécanismes plus complexes comme l'utilisation de solutions de substitutions ou la mise en œuvre de systèmes de management environnemental ou d'évaluation du cycle de vie. Enfin, la production en boucle fermée et l'écologie industrielle sont concernées par des changements plus profonds qui impliquent la création de structures de production nouvelles (OCDE 2010). Cette association entre les stratégies de la production durable et les dimensions de l'écoinnovation est schématisée sur la figure 2.7. Sur un axe on porte les mécanismes d'écoinnovation, sur l'autre les objectifs, à l'intersection on retrouve les étapes d'évolution de la production durable. Cette relation indique que les gains économiques et environnementaux obtenus grâce à des initiatives de la production durable s'accompagnent d'une complication du processus d'écoinnovation.

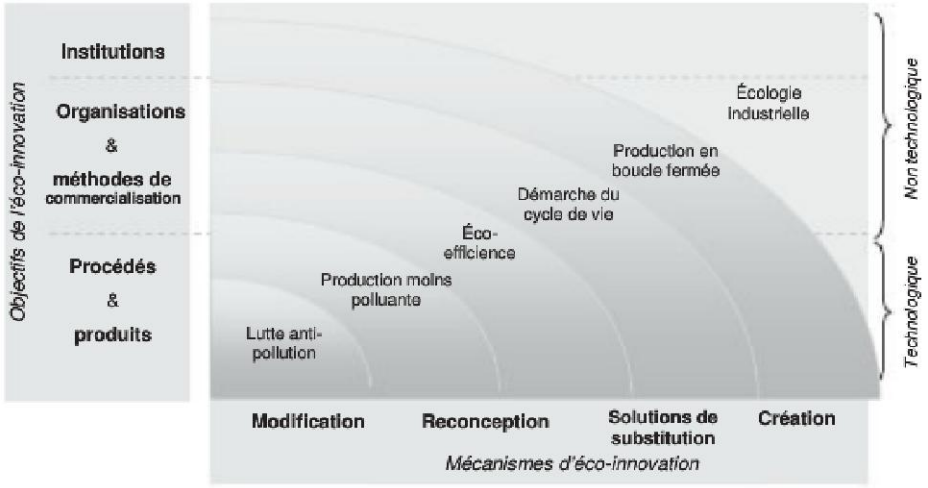



*Figure 2.7: Relation entre la production durable et les axes de l'écoinnovation.*

### 2.3.2 *Ecoinnovation en Produit-Procédés*

Dans ce manuscrit, nous sommes plus particulièrement concernés par l'écoinnovation de procédés et/ou produits. Jusqu'à présent en génie des procédés les solutions apportées sont, en général, de type curatif avec des innovations incrémentales. Ainsi, ces solutions cherchent à éliminer les éléments générant des pollutions dans les procèdes et ou produits. Cependant depuis ces dernières années des efforts de recherche sont portés sur la mise en œuvre de solutions préventives, cherchant à éliminer la source de polluants : recherche de nouveaux solvants verts, matières premières bio sourcées, bio raffineries vertes… Pourtant, le défi actuel de l'écoinnovation dans le domaine des procèdes ne demande pas uniquement des innovations incrémentales mais également des innovations radicales qui cherchent des alternatives ou la création de procédés qui permettent une viabilité économique, sociale et environnementale. Pour ce faire, les entreprises doivent intégrer un changement de périmètre dès la phase de conception en intégrant le cycle de vie complet. Ce changement permet la réduction de substances non désirées, une consommation plus durable et favorise l'innovation (Rubik 2001). Dans ce contexte, il s'avère nécessaire de créer de nouvelles approches et de nouveaux outils dédiés à la création de systèmes écoinnovants en les intégrant par exemple dans des systèmes d'aide à l'innovation assistée par ordinateur.
Comme le notent (Srinivasan et Kraslawski 2006), il subsiste un manque d'intérêt pour la recherche sur l'écoinnovation et plus largement sur l'innovation en génie des procédés. Ce faible intérêt s'explique d'une part par la complexité des phénomènes mis en jeu et d'autre part parce que le besoin d'innovation se fait sentir plus fréquemment pour les produits (ou groupe de produits) à cycle de vie relativement court (comme dans l'industrie manufacturière) que pour le produits à cycle de vie plus long. En génie des procédés, on a globalement des produits entrant dans la deuxième catégorie cependant dans certains domaines comme la cosmétique et l'agroalimentaire mais aussi avec l'évolution de la discipline vers de nouveaux domaines émergents on voit apparaître des produits à cycles de vie plus courts.

En génie des procédés, l'ecoinnovation peut être associée aux concepts comme l'intensification de procédés, la chimie verte, le développement durable. Pour ces concepts, différentes méthodes et différents outils généraux ou spécifiques ont été

créés et mis en œuvre. Par exemple, l'intensification de procèdes utilise des méthodes comme les réacteurs multifonctionnels ou des sources alternatives d'énergie (Stankiewicz et Moulijn 2000). Ainsi, une perspective est d'intégrer ces différentes méthodes et ces outils dans le processus d'écoinnovation de génie de procèdes. Pour ce faire, il est nécessaire d'analyser les différents méthodes et outils existants pour faciliter l'intégration de ces méthodes plus spécifiques. Cette analyse est présentée dans la partie suivante.

### 2.3.3 *Méthodes et outils d'écoinnovation*

Deux grands types d'approches sont mentionnés dans la littérature afin d'améliorer, d'évaluer voire d'organiser l'écoinnovation : les approches quantitatives ou qualitatives. Le premier type d'approches se base sur des outils d'évaluation des impacts au travers d'indicateurs comme par exemple les Analyses de Cycle de Vie (ACV). Le second s'appuie sur des données qualitatives évaluées selon des échelles de valeurs ou des appréciations avec par exemple des représentations graphiques, des listes, des guides de bonne pratique…

La littérature fait aussi état d'outils d'écoinnovation qui intègrent la dimension environnementale dans le processus de génération de concepts et non plus pour l'aide à la décision ou l'analyse du besoin. Parmi ces méthodes de nombreuses reposent entièrement sur des outils de TRIZ, ou certains outils sont intégrés dans une méthodologie propre comme par exemple (Chang 2005), la méthode CAD Eco Design de (Chang et Chen 2004), (Chen et Liu 2001 2003) pour le couplage entre la matrice QFD et TRIZ, (Yen et Chen 2005) pour le couplage AMDEC et TRIZ… Ces méthodes proposent des cadres intéressants pour la prise en compte des problèmes environnementaux dans la définition des objectifs et l'analyse du besoin. En revanche, l'intégration de ces contraintes dans la suite du processus n'est pas clairement définie : structuration, formulation et résolution du problème (notamment l'intégration des ressources disponibles n'est pas présente) avec une vision environnementale. De plus, comme elles sont basées sur TRIZ ces méthodes ont hérité d'un de ces inconvénients majeurs à savoir le niveau d'abstraction des solutions proposées. Bien qu'utile pour des séances de créativité autour d'équipes pluridisciplinaires, l'effort créatif d'adaptation d'une des voies de résolution en une solution reste important.

A l'heure actuelle, le travail récent autour de l'outil Eco Mal'In (Samet 2010) reste la démarche structurée la plus aboutie en terme d'écoinnovation. Elle offre une intégration plus profonde des aspects environnementaux dans l'ensemble des étapes du processus de génération de concepts. De plus, elle prend en considération l'ensemble du cycle de vie. Bien que présentant des similitudes avec la vision et l'approche proposée dans les sections suivantes, des différences majeures apparaissent :

- Tout comme les méthodes précédentes elle est centrée sur le produit, même si l'approche est très générique, son application aux procédés n'est pas immédiate.
- Dans cette approche, l'intégration de la vision environnementale est plus particulièrement faite au niveau des étapes d'analyse, de structuration et de formalisation du problème et de façon moins marquée sur la résolution.

Ce dernier point met en évidence l'une des différences importantes entre innovation et écoinnovation qui limite ainsi le champ des possibilités de solution avec la prise en compte de la réduction de l'impact environnemental en tant qu'objectif de conception.

L'innovation traditionnelle laisse plus de liberté au niveau de l'espace des solutions. Ainsi les aspects environnementaux peuvent être intégrés comme des contraintes supplémentaires au même titre que les autres aspects de la performance venant ainsi limiter l'espace de recherche de solution.

## 2.4 POSITIONNEMENT DES TRAVAUX

Le chapitre précédent a mis en évidence que la production durable gagne en importance dans le génie de procédé. En effet, le génie des procédés va devoir opérer des changements importants en vue de produire autrement pour rendre son développement plus durable. Ces changements impliquent une remise en cause de la façon de produire avec comme objectif de concevoir des produits et procédés futures visant à réduire les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie. Une des voies pour traiter cette problématique est d'introduire de l'écoinnovation dès les phases amont du processus de conception. Dans un contexte industriel sensible, l'écoinnovation est une aide pour passer d'une vision de la croissance verte en une réalité car elle est la clé du développement et du dépoilement de technologies plus respectueuses de l'environnement. Une méthode et un outil d'aide à l'écoinnovation (prenant en considération à la fois les aspects technologiques et environnementaux) apporterait une première réponse pour faciliter, accélérer et améliorer la conception tant au niveau des opérations unitaires que du procédé dans son ensemble. A l'heure actuelle en génie des procédés, aucune approche traitant de cette problématique n'a été développée. Ainsi l'objectif principal de ce travail et de proposer une méthode est un outil d'aide à la résolution de problèmes inventifs en intégrant la dimension environnementale.

Pour aborder l'ecoconception, il faut l'intégrer dès la phase de conception préliminaire et plus spécifiquement la phase de recherche de concepts pour favoriser la proposition de solution réduisant considérablement les impacts environnementaux. De plus, il faut également intégrer une vision sur l'ensemble du cycle de vie et ne pas se limiter au périmètre du procédé de production. Cette intégration dès l'amont du processus de conception conduit à une complexification de la problématique liée à l'incomplétude et l'incertitude sur les données. Bien que présentent dans toute conception, cette incomplétude et incertitudes sont amplifiées lorsqu'on cherche à proposer des innovations. Durant cette phase se pose inévitablement la question de l'évaluation des concepts proposés afin de sélectionner celui (ou ceux) qui passeront à la phase suivante du processus de conception. Pour cette étape d'évaluation, on atteint également les limites des méthodes traditionnellement utilisées car de par leurs hypothèses elles s'appliquent plus particulièrement à la conception détaillée mais perdent de leur pertinence en conception préliminaire. Par exemple, à l'issue de la conception préliminaire, réaliser une ACV pour évaluer les concepts proposés ne constituerait pas une aide à la décision quand on connaît la sensibilité de cette méthode aux données d'entrée. Or il demeure une trop grande incertitude sur ces données pour avoir un résultat fiable sur lequel s'appuyer pour prendre une décision. Ainsi, il s'avère nécessaire de développer de nouvelles méthodes ou outils.

Dans ce chapitre, nous soulignons l'intérêt de la gestion des connaissances pour accélérer la proposition de solutions innovantes et donc d'écoinnovantes. Cette gestion des connaissances est surtout utile pour aborder l'innovation incrémentale, modulaire ou architecturale mais atteint ses limites lorsqu'on aborder la création d'un

nouveau système (il vaut mieux repartir de zéro). Cet aspect gestion des connaissances en innovation a été en partie traité dans la thèse de Cortes Robles (2006) où une synergie entre la théorie TRIZ et le RàPC a été proposée pour la résolution de problèmes. Parmi les perspectives avancées, ce travail faisait état d'un manque de méthode pour l'analyse de la situation problématique. De plus, l'approche proposée se basait sur les outils traditionnels de TRIZ, héritant ainsi de ces avantages mais également de ces inconvénients comme le niveau d'abstraction de ses outils de résolution. Le travail présenté s'inscrit dans la continuité de ces travaux, mais se situe plus en amont avec la proposition d'un cadre d'analyse de la situation problématique mais aussi la proposition d'une nouvelle méthode de résolution permettant de traiter des problèmes multi-contradictions mais aussi d'intégrer les contraintes environnementales. Un tel cadre s'avère très complexe car il ne se limite pas à l'adaptation de la théorie TRIZ à l'ecoinnovation mais il vise à développer et adapter d'autres méthodes.

Dans ce chapitre, nous avons également présenté les systèmes d'aide à l'innovation assistée par ordinateur. La finalité l'ensemble de ces travaux de recherche est de prototype logiciel pour la partie gestion des idées : de leur génération à leur évaluation. Ce prototype intégrera les travaux précédents de Cortes Robles, le cadre méthodologique pour l'écoinnovation présentée dans ce manuscrit ainsi que les travaux en cours sur un Open CAI 2.0 (thèse de Lopez).

## 2.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, l'innovation et l'éconnovation ont été présentées. Elles sont le moteur pour développement de la société et la rénovation du domaine industriel. Néanmoins, il existe une différence importante entre ces deux termes : l'ecoinnovation cherche des solutions avec la prise en compte de la réduction de l'impact environnemental en tant qu'objectif de conception. Pour le génie des procédés, l'écoinnovation s'avère de grande importance afin d'assurer le progrès simultané sur les 3P (Peuple, Profit, Planète). L'ecoinnovation se compose de trois dimensions : l'objectif, les mécanismes et l'impact. Ces trois dimensions sont associées à différentes stratégies de la production durable donc les entreprises doivent adopter un plan d'actions selon le type de stratégie désiré. Par exemple, si une entreprise se focalise sur une production moins polluante, elle doit mettre en œuvre des changements plus intégrés comme la reconception du produit ou du procédé. Plus des gains environnementaux visés sont importants, plus le niveau d'econnovation nécessaire est important.

Dans ce manuscrit, nous sommes plus particulièrement concernés par l'écoinnovation de procédés et/ou produits en nous focalisant plus particulièrement sur la phase de recherche de concept. Pour ce faire nous allons proposer une méthodologie d'analyse et de résolution en se basant sur certains outils et méthodes de la théorie TRIZ. Toutefois, ces derniers seront adaptés aux problématiques de l'écoinnovation, et également couplés avec d'autres méthodologies pour augmenter l'efficacité de l'approche proposée. Ainsi, le but est de proposer une première brique d'un système d'aide à l'innovation assistée par ordinateur (l'IAO) avec prise en compte des aspects environnementaux. Pour ce faire, il est nécessaire de proposer

un cadre pour la structuration, la formulation et la résolution du problème. Ainsi, il s'avère nécessaire de développer une approche apte à faciliter le processus d'ecoinnovation. Les deux prochains chapitres ont pour objectif de présenter ce cadre.

CHAPITRE 3

# DEVELOPPEMENT D'UNE METHODE DE FORMULATION DE CONTRADICTIONS

## 3.1 INTRODUCTION

La complexification croissante des produits et procédés à concevoir implique la modélisation et la résolution de problèmes dans les étapes de conception, de préférence dès l'étape de conception conceptuelle. Durant cette étape le concepteur utilise le sens commun pour décrire le monde physique et utilise le raisonnement commun pour décrire le comportement des objets dans ce monde. Ensuite, au travers de ce raisonnement le concepteur choisit, sur la base de sa propre expérience, le modèle le plus approprié à la situation spécifique afin de résoudre la situation problématique (Tomiyama et al. 1992). Néanmoins, ce processus est très complexe et parfois difficile à modéliser pour un futur développement, et les solutions générées sont d'ampleur limitée. Ainsi, il est donc essentiel de développer une méthode plus efficace qui permet d'un côté la formalisation de la situation problématique et de l'autre la résolution des problèmes complexes. Elle doit également permettre de capitaliser les expériences acquises lors de la résolution du problème. En première approche, la méthode OTSM-TRIZ facilite ces tâches avec la formulation du problème au travers d'une structure arborescente (réseau de problèmes), qui est ensuite transformée en un réseau de contradictions qui défissent le cœur de la situation problématique. Dans ce chapitre, une méthode pour la formalisation et la modélisation de la situation problématique est présentée. Cette méthode s'appuie en partie sur OTSM-TRIZ lors de ses premières étapes. Notre méthodologie intègre également des spécificités pour la mise en œuvre d'une démarche d'écoconception inventive.

## 3.2 L'EVOLUTION DE LA THEORIE TRIZ

### 3.2.1 *OTSM-TRIZ*

Dès leur création les outils de la théorie TRIZ et son algorithme ARIZ se sont inscrits dans un développement et une amélioration permanente jusqu'à leur unification en 1985 (figure 3.1) sous le nom de la Théorie générale de la pensée avancée (OTSM). L'origine d'OTSM vient du constat que d'un côté, de plus en plus d'utilisateurs de domaines différents à celui de l'ingénierie ont commencé à utiliser la théorie TRIZ comme une approche pour résoudre des problèmes inventifs, et de l'autre les experts de la théorie TRIZ atteignaient les limites de la théorie pour résoudre des problèmes complexes et multidisciplinaires. En conséquence, Altshuller a proposé la transformation de la théorie TRIZ en la Théorie générale de la pensée avancée (OTSM) afin de lever ce verrou (Khomenko et al. 2007). Toutefois, le défi principal du développement d'OTSM était la difficulté de créer une méthode générale afin de résoudre une grande variété de problèmes multidisciplinaires, ceci implique que :
« Afin de développer une théorie universelle de résolution de problèmes inventifs, il faut que les règles (méthodes ou techniques) du processus de résolution de problèmes soient aussi génériques que possible, mais plus elles sont génériques, plus il est difficile de les appliquer à des problèmes spécifiques », ou réciproquement, « les règles doivent être spécifiques afin de résoudre un problème spécifique, mais plus elles sont spécifiques moins elles sont transposables et utilisables pour résoudre d'autres problèmes » (Cavallucci et Khomenko 2007).
Afin de résoudre ce problème, la solution proposée est la suivante : les règles (méthodes ou techniques) de résolution de problèmes restent les plus générales

possible, ce qui leur confère un caractère universel. Cependant, l'organisation du système constitué par ces règles devrait être telle qu'elles puissent être utiles pour trouver une solution spécifique à un problème spécifique.

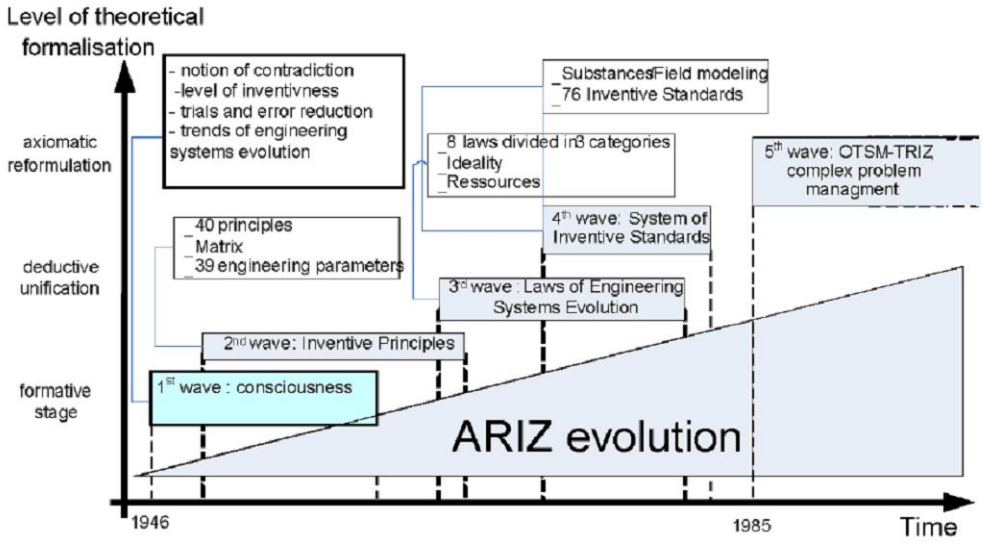



*Figure 3.1 : Evolution de la théorie TRIZ (Khomenko et al. 2009).*

Néanmoins, cette méthode générale implique d'autres obstacles, les deux plus importants sont : l'inexistence d'un modèle qui permet de décrire tous les éléments d'un problème multidisciplinaire, et la résolution d'un grand nombre de contradictions issues de cette multidisciplinarité. Afin de résoudre le premier inconvénient, il a été proposé le modèle « Elément –Attribut- Valeur » (EAV), basé sur des modèles de l'intelligence artificielle, pour faciliter le processus de description des éléments, par exemple : l'élément (véhicule) a un attribut (couleur) avec une valeur (rouge) (Cavallucci et Khomenko 2007). Pour aborder le deuxième inconvénient sur la résolution de plusieurs contradictions, tout d'abord les problèmes sont représentés sous la forme d'un réseau de problèmes. Par la suite, les plus importants sont identifiés et modélisés sous la forme de contradictions, puis, ces dernières sont résolues à l'aide des différentes méthodes ou techniques de la théorie TRIZ (Khomenko et al. 2007).

Ces deux pistes de solutions sont associées en un seul modèle dénommé : réseau de flux des problèmes (RFP). Le RFP intègre les méthodes et concepts de la théorie TRIZ et les instruments d'OTSM dans un même système unifié (OTSM-TRIZ). Ainsi, le RFP est considéré comme un outil pour la gestion continue d'un flux permanent de problèmes (Cavallucci et Khomenko 2007). Le RFP est constitué de différents réseaux (problèmes, contradictions et paramètres). Pour générer ces réseaux, OTSM-TRIZ utilise quatre technologies, représentées sur la figure 3.2 :

- **Nouvelle définition du problème** : son objectif est de faciliter la compréhension du problème en utilisant les concepts de la théorie TRIZ comme la solution idéale, les ressources et la contradiction afin d'aider à la description d'une situation problématique et pour en faciliter la transformation sous la forme de réseaux de problèmes, de contradictions et de paramètres.

- **Solutions des problèmes typiques** : une fois le problème défini, cet outil est utilisé afin de résoudre la contradiction avec des solutions provenant soit du sens commun, soit des méthodes ou techniques spécifiques au domaine d'application, soit générées avec les standards ou méthodes de la théorie TRIZ.
- **Contradictions** : si aucune solution n'est obtenue par les solutions standards ou les méthodes spécifiques, nous sommes donc confrontés à un problème complexe. Dans ce cas, l'algorithme ARIZ est utilisé afin d'avoir une compréhension plus profonde de la situation problématique et donc redéfinir les contradictions.
- **Flux de problèmes** : cet outil donne des guides et règles pour organiser l'information du réseau de flux des sous-problèmes qui surgissent lors du processus de résolution des problèmes et pour la synthèse du concept final de solution à partir des concepts des solutions partielles obtenues.

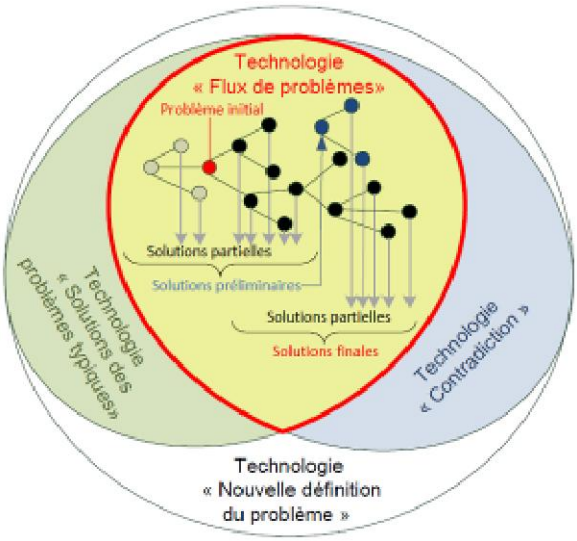



*Figure 3.2 : Les technologies du modèle fractal OTSM-TRIZ pour la résolution de problèmes complexes (Khomenko et Sokol 2000).*

Ces quatre technologies sont étroitement imbriquées et doivent être utilisées simultanément car des données générées par les éléments d'une technologie servent d'information d'entrée pour les autres dans le processus de résolution des problèmes. L'information générée par les quatre technologies est représentée au travers de réseaux de modélisation (Khomenko et al. 2007, Cavallucci et Khomenko 2007) :

- **Réseau de problèmes** : le réseau de problèmes peut être considéré comme un réseau sémantique ou graphe orienté de nœuds d'un haut niveau d'abstraction pour modéliser le problème et/ou une solution initiale d'une situation problématique, mais aussi les nouveaux problèmes ou solutions partielles qui résultent du processus d'analyse de cette situation. Une solution partielle est une solution qui résout le problème mais qui produit d'autres

problèmes, ou c'est une solution qui résout seulement une partie de la situation problématique. Si bien que des solutions existantes dans le réseau de problèmes ne peuvent pas être considérées comme des solutions satisfaisantes, elles peuvent guider vers les sources du problème, les problèmes les plus faciles à modifier ou les problèmes clés. Ce réseau permet de faciliter la modélisation de la situation problématique (représentation d'objets, cause-effet et phénomènes existants), et de formaliser, organiser (capturer) la connaissance implicite dans la résolution de problèmes. Le réseau de problèmes est une méthode qui permet aux concepteurs de guider la pensée vers différentes solutions possibles d'une manière structurée (Khomenko et De Guio 2007). La figure 3.3 représente un tel réseau dont les sous-problèmes et les solutions partielles sont schématisés sous la forme de rectangle et les flèches indiquent la direction du développement du réseau.

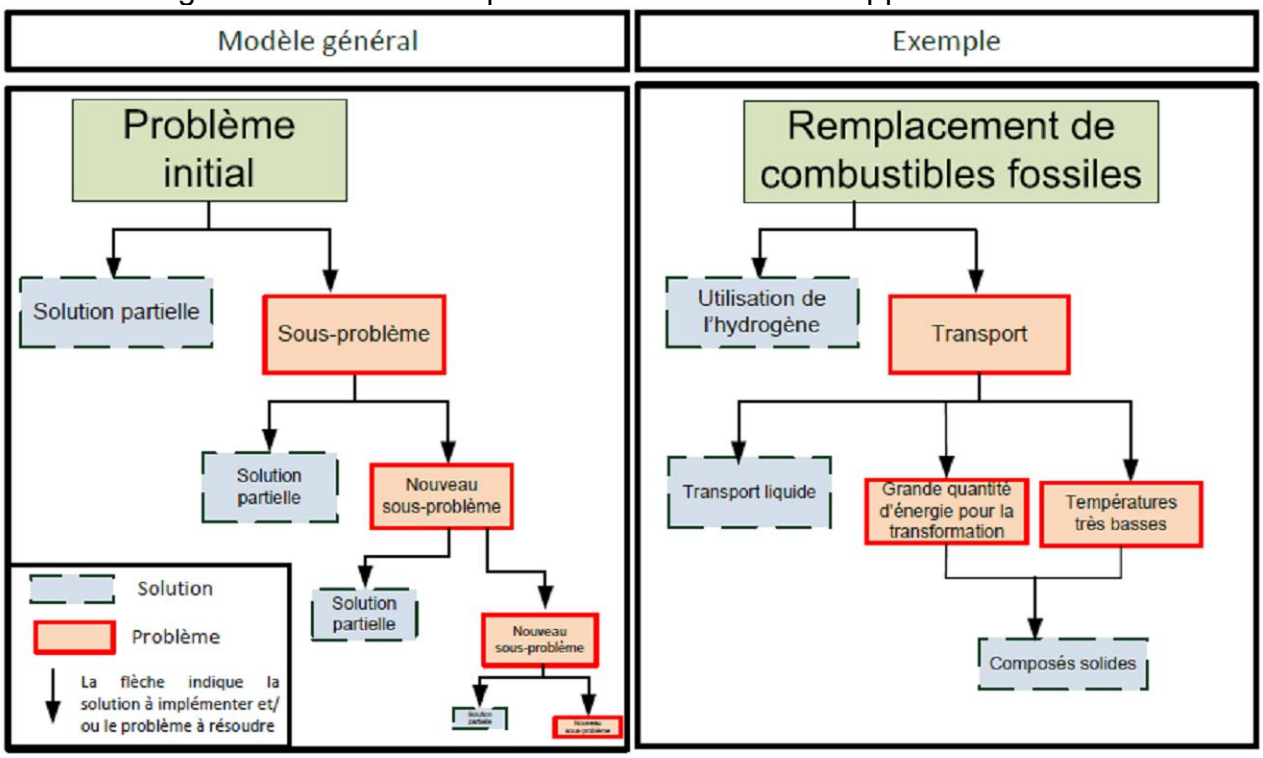



*Figure 3.3 : Réseau de problèmes.*

- **Réseau des contradictions** : dans cette étape, les problèmes clés ou les sources principales des problèmes définis dans l'étape précédente sont représentés sous la forme de contradictions techniques (CT) en utilisant les modèles de la théorie TRIZ. Ainsi, un problème clé est défini comme le conflit entre deux paramètres du système ou de son environnement (nommés paramètres d'évaluation). Au moins un paramètre est modifié afin d'obtenir un résultat désiré ou d'éliminer le problème au travers de l'influence d'un paramètre de contrôle (celui que le concepteur peut changer directement) avec une valeur déterminée. Suite à cette modification, un autre paramètre se dégrade de façon inadmissible sous l'influence du même paramètre de contrôle (avec la même valeur). De cette manière, l'ensemble des problèmes clés transformés en contradictions techniques sont regroupés en un réseau nommé réseau des contradictions. Dans le cas où le réseau des contradictions contient plusieurs contradictions, il est nécessaire de les

réduire. Un processus de sélection des contradictions les plus importantes est réalisé en utilisant trois types de critères (Cavallucci et Khomenko 2007) : a) selon le centre d'importance où les contradictions essentielles sont sélectionnées en fonction des paramètres d'évaluation qui se répètent fréquemment ou leur son importance, b) selon les lois d'évolution des systèmes techniques, et c) selon les ressources, c'est-à-dire, les paramètres d'évaluation qui sont liés aux ressources disponibles dans le système. La figure 3.4 représente un réseau de contradictions dont le paramètre de contrôle d'un élément du système qui, selon sa valeur, influence positivement ou négativement les paramètres d'évaluation des différents éléments du système ou de son environnement. Cette influence se traduit comme un conflit entre les deux paramètres d'évaluation qui représente la contradiction technique.

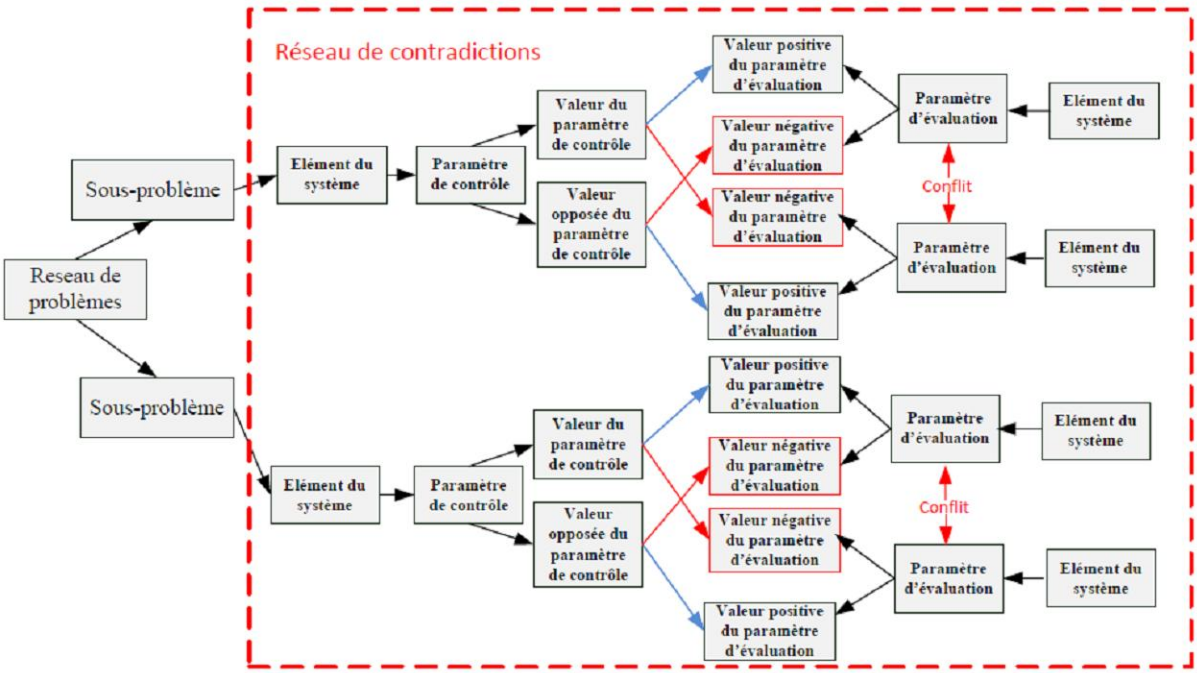



*Figure 3.4 : Réseau des contradictions.*

- **Réseau des paramètres spécifiques** : ce réseau regroupe l'ensemble des contradictions physiques nommées dans OTSM-TRIZ «contradictions de paramètres ». Une contradiction de paramètres représente le conflit entre les besoins qui visent à résoudre le problème existant et les lois de la physique, de la chimie… qui empêchent leur réalisation. Ainsi, une contradiction de paramètres existe lorsqu'un paramètre d'un système doit avoir une valeur pour satisfaire les besoins et simultanément une valeur opposée imposée par les lois, mais ces deux valeurs ne peuvent pas coexister (valeurs contradictoires). Cette contradiction de paramètres est considérée comme la source de plusieurs contradictions techniques. La figure 3.5 représente une contradiction de paramètres. Le réseau de paramètres spécifiques permet une définition claire des conflits existants dans une situation problématique et facilite l'évaluation des solutions proposées.

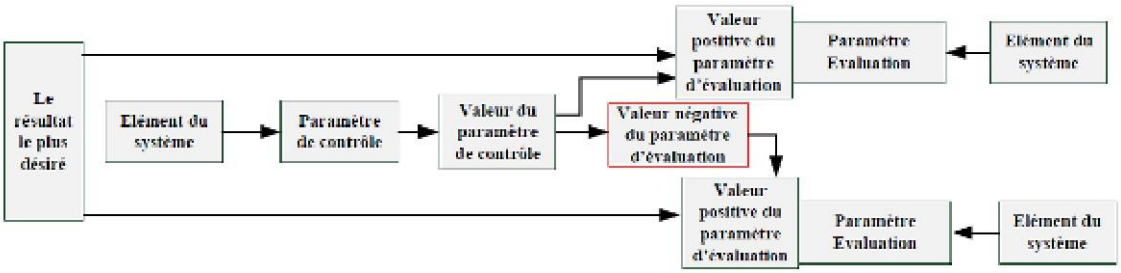



*Figure 3.5 : Réseau des paramètres spécifiques (Khomenko et al. 2007).*

- **Réseau des paramètres généraux** : finalement, le réseau des paramètres spécifiques est transformé en un réseau des paramètres généraux. Un réseau des paramètres généraux est un ensemble de lois d'un certain domaine de connaissance qui peuvent être généralisées afin de faciliter la formulation des paramètres spécifiques, la résolution des contradictions et l'évaluation de la solution (Khomenko et al. 2009). Par exemple, dans un réseau particulier, le conflit entre la puissance d'un moteur et la consommation de carburant, est transformé à l'aide des paramètres généraux : puissance et productivité.

Le réseau de flux des problèmes (RFP) est une approche qui présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes conventionnelles de la théorie TRIZ car il facilite la compréhension et la description d'une situation problématique. Il permet également de comparer et d'évaluer les solutions de manière plus objective. Ainsi, la méthode OSTM-TRIZ peut être considérée comme une approche multidisciplinaire capable de représenter différents types de connaissance afin d'organiser le processus de résolution grâce à des outils graphiques de modélisation et de sa capacité de passer des aspects spécifiques d'un problème aux aspects génériques. De plus, grâce aux différents outils, il est possible de formuler et résoudre des problèmes complexes avec plusieurs contradictions. Enfin, OTSM-TRIZ permet la collecte, la représentation et le stockage de la connaissance pour une future réutilisation. Le processus de résolution de problèmes avec OTSM-TRIZ est représenté sur la figure 3.6.

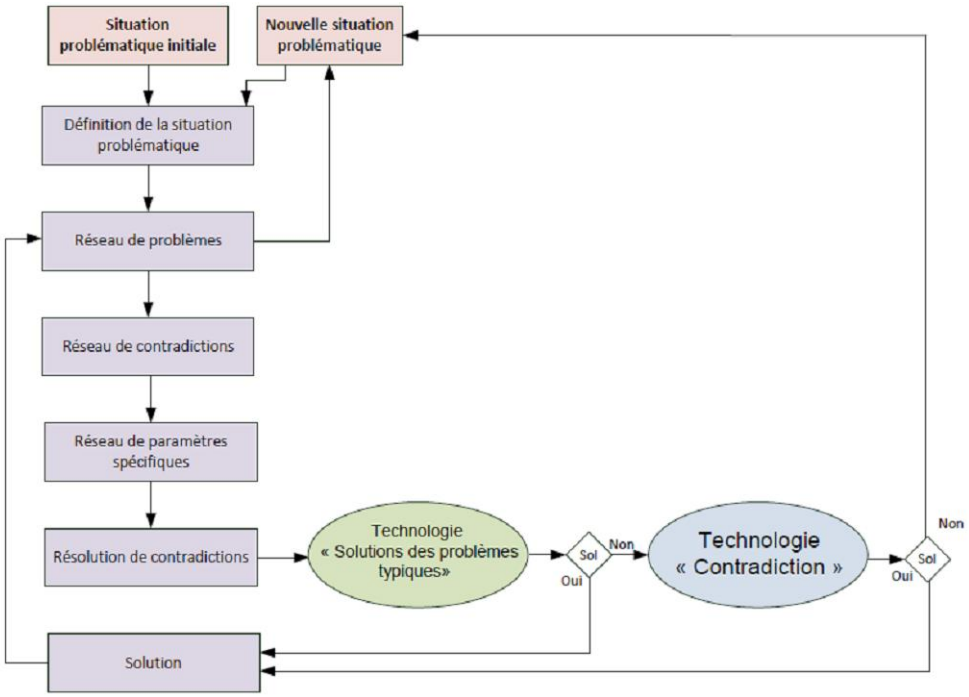



*Figure 3.6 : Processus de résolution.*

### 3.2.2 *OTSM -TRIZ et la production durable*

En général, l'écoconception implique des problèmes complexes multidisciplinaires. Pour faire face à ce type de problèmes, la Théorie générale de la pensée avancée (OTSM) s'avère être une méthode appropriée car elle permet de réduire l'aspect aléatoire dans la recherche des concepts innovants. Dans un contexte environnemental, l'objectif de l'utilisation d'OTSM –TRIZ est d'assurer la mise en œuvre des différentes actions de la production durable dans l'écoconception. Ces actions sont illustrées sur la figure 3.7.

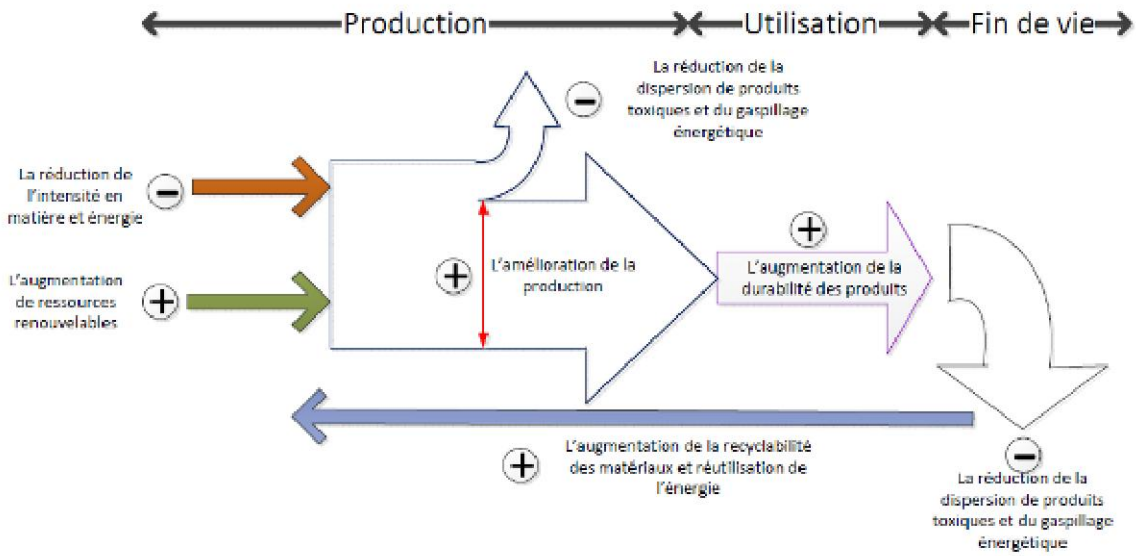



*Figure 3.7 : Les actions de la production durable.*

Néanmoins, l'OTSM-TRIZ présente des limites lors de l'implémentation d'une démarche d'écoconception :

- Ses outils sont capables de résoudre des problèmes généraux, mais dans leurs formes actuelles, il est nécessaire de les transformer afin qu'ils permettent de guider les concepteurs vers des solutions plus respectueuses de l'environnement (Khomenko et Ashtiani 2007).
- Bien que la phase d'identification du problème soit considérée comme l'étape la plus délicate (Cortes Robles 2006), il n'existe pas de méthodologie pour organiser la pensée lors de cette étape (réseau de problèmes).
- Il reste encore une grande difficulté dans la recherche de concepts de solutions spécifiques en utilisant les outils de la théorie TRIZ. Les effets ou phénomènes peuvent être utilisés pour faciliter cette tâche et améliorer l'utilisation des ressources mais il est nécessaire d'avoir un moyen de les modéliser pour faciliter leur compréhension et adaptation.

Pour surmonter ces limites, nous proposons une méthode d'écoconception s'appuyant sur la méthode OTSM-TRIZ. Cette méthode se décompose en deux étapes principales : la formulation des contradictions et la résolution des contradictions. Dans cette méthode, les étapes sont elles mêmes subdivisées en sous étapes comme l'indique la figure 3.8 :

- Formulation des contradictions :
  - Description de la problématique.
  - Réseau de problèmes.
  - Contradictions.
- Résolutions des contradictions :
  - Modélisation et résolution des contradictions.
  - Recherche de solutions spécifiques.
  - Association de solutions spécifiques.
  - Evaluation de la solution.

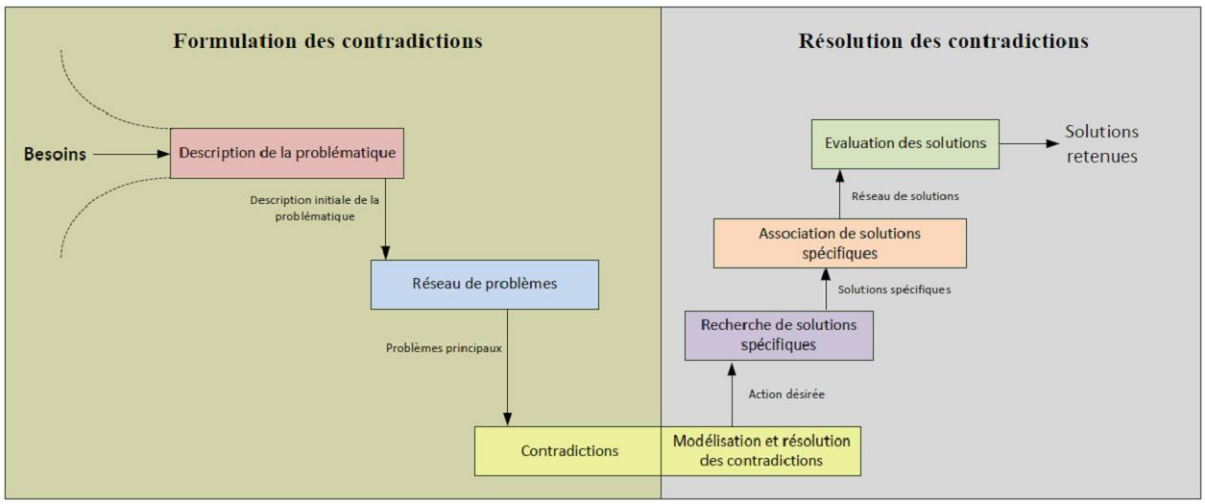



*Figure 3.8 : Le processus d'écoconception.*

La suite de ce chapitre se focalise plus particulièrement sur l'étape d'analyse du problème jusqu'à l'obtention des contradictions. La partie résolution sera abordée dans le chapitre suivant.

## 3.3 FORMULATION DE CONTRADICTIONS

Résoudre un problème d'écoconception s'avère souvent complexe. La plupart du temps, le concepteur est confronté à un problème non typique qui demande un certain niveau de créativité ou d'inventivité, et dans lequel une ou plusieurs contradictions sont à découvrir (Khomenko et De Guio 2007). Pour faciliter la formalisation des contradictions à partir d'une situation problématique initiale, nous proposons une méthode de modélisation, représentée sur la figure 3.9. Elle se compose de trois étapes principales divisées en sous étapes. Chaque étape est supportée soit par des outils déjà existants mais adaptés pour une problématique environnementale, soit par des outils qui ont été spécifiquement développés. Ainsi, le but de toutes ces étapes est d'acquérir une certaine connaissance de la situation problématique spécifique, de la formaliser sous la forme d'un réseau de problèmes en y incluant l'ensemble des problèmes et des solutions existantes. Si les solutions générées ne résolvent pas la situation problématique, le réseau est transformé en un réseau de contradictions et de paramètres afin d'utiliser les méthodes et outils de la théorie TRIZ. Les étapes de la modélisation sont détaillées dans cette section.

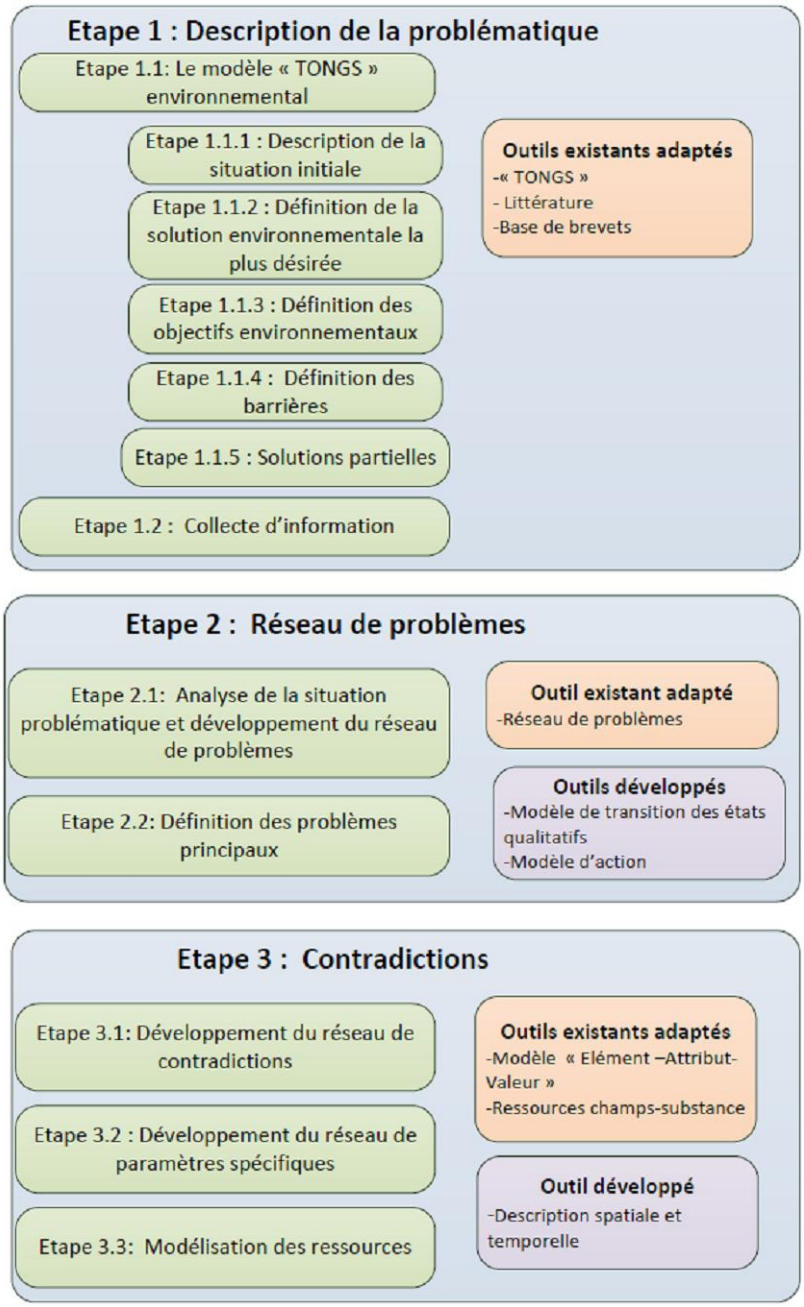



*Figure 3.9 : Etapes du processus de formulation de contradictions.*

### 3.3.1 *Etape 1 : Description de la problématique*

Le point de départ de la démarche est la description initiale de la problématique. Selon l'axiome d'OTSM-TRIZ sur la cause fondamentale des problèmes, quelle que soit la situation problématique, elle peut être décrite comme le conflit entre les attentes humaines et les lois de la physique (Khomenko et Cooke 2010). Pour faciliter la représentation de ce conflit, OTSM-TRIZ utilise le modèle « TONGS ». Ensuite pour une définition plus complète de cette problématique, une collecte d'information est réalisée en utilisant la littérature, les bases de brevets et l'information obtenue auprès des acteurs impliqués dans la définition de la situation problématique.

#### 3.3.1.1 Le modèle « TONGS »

Le modèle « TONGS » permet la description d'une situation problématique. Ce modèle est composé de quatre éléments : a) une situation initiale non désirée qui contient une caractéristique négative à éliminer ou un besoin à satisfaire, b) une situation désirée qui satisfait ces exigences ou besoins, c) un obstacle (barrière) qui empêche de passer de la situation initiale à la situation désirée, d) une solution qui tente de faciliter ce passage en éliminant l'obstacle (figure 3.10). L'avantage du modèle « TONGS » est qu'il peut être utilisé pour clarifier la situation initiale pour l'initialisation du réseau des problèmes.

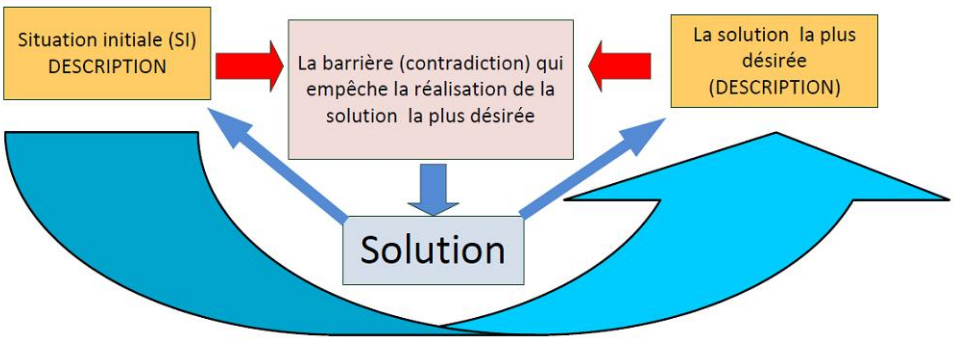



*Figure 3.10 : Le modèle « TONGS » (Khomenko et Cooke 2010).*

#### 3.3.1.2 Etape 1.1 : Le modèle « TONGS » environnemental

Afin de faciliter la description d'une situation problématique avec une vision environnementale, le modèle « TONGS » est adapté. Le but est de définir les éléments principaux d'une situation problématique et de définir les barrières qui seront le point de départ du réseau des problèmes. Ainsi, le modèle « TONGS » modifié comprend les éléments suivants :

- **Situation initiale :** elle donne une description de la situation problématique initiale en précisant un besoin, une exigence, l'effet négatif le plus important ou l'aspect le plus insatisfaisant dans la situation actuelle. Cette situation non désirée peut être obtenue directement à travers l'expression des exigences et besoins, pour les systèmes à créer ou pour l'amélioration des systèmes déjà existants. Dans ce dernier cas, nous pouvons bénéficier des différents outils d'évaluation de l'impact environnemental des procédés ou des produits comme l'analyse de cycle de vie et l'analyse exergétique (chapitre 1).
- **La solution environnementale la plus désirée (SEPD) :** elle donne une description de la solution idéale envisagée d'un point de vue environnemental. Son but est de guider le concepteur dans toutes les étapes de résolution du problème. Cette solution permet de définir le résultat envisagé pour le produit ou procédé à développer et peut servir de référence pour l'évaluation des solutions proposées.
- **Définition des objectifs environnementaux :** cet élément est introduit au modèle « TONGS ». Son but est de vérifier que la SEPD est liée à au moins à une des actions de la production durable (figure 3.7) :
    1. La réduction de l'intensité en matière et énergie.
    2. L'augmentation de ressources renouvelables.

3. La réduction de la dispersion de produits toxiques et du gaspillage énergétique.
4. L'amélioration de la production.
5. L'augmentation de la durabilité des produits.
6. L'augmentation de la recyclabilité des matériaux et réutilisation de l'énergie.

- **Définition de la barrière :** elle représente l'obstacle ou l'effet négatif qui empêche l'atteinte de la SEPD. Cette barrière est le point de départ du développement du réseau de problèmes. Dans le cas du développement d'un nouveau système, les barrières sont définies comme l'absence de l'action désirée définie dans la SEPD.
- **La solution partielle :** pour éliminer la barrière, une solution est proposée. Cette nouvelle solution peut posséder des inconvénients importants (quand elle est comparée avec la SEPD) pouvant générer des nouveaux problèmes et donc elle peut être considérée comme une nouvelle situation initiale.

Ainsi, le modèle « TONGS » environnemental permet d'aider le concepteur à définir correctement la problématique initiale, définir les objectifs environnementaux et développer une stratégie de résolution. Parallèlement, il donne les bases pour le développement du réseau de problèmes. Il peut être également utilisé comme une méthode d'évaluation préliminaire des solutions proposées. Il faut noter qu'au début de la description initiale sont définis certains objectifs de la production durable à satisfaire, d'autres objectifs peuvent être ajoutés en cours de développement de la solution finale. Le modèle « TONGS » environnemental modifié pour notre approche est représenté graphiquement sur la figure 3.11.

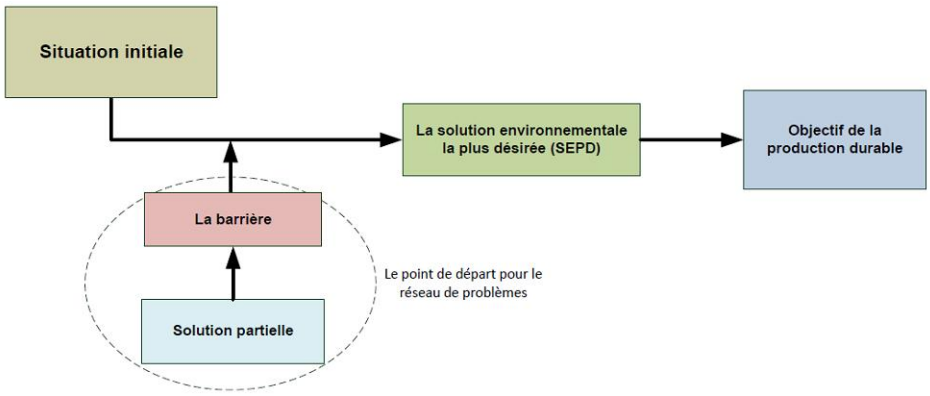



*Figure 3.11 : Le modèle « TONGS » environnemental.*

La figure 3.12 présente deux exemples de la représentation de la description de la situation problématique. Dans la partie supérieure la description de l'amélioration d'un système existant et dans la partie inferieure le développement d'un nouveau système.

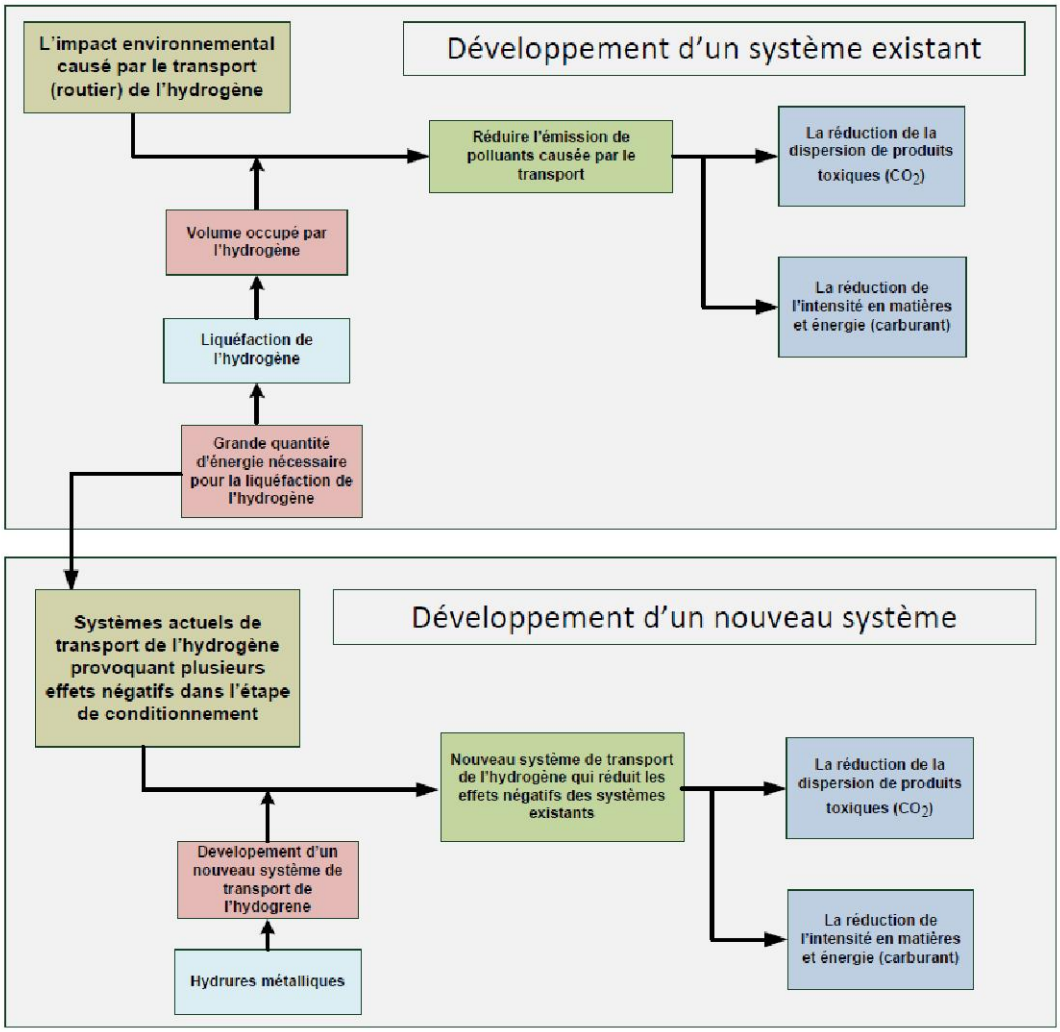



*Figure 3.12 : Description de la situation problématique.*

### 3.3.1.3 Etape 1.1 : Collecte d'information

Suite à la définition de la barrière et des limites du problème, il est nécessaire de collecter l'information sous la forme d'une liste de problèmes les plus importants, des solutions potentielles ou partielles, d'information importante, etc. liées à la barrière et à la situation initiale (figure 3.13). Cette information peut être extraite des acteurs impliqués ou par une recherche dans la littérature ou les bases de brevets. Le but est de fournir des éléments afin de développer le réseau de problèmes dans l'étape suivante.

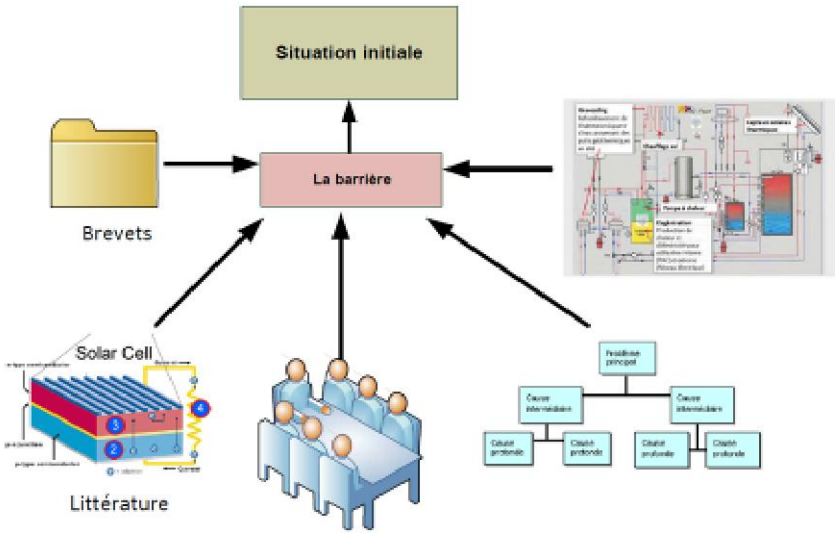



*Figure 3.13 : Collecte d'information.*

### 3.3.2 *Etape 2 : Réseau de problèmes*

Son but est de générer une image complète de la situation problématique de façon formalisée pour en obtenir une meilleure compréhension et donc facilité la description de ses principales causes qui peuvent être la source de contradictions (Khomenko et De Guio 2007). Néanmoins, malgré l'importance du réseau de problèmes, il n'existe pas un moyen ou une méthode pour aider à sa construction. Pour cette raison, nous proposons une méthode de formalisation des problèmes et des solutions partielles, décrite par la suite.

#### 3.3.2.1 Etape 2.1 : l'analyse de la situation problématique et développement du réseau de problèmes

La méthode d'analyse proposée a pour but de réaliser de façon ordonnée un recensement des causes principales de la situation problématique ainsi que des solutions partielles déjà existantes. Elle fournit des moyens pour favoriser la génération de solutions en cours d'analyse et donc facilite la construction du réseau de contradictions. Dans cette méthode, nous nous sommes appuyés sur l'outil du réseau de problèmes, le modèle de transition d'états qualitatifs et le modèle d'action. Le processus d'analyse de la situation problématique est composé par trois parties (figure 3.14) :

- **Situation initiale** : elle décrit les aspects les plus importants du problème ou d'une solution partielle.
- **Analyse** : dans cette partie, la situation est modélisée en utilisant deux « fenêtres » de modélisation : la transition des états qualitatifs et le modèle d'action. Ces deux fenêtres représentent la perception du concepteur de la situation problématique sous deux angles différents. D'un côté, la transition des états qualitatifs modélise le système comme la transition ou le changement entre ses différents états qualitatifs lorsqu'il est soumis à une action. D'un autre côté le modèle d'action représente l'interaction entre l'outil (nommé aussi l'instrument) et le système. L'outil est le composant qui réalise l'action sur l'objet afin de le modifier ou de le faire passer d'un état qualitatif à un autre (Salamatov 1999). Ces deux fenêtres permettent de représenter la

situation problématique et indiquent différentes voies d'actions qu'il est possible de réaliser afin de résoudre cette situation.

- **Nouveaux problèmes ou solutions partielles** : les problèmes rencontrés ou les solutions générées au travers de l'analyse avec les deux fenêtres sont décrits afin de générer de nouvelles situations à analyser.

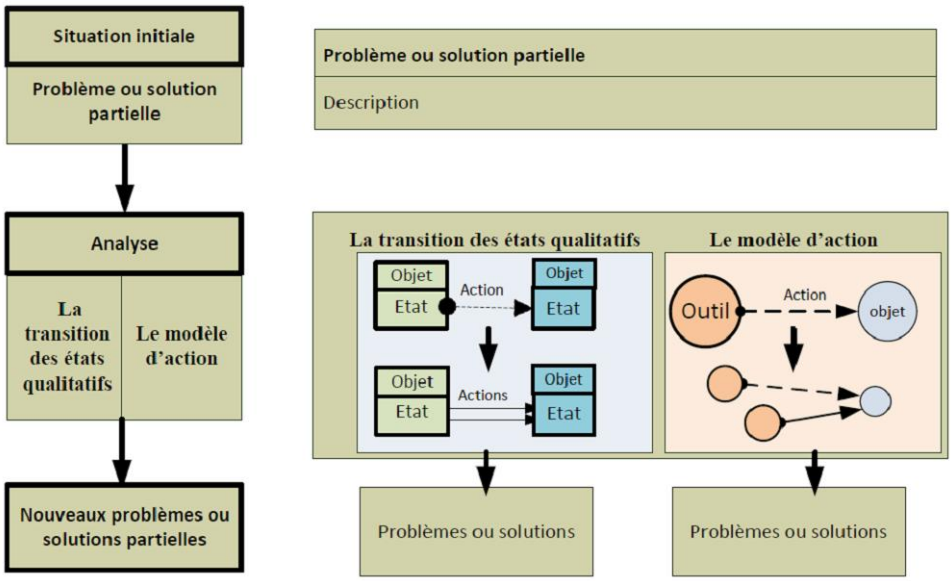



*Figure 3.14 : Les trois étapes de l'analyse de la situation problématique.*

Les deux fenêtres ont pour objectif de fournir deux représentations différentes mais complémentaires d'une situation similaire et donc deux observations différentes du problème comme le suggère l'axiome sur la réflexion d'OTSM-TRIZ (Khomenko et Ashtiani 2007). Par exemple, on peut représenter l'utilisation du chauffage (outil) afin de chauffer un bureau (système) comme le changement de l'état qualitatif (du bureau) de froid à chaud et l'interaction entre le chauffage et le bureau comme le modèle d'action (figure 3.15). Dans cet exemple, les deux modèles sont complets et représentent un état et une action désirés. Par ailleurs, une situation problématique est générée, par exemple, avec l'existence d'un état non désiré ou la difficulté à réaliser un état désiré.

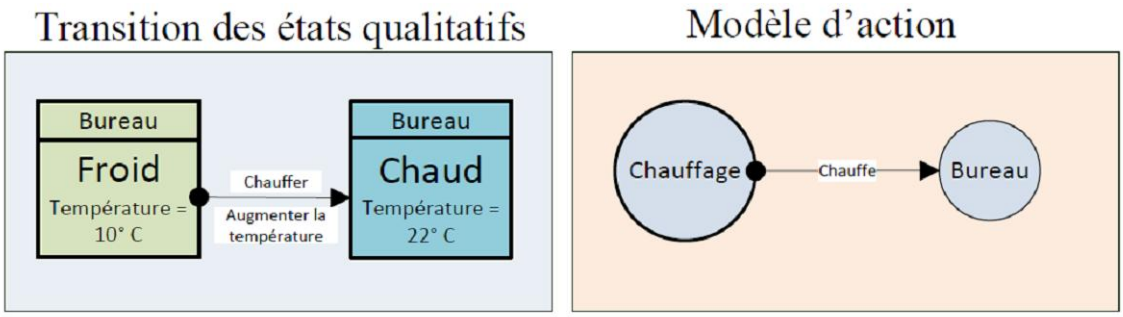



*Figure 3.15 : Exemple du modèle de la transition des états qualitatifs et le modèle d'action.*

### 3.3.2.2 La fenêtre de l'état qualitatif

**Etat qualitatif**

La fenêtre de l'état qualitatif a pour but de représenter le changement entre deux états qualitatifs d'un système. *« Un état qualitatif est un ensemble de propositions (ensemble de paramètres) qui caractérisent un comportement qualitativement distinct du système à un instant donné ou durant un intervalle de temps »* (Forbus 2008). Les états qualitatifs sont utilisés afin de fournir un moyen de prévoir, expliquer et décrire les comportements du système physique en utilisant des termes qualitatifs (De Kleer 1992). Un changement d'un état qualitatif à un autre est représenté par un changement des conditions qualitatives importantes du comportement d'un système. Par exemple, quand l'on soumet un récipient contenant de l'eau à une source de chaleur, durant l'élévation de température entre 30 °C et 70° C, l'eau reste dans un même état qualitatif : liquide. Par contre, durant le changement de température entre 90°C et 100 °C, il existe un passage de l'état qualitatif liquide à l'état gazeux où l'eau se comporte de manière différente. La représentation d'un système dans un état qualitatif est définie par deux composants : le nom du système, et ses attributs (paramètres) avec leur relation (figure 3.16). Une relation décrit certaines conditions entre les attributs du système afin que cet état puisse exister, par exemple, pour qu'un système soit à l'état liquide il faut que sa température soit supérieure à son point de fusion et inferieure à son point d'ébullition. Une relation peut aussi représenter certaines liaisons fonctionnelles entre les paramètres. Une relation fonctionnelle (ou de proportionnalité qualitative) décrit une dépendance proportionnelle entre deux paramètres (Forbus 2008), par exemple, la chaleur d'un objet a une relation proportionnelle croissante avec sa température (chaleur $\propto_{Q+}$ température), c'est-à-dire, si l'on augmente la chaleur de l'objet la température augmente également. La relation fonctionnelle peut être croissante ou décroissante.

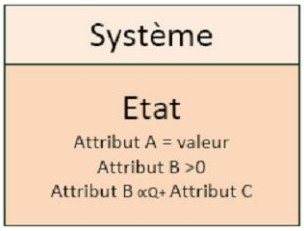



*Figure 3.16 : Représentation de l'état d'un système.*

Le passage entre deux états qualitatifs est assimilable à un diagramme d'état de transition dans la modélisation UML (Charroux et al. 2005). La transition entre deux états qualitatifs est déclenchée par des actions (événements) qui pour notre modélisation peuvent être représentées par des phénomènes physiques décrits comme un processus (e.g. collision, oxydation, flux de chaleur), ou comme des changements de paramètres d'un système (e.g. augmentation de la température, du volume ou de la vitesse). Ainsi, une même transition entre deux états peut être représentée au travers d'un procédé ou d'un changement de paramètre (figure 3.17).

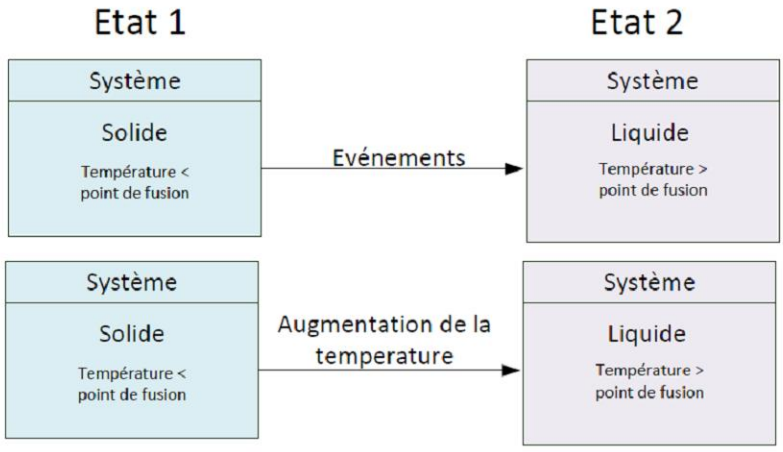



*Figure 3.17 : La transition entre états qualitatifs.*

**Analyse par la fenêtre des états qualitatifs**

Grâce à l'analyse de la transition des états, le concepteur peut décrire des problèmes existants ainsi que des solutions potentielles pour générer un état désiré ou changer un état non désiré. A partir de la description de la situation problématique, la situation est identifiée selon le type d'état de transition. Il existe trois types de changement entre états (détaillés par la suite) : état actuel vers un état désiré, l'état actuel vers un état non désiré et le changement entre deux états désirés. Le concepteur propose alors une solution selon le type d'état de transition. Cette solution peut être obtenue soit par la connaissance ou l'information que possède le concepteur, soit au travers de nouvelles connaissances ou d'information externe (base de brevets, littérature, etc.). Dans notre approche, la direction de recherche de solutions est réalisée au travers des stratégies les plus couramment utilisées dans le changement d'états. Les solutions générées sont définies comme une nouvelle solution partielle. Par contre, si cette solution présente des obstacles, ces derniers sont considérés comme des nouveaux problèmes.

**Transition Etat actuel - Etat désiré** : ce modèle représente la transition d'un état actuel vers l'état désiré (figure 3.18) dans lequel la situation problématique peut être représentée par la difficulté à atteindre l'état désiré ou les effets non désirés que génèrent le passage vers cet état désiré. Les stratégies à suivre pour réaliser le changement d'un état actuel vers un état désiré sont les suivantes :

- Action ou modifier l'action : afin de réaliser la transition vers un état désiré, il est possible d'introduire une action ou la modification d'une action existante.
- Ajouter une action : si l'état désiré est difficile à réaliser à cause d'une action existante insuffisante, il est possible d'ajouter une action supplémentaire pour accroitre l'action existante.
- Substituer : si l'action actuelle ne peut pas réaliser efficacement la transition vers l'état désiré, une option est de substituer l'action existante par une autre action.
- Modifier l'état actuel : s'il est difficile de réaliser la transition vers l'état désiré, on peut chercher à modifier l'état actuel du système de sorte que la transition vers l'état désiré soit plus facilement réalisable.

- Changer vers un état non désiré puis vers un état désiré : s'il est difficile de réaliser la transition vers un état désiré directement, il est possible de passer par un état non désiré temporaire pour atteindre l'état désiré.

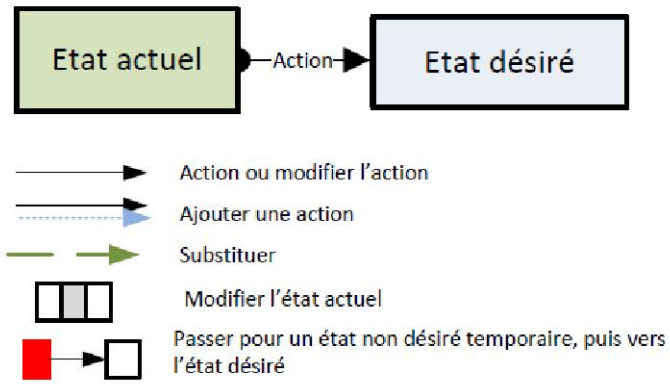



*Figure 3.18 : Transition Etat actuel - Etat désiré.*

Exemple : Les voyageurs qui utilisent l'aéroport Orly se plaignent de la distance entre les terminaux 1 et 2. La majorité des réclamations viennent des voyageurs qui n'ont pas pu prendre leur correspondance ou qui sont arrivés en retard à cause de la distance entre les deux terminaux. Le but est donc d'augmenter la vitesse de déplacement entre la terminal 1 (état 1) et le terminal 2 (état 2). L'analyse de l'état actuel- état désiré et les stratégies à suivre sont décrites sur la figure 3.19.

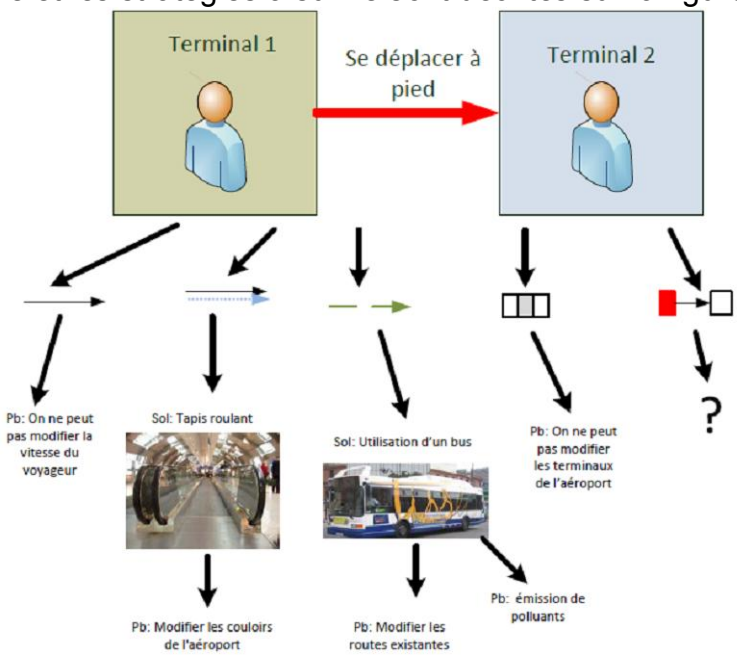



*Figure 3.19 : L'analyse de l'état actuel- état désiré et les stratégies de solution.*

Dans cet exemple, plusieurs solutions partielles (Sol.) et des problèmes (Pb.) sont générés. Dans, le cas où une solution génère des obstacles, cette situation peut être

formalisée comme une contradiction. Ainsi, ce type de modélisation facilite la formulation de contradictions.

**Transition Etat actuel - Etat non désiré :** ce modèle analyse la transition vers un état non désiré d'un système. Les états non désirés sont, la plupart du temps, guidés par les lois de la physique. Les stratégies à suivre sont (figure 3.20) :

- Renforcer : changer les caractéristiques ou propriétés du système afin de prévenir ou d'éliminer la transition vers l'état non désiré.
- Utiliser l'état non désiré : utiliser ou tirer bénéfice de l'état non désiré. Cette stratégie est rarement considérée à cause de l'inertie psychologique mais elle permet de générer des idées innovantes. Cette stratégie nous permet d'accepter ce qui parait inacceptable (Salamatov 1999).
- Eliminer ou réduire l'action : dans cette stratégie, il est nécessaire de changer les conditions d'existence de l'action pour l'éliminer ou la changer afin que la transition vers l'état non désiré n'existe plus.
- Utiliser l'action : dans cette stratégie, l'action est utilisée afin d'éliminer ou réduire l'action néfaste ou renforcer l'état actuel du système.
- Contrebalancer : il s'agit d'utiliser une action opposée afin de compenser ou d'équilibrer l'action. Cette contre action peut être réalisée pendant, après ou avant l'action. Dans certains cas, il est possible d'appliquer une contre action après l'action ou lorsque l'objet est dans l'état non désiré. Par exemple, une action après un état non désiré est de réparer un système endommagé et une action avant l'action non désirée est la maintenance préventive.

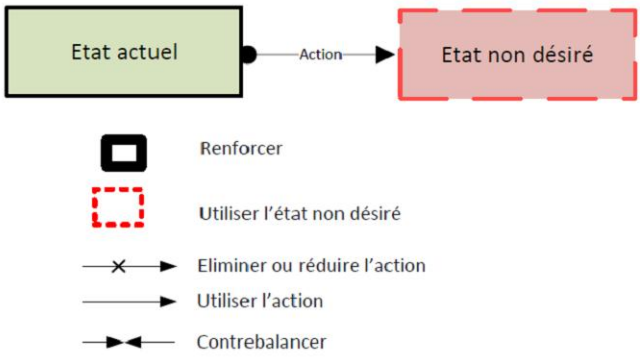



*Figure 3.20 : Transition Etat actuel - Etat non désiré.*

Exemple : une entreprise doit concevoir et fabriquer une antenne militaire mobile. Le système est composé de l'antenne et d'un mât qui la supporte. Durant son utilisation hivernale, un problème se pose : la glace s'accumule sur l'antenne ce qui provoque la rupture du mât (Horowitz 1999). Comment résoudre le problème ? Les stratégies à suivre dans cette situation non désirée sont décrites sur la figure 3.21.

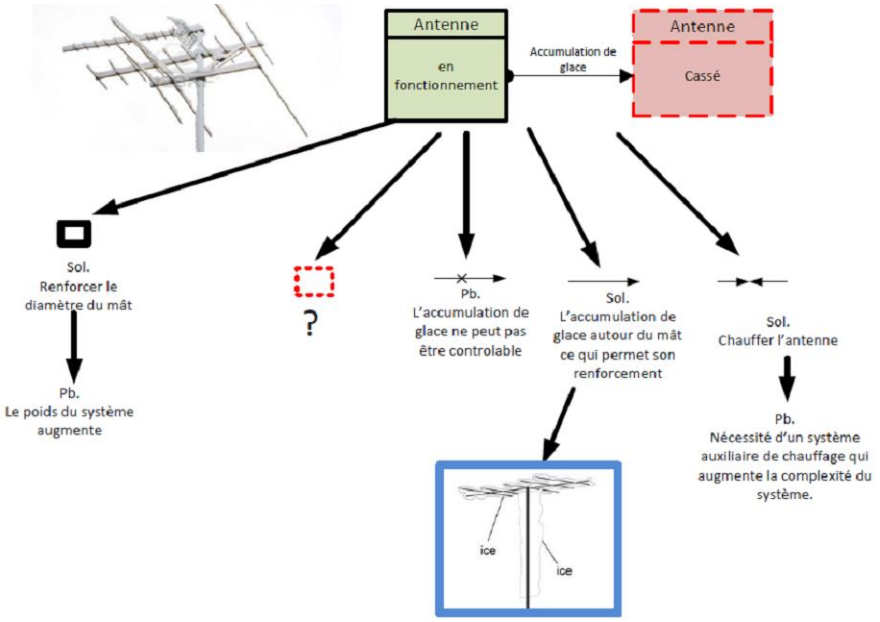



*Figure 3.21 : Exemple d'un état non désiré.*

Dans cet exemple, la solution envisagée est d'utiliser l'action qui provoque la transition vers l'état non désiré pour renforcer le mât ce qui élimine cette transition. Il faut noter que plusieurs solutions peuvent être développées en considérant une seule stratégie. Dans l'exemple de l'antenne, la stratégie de renfoncer peut donner lieu à des solutions comme : utiliser des matériaux composites, appliquer une couche de téflon, changer la structure du système afin que la glace ne puisse pas s'accumuler, fabriquer une antenne plus légère, couvrir l'antenne avec une couche en plastique.

**Transition entre deux Etats désirés** : ce modèle représente deux états désirés d'un même système. Dans ce cas, les stratégies à suivre sont (figure 3.22) :

- Utiliser un état : utiliser un seul état ou les deux séparément.
- Compromis entre les deux états : utiliser un état intermédiaire entre les deux états désirés.
- Agir : utiliser une action capable de faire changer le système entre les deux états désirés.
- Etat de transition : le système a la capacité de changer entre les deux états désirés.

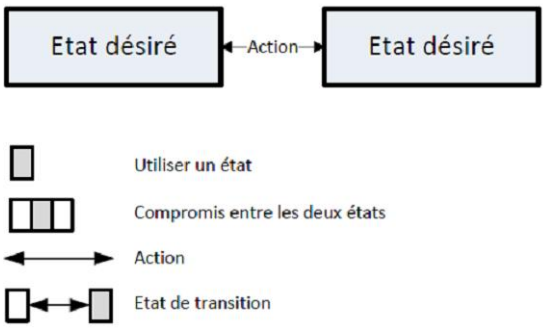



*Figure 3.22 : Transition entre deux états désirés.*

Exemple : Dans la conception d'un couteau, on désire qu'il soit long lors de son utilisation et court quand il n'est pas utilisé ou quand il est transporté. Comment le couteau peut-il avoir ces deux états désirés ? La figure 3.23 décrit les différentes stratégies à suivre.

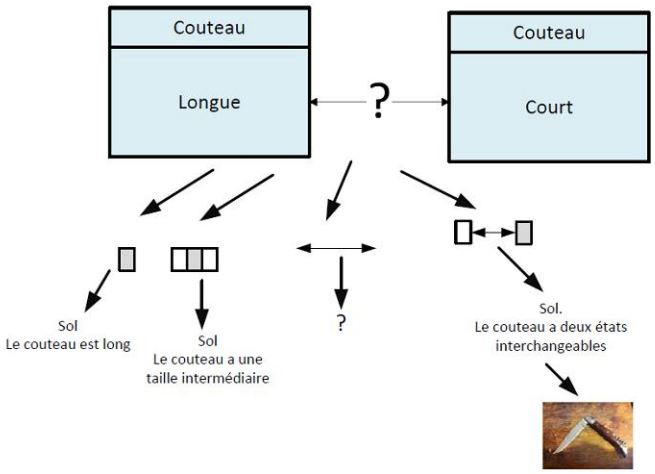



*Figure 3.23 : Stratégies pour les deux états désirés d'un couteau.*

Ainsi, la fenêtre des états qualitatifs (figure 3.24) représente de manière graphique la situation problématique initiale et les stratégies de solutions selon les types de changement entre états qualitatifs. L'analyse d'un état qualitatif peut générer des nouvelles solutions ou nouveaux problèmes qui à leur tour doivent être soumis à analyse. Cette analyse n'est pas considérée dans la méthodologie OTSM-TRIZ dans le processus de formulation de problèmes et construction du réseau des problèmes. Le but de l'analyse des états qualitatifs est de guider la pensée du concepteur et de formaliser cette pensée pour des utilisations futures. Néanmoins, cette analyse n'est pas complète car il faut aussi considérer l'outil qui agit sur le système afin qu'il puisse faire la transition entre différents états. L'analyse des interactions entre l'outil et le système est nommée modèle d'action, elle est décrite dans le paragraphe suivant.

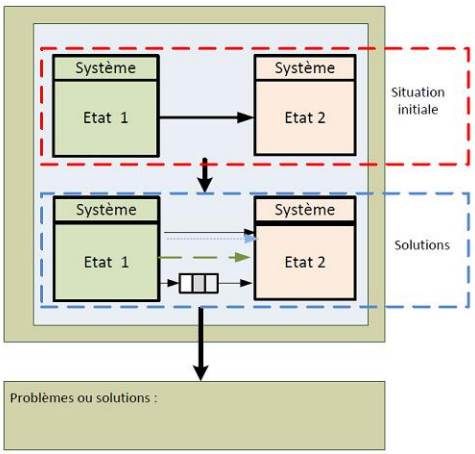



*Figure 3.24 : La fenêtre des états qualitatifs.*

### 3.3.2.3 Fenêtre du modèle d'action

L'analyse avec le modèle d'action a pour but de décrire les différents types d'interactions (actions) existantes dans une situation problématique et de guider vers des solutions potentielles. La différence avec la fenêtre d'états qualitatifs est que ce modèle représente l'interaction entre objets (outil - système) qui provoque le changement de l'état qualitatif du système et donc il donne une perspective différente de la situation problématique. L'analyse d'action est ajoutée à la théorie TRIZ (Clausing et Fey 2004) (Fey et Rivin 2005) (Terninko et al. 1998) afin de formuler la situation problématique et la contradiction. Dans notre approche, cette analyse est utilisée pour formuler des solutions envisageables ou des problèmes liés à l'interaction entre le système et l'outil ou entre le système et son environnement.

Le modèle d'action implique l'interaction (dénommée action) entre deux composants : un système et un outil. Une action peut être considérée utile (désirée) ou néfaste (non désirée). Cette interprétation est subjective car la même action peut être considérée comme utile ou néfaste. Il existe quatre types d'actions envisageables, tableau 3.1 (Fey et Rivin 2005).

| Action | Représentation |
|---|---|
| Action utile satisfaisante |  |
| Action utile manquante |  |
| Action utile insatisfaisante |  |
| Action néfaste |  |

*Tableau 3.1 : Les quatre types d'actions (Fey et Rivin 2005).*

La description de cette interaction se réalise en utilisant les noms pour représenter les systèmes et les outils, et des verbes pour décrire l'action. Par exemple, « la chaudière » *chauffe* « l'eau », « une ampoule électrique » *émet de la* « lumière », « l'échangeur de chaleur » *transfère* « la chaleur ». En considérant ces descriptions, le système peut être défini comme le composant à contrôler et l'outil le composant qui contrôle directement les paramètres du système. Cette interaction est représentée sur la figure 3.25. Différents outils peuvent être utilisés pour réaliser la même action. Une action peut inclure la mesure d'un paramètre ou une caractéristique de l'objet.

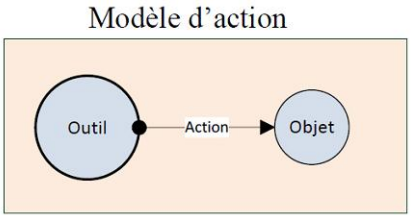



*Figure 3.25 : Modèle d'action.*

Des quatre interactions possibles, seules l'action utile manquante, l'action utile insatisfaisante et l'action néfaste sont analysées dans la situation problématique du modèle d'action afin d'établir des directions de recherche de solutions. Le but est de réaliser une action utile satisfaisante ou d'éliminer ou réduire l'action néfaste.

**Action utile manquante :** c'est une action qui doit être introduite afin que le système réalise une action désirée. Cette action utile manquante et la stratégie à suivre sont (figure 3.26) :

- Introduction de l'outil et l'action afin que l'objet puisse réaliser l'action désirée.

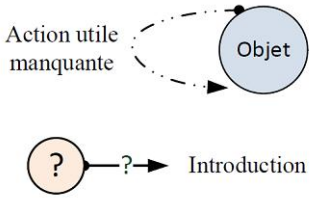



*Figure 3.26 : Action utile manquante.*

Exemple : un parasol doit être léger pour son transport et lourd pour être stable. Le problème est résolu avec l'introduction de l'outil (la base du parasol remplie d'eau) afin de stabiliser le parasol (figure 3.27).

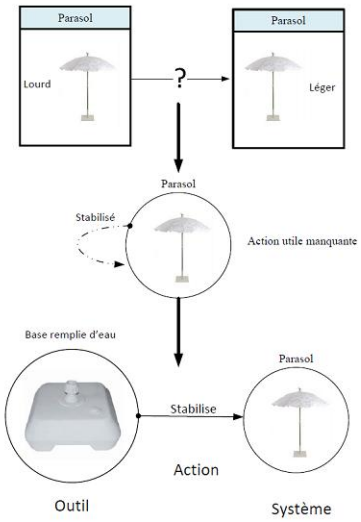



*Figure 3.27 : Exemple d'introduction d'une action utile manquante.*

**Action utile insatisfaisante :** c'est une action existante qui a un résultat insatisfaisant, qui présente des désavantages ou qui est difficile à mettre en œuvre. Les stratégies à suivre sont les suivantes (figure 3.28) :

- Renforcer : modifier l'outil existant afin d'améliorer l'interaction avec le système et donc améliorer l'action utile.
- Modifier l'action : changer l'interaction entre l'outil et le système afin d'améliorer l'action utile.
- Action auxiliaire : introduire une action auxiliaire afin d'améliorer l'action existante.
- Substituer : changer l'outil ou l'action existante par une autre qui permet au système de réaliser l'action désirée.
- Modifier : modifier l'objet afin de réaliser l'action désirée ou qui facilite l'action existante.

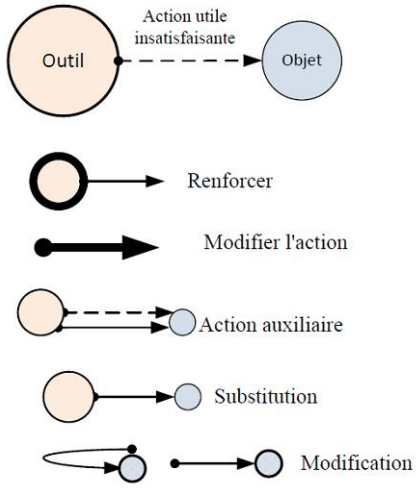



*Figure 3.28 : Action utile insatisfaisante.*

Exemple : Pour décrire une action utile insatisfaisante et les stratégies à suivre, nous prenons l'exemple suivant : pour l'excavation dans une mine de charbon, on cherche à augmenter la vitesse d'excavation pour répondre à une augmentation de la demande en charbon. Donc, l'entreprise veut explorer les différentes options à mettre en œuvre pour améliorer la productivité. La figure 3.29 représente les différentes stratégies à suivre, les solutions proposées et les problèmes rencontrés.

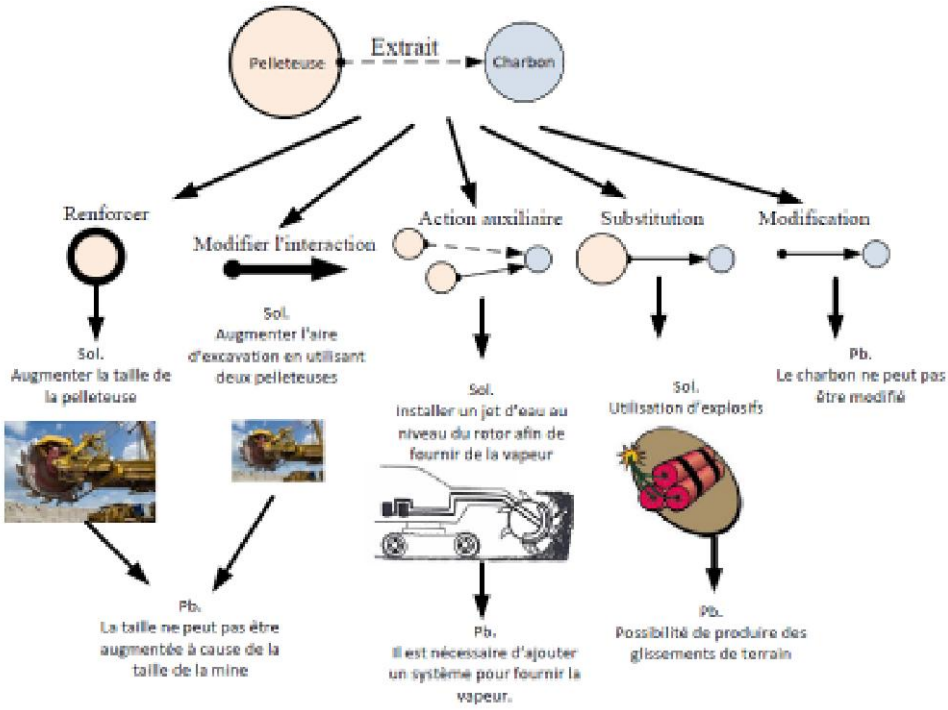



*Figure 3.29 : Les stratégies à suivre dans l'extraction de charbon.*

**Action néfaste :** Une action néfaste est une action qui dégrade l'efficacité du système. Lorsqu'une action néfaste existe au travers de l'interaction entre l'outil et le système, les stratégies à suivre sont les suivantes (figure 3.30) :

- Eliminer ou modifier l'outil afin que l'action néfaste disparaisse ou soit réduite.
- Eliminer ou modifier l'interaction afin que l'action néfaste disparaisse ou soit réduite.
- Eliminer ou modifier le système afin que l'action néfaste disparaisse ou soit réduite.

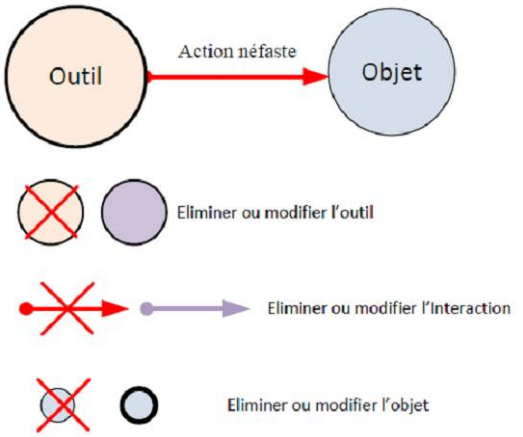



*Figure 3.30 : L'action néfaste et les stratégies à suivre.*

La modification de l'outil, du système ou de l'action néfaste peut être réalisée par l'ajout d'une action.

Exemple : Un tuyau en plastique, qui à été initialement conçu pour transporter des billes en plastique, est utilisé maintenant pour transporter des billes de métal. Malheureusement, dans les coudes du tuyau, les impacts des billes sur les parois de la conduite détruisent celles-ci (figure 3.31) (Savransky 2000). Comment résoudre le problème ? Les solutions générées en utilisant le modèle de l'action néfaste sont représentées sur la figure 3.32.

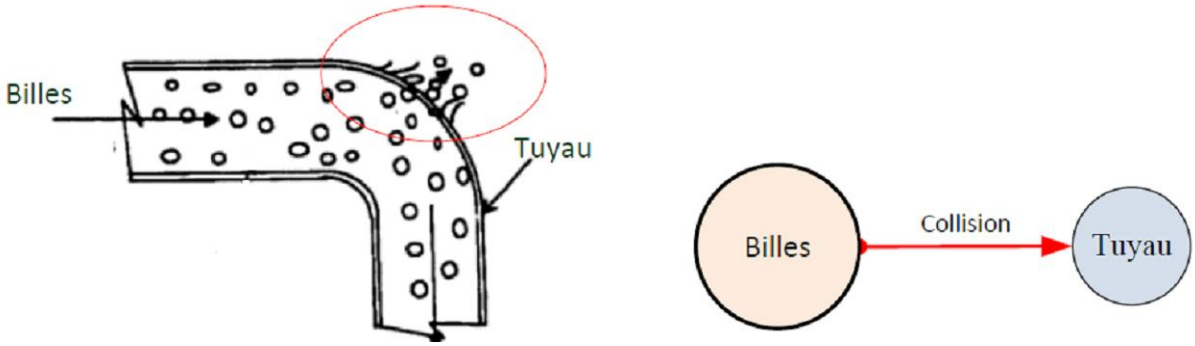



*Figure 3.31 : Modélisation du transport des billes de métal.*

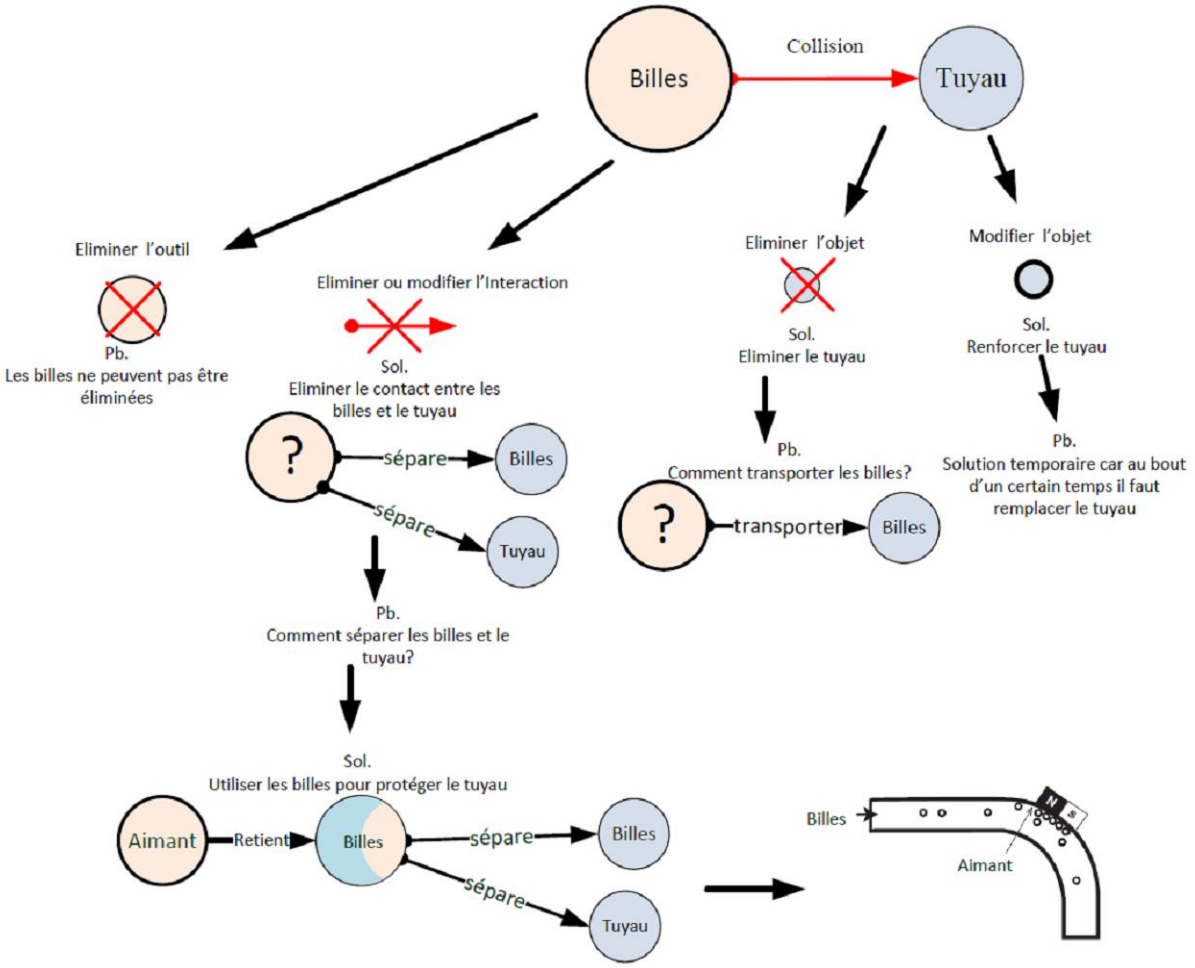



*Figure 3.32 : L'action néfaste et les stratégies à suivre.*

Dans l'exemple, la stratégie à suivre est de réduire l'interaction entre les billes et le tuyau c'est-à-dire éliminer le contact entre les deux. Pour ce faire, un aimant est utilisé pour couvrir la superficie d'interaction entre les billes et le tuyau de façon à utiliser des billes comme bouclier protecteur.

Ainsi, le modèle d'action (figure 3.33) représente de manière graphique la situation problématique initiale et les stratégies de solutions selon les types d'action. Cette analyse peut générer de nouvelles solutions ou nouveaux problèmes qui à leur tour doivent être soumis à une analyse.

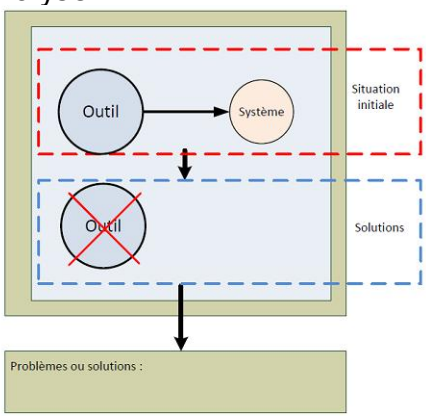



*Figure 3.33 : La fenêtre du modèle d'action.*

Par rapport à l'état qualitatif, le modèle d'action considère non seulement l'action sinon l'outil qui participe à l'action sur le système. Enfin, ces deux outils interagissent afin de faciliter la compréhension du problème et de modéliser la situation problématique. Les problèmes et les solutions générés par ces deux outils sont formalisés dans le réseau des problèmes décrit par la suite.

### 3.3.3 *Le réseau des problèmes*

L'analyse de la situation problématique définie précédemment permet la construction progressive du réseau de problèmes. Ainsi, le réseau commence avec les principales barrières à résoudre dans notre problématique environnementale, définies à l'aide du modèle « TONGS » environnemental. Puis le problème initial est analysé à l'aide des deux modèles précédents. Suite à cette analyse, des sous-problèmes ou des solutions partielles sont générés, ces sous problèmes sont à leur tour analysés. La figure 3.34 illustre le développement du réseau de problèmes et sa relation avec l'analyse de la situation problématique. Le but est de formaliser le processus de modélisation des problèmes qui la plupart du temps ne l'est pas, mais aussi de faciliter la description des causes et conséquences d'un problème ou d'une solution proposée.

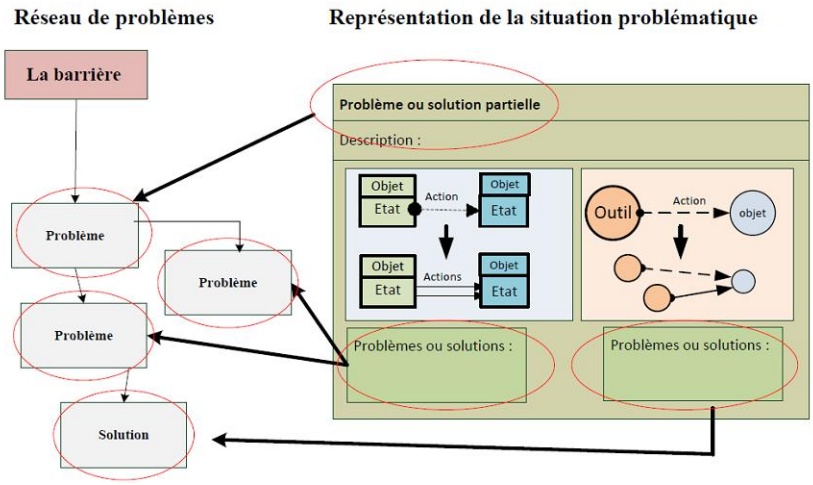



*Figure 3.34 : Le réseau de problèmes et l'ensemble de la situation problématique.*

### 3.3.4 *Définition des problèmes principaux*

Une fois que le réseau n'évolue plus, un graphique des différents problèmes existants est créé. Les problèmes les plus importants à résoudre sont sélectionnés pour les transformer en contradictions. Cette sélection est réalisée soit par les experts ou soit parce que plusieurs problèmes existants sont associés à un problème ou une solution partielle (figure 3.35). Cette association indique souvent l'existence d'au moins une contradiction cachée. Dans le cas où plusieurs problèmes principaux existent, il est préférable de sélectionner ceux qui ont plus fort impact environnemental et/ou ceux qui utilisent le plus de ressources, et/ou qui se trouvent le plus proche de la barrière initiale (Khomenko et De Guio 2007).

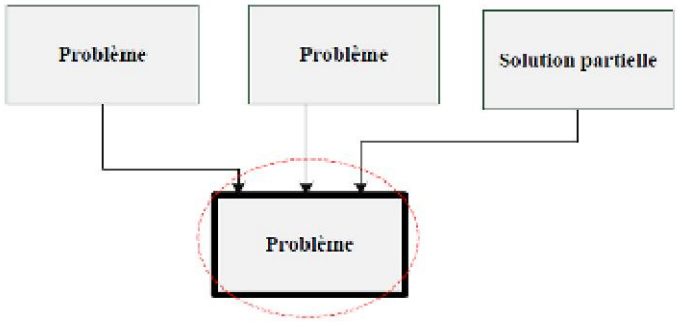



*Figure 3.35 : Identification d'un problème principal.*

## 3.4 ETAPE 3 : CONTRADICTIONS

Cette étape est consacrée, dans un premier temps, à la transformation des problèmes principaux sous la forme d'un réseau de contradictions, puis un réseau de paramètres en utilisant le modèle EAV et la description temporelle et spatiale. Dans un deuxième temps, l'identification des ressources existantes est réalisée.

### 3.4.1 *Etape 3.1 et 3.2 : Réseau de contradictions et réseau de paramètres*

Une fois le réseau de problèmes établi, les problèmes principaux sont transformés en une liste initiale de contradictions. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir une représentation compréhensible des éléments du problème et un moyen pour les

représenter sous la forme d'une contradiction. Ainsi, la description de la contradiction est réalisée au travers du modèle EAV (Elément - Attribut - Valeur) (Cavallucci et Khomenko 2007). Le problème est lié à la valeur d'un paramètre (attribut) d'un système (élément) nommé paramètre de contrôle (celui qui peut être directement influencé ou modifié), qui est en conflit car il influence positivement ou négativement d'autres paramètres du système ou de son environnement (dénommés paramètres d'évaluation) (Khomenko et al. 2007). Cette modélisation est représentée sur la figure 3.36. Le modèle EAV est accompagné d'une partie d'interprétation qui décrit le résultat de l'influence du paramètre de contrôle sur les différents paramètres d'évaluation. Ces interprétations sont associées pour établir la contradiction. Dans la partie inférieure, les paramètres en conflit sont représentés dans un espace temporel et spatial afin de mieux comprendre le problème. Ainsi, une contradiction est définie comme le conflit entre les paramètres d'évaluation lorsque le paramètre de contrôle prend une valeur déterminée. Finalement, chaque problème principal est représenté sous cette forme et le réseau de contradictions est construit.

La formalisation d'une contradiction comprend les parties suivantes (adapté de Cavallucci et al. 2005) :

- Elément : représente une partie du système à analyser.
- Paramètre de contrôle (attribut) : paramètre du système qui provoque des changements sur le paramètre d'évaluation du même système ou sur l'environnement. La valeur de ce paramètre est contrôlée par le concepteur.
- Valeur : la valeur d'un paramètre peut être représentée selon l'état qualitatif d'un paramètre (grand, chaude, active…) ou comme une variable qualitative (quantité de substance > zéro, pression > pression maximale, température = point de fusion).
- Influence : elle représente la relation entre un paramètre de contrôle et un paramètre d'évaluation.
- Paramètre d'évaluation : paramètre influencé par le paramètre de contrôle.
- Interprétation : elle décrit le résultat de l'influence du paramètre de contrôle sur un paramètre d'évaluation selon le point de vue du concepteur.
- La contradiction : elle décrit le conflit entre les deux interprétations des paramètres d'évaluation ou les paramètres de contrôle.
- Description spatiale et temporelle du conflit : elle décrit la relation temporelle et spatiale entre deux paramètres en conflit soit les deux valeurs du paramètre de contrôle, ou soit les deux paramètres d'évaluation.

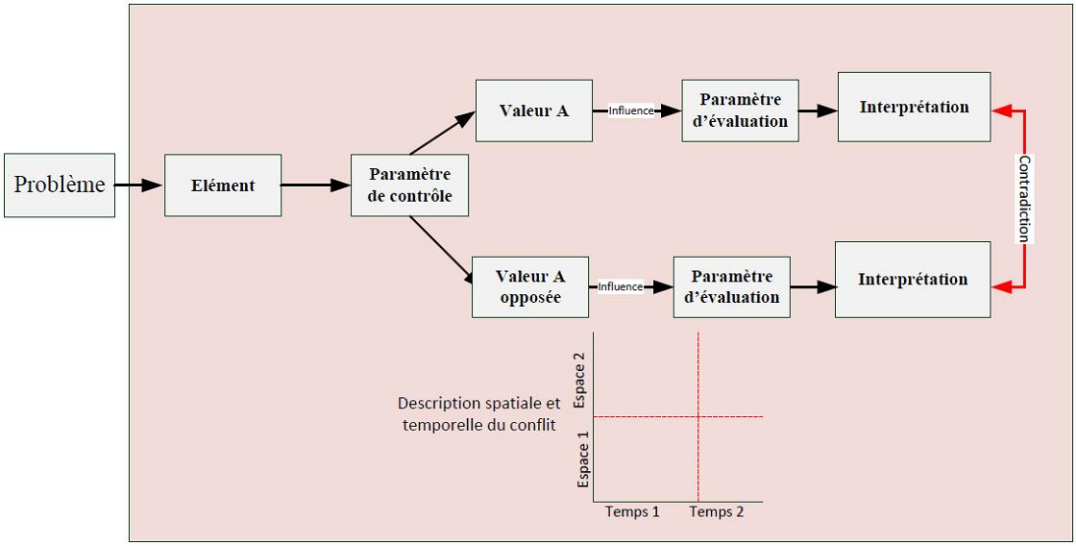



*Figure 3.36 : Le modèle EAV et la contradiction.*

La description spatiale et temporelle du conflit peut se représenter avec les relations suivantes (figure 3.37) :

- Conflit dans les mêmes espace et temps.
- Conflit dans le même espace mais à des temps différents.
- Conflit dans le même temps mais dans des espaces différents.
- Conflit dans différents temps et espace.

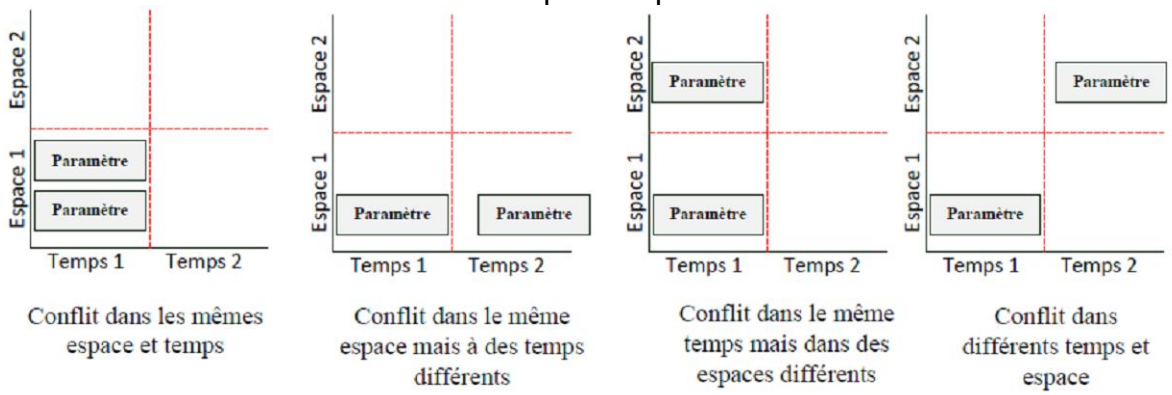



*Figure 3.37 : Les relations spatiales et temporelles entre les paramètres en conflit.*

Ainsi, pour chaque problème principal, une contradiction est formalisée, puis un réseau de contradictions est créé comme l'ensemble des contradictions existantes pour une situation problématique (figure 3.38).

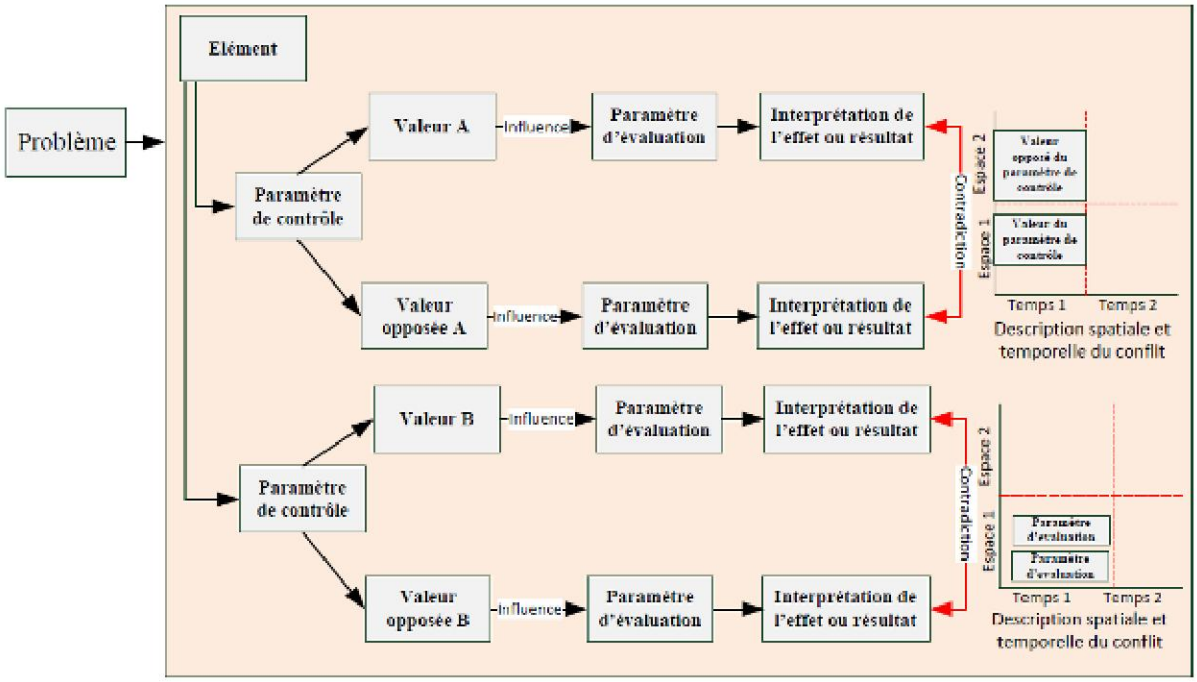



*Figure 3.38 : Réseau des contradictions.*

Une fois que les contradictions sont formalisées, elles sont analysées afin de créer le réseau de paramètres. Dans ce réseau, on représente la valeur désirée de chaque paramètre d'évaluation, la valeur (la plus désirée) pour le paramètre de contrôle et la barrière définie par les lois de la physique qui empêche l'atteinte de l'état désiré (figure 3.39). La valeur du paramètre de contrôle la plus désirée retenue est celle qui assure le maximum d'efficacité de l'action, celle dictée par les lois de la physique, celle qui parait comme la plus convenable dans la situation existante. Dans notre cas, celle qui assure l'atteinte d'au moins une des actions de la production durable et/ou qui réduit significativement l'impact environnemental.

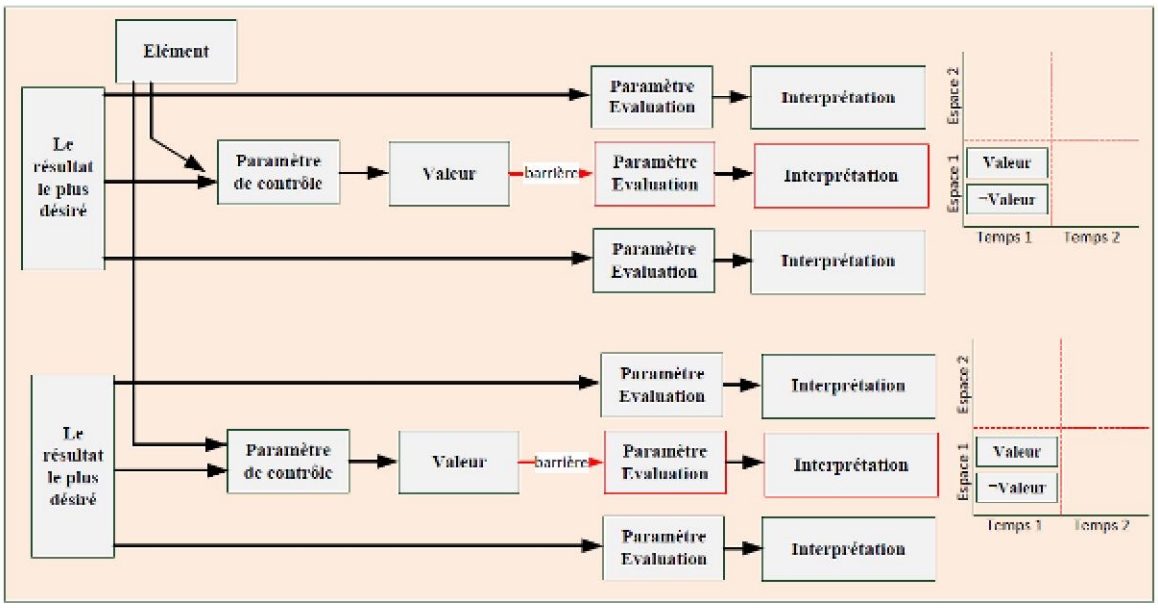



*Figure 3.39 : Réseau des paramètres.*

Par exemple : Un nageur qui pratique la nage longue distance a des difficultés à réaliser son entrainement hivernal en piscine. La petite taille du bassin est l'inconvénient principal : le nageur doit se concentrer à chaque fois qu'il s'approche du mur du bassin. De plus, le temps de trajet est très court. Il serait préférable d'avoir un bassin long mais cela implique la construction d'un nouveau bassin (Salamatov 1999). Comment est-il possible d'avoir un entrainement ininterrompu pour le nageur sans augmenter la taille du bassin ?

La formulation de la contradiction de cet exemple est la suivante (figure 3.40) :

- La piscine doit être longue pour faciliter l'entrainement.
- La piscine doit être courte parce que la piscine ne peut pas être allongée. Pour la description spatiale et temporelle les deux paramètres sont en conflit dans le même temps et dans le même espace.

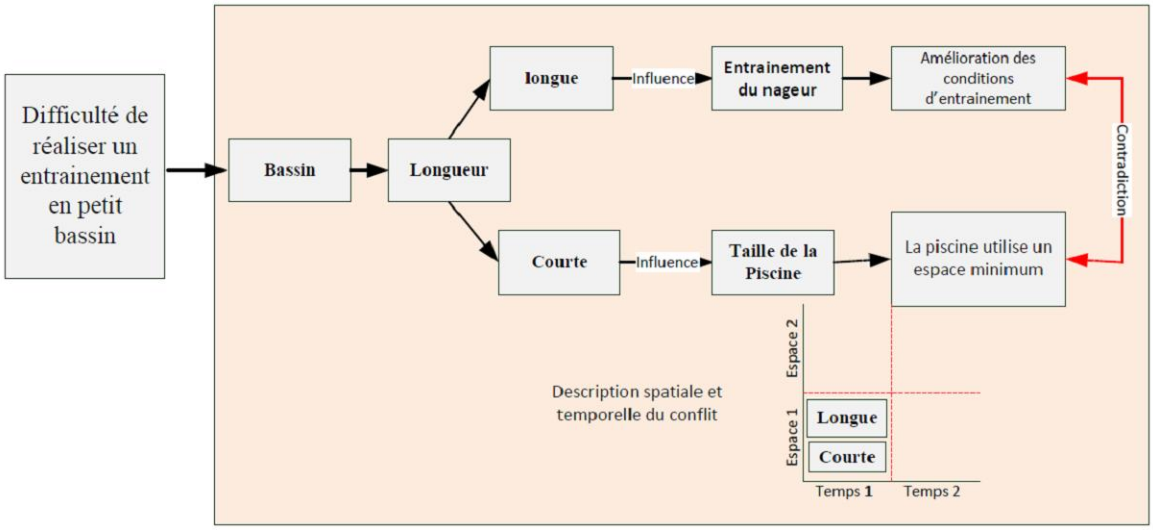



*Figure 3.40 : La formulation de la contradiction.*

La formulation du réseau de paramètres est la suivante (figure 3.41) :

- On souhaite une amélioration des conditions d'entrainement en gardant une taille raisonnable de la piscine pour faciliter sa construction et pour utiliser le moins d'espace possible.
- La valeur la plus désirée est que le bassin soit court mais avec cette valeur l'entrainement est difficile à réaliser (barrière à surmonter).

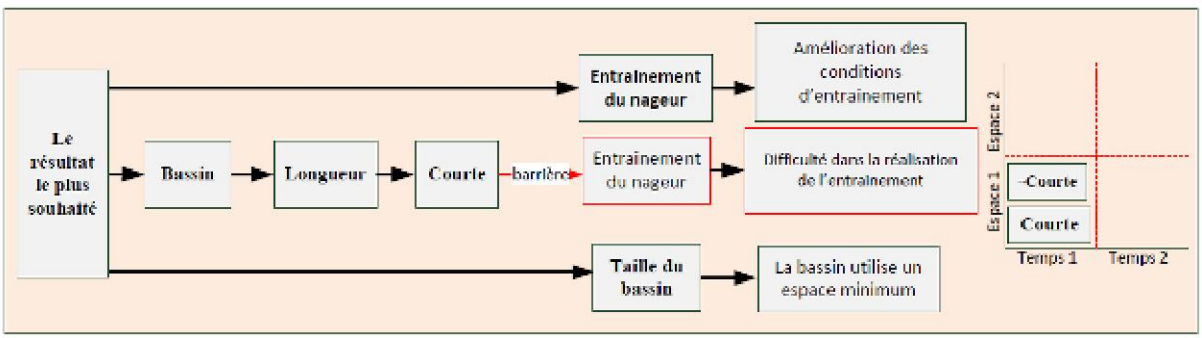



*Figure 3.41 : Représentation du réseau du paramètre.*

Solution : la piscine est construite en circuit fermé, avec la simulation d'un courant continu fourni à l'aide d'une pompe. Ainsi, la contradiction est résolue, la piscine est courte en taille mais le courant permet au nageur de réaliser des entrainements sans effectuer de virages (figure 3.42).

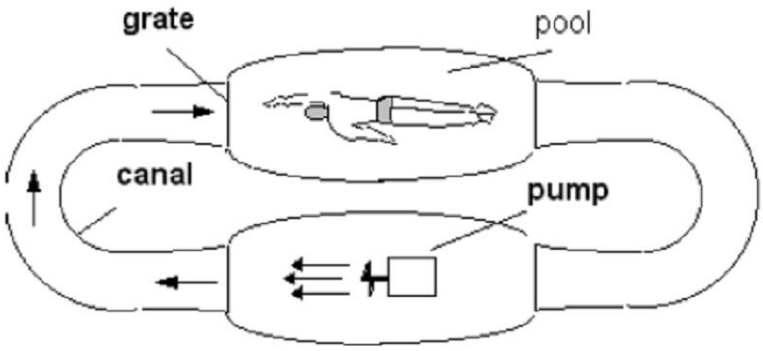



*Figure 3.42 : Représentation de la solution du problème de bassin (Salamatov 1999).*

Le réseau de contradictions et de paramètres permettent de formaliser la situation problématique sous la forme d'une contradiction. Pour faciliter la résolution des contradictions, il s'avère nécessaire de considérer toutes les ressources disponibles dans le système et son environnement.

## 3.5 MODELISATION DES RESSOURCES

Dans une situation problématique spécifique, tout problème est résolu en utilisant des ressources. Une ressource disponible est un élément présent dans le système ou dans son environnement proche et qui peut être utilisé pour produire une action utile sans ou à moindre coût (Cortes Robles 2006). Une ressource externe est un élément non disponible dans le système ou son environnement mais qui doit être ajouté afin de réaliser une action utile. Idéalement, il est préférable d'utiliser des ressources disponibles. Il est donc nécessaire de les identifier afin qu'elles puissent être intégrées à la résolution. Pour leur identification, les ressources peuvent être classifiées conformément à la description suivante (Savransky 2000) (Orloff 2003) :

**Substances** : tous les éléments et matières existants dans le système et son environnement. Parmi les substances, on peut trouver :

- Les matières premières.
- Les substances existantes dans l'environnement.
- Les composants d'un système.
- Les déchets…

**Champs** : tous les champs de la physique ou flux d'énergie existants ou produits dans le système ou dans l'environnement. Par exemple :

- Champs dans le système.
- Champs dans l'environnement …

**Ressources temporelles** : les intervalles inutilisés avant, pendant ou après une action. Par exemple :

- Operations parallèles.
- Utilisation des temps d'inactivité…

**Ressources d'espace** : position, localisation et ordre des sous-systèmes.

- Espaces entre objets.
- La forme d'un objet…

Toutefois, on peut également intégrer des informations supplémentaires sur les substances. En effet, elles peuvent avoir des propriétés physiques ou chimiques que l'on peut exploiter, on parle alors de ressources matières et fonctionnelles :

**Ressources matières :** Les propriétés des substances existantes qui peuvent être utilisées. Par exemple :

- Les propriétés magnétiques.
- Le point curie d'un objet…

**Ressources fonctionnelles** : tous les effets supplémentaires (fonctions auxiliaires) différents de la fonction principale du système. Par exemple :

- Une tige métallique peut fonctionner comme un capteur de température ou comme une valve.
- Le flux de chaleur peut causer des changements additionnels comme par exemple l'accroissement de la longueur ou du volume de l'objet (expansion thermique).

Les ressources peuvent être identifiées dans le système analysé ou dans le super-système ou les sous-systèmes qui le composent (figure 3.43).

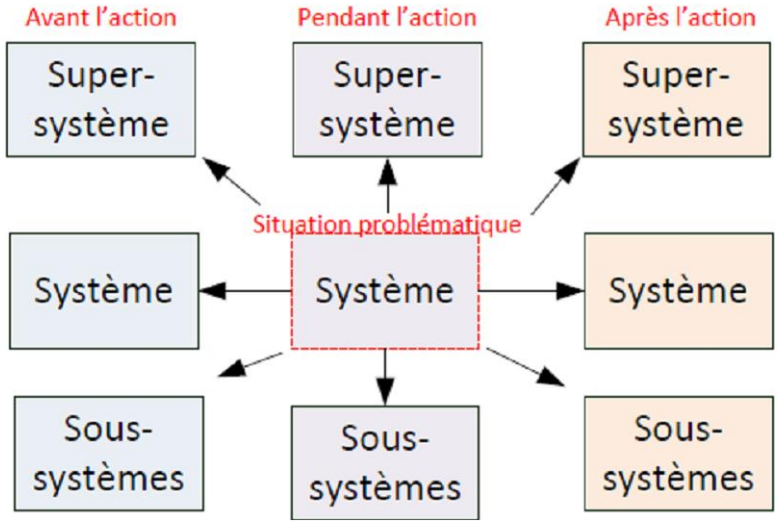



*Figure 3.43 : Identification des ressources.*

Ainsi, les exemples de l'antenne, du parasol et des billes, décrits dans ce chapitre, utilisent des ressources disponibles :

- L'antenne utilise une ressource fonctionnelle (l'accumulation de glace) et une ressource substance (glace) qui existent dans le super-système.
- Le parasol utilise une ressource substance (l'eau) qui existe dans le super-système.
- Dans le problème des billes, la ressource utilisée est une substance (billes) qui est un sous-système

Ainsi, les ressources identifiées sont organisées dans un tableau similaire au tableau 3.2 :

| Ressources | |
|---|---|
| Substances | Substance 1 (système A)<br>Substance 2 (sous-système B) … |
| Champs | Energie 1 (système A)<br>Energie 2 (sous-système B) … |
| Ressources matérielles | Ressource matérielle 1 (système C)<br>Ressource matérielle 2 (super-système A) … |
| Ressources fonctionnelles | Ressources fonctionnelles (système A)<br>Ressources fonctionnelles 2 (sous-système B) … |
| Ressources temporelles | Ressource temporelle 1 (système B)<br>Ressource temporelle 2 (sous-système B) … |
| Ressources d'espace | Ressource d'espace 1 (système C)<br>Ressource d'espace 2 (super-système A) … |

*Tableau 3.2 : L'identification des ressources.*

Exemple : La publicité sous forme papier, dont la fonction est d'informer, a un cycle de vie très court. Bien qu'elle soit recyclable, elle est une source de déchet (figure 3.44). En analysant les ressources existantes, on peut trouver qu'à la fin de son cycle de vie, le papier est une ressource qui n'est pas exploitée et qui pourrait l'être.

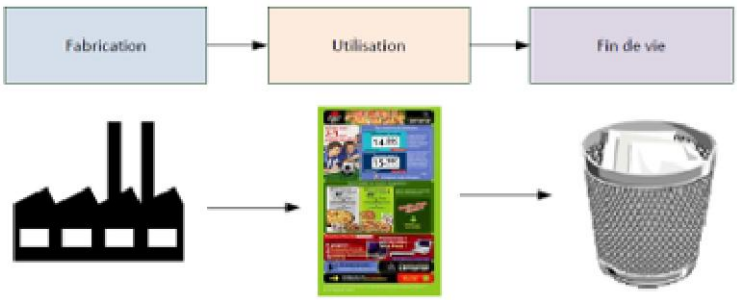



*Figure 3.44 : Cycle de vie de la publicité sous forme papier.*

Ainsi, en utilisant le modèle d'action, il est nécessaire trouver une action à réaliser afin d'améliorer le cycle de vie de la publicité (figure 3.46).

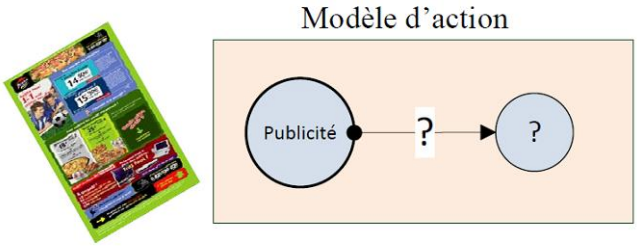



*Figure 3.45 : Analyse de la publicité en papier.*

Solution : il est proposé de modifier le support de publicité afin de le mettre sous la forme d'un sac poubelle (figure 3.46). Cela permet d'augmenter son cycle de vie avec une fonctionnalité ajoutée et donc on peut réduire l'utilisation de sacs en plastique.




*Figure 3.46 : Sac poubelle comme support de publicité.*

## 3.6 CONCLUSION

La formulation de contradictions est la partie fondamentale dans la résolution de problèmes inventifs, tels que les problèmes d'écoconception. La contribution principale de ce chapitre est la proposition d'un processus en trois étapes pour la modélisation d'une situation problématique complexe. Ce processus s'appuie sur les outils d'OTSM-TRIZ. Toutefois ces derniers sont modifiés et complétés afin d'intégrer les contraintes liées à l'écoconception. Le processus pour l'écoconception d'un produit ou procédé commence par la définition des objectifs environnementaux, des barrières qui empêchent sa réalisation. Puis, ces barrières sont transformées en différentes situations problématiques qui sont analysées au travers des fenêtres des états qualitatifs et du modèle d'action. Après cette analyse, de nouveaux problèmes et des solutions partielles sont générés. Tous les problèmes sont formalisés en un réseau de problèmes. Puis, lorsque le réseau de problèmes est stable les problèmes principaux sont extraits et transformés en un réseau de contradictions et réseau de paramètres. Parallèlement, une analyse des ressources existantes est réalisée afin de faciliter le processus de résolution de contradiction qui sera mise en œuvre dans le chapitre suivant.

Ainsi, dans ce chapitre, nous proposons l'adaptation du modèle « TONGS » pour la description de la problématique environnementale. Une autre contribution est une méthode pour l'organisation du réseau de problèmes dénommée analyse de la situation problématique, dans laquelle le concepteur, au travers de la fenêtre des états qualitatifs et du modèle d'action, réalise une analyse de la situation problématique et suit certaines stratégies qui lui permettent de générer des solutions différentes pour surmonter le conflit.

Une dernière contribution de ce chapitre est introduite dans l'étape de la formulation de la contradiction avec l'introduction de l'analyse temporelle et spatiale dans le réseau de contradiction et le réseau de paramètres. Cette analyse permet de situer les deux exigences ou états contradictoires de façon graphique sur ces réseaux.

De plus, au travers du réseau de problème, il est possible de capitaliser des problèmes et solutions existantes qui peuvent être considérés dans des situations futures. En effet, le réseau permet d'organiser et de partager la connaissance dans la résolution d'une situation problématique. Cette capitalisation de connaissance s'avère très importante pour une entreprise. Ainsi, une des perspectives est le développement d'un système de capitalisation de connaissance afin de favoriser la génération de nouvelles connaissances et de leur capitalisation.

CHAPITRE 4

# METHODE DE RESOLUTION DES CONTRADICTIONS

# APPLICATION A L'ECOCONCEPTION

## 4.1 INTRODUCTION

Une des principales causes de l'occurrence de contradictions techniques et physiques est le développement inégal des parties d'un système (Altshuller 1984). A l'inverse, il faudra que plusieurs contradictions soient résolues afin d'avoir un développement égal des parties d'un système. La complexité grandissante des systèmes actuels, la prise en compte de plus en plus de contraintes conduisent également à des problèmes formulés à l'aide de plusieurs contradictions. Ainsi, nous proposons un processus de résolution de problèmes formulés à l'aide de plusieurs contradictions. Le concept de multi-contradictions peut être défini comme un ensemble de deux ou plusieurs contradictions indépendantes dont chacune est composée par un paramètre de contrôle et de deux paramètres d'évaluation. Il faut noter que les paramètres spécifiques d'une situation problématique peuvent être interprétés à l'aide de différents paramètres d'évaluation car un paramètre d'évaluation peut influencer un autre paramètre d'évaluation, par exemple : la vitesse d'exécution d'une machine, peut aussi être interprétée comme la productivité de la machine car la vitesse influence le paramètre de productivité. Ainsi, cette contradiction peut être décrite des deux façons suivantes : vitesse vs puissance ou productivité vs puissance. Dans ce cas, on parle de plusieurs interprétations de la même contradiction et non de multi-contradictions. La figure 4.1 illustre la différence entre plusieurs contradictions et contradiction avec plusieurs interprétations.

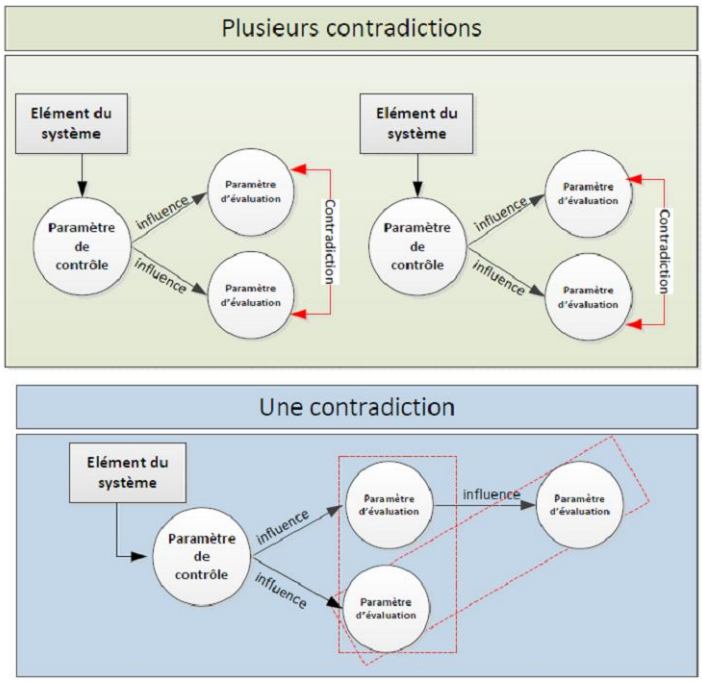



*Figure 4.1 : Plusieurs contradictions et plusieurs interprétations d'une contradiction.*

Le processus proposé pour la résolution de problèmes formulés à l'aide de plusieurs contradictions se divise en deux parties principales : la formulation et la résolution des contradictions. Dans le chapitre 3, nous avons décrit le processus de formulation, et dans ce chapitre nous allons détailler la partie du processus relative à la résolution. Le processus de résolution des contradictions se décompose en quatre étapes. Dans les deux premières, chaque contradiction est résolue indépendamment car selon l'axiome de la particularité d'OTSM : « *chaque problème doit être résolu*

*par rapport aux restrictions spécifiques de la situation problématique* » (Cavallucci et Khomenko 2007). Ainsi, dans la première étape, chaque contradiction définie dans le réseau de contradictions est modélisée et résolue avec les outils de la théorie TRIZ. A la sortie de cette étape, un ou plusieurs comportements souhaités pour éliminer la contradiction sont définis. Un comportement du système fait référence à l'interprétation de manière abstraite du changement de valeur d'un paramètre dans un système (Mizoguchi et Kitamura 2000). Dans notre cas, le comportement est défini comme une action désirée qui permet le changement nécessaire des caractéristiques et/ou paramètres d'un système pour résoudre la situation problématique (Savransky 2000). Puis, lorsque la ou les actions désirées sont définies, elles sont interprétées comme des fonctions à réaliser.
Dans la deuxième étape, un ou plusieurs effets ou phénomènes (physiques, chimiques, géométriques et biologiques) capables de réaliser cette fonction sont recherchés, puis sont transformés en une solution concrète spécifique. Cette procédure de recherche d'effets est réalisée pour chaque contradiction.
Dans la troisième étape, toutes les solutions spécifiques de chaque contradiction sont regroupées en un réseau de solutions à partir duquel les différentes ressources sont extraites pour réaliser une nouvelle itération de recherche d'effets solution pour chaque contradiction. Si de nouveaux effets sont obtenus, ils sont transformés en solutions spécifiques et ajoutés au réseau de solutions. Puis, dans ce nouveau réseau de solutions, une recherche d'association entre solution est réalisée afin de vérifier l'existence d'éléments communs à différentes solutions. Cela correspond aux tendances d'évolution de systèmes technologiques (transition vers super-système et microsystème), qui sont également appliquées aux solutions car elles représentent de futurs systèmes technologiques. Ces tendances sont définies comme suit (Karasik 1980) (figure 4.2) :

- **Systèmes hétérogènes :** systèmes qui n'ont rien en commun (caractéristiques et/ou propriétés différentes).
- **Systèmes homogènes :** systèmes avec des ressources communes mais ils n'ont pas de parties ou d'éléments en commun.
- **Systèmes superposés :** systèmes avec des ressources et parties communes.
- **Systèmes fusionnés :** les systèmes sont combinés en un seul système ou les fonctions de l'un sont déléguées à l'autre.
- **Système de substitution :** un nouveau système remplace le système existant.

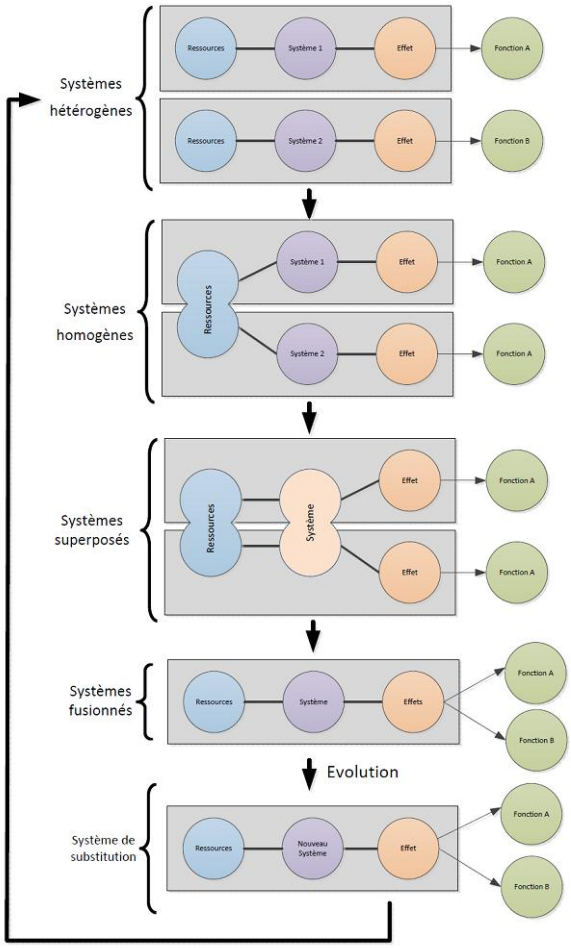



*Figure 4.2 : Evolution des systèmes techniques.*

Enfin, dans la quatrième étape, les différentes solutions du réseau sont évaluées voire améliorées en utilisant la matrice de Pugh. Ces dernières sont regroupées dans une solution finale qui servira à proposer un nouveau concept de solution. Les étapes du processus de résolution des contradictions (figure 4.3) sont détaillées dans la prochaine section.

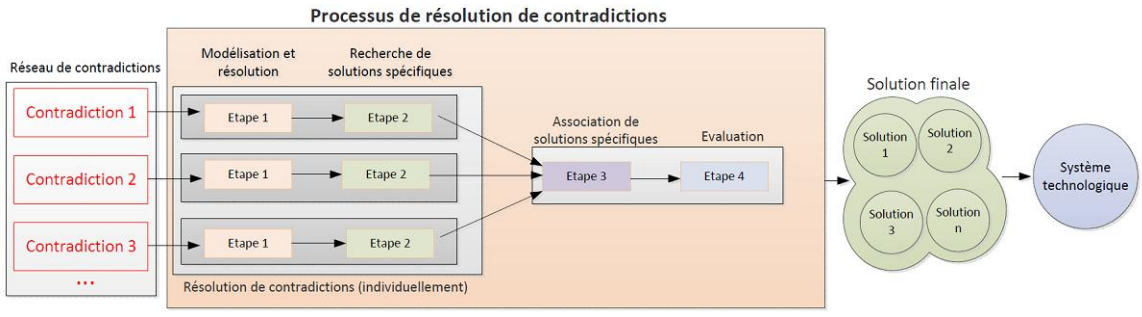



*Figure 4.3 : Etapes du processus de résolution de contradictions.*

## 4.2 PROCESSUS DE RESOLUTION

Comme il a été défini précédemment, la méthode de résolution proposée comprend quatre étapes, divisées en sous étapes décrites sur la figure 4.4. Pour leur

réalisation, les étapes s'appuient sur des outils existants adaptés à notre objectif ou des outils qu'il à fallu développer. La figure 4.4 liste ces différentes étapes ainsi que leurs outils associés.

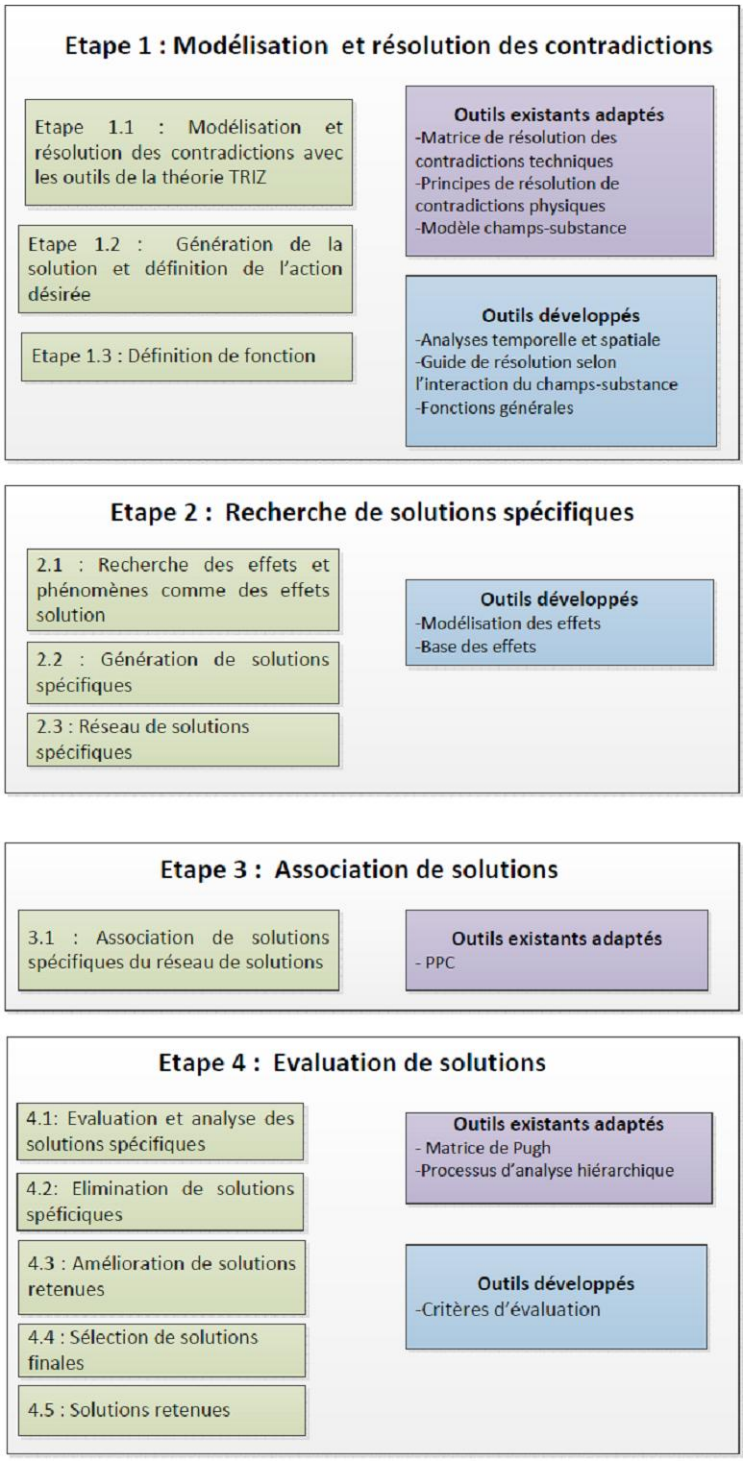



*Figure 4.4 : Processus de résolution détaillé et les outils associés.*

### 4.2.1 *Etape 1 : Modélisation et résolution des contradictions*

Le processus de résolution des contradictions commence par la modélisation de chaque contradiction identifiée dans le réseau de contradictions spécifiques ou dans

le réseau de paramètres spécifiques en une contradiction générique (en utilisant les paramètres d'ingénierie de TRIZ ou le modèle champs-substances). L'objectif est d'élever le niveau d'abstraction de la connaissance et d'utiliser les outils de la théorie TRIZ, afin de proposer des solutions sous la forme d'une ou plusieurs actions désirées capables d'éliminer les contradictions (Salamatov 1999). Ces actions sont ensuite traduites sous la forme de fonctions. Nous avons utilisé les fonctions, car elles vont nous permettre d'identifier plus facilement les effets ou phénomènes à mettre en œuvre pour proposer des solutions plus concrètes. De plus, grâce à ces effets et phénomènes, il est possible d'atteindre des solutions ayant un haut niveau d'inventivité (Altshuller 1984).

Ainsi, le processus de résolution démarre avec la modélisation de la contradiction technique et l'utilisation de la matrice de résolution des contradictions, les principes obtenus, s'ils en existent, sont analysés dans la sous étape du développement de la solution, figure 4.5. Si l'utilisation des principes permet de définir la ou les fonctions désirées pour résoudre la contradiction, on passe directement à l'étape 2, sinon, il faut affiner la modélisation en cherchant la contradiction physique. On utilise alors les onze principes afin de définir l'action désirée pour surmonter la contradiction physique. Si l'action désirée est définie, elle est ensuite traduite en une fonction, et le processus se poursuit par l'étape 2, sinon on affine la modélisation en utilisant le modèle champs-substances. De même, si grâce à l'utilisation du guide de solution selon le type d'interaction existant (annexe 2), l'action désirée est définie, elle est également traduite en une fonction, il faut ensuite aller à l'étape 2. Si avec le guide, il n'est pas possible de définir l'action désirée, il faudra donc redéfinir le problème et reformuler une nouvelle contradiction. Ainsi, l'étape 1 du processus est illustrée sur la figure 4.5. Les outils utilisés dans cette étape sont décrits ci-dessous.

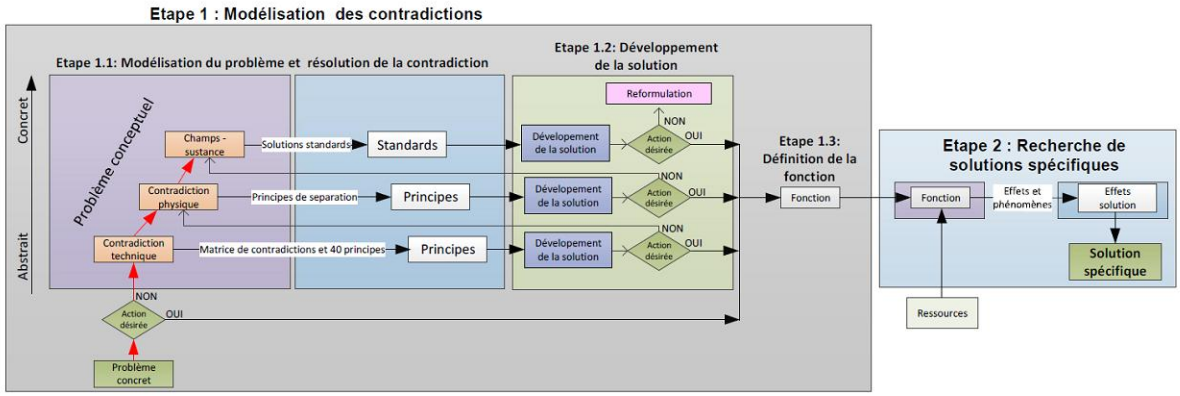



*Figure 4.5 : Etape 1 : Modélisation et résolution des contradictions.*

### 4.2.1.1 Définition d'une fonction

L'utilisation des fonctions a pour but de généraliser les actions désirées et de pouvoir les associer aux différents effets et phénomènes pour générer une solution spécifique (cette dernière étape est présentée dans la prochaine section). Parmi les différentes définitions d'une fonction, pour notre approche nous retenons celle d'Umeda (Umeda et al. 1995) qui définit la fonction comme une description du comportement d'un système au travers d'un processus abstrait afin de pouvoir l'utiliser. La fonction permet d'établir le lien entre les exigences et le comportement physique d'un système. En outre, (Sasajima et Kitamura 1995) définissent une

fonction comme l'interprétation d'un comportement conforme à un but désiré, elle permet la relation entre les objectifs d'un système et son comportement. Dans l'ingénierie de la valeur, la fonction est représentée sous la forme : verbe + objet pour représenter l'action entre « l'outil » qui réalise l'action et l'objet qui la reçoit. Elle est représentée sous la forme : faire quelque chose (Umeda et al. 1995). Ainsi, pour notre approche une fonction est la représentation abstraite d'une action désirée qui représente le comportement désiré pour un système. Un comportement est défini comme la description du changement d'un paramètre d'un système.

Définir une action désirée comme une fonction est une tâche difficile car la fonction possède un contexte déterminé selon le concepteur, c'est-à-dire une fonction est une interprétation du comportement de l'objet que s'en fait le concepteur (Mizoguchi et. Kitamura 2000). En conséquence, des interprétations différentes d'une même action peuvent être développées et donc une grande variété de fonctions peut être définie. Pour surmonter cet inconvénient, il est préférable de définir une fonction avec un haut niveau d'abstraction ce qui permet d'un côté d'éliminer cette variété d'interprétations, et de l'autre d'éliminer des descriptions spécifiques comme par exemple : « souder un objet » implique non seulement l'action à réaliser (joindre), mais aussi le moyen pour la réaliser (les deux objets sont fusionnés). Ainsi, pour cet exemple, il est préférable d'utiliser des fonctions moins spécifiques ou plus abstraites comme « connecter » deux objets (Kitamura et al. 2004). Avec cette élévation du niveau d'abstraction il devient possible de transférer plus facilement les fonctions entre les différents domaines technologiques, et ainsi de faciliter le processus d'innovation. Néanmoins, un défi demeure : comment formuler les différentes fonctions avec un tel niveau d'abstraction sans perdre d'information ?

Pour résoudre cette problématique, nous avons considéré le modèle de représentation des fonctions développé par (Pahl et al. 2007). Ces fonctions dénommées « Fonctions générales » sont : changer, varier, connecter, conduire et stocker. Pour notre approche, ces fonctions sont réutilisées et renommées : transformer (changer), varier, connecter, transporter (conduire) et stocker. De plus, nous ajoutons les fonctions transférer et mesurer. Ces ajouts et modifications ont pour objectif d'adapter les fonctions générales au domaine d'application visé par cette étude, le génie des procédés. Ces fonctions sont divisées en sous-fonction plus spécifiques : plus, moins et zéro. Le tableau 4.1 détaille les différentes fonctions générales et sous fonctions spécifiques. Ces fonctions sont appliquées à différents types d'énergie, de substances ou à différentes propriétés d'une substance (tableau 4.2). Ainsi, par exemple la fonction générale varier la température d'une substance peut être décrite avec des fonctions plus spécifiques « varier plus » (augmenter), « varier moins » (diminuer) ou « varier zéro » (stabiliser la température). De même, la fonction générale transformer l'énergie thermique est divisée en sous fonctions spécifiques : « transformer plus » (générer l'énergie) et « transformer moins» (éliminer l'énergie).

| Fonction générale | Sous-fonction spécifique | Définition |
|---|---|---|
| Transformer | Plus (T+) | La génération d'énergie ou d'une substance. |
| | Moins (T-) | L'élimination d'énergie ou d'une substance. |
| Varier | Plus (V+) | Augmenter la quantité d'énergie, de substance ou la propriété d'une substance. |
| | Zéro (V0) | Stabiliser la quantité d'énergie, de substance ou la propriété d'une substance. |
| | Moins (V-) | Diminuer la quantité d'énergie, de substance ou la propriété d'une substance. |
| Connecter | Plus (C+) | Unir une énergie ou une substance |
| | Moins (C-) | Séparer une énergie ou une substance. |
| Transporter | Plus (Tp+) | Transporter une quantité d'énergie ou d'une substance. |
| | Moins (Tp-) | Réduire le transport d'une énergie ou d'une substance. |
| Transférer | Plus (Tf+) | Recevoir une quantité énergie ou une substance. |
| | Moins (Tf-) | Perdre une quantité d'énergie ou une substance. |
| Stocker | Plus (S+) | Accumuler dans le temps une quantité d'énergie ou une substance. |
| | Moins (S-) | Dissiper dans le temps une quantité d'énergie ou une substance. |
| Mesurer | | Mesurer une production ou consommation d'énergie, d'une substance ou mesurer une propriété d'une substance. |

*Tableau 4.1: Fonctions générales et spécifiques.*

| | |
|---|---|
| **Types d'énergie** | Thermique, chimique, électrique, magnétique, mécanique, nucléaire, rayonnement… |
| **Types de substance** | Gaz, liquide, solide, plasma, solide-gaz, solide-liquide, liquide-gaz, gaz-liquide-solide… |
| **Propriétés de substance** | Absorbance, capacité électrique, capacité thermique, capillarité, conductivité électrique, conductivité thermique, couleur, densité, ductilité, dureté, élasticité, électronégativité, fréquence, friction, flux magnétique, force, forme, viscosité, vitesse, volume… |

*Tableau 4.2 : Différents types d'énergie, substances et propriétés des substances.*

Avec cette définition, les différents effets et phénomènes (physiques, chimiques, géométriques et biologiques) peuvent être plus facilement associés aux différentes fonctions grâce à la finalité voulue sur le comportement de l'énergie, de la substance ou le changement d'une propriété de la substance.

#### 4.2.1.2 La matrice de résolution des contradictions techniques

Pour notre approche, la matrice de résolution des contradictions techniques a été étendue avec l'intégration des paramètres d'écoefficacité en tant que paramètres

d'ingénierie (figure 4.6) (Negny et al. 2012). Cette extension est motivée par la création d'un outil gardant ses fonctionnalités mais intégrant les problématiques de l'écoconception. Pour affecter des principes aux nouvelles cellules créées, nous avons posé l'hypothèse que les 40 principes actuels couvraient toujours l'espace des solutions. En effet, lors de l'actualisation de la matrice, (Mann et al. 2003) ont démontré que les 40 principes initiaux étaient toujours d'actualité pour atteindre les solutions inventives contenues dans les brevets déposés après l'établissement de la matrice initiale. L'affectation des principes dans les nouvelles cellules a été réalisée suite à une analyse de brevets, en lien avec des écoinventions, extraits de différentes bases de brevets ou du site du World Business Council for Sustainable Development.

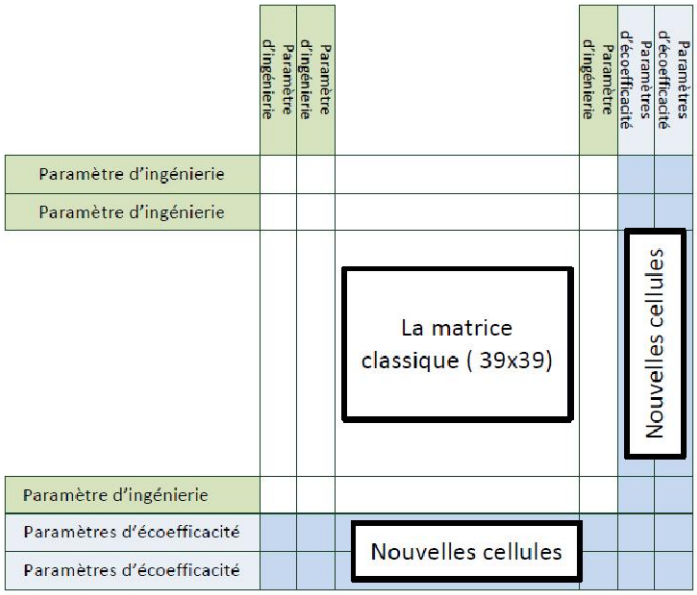



*Figure 4.6 : Nouvelle matrice de résolution des contradictions techniques (46x46).*

Ainsi, une contradiction issue du réseau de paramètres (figure 4.7) est transformée en une contradiction technique générale grâce à une abstraction des paramètres d'évaluation qu'il faudra interpréter à l'aide de la liste des 46 paramètres (39 paramètres d'ingénierie plus 7 paramètres d'écoefficacité) (tableau 4.3). La contradiction technique générale correspond à un paramètre amélioré qui provoque une dégradation inacceptable d'un autre. Par ailleurs, dans le cas où la contradiction ne peut ne pas être formalisée à l'aide des 46 paramètres, elle reste écrite avec les paramètres spécifiques (figure 4.8) et donc on cherche à identifier la contradiction physique.

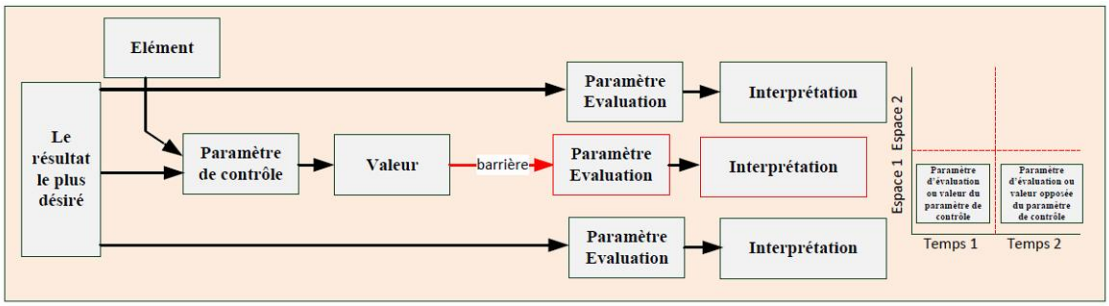



*Figure 4.7 : Réseau de paramètres.*

| 46 paramètres de l'ingénierie | | | |
|---|---|---|---|
| Masse d'un objet mobile | 1 | Perte d'information | 24 |
| Masse d'un objet immobile | 2 | Perte de temps | 25 |
| Longueur d'un objet mobile | 3 | Quantité de substance | 26 |
| Longueur d'un objet immobile | 4 | Fiabilité | 27 |
| Surface d'un objet mobile | 5 | Précision de la mesure | 28 |
| Surface d'un objet immobile | 6 | Précision de l'usinage | 29 |
| Volume d'un objet mobile | 7 | Facteurs nuisibles agissant sur l'objet | 30 |
| Volume d'un objet immobile | 8 | Facteurs nuisibles générés par l'objet | 31 |
| Vitesse | 9 | Facilité de fabrication | 32 |
| Force | 10 | Facilité d'utilisation | 33 |
| Tension et pression | 11 | Aptitude à la réparation | 34 |
| Forme | 12 | Adaptabilité | 35 |
| Stabilité d'un objet | 13 | Complexité du système | 36 |
| Résistance | 14 | Complexité de contrôle | 37 |
| Durée de l'action d'un objet mobile | 15 | Degré d'automatisation | 38 |
| Durée de l'action d'un objet immobile | 16 | Productivité | 39 |
| Température | 17 | Intensité matière | 40 |
| Brillance | 18 | Intensité énergétique | 41 |
| Énergie dépensée par l'objet mobile | 19 | Dispersion de produits toxiques | 42 |
| Énergie dépensée par l'objet immobile | 20 | Recyclabilité | 43 |
| Puissance | 21 | Ressources renouvelables | 44 |
| Gaspillage d'énergie | 22 | Durabilité | 45 |
| Gaspillage de substance | 23 | Intensité des services | 46 |

*Tableau 4.3 : Les 46 paramètres.*

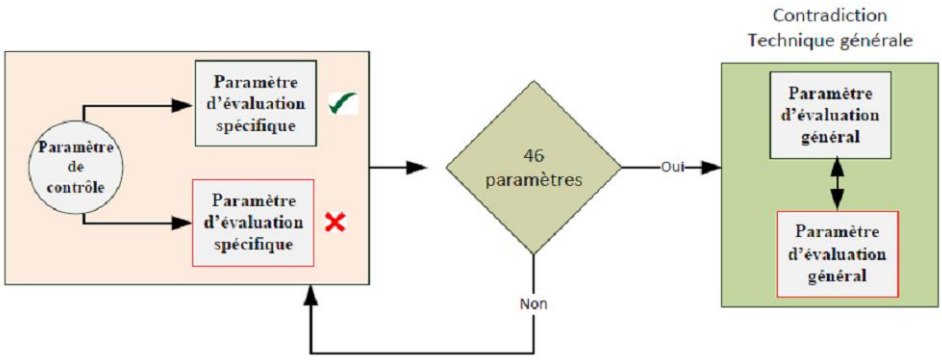



*Figure 4.8 : Contradiction technique générale.*

Lorsque les deux paramètres contradictoires sont identifiés, la nouvelle matrice de résolution des contradictions est utilisée afin d'identifier les principes de solution : sur

les lignes se trouve le paramètre à améliorer et sur les colonnes celui qui se détériore. L'intersection entre la ligne et la colonne, isole une cellule de la matrice qui contient un ou plusieurs principes à explorer pour résoudre cette contradiction (figure 4.9). Dans l'étape de développement de la solution, les principes sont analysés pour les transformer en un ou plusieurs concepts de solution décrits sous la forme d'une action désirée qui servira ensuite à définir une fonction. Par contre, si les principes de solutions n'aboutissent pas à au moins une proposition d'action désirée, le problème est formulé à l'aide d'une contradiction physique.

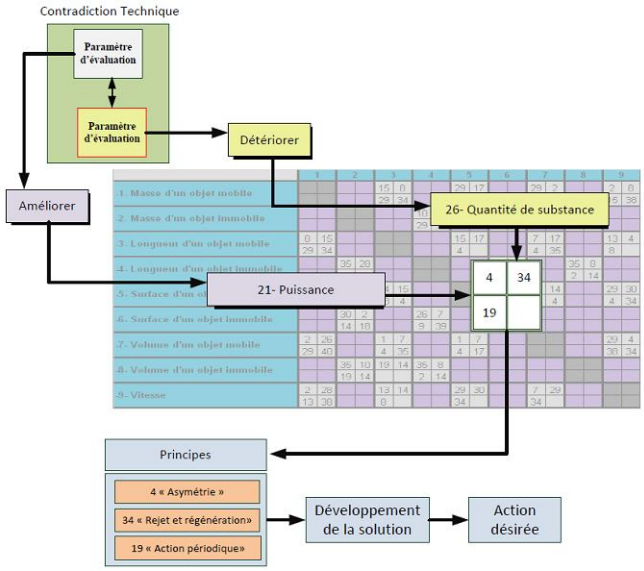



*Figure 4.9 : Matrice de résolution des contradictions techniques.*

### 4.2.1.3 Contradiction physique

Tout comme la contradiction technique, la contradiction physique est extraite du réseau de paramètres. Le but de la formulation de la contradiction physique est de révéler les causes physiques du problème. Cette cause physique est définie comme deux valeurs incompatibles pour le paramètre de contrôle du système (alors que la contradiction technique se focalise sur les paramètres d'évaluation). Le modèle pour décrire la contradiction est le suivant (figure 4.10) :

*Le « paramètre de contrôle » doit avoir « la valeur X » afin d'avoir « le comportement désiré ou éliminer le comportement non désiré » et ne doit pas avoir «la valeur X » pour avoir « le comportement désiré ou éliminer le comportement non désiré ».*

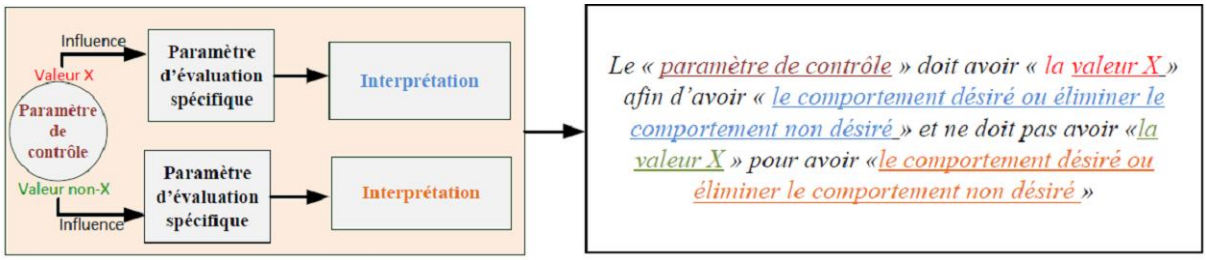



*Figure 4.10 : Contradiction physique.*

Une fois la contradiction physique formalisée, les deux valeurs contradictoires du paramètre sont situées dans l'espace et le temps. Cela permet de guider la résolution vers un type de principes à utiliser. En effet, pour résoudre cette contradiction physique, onze principes de séparation sont proposés (Salamatov 1999) :

1. Séparation des propriétés contradictoires dans l'espace.
2. Séparation des propriétés contradictoires dans le temps.
3. Fusion de plusieurs systèmes : homogènes ou hétérogènes en un super système.
4. Fusion d'un système et son opposé (antisystème), ou transformation d'un antisystème vers un système.
5. Séparation des propriétés opposées entre le système et ses sous-systèmes.
6. Changement de phase d'une partie du système, ou de son environnement.
7. Transition d'un système vers le micro niveau.
8. Transition « dynamique » de phase d'un système selon les conditions de fonctionnement.
9. Utilisation des phénomènes associés aux changements de phase.
10. Remplacement d'une substance à une seule phase par une substance à deux voire plusieurs phases.
11. Transformation d'une substance par combinaison ou décomposition physico-chimique.

Une fois les causes physiques du problème associées à un ou plusieurs principes, différentes solutions sont générées dans l'étape de développement de la solution. Ces solutions expriment une action désirée pour la résolution de la contradiction physique, cette action est par la suite définie comme une fonction. Si les méthodes ne donnent pas de voie de solution pour définir une action désirée, l'analyse du problème est affiné à l'aide de la modélisation champs-substances.

#### 4.2.1.4 Champs-substances

Son but est de décrire le cœur du problème en modélisant graphiquement l'interaction entre un ou plusieurs objets et les champs existants dans un système (la modélisation champs-substances est détaillée dans l'annexe 1). Au travers de l'analyse champs-substances différents modèles de solutions standard indiquent des voies d'amélioration du système, elles suggèrent également la façon de le modifier pour améliorer sa performance (Cortes Robles 2006). Ces modèles de solutions correspondent à l'action ou comportement nécessaire afin de résoudre la contradiction.

Selon (Savransky 2000) les 76 solutions standards proposées par Altshuller présentent un certain nombre d'inconvénients comme par exemple une structuration non homogène des standards, une interprétation possible très diversifiée voire parfois non consistante. Ainsi, pour faciliter l'utilisation des solutions standards, nous avons développé un guide de solutions selon le type d'interaction ou d'action. Ce guide a été développé suite à une analyse des standards définis par (Salamatov 1999) (Fey et Rivin 2005) (Savransky 2000) (Altshuller 1984) (annexe 2). Sa finalité est de faciliter la définition de l'action désirée nécessaire pour résoudre la situation

problématique. De manière générale, on peut résumer les différents types d'interactions d'une situation problématique comme suit :

1. Création ou élimination d'une action.
2. Amélioration d'une action.
3. Actions en conflit.
4. Amélioration de deux ou plusieurs actions utiles.
5. Problème de mesure.
6. Problème d'introduction d'un champ ou d'une substance.

Ce guide fournit les différentes voies de solution pour résoudre la situation problématique selon le type d'interaction identifiée. Les étapes à suivre pour utiliser ce guide sont :

1. Identifier les éléments (champs ou substances) dans la contradiction.
2. Modéliser la situation problématique à l'aide d'un modèle champs-substances.
3. Définir le type d'interaction de la situation problématique parmi les 6 types précédents.
4. Utiliser le guide et identifier les solutions potentielles.
5. Générer un concept de solution.

L'analyse champs-substances ne vise pas un effet physique, chimique, géométrique ou biologique précis, mais le type d'action nécessaire pour résoudre la contradiction. En conséquence, les différents concepts de solutions générés donnent des voies vers l'action désirée à implémenter pour résoudre la contradiction. Si suite à l'analyse champs-substances, l'action désirée ne peut pas être définie il faudra recaractériser le problème et reformuler une nouvelle contradiction.

### 4.2.2 *Etape 2 : Recherche de solutions spécifiques*

Une fois que la ou les fonctions recherchées sont identifiées, il est nécessaire de la ou les transformer en solutions spécifiques. Pour ce faire, chaque fonction doit être traduite en un effet ou phénomène physique, chimique, géométrique ou biologique. Comme il a déjà été évoqué précédemment, les effets et phénomènes permettent de proposer des voies de solutions plus concrètes. Pour réaliser la recherche des effets et phénomènes provenant de domaines scientifiques différents, il est nécessaire de les organiser et structurer dans une base des effets. Enfin, les solutions spécifiques de chaque contradiction (provenant de la mise en œuvre des effets identifiés) sont organisées en un réseau de solutions. Les éléments mentionnés ci-dessus sont détaillés dans les sections suivantes.

#### 4.2.2.1 Modélisation des effets et phénomènes physiques, chimiques, géométriques et biologiques

Les différents effets et phénomènes physiques, chimiques, géométriques et biologiques, sont modélisés comme des processus. Un processus décrit tout changement dans le temps des paramètres d'un système (Forbus 1984). Cette représentation est guidée par l'axiome du processus d'OTSM (Khomenko et Ashtiani 2007) qui indique que pour qu'une résolution soit efficace, il faut étudier la façon dont les caractéristiques (propriétés) de ses éléments changent au cours du temps. Par exemple, le phénomène physique d'ébullition d'un corps pur durant lequel un liquide

se transforme en un gaz peut être représenté comme suit : la quantité de liquide diminue, la quantité de gaz augmente, la température des deux phases (éléments) reste constante, et il existe un flux de chaleur continu. Ainsi, au travers de la modélisation d'un processus, il est possible de décrire les différents changements d'un système (interprétés comme des effets) et ses causes. Pour notre approche, nous utilisons la modélisation des processus qualitatifs proposée par (Forbus 1984). De plus, pour faciliter la représentation graphique des effets nous utilisons la modélisation champs-substances de la théorie TRIZ. Ce couplage entre ces deux types de modélisation présente l'avantage de visualiser les ressources et l'énergie nécessaires pour réaliser l'effet, mais aussi de considérer uniquement les informations qualitatives importantes, ainsi nul besoin de valeurs quantitatives précises des paramètres. Cela permet également de décrire facilement les différentes fonctions du système. Dans le cas des effets géométriques, le modèle graphique champs-substances peut être remplacé par une image pour une meilleure représentation.

Ainsi, les éléments nécessaires pour représenter un effet sont les suivants :

- **Nom de l'effet** : le nom avec lequel l'effet est identifié.
- **Type d'effet** : physique, chimique, géométrique ou biologique.
- **Description** : dans cette partie, le concepteur peut réaliser une description de certains aspects importants de l'effet.
- **Eléments et ses attributs** : les éléments sont les champs et substances avec leurs attributs associés nécessaires à la mise en œuvre de l'effet. Par exemple : la substance A [vitesse, température, masse].
- **Conditions (restrictions)** : ce sont des expressions qui définissent les conditions sur les attributs des éléments qui doivent être satisfaites afin que l'effet se réalise. Par exemple : substance A [température] < A [point de fusion] ou la substance B [force] >0.
- **Relations** : elles décrivent les attributs d'un élément, les relations possibles entre les attributs d'un même élément et/ou les relations entre les attributs de différents éléments. Les relations possibles sont :
    - Une relation de *description* : elle définit les attributs d'un élément (la quantité de substance(B) > zéro), et elle décrit la relation entre les différents éléments et leurs attributs (substance A (vapeur) = substance B (l'eau)).
    - Une relation *proportionnelle* (αQ) entre deux attributs, par exemple : substance A [chaleur] αQ+ substance A [température] cette relation définit que si l'on augmente la chaleur transférée à la substance A, sa température augmente également. La notion αQ- est utilisée pour modéliser une relation de proportionnalité mais avec un sens de variation inverse.
    - Une relation de *dépendance* : elle définit une relation entre attributs qui ne peut pas être définie comme une relation proportionnelle, par exemple l'aire de l'objet dépend de la forme de l'objet.
    - Une relation *d'influence* : elle définit l'influence d'un attribut d'un élément sur un attribut d'un autre élément. L'influence peut être positive si la valeur de l'attribut influencé augmente et négative si la valeur de l'attribut influencé diminue. Par exemple, le flux thermique a une influence positive (influence +) sur l'attribut chaleur de l'objet qui reçoit cette quantité de chaleur.

  - Une relation de *correspondance* : elle définit la relation entre les valeurs qualitatives des attributs, par exemple objet A [force] = zéro correspond objet A [vitesse] = zéro.
- **Diagramme champs-substances** : cette partie correspond à la représentation graphique des éléments nécessaires à la mise en œuvre de l'effet et le comportement des attributs des éléments. Ce comportement est décrit selon le changement de l'attribut (augmentation, diminution ou stagnation).
- **Fonctions** : tout processus qui conduit aux changements de l'énergie, d'une substance ou des propriétés de la substance. Ces changements peuvent être définis à l'aide des fonctions décrites précédemment.
- **Effets associés** : une liste des effets qui ont une relation directe avec l'effet décrit. Par exemple, l'effet d'ébullition est lié à l'effet de transfert de chaleur.

Ainsi, toute l'information sur les différents éléments décrits ci-dessus est organisée dans un tableau similaire à celui de la figure 4.11 qui donne un exemple d'un phénomène physique.

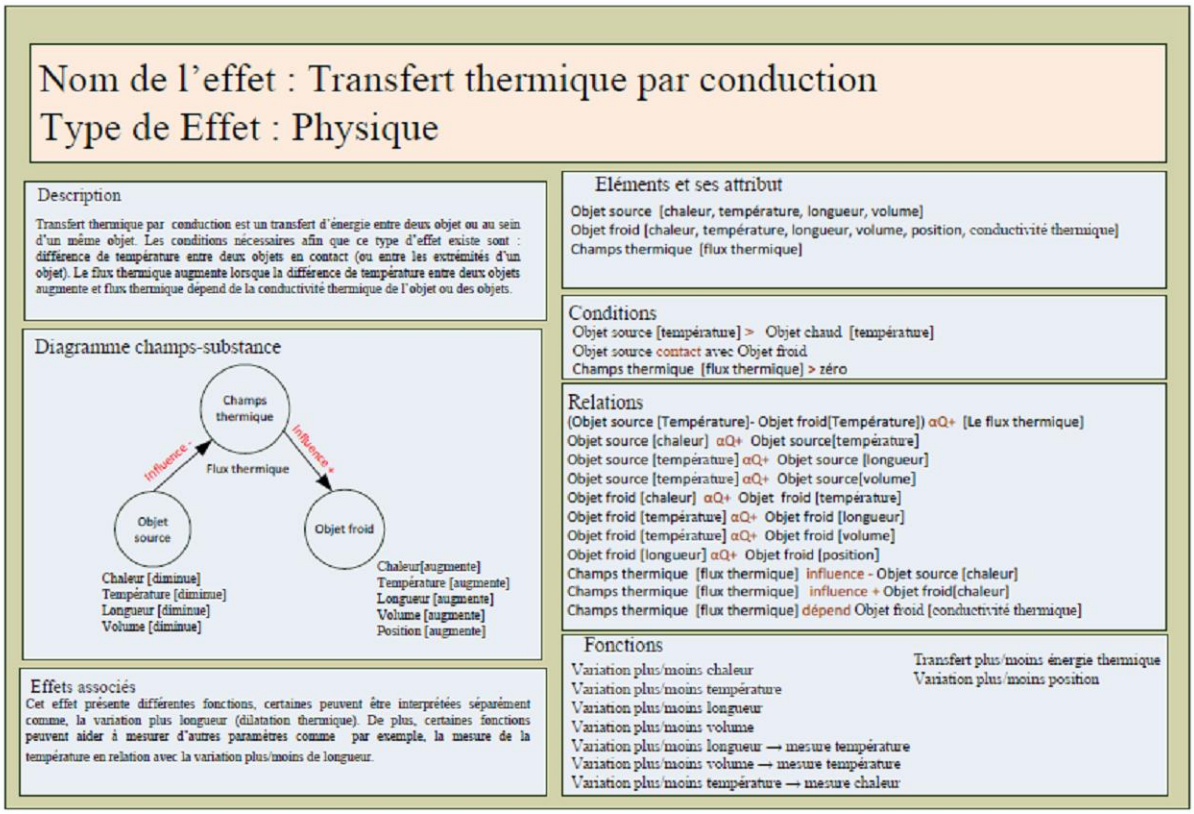



*Figure 4.11 : Représentation d'un effet physique et de ses fonctions associées.*

Il faut noter que les différentes fonctions d'un effet peuvent être représentées séparément, par exemple, pour l'effet physique de transfert thermique par conduction, on peut représenter les fonctions : varier plus longueur ou varier plus volume d'un objet, ces deux fonctions peuvent être modélisées comme deux effets : dilatation thermique et dilatation volumique.

De plus, afin d'améliorer la description d'un effet avec une fonction particulière, des exemples d'application sont inclus. La figure 4.12 présente la description d'un exemple de la fonction variée le volume d'un objet en utilisant l'effet transfert thermique par conduction.

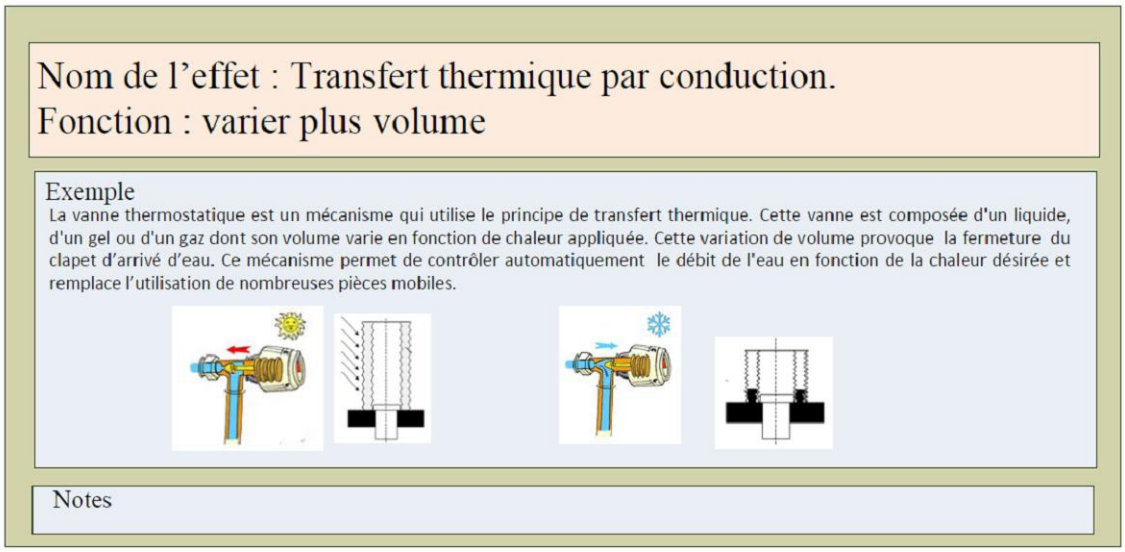



*Figure 4.12 : Exemple de l'application d'une fonction.*

Pour faciliter la recherche des effets et des phénomènes, ces derniers sont regroupés dans une base d'effets. Actuellement, cette base contient 234 effets. Dans cette base, les effets et phénomènes sont organisés par fonctions et à chacun d'entre eux sont associées les ressources nécessaires pour leur mise en œuvre (figure 4.13). Les ressources sont divisées en substances, énergies, ressources matières … (chapitre 3).

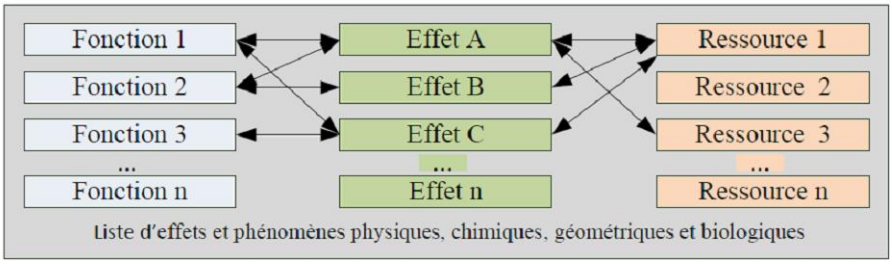



*Figure 4.13 : Base d'effets et relation entre fonctions générales, effets et ressources.*

### 4.2.2.2 Recherche des effets solution

Le but de la base des effets est d'organiser les différents effets et phénomènes afin qu'ils puissent être utilisés comme solutions pour résoudre la contradiction. Ainsi, un effet qui permet la résolution d'une contradiction et qui utilise le moins de ressources (de préférence les disponibles) du système, est extrait comme un effet pouvant potentiellement générer une solution. Donc, l'effet solution doit répondre à deux contraintes : la fonction souhaitée et les ressources existantes. Le processus de recherche d'effets solution, est représenté sur la figure 4.14. Une recherche est lancée dans la base des effets pour filtrer les effets répondant aux contraintes précédentes sur la fonction et les ressources. Suite à cette recherche, les effets

obtenus sont considérés comme des effets solutions potentiels afin d'éliminer la contradiction. S'il n'est pas possible d'extraire un effet solution répondant à l'ensemble des contraintes, les contraintes sur les ressources sont progressivement relâchées. Dans ce cas, pour implémenter l'effet dans le système, il sera nécessaire d'introduire des ressources supplémentaires qui seront définies dans l'étape de génération de solutions spécifiques.

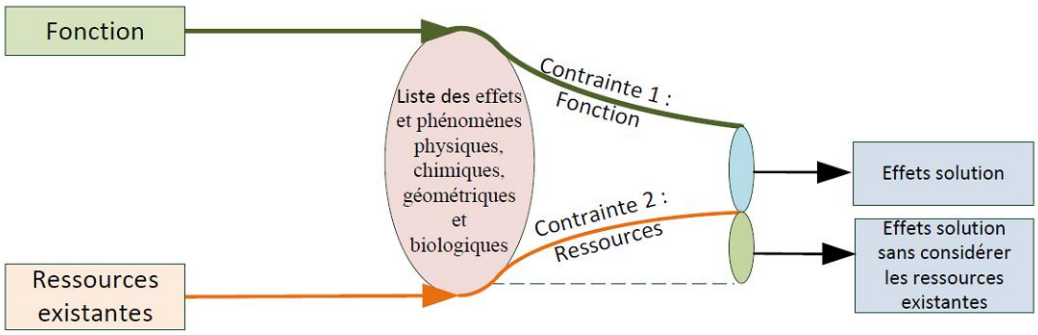



*Figure 4.14 : Processus de recherche des effets solution.*

Finalement, après filtrage les solutions obtenues sont définies sous la forme d'effets solutions. Cependant, comme les effets solutions sont encore des solutions générales, elles doivent être transformées en solutions spécifiques.

#### 4.2.2.3 Génération de solutions spécifiques

Le ou les effets solutions trouvés dans la phase précédente, ne sont pas des solutions finales. En effet, ils doivent être interprétés et adaptés, au travers d'un processus créatif, puis leur implémentation doit être évaluée. Durant ce processus d'adaptation, il est possible de définir si la solution est réalisable ou non, si cette solution peut générer de nouvelles situations problématiques ou d'identifier de nouvelles ressources. Ces dernières peuvent être utilisées soit pour la résolution d'autres contradictions, soit pour étendre la liste des effets potentiellement applicables. Dans ce dernier cas, une nouvelle itération de recherche des effets solutions sera nécessaire en intégrant les nouvelles ressources ajoutées. Ainsi, lors de la résolution d'une contradiction plusieurs solutions spécifiques peuvent être développées.

Afin d'expliquer le processus de génération d'une solution spécifique, nous reprenons l'exemple du tuyau en plastique et des billes décrit dans le chapitre 3. Dans cet exemple, l'effet solution propose d'utiliser un champ magnétique afin de joindre les billes (réaliser la fonction « Connecter plus solide »). Donc, cet effet solution doit être adapté à la solution spécifique : un aimant est utilisé afin de constituer une couche de billes métalliques à l'intérieur du tuyau (figure 4.15). Dans ce cas, la solution spécifique utilise une ressource existante (les billes) et une autre ressource est introduite (le champ magnétique). L'introduction du champ magnétique agrandit l'espace des solutions avec des effets comme le contrôle du déplacement des billes, le contrôle du flux des billes, ou la séparation des billes métalliques (si différentes).

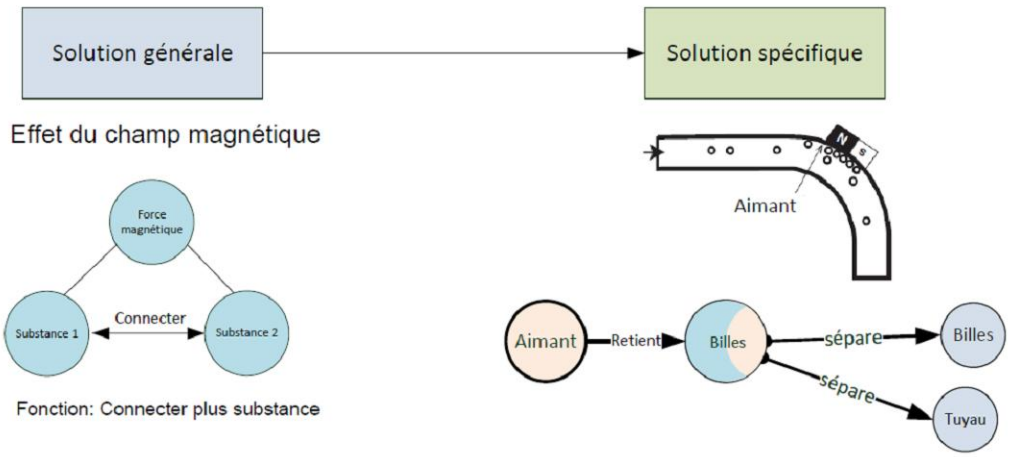



*Figure 4.15 : Adaptation de la solution générale à la situation spécifique.*

Finalement chaque solution spécifique est décrite par les éléments suivants (figure 4.16) :

- Le nom de la solution spécifique
- Le nom de l'effet utilisé.
- Les fonctions en incluant la fonction principale liée à l'action désirée et les fonctions secondaires qui existent en utilisant cet effet comme solution spécifique. Toutes les fonctions sont décrites à l'aide des fonctions générales.
- Les ressources utilisées dans la solution spécifique.

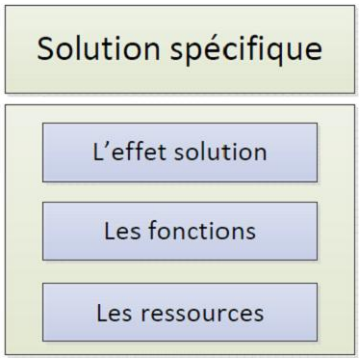



*Figure 4.16 : Eléments descriptifs d'une solution spécifique.*

#### 4.2.2.4 Réseau de solutions spécifiques

Pour chaque contradiction une ou plusieurs solutions spécifiques peuvent être développées puis, elles sont regroupées sous la forme d'un réseau de solutions spécifiques et liées au réseau de contradictions (figure 4.17).

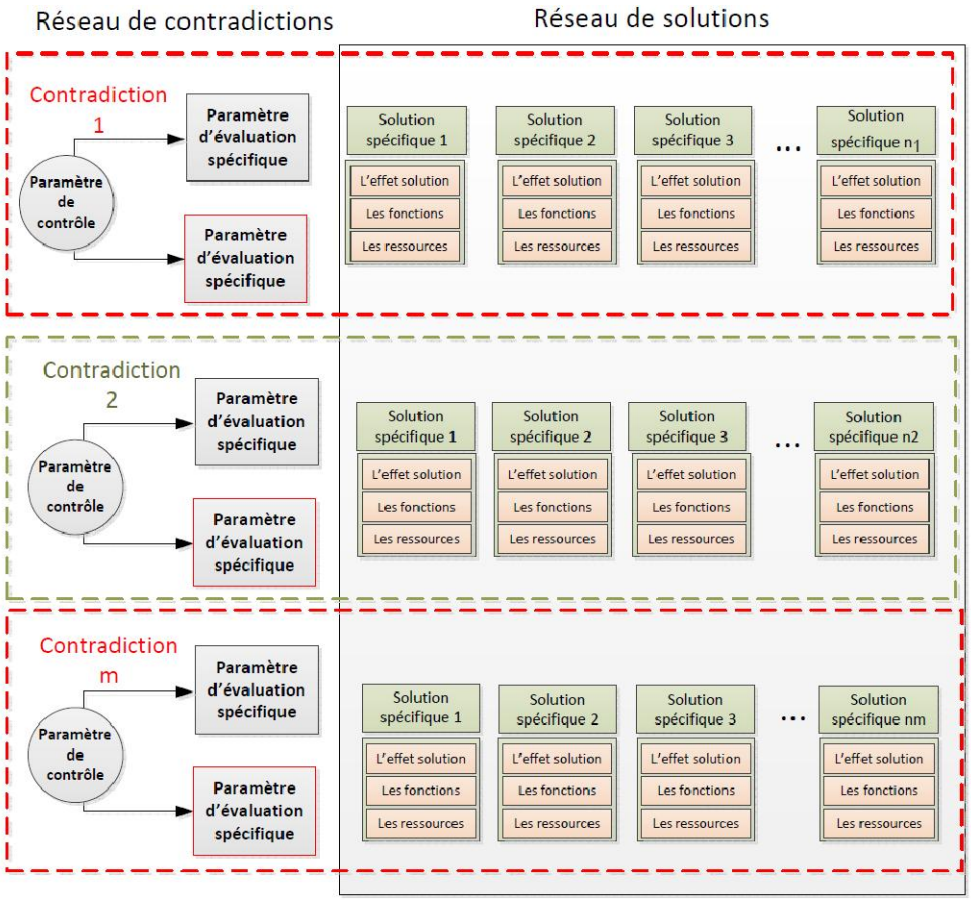



*Figure 4.17 : Différentes solutions spécifiques dans un réseau de solutions.*

Une fois toutes les solutions spécifiques définies, il est nécessaire de réaliser une deuxième recherche, car les nouvelles ressources ajoutées pour la mise en œuvre de solutions peuvent être à leur tour la source de nouvelles solutions. Ainsi, l'ensemble des ressources utilisées dans les différentes solutions spécifiques est nommé réseau de ressources (figure 4.18).

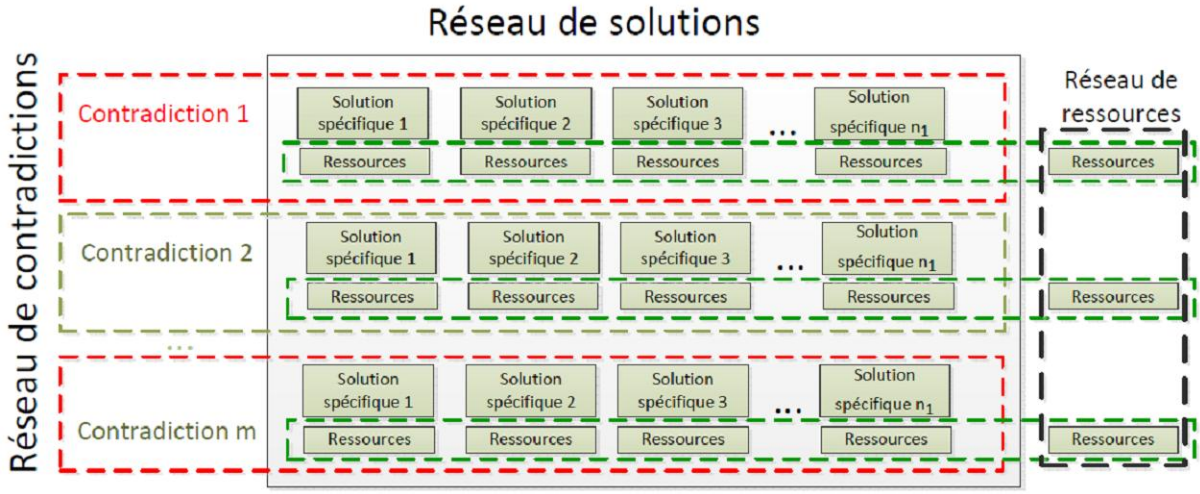



*Figure 4.18 : Réseau de ressources extrait du réseau de solutions.*

Ainsi, une nouvelle recherche d'effets solution (figure 4.19) peut donner de nouveaux effets qui doivent être transformés en nouvelles solutions spécifiques puis ajoutées au réseau de solutions. On limite volontairement la recherche à deux itérations car une troisième recherche impliquerait d'ajouter de nombreuses ressources externes ce qui va à l'encontre de la loi d'idéalité.

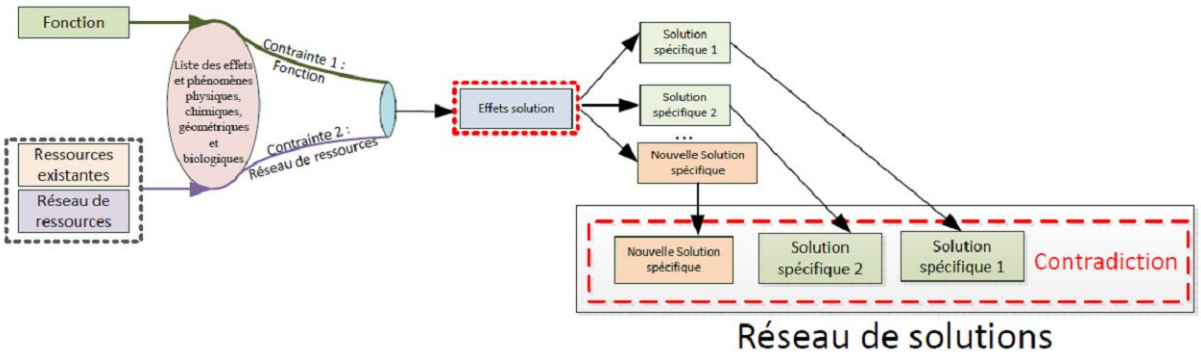



*Figure 4.19 : Nouvelle recherche d'effets solution.*

Enfin, les différentes solutions du réseau de solutions seront comparées afin de détecter l'existence d'éventuelles similitudes, par exemple une fonction ou une ressource, qui peuvent être combinées et donner une solution commune. Ce processus de comparaison et d'association est décrit dans la section suivante.

### 4.2.3 *Etape 3 : Association de solutions spécifiques du réseau de solutions*

Dans les parties précédentes, les différentes contradictions d'une situation problématique ont été modélisées et résolues de manière indépendante, donc une ou plusieurs solutions spécifiques ont été proposées pour chaque contradiction. Une étape d'association est réalisée pour chercher des éléments communs (ressources ou caractéristiques) entre les différentes solutions afin de pouvoir les associer et proposer de nouvelles solutions plus effectives en minimisant l'utilisation de ressources.
Comme évoqué précédemment, les systèmes technologiques suivent certaines tendances d'évolutions qui peuvent également être appliquées aux solutions spécifiques. Deux de ces tendances indiquent que les systèmes évoluent vers la réduction d'utilisation de ressources et l'augmentation du nombre de liens entre les éléments du système (Altshuller 1984). Ainsi, le but est de générer une solution finale qui fournit toutes les fonctions (actions désirées) pour éliminer les contradictions avec le moins de quantité de ressources (voir loi de l'idéalité). Pour ce faire, chaque solution spécifique doit être comparée à l'ensemble des autres solutions spécifiques afin de vérifier l'existence de similitudes et d'essayer de les coupler. Néanmoins, le processus de recherche de similitudes peut s'avérer complexe à cause du grand nombre de combinaisons possibles. Pour faciliter cette tâche, des méthodes mathématiques comme la programmation par contraintes sont utilisées.

La programmation par contraintes (PPC) est une approche mathématique largement utilisée pour la résolution de problèmes complexes et combinatoires dans le domaine industriel, comme par exemple : en gestion de projets, pour l'optimisation de la

production, la planification et l'ordonnancement, etc. (Fron 1994). La PPC regroupe un ensemble de méthodes de résolution basées sur une description du problème grâce à un ensemble de variables de décision avec leurs domaines de définition associés et un ensemble de contraintes. Son but est de trouver une affectation de toutes les variables qui satisfasse toutes les contraintes (Apt 2003). Ce type de problèmes est connu comme un problème de satisfaction de contraintes (PSC). Nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la PPC car elle présente l'avantage de faciliter la modélisation des problèmes et de son efficacité de résolution de problèmes fortement combinatoires. Les aspects mathématiques relatifs à la PPC sont détaillés dans l'annexe 3.

Les techniques de programmation par contraintes peuvent être appliquées afin de vérifier l'existence des éléments communs aux différentes solutions du réseau de solutions. Ainsi par exemple, sur la figure 4.20, deux solutions spécifiques à deux contradictions différentes sont comparées, s'il existe des éléments communs, il faudra tester la possibilité d'un couplage pour générer un nouveau concept de solution plus intégré. Pour ce faire, l'association est réalisée au niveau de l'effet de chaque solution : s'il existe des effets communs ces voies de solutions seront examinées en priorité. Ensuite, la vérification remonte au niveau des fonctions. Elles sont comparées et s'il existe des fonctions communes, ces solutions seront analysées pour vérifier la possibilité de les associer. Par exemple, si nous avons les fonctions « varier température plus » à un endroit du système et « varier température moins » à un autre endroit, il est intéressant d'analyser la potentialité de réaliser un échange thermique entre les sous-systèmes (avec par exemple l'utilisation de l'analyse pinch, chapitre 1). Enfin, une association de ressources peut également être réalisée. S'il existe des ressources communes à plusieurs solutions il faudra vérifier s'il est possible de les partager. La figure 4.21a montre un exemple d'association de solution avec une recherche exhaustive qui considère toutes les combinaisons possibles. La figure 4.21b illustre le cas où une ressource est commune à deux solutions particulières.

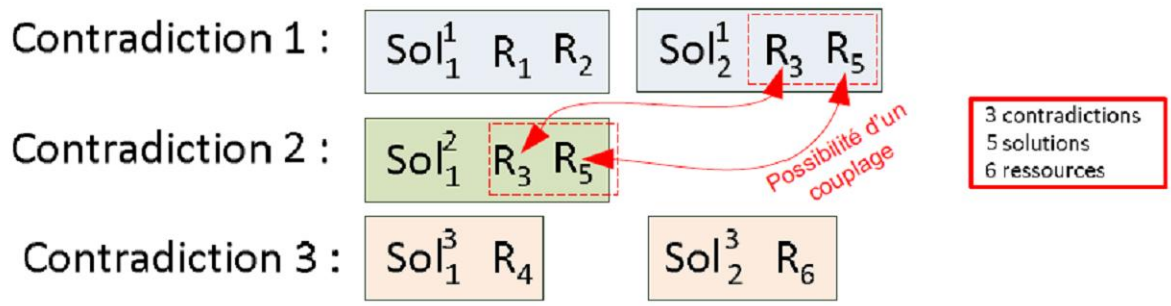



*Figure 4.20 : Comparaison entre deux solutions.*

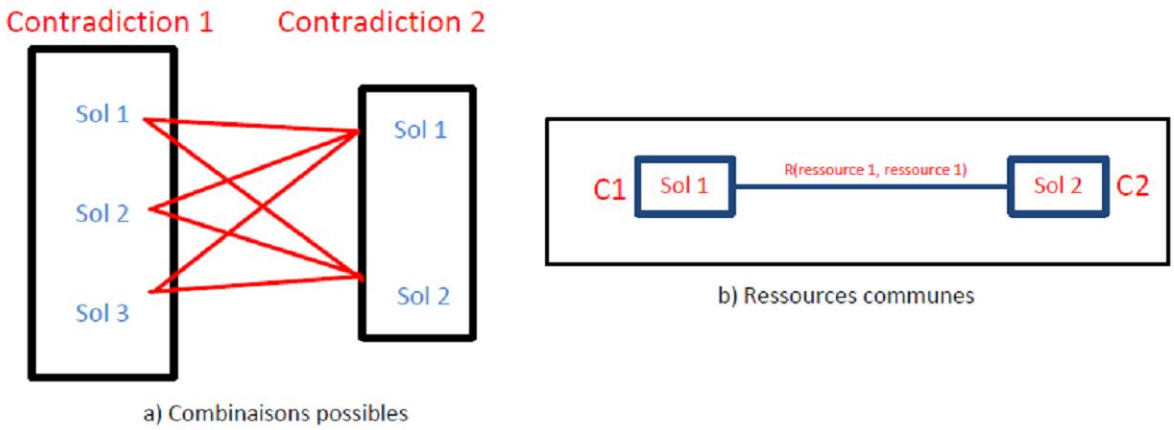



*Figure 4.21 : Utilisation de la PPC pour vérifier des éléments similaires.*

Pour réaliser les associations, le problème est modélisé comme un PSC c'est-à-dire avec le triplet Variable, Domaine de définition et Contraintes {**V, D, C**} :

- Variables (V) : les possibilités de couplage entre les solutions
- Domaines (D) : les solutions spécifiques du réseau de solutions
- Contraintes (C) : les effets, les fonctions et les ressources pour chaque solution

Une fois les possibilités d'association identifiées, une étape de créativité est nécessaire pour essayer de les coupler et donc de nouvelles solutions peuvent être développées. Enfin, lorsque toutes les toutes les associations sont vérifiées et les solutions potentielles développées, les différentes solutions de chaque contradiction doivent être évaluées afin de générer la solution finale. Cette étape est détaillée dans la partie suivante.

### 4.2.4 *Etape 4 : Evaluation des solutions*

Parmi l'ensemble des solutions potentielles, il est nécessaire de sélectionner celle qui parait la plus prometteuse, et qui sera développée dans les étapes suivantes du processus de conception. Pour choisir cette solution, il est nécessaire de proposer un processus d'évaluation et de sélection. Pour notre approche, nous utilisons une version adaptée du processus de sélection de concept développé par Pugh (Pugh 1990). Ce processus, qui sera décrit par la suite, s'appuie sur les éléments suivants :

- Sélection de critères d'évaluation.
- Moyen de mesurer les différents critères d'évaluation.
- Evaluation de solutions spécifiques.
- Analyse des résultats de l'évaluation et élimination de solutions spécifiques.
- Amélioration de solutions spécifiques retenues.
- Sélection de la solution finale.

#### 4.2.4.1 Sélection des critères d'évaluation

Une évaluation des concepts de solution est vitale car toutes les décisions prises dans l'étape d'évaluation auront des conséquences dans les étapes suivantes du processus de conception. Donc, la définition des critères d'évaluation est primordiale. Dans la phase amont du processus de conception, ces critères d'évaluation sont souvent qualitatifs et non quantitatifs car il demeure encore une grande incertitude et imprécision sur les caractéristiques et propriétés du système à développer. Pour

notre approche d'écoconception, les critères environnementaux sont ajoutés aux critères communément utilisés en conception. Ces critères d'évaluation doivent être compréhensibles pour les différents membres de l'équipe qui participent à la conception du système.

Pour notre approche ces critères sont divisés en quatre groupes :

- Critères indispensables : critères à satisfaire obligatoirement, basés sur des concepts de la théorie TRIZ et d'écoconception.
- Critères environnementaux : critères liés aux actions de la production durable.
- Critères spécifiques : critères sur l'atteinte de certains objectifs ou exigences techniques particulières au problème.
- Critères d'évaluation du coût des ressources utilisées pour l'implémentation de la solution spécifique.

Ainsi, les quatre groupes sont décrits dans les tableaux suivants 4.4 à 4.7.

**Critères indispensables**

| | |
|---|---|
| Critères indispensables | • La solution satisfait la solution environnementale la plus désirée (SEPD).<br>• La solution élimine la contradiction.<br>• La solution contient au moins un élément contrôlable.<br>• La solution est technologiquement réalisable.<br><br>Note : si la solution ne satisfait pas tous les critères, la solution n'est pas retenue. |

*Tableau 4.4 : Evaluation des critères indispensables (Savransky 2000) (Orloff 2003).*

**Critères environnementaux**

| | |
|---|---|
| Les actions de la production durable | • L'intensité matière.<br>• L'intensité énergétique.<br>• L'augmentation de ressources renouvelables.<br>• La réduction de la dispersion de produits toxiques et du gaspillage énergétique.<br>• L'amélioration de la production.<br>• L'augmentation de la durabilité des produits.<br>• L'augmentation de la recyclabilité des matériaux et réutilisation de l'énergie. |

*Tableau 4.5 : Critères environnementaux.*

**Evaluation des objectifs et exigences du problème**

| | |
|---|---|
| Objectifs et exigences particulières du système à développer ou à améliorer | Exemple :<br>• Facilité de fabrication.<br>• Fiabilité de conception.<br>• Facilité d'entretien.<br>• Génération de facteurs nuisibles.<br><br>Note : certains paramètres de la théorie TRIZ peuvent être inclus. |

*Tableau 4.6 : Critères d'évaluation des objectifs et exigences du problème.*

**Evaluation des ressources**

| | |
|---|---|
| Estimation des ressources | • Qualité<br>  ○ Néfaste<br>  ○ Neutre<br>  ○ Utile<br>• Quantité<br>  ○ Limitée<br>  ○ Insuffisante<br>  ○ Suffisante |
| Disponibilité des ressources | • Disponibilité<br>  ○ A développer<br>  ○ A modifier<br>  ○ Prête à l'emploi<br>• Coût<br>  ○ Très cher<br>  ○ Cher<br>  ○ Gratuit<br>• Localisation<br>  ○ Externe<br>  ○ Super-système<br>  ○ Système |
| Fin de vie | • Degré de recyclabilité ou réutilisation<br>  ○ Non recyclable / réutilisable<br>  ○ Revalorisable<br>  ○ Recyclable / réutilisable |

*Tableau 4.7 : Critères d'évaluation de ressources (Savransky 2000) (Orloff 2003).*

#### 4.2.4.2 Moyen de mesurer les différents critères d'évaluation

Un des grands défis de la conception préliminaire est d'évaluer les critères précédents car l'information disponible est souvent imprécise et incomplète à ce stade de la conception. En général, cette information est disponible dans les étapes finales du processus de conception car elle est développée au fur et à mesure de l'avancement du projet. Néanmoins, il est nécessaire de trouver un moyen d'estimer ces critères d'évaluation afin de sélectionner une solution appropriée. Une évaluation distincte est réalisée pour les différents groupes de critères. Pour évaluer les critères

indispensables, nous utilisons d'abord une procédure de vérification au travers d'une check-list d'évaluation (Pahl et al. 2007) afin de déterminer si la solution spécifique satisfait ces critères. Ainsi, ils sont évalués comme **+** (Oui) si la solution répond au critère évalué et **-** (Non) si la solution ne répond pas au critère. Dans ce cas, la solution spécifique doit satisfaire positivement tous les critères indispensables sinon elle est éliminée.
Pour évaluer les critères environnementaux, les objectifs et exigences du problème, et les ressources, la matrice de Pugh est utilisée (Pugh 1990). Cette méthode facilite l'identification des meilleures solutions et contribue au développement de nouvelles alternatives de solution. Elle permet d'évaluer si une solution particulière présente une amélioration, une dégradation ou reste sans effet par rapport à une solution de référence (système actuel). Ce mode d'évaluation est détaillé dans la partie suivante.

#### 4.2.4.3 Evaluation de solutions spécifiques

Une évaluation est utilisée afin de déterminer la « valeur » ou l'« utilité » d'une solution par rapport à certains objectifs. Pour réaliser l'étape d'évaluation, différentes matrices sont conçues de manière similaire : sur les lignes sont situées les différentes solutions particulières et sur les colonnes chaque critère d'évaluation. Les différentes solutions sont évaluées selon un point de référence. Si le problème concerne l'amélioration ou la reconception d'un système, le système existant est utilisé comme référence. Au contraire, si le problème est de concevoir un système totalement nouveau, le point de référence est un système similaire considéré comme le meilleur existant, une des solutions spécifiques considérées comme ponctuellement la meilleure par les concepteurs (Ullman 2009), ou un concept qui définit le système idéal. Une fois la référence établie, l'étape d'évaluation est réalisée. La figure 4.22 illustre l'étape d'analyse et d'évaluation.
Pour ce faire, chaque solution spécifique proposée est comparée à la référence, si la solution est meilleure que la référence la solution obtient une note **+**, si la solution spécifique est similaire à la référence, elle obtient un **0**, si la solution spécifique est moins performante que la solution de référence sur le critère évalué, la solution obtient une note **-**. On peut ajouter un signe **?** quand il n'est pas possible de réaliser une comparaison sur un critère, et donc une information supplémentaire doit être produite. Ainsi, la matrice Pugh permet de définir une ou plusieurs solutions satisfaisantes. Lorsqu'il est nécessaire de faire une comparaison multicritères de plusieurs solutions candidates, le processus d'analyse hiérarchique (PAH) (Saaty 2008) est utilisé. Le PAH (détaillé dans la partie 4.2.4.6) est une méthode qui permet d'obtenir une appréciation générale de l'importance relative de chaque alternative de façon hiérarchisée. Ainsi, ces deux méthodes couplées sont utilisées pour faciliter l'évaluation des solutions selon les différents critères à considérer.

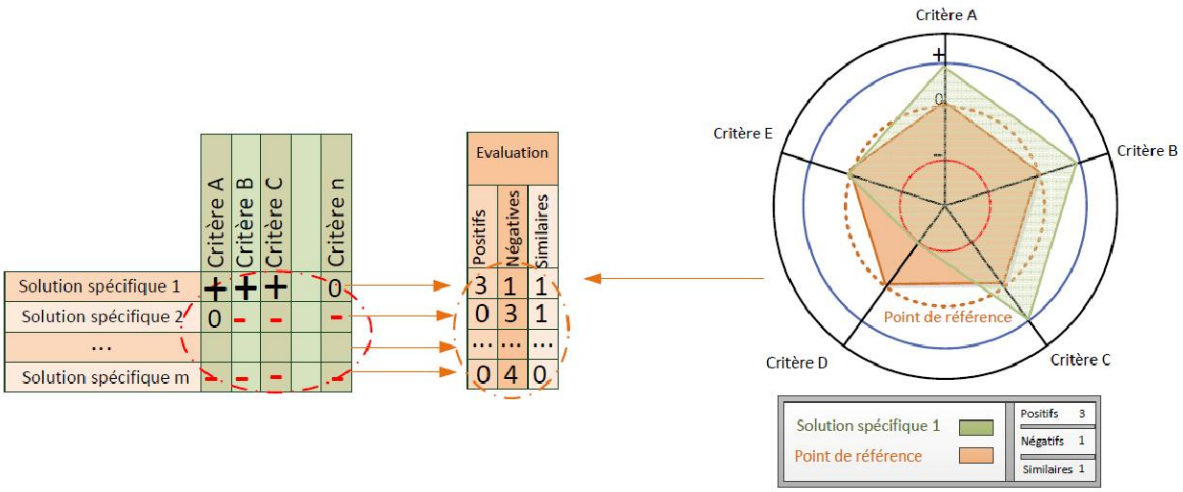



*Figure 4.22 : Analyse et évaluation des solutions spécifiques.*

#### 4.2.4.4 Analyse des résultats de l'évaluation et élimination de solutions spécifiques

Après l'étape d'évaluation, l'étape d'analyse est réalisée, elle se compose de trois parties :

- Le résultat de l'évaluation où le concepteur définit si la solution est retenue ou éliminée (figure 4.23). Si les points positifs et similaires dépassent les points négatifs la solution est retenue, dans le cas contraire la solution est éliminée. Par ailleurs, lorsqu'il n'est pas possible de définir le résultat, il faudra des informations supplémentaires pour réévaluer la solution.

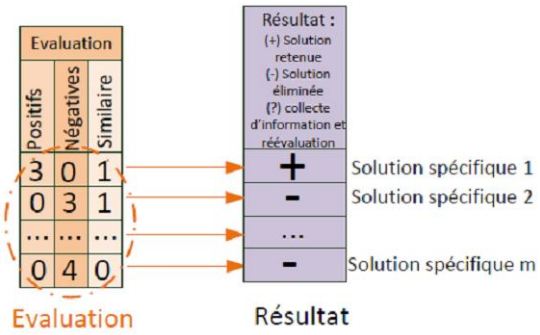



*Figure 4.23 : Résultat de l'évaluation.*

- Une partie d'amélioration où le concepteur définit les critères qui devront être améliorés par les solutions retenues (figure 4.24). Le résultat de cette analyse est utilisé dans l'étape d'amélioration décrite par la suite.

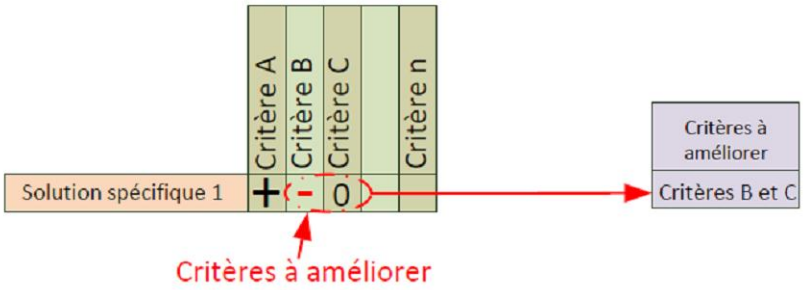



*Figure 4.24 : Critères à améliorer pour une solution spécifique.*

- Si sur certaines caractéristiques, une solution vouée à être éliminée possède une évaluation élevée, il faut étudier l'éventualité de les adapter aux solutions retenues. Par exemple, sur la figure 4.25 la solution spécifique 2 est candidate à être éliminée mais sur le critère 2 elle est supérieure à la solution retenue. Il faut analyser si les caractéristiques conduisant à une bonne évaluation sur ce critère pourraient être intégrées à la solution 1.

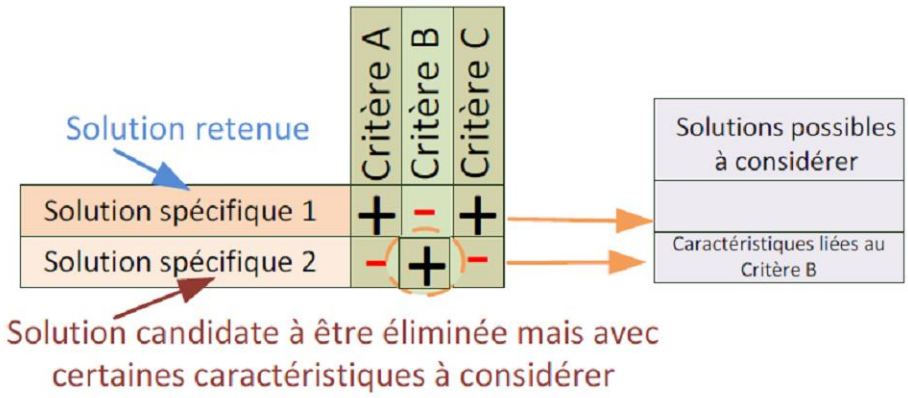



*Figure 4.25 : Solutions potentielles à considérer*

Ainsi, l'évaluation et l'analyse des différents groupes de critères sont réalisées dans les différentes matrices illustrées sur les figures suivantes, 4.27 à 4.31.

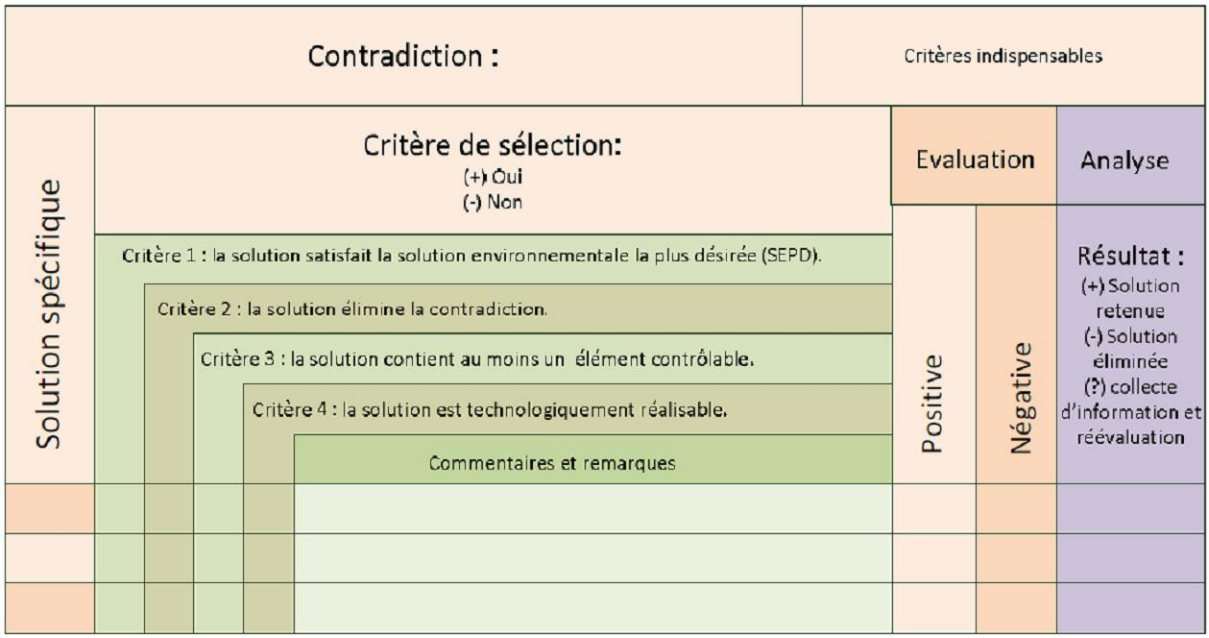



*Figure 4.26 : Evaluation et analyse des critères indispensables.*

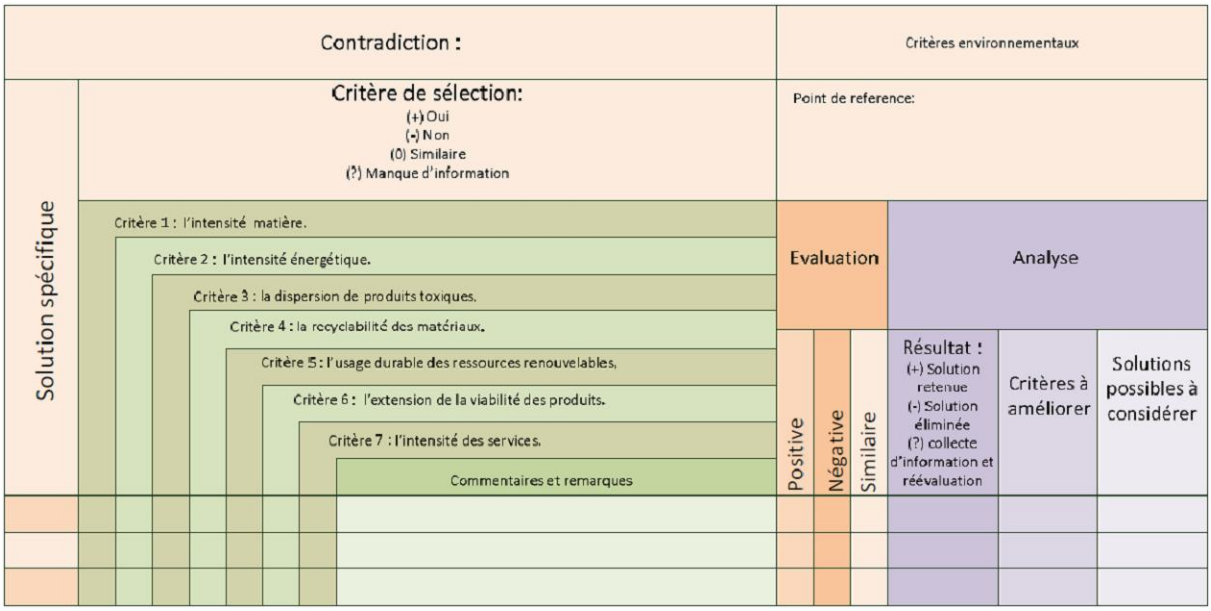



*Figure 4.27 : Evaluation et analyse des critères environnementaux.*

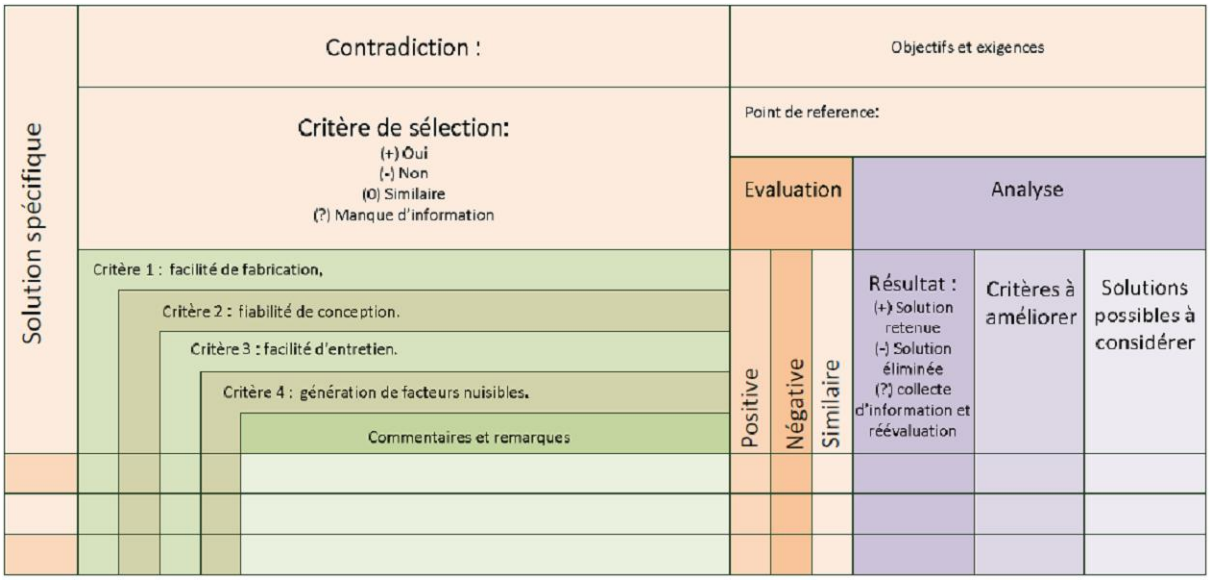



*Figure 4.28 : Evaluation et analyse des objectifs et exigences.*

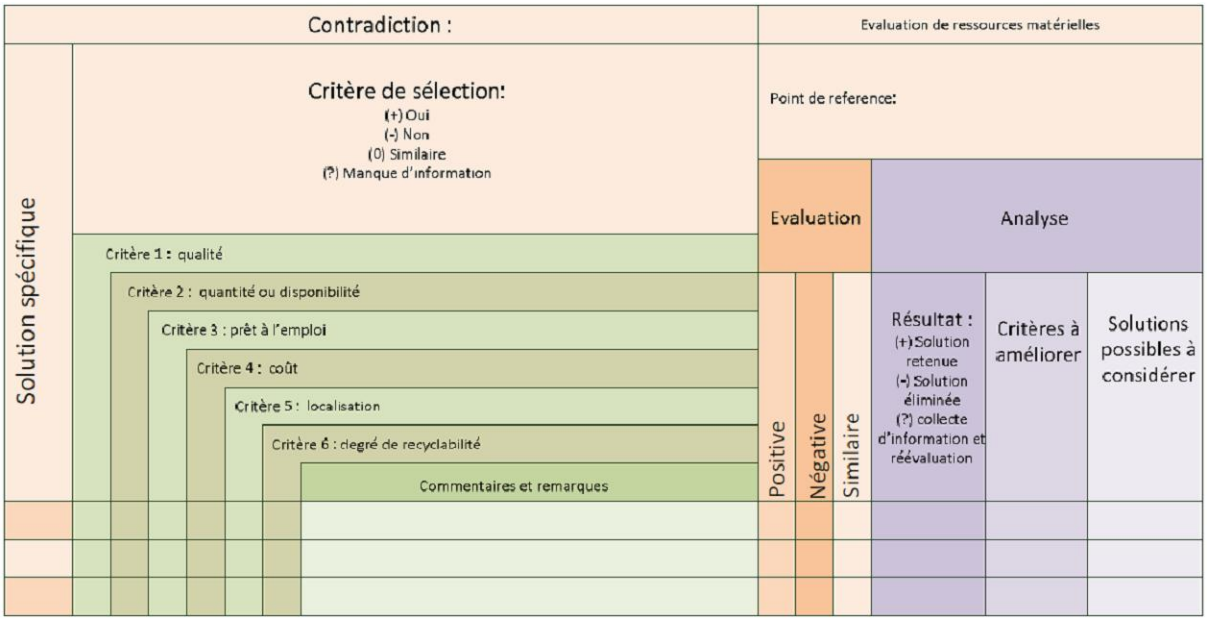



*Figure 4.29 : Evaluation et analyse des ressources matérielles.*

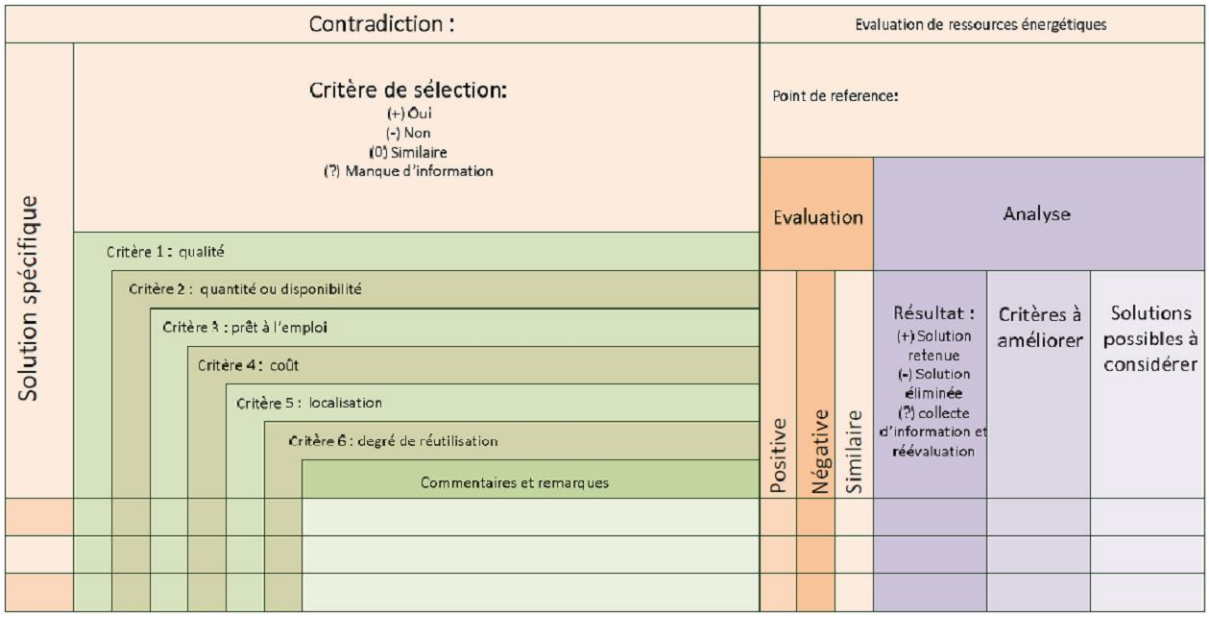



*Figure 4.30 : Evaluation et analyse des ressources énergétiques*

#### 4.2.4.5 L'étape d'amélioration des solutions retenues

Une fois l'étape d'élimination réalisée, une étape d'amélioration des solutions retenues est mise en œuvre. Sur les solutions retenues, les solutions peuvent avoir des notes égales (**0**) ou moins bonnes (**-**) que le point de référence, dans ce cas le concepteur doit chercher la façon de les améliorer. Cette amélioration peut s'opérer via l'intégration de certaines caractéristiques positives (évaluation supérieure par rapport à la solution retenue) de solutions candidates à être éliminées.

Ainsi, des améliorations peuvent être obtenues pour les solutions retenues, ou, au contraire, le développement de nouvelles solutions nommées solutions hybrides est également possible. L'objectif de l'hybridation est de tirer profit de chaque solution. Ainsi, si des améliorations ou de nouvelles solutions existent, la matrice d'évaluation et d'analyse est mise à jour puis on continue avec l'étape de sélection.

#### 4.2.4.6 Sélection de la solution finale

L'objectif de cette étape est de déterminer la solution spécifique la plus prometteuse. Pour cela, chaque solution est évaluée selon trois critères :

- Les critères environnementaux.
- Les objectifs et exigences.
- Les ressources.

La difficulté à réaliser une évaluation multicritères vient du fait que l'importance relative de chaque critère peut varier selon le point du vue de concepteur et de la situation particulière du problème. Ainsi, pour faciliter l'évaluation des solutions spécifiques, nous proposons une méthode d'évaluation qui se compose des étapes suivantes :

1. Estimation de l'importance relative de chaque critère au travers du processus d'analyse hiérarchique (PAH) (Saaty 2008). Cette méthode a l'avantage d'évaluer plusieurs solutions en fonction de plusieurs

critères dont certains peuvent être de nature différente voire même contradictoire.

2. Evaluation d'une solution spécifique par rapport à chaque critère (nommé score) en utilisant l'échèle du guide VDI 2225 (Pahl et al. 2007).
3. Détermination de l'indice relative de chaque solution spécifique et définition de la solution finale au travers d'un indice relatif total.

#### 4.2.4.6.1 Estimation de l'importance relative de chaque critère

Pour estimer cette importance le PAH utilisé se compose de trois étapes :

- Décomposer le problème en une structure hiérarchique (figure 4.31)

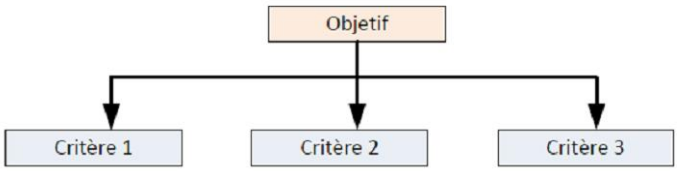



*Figure 4.31 : Décomposition du problème.*

- Réaliser les comparaisons binaires entre chaque critère afin de calculer leur poids relatif. Pour déterminer la valeur de comparaison entre critères l'échelle numérique du tableau 4.8 est utilisée. La matrice de la figure 4.32 représente un exemple de comparaison entre les différents critères.

| Echelle de comparaison par paire | | |
|---|---|---|
| Valeur | Définition | Description |
| 1 | Importance égale | Les deux éléments ont la même importance |
| 3 | Importance modérée | Un élément est un peu plus important que l'autre |
| 5 | Importance forte | Un élément est plus important que l'autre |
| 7 | Importance très forte | Un élément est fortement plus important que l'autre |
| 9 | Importance absolue | Un élément est absolument plus important que l'autre. |
| Les valeurs 2, 4, 6, 8 peuvent être utilisées, elles représentent des valeurs intermédiaires pour affiner les comparaisons. | | |

*Tableau 4.8 : Echelle de comparaison (Saaty 2008).*

| | Critère 1 | Critère 2 | Critère 3 |
|---|---|---|---|
| Critère 1 | 1 | 1/2 = 0.5 | 3 |
| Critère 2 | 2 | 1 | 4 |
| Critère 3 | 1/3 = 0.33 | 1/4 = 0.25 | 1 |
| Somme | 3.33 | 1. 75 | 8.00 |

*Figure 4.32 : Comparaison entre critères.*

- Déterminer l'importance relative de chaque critère et le poids relatif associé à chacun. Pour ce faire, il est nécessaire de normaliser les valeurs des différents critères et de déterminer leur importance (figure 4.33).

| | Normalisation | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Critère 1 | Critère 2 | Critère 3 | Somme | Importance |
| Critère 1 | 0.30 | 0.29 | 0.38 | 0.96 | 32.02% |
| Critère 2 | 0.60 | 0.57 | 0.50 | 1.67 | 55.71% |
| Critère 3 | 0.10 | 0.14 | 0.13 | 0.37 | 12.26% |
| Somme | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 3.00 | 100.00% |

*Figure 4.33 : Détermination de l'importance des critères.*

Ainsi, l'importance de chaque critère est définie comme un facteur de pondération (figure 4.34).

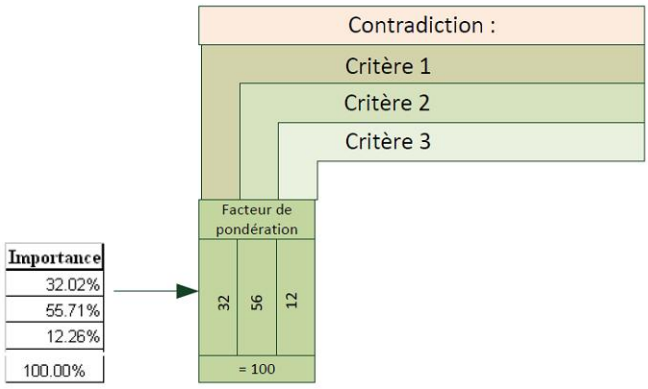



*Figure 4.34 : Importance de chaque critère comme facteur de pondération.*

#### 4.2.4.6.2 Evaluation d'une solution spécifique par rapport à chaque critère

Cette évaluation définit le degré de satisfaction ou de réponse d'une solution spécifique à un critère. Pour évaluer cette réponse (nommé score), le concepteur utilise l'échelle du guide VDI 2225 (Pahl et al. 2007) avec un intervalle de variation entre 0 - 4 qui signifie :

| Echelle du guide VDI 2225 | | |
|---|---|---|
| **Valeur** | **Définition** | **Description** |
| 0 | Insatisfaisante | La solution est insatisfaisante par rapport au critère. |
| 1 | Tolérable | La solution est tolérable par rapport au critère. |
| 2 | Adéquate | La solution est adéquate par rapport au critère. |
| 3 | Bonne solution | La solution est une bonne solution par rapport au critère. |
| 4 | Très bonne | La solution est très bonne voire idéale par rapport au critère. |

*Tableau 4.9 : Echelle du guide VDI pour l'évaluation de solutions spécifiques.*

Ainsi chaque évaluation de la solution spécifique pour chaque critère est calculée dans une matrice illustrée sur la figure 4.35.

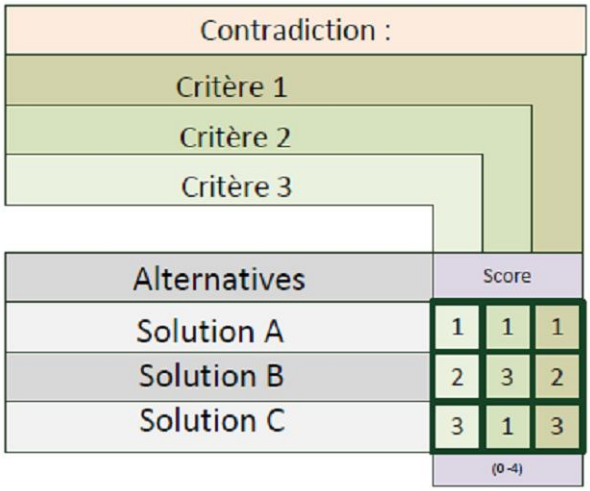



*Figure 4.35 : Evaluation des solutions spécifiques.*

#### 4.2.4.6.3 Détermination de l'indice relatif global

Une fois que les facteurs de pondération (Fp) et les scores (Sc) définis, l'indice relatif de chaque critère ($IR_c$) est calculé. Cet indice se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$IR_c = Fp_c \times Sc_c$$

Avec :

$IR_c$ = Indice relatif du critère c.
$Fp_c$ = Facteur de pondération du critère c.
$Sc_c$= Score du critère c.

La somme de tous les indices relatifs donne l'indice relatif global ($IRT_s$) pour la solution évaluée. Cet indice global est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$IRT_s = \sum_{c=1}^{n} IR_c$$

Avec :

$IRT_s$ = Indice relatif global de la solution considérée.

$IRT_s$ permet le classement entre les différentes solutions spécifiques. La figure 4.36 illustre cette dernière étape au travers d'un exemple.

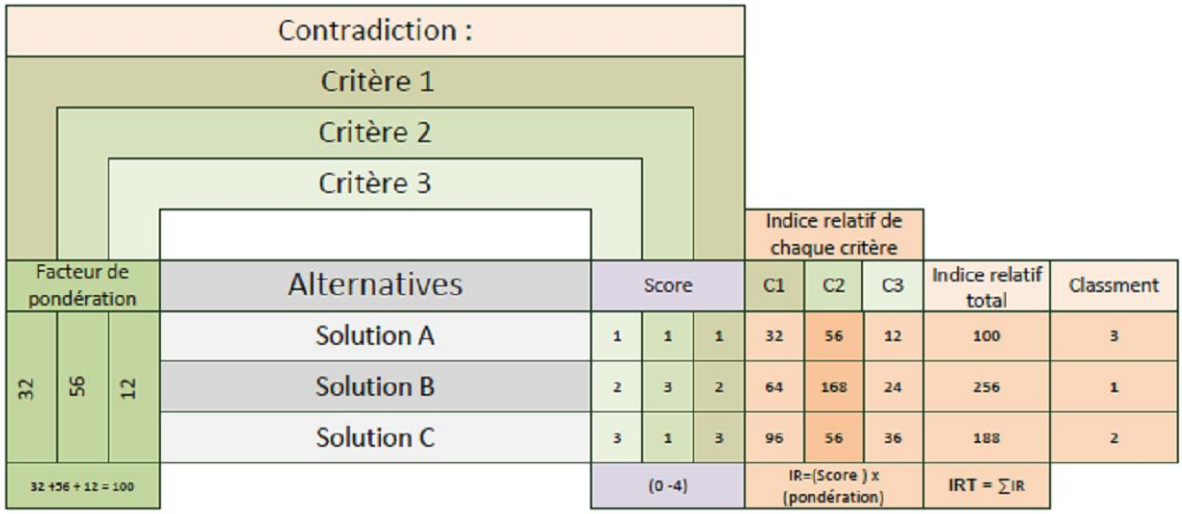



*Figure 4.36 : Modèle d'évaluation et sélection des solutions spécifiques.*

En utilisant cette méthode, il est possible d'évaluer les différentes solutions spécifiques par rapport aux trois critères utilisés dans notre approche et de sélectionner la plus prometteuse. De plus, cette même méthode peut être utilisée pour réaliser une évaluation plus approfondie en considérant des sous-critères.

### 4.2.5 *Solutions retenues*

Une fois les solutions de chaque contradiction évaluées, les plus prometteuses sont sélectionnées, et sont définies comme solutions retenues. A ce stade, elles sont considérées comme des solutions indépendantes donc il faut les agréger pour développer la solution finale qui sera ensuite matérialisée par un nouveau système technologique. Pour ce faire, trois étapes sont nécessaires (figure 4.37):

1. Réaliser une description physique détaillée de chaque solution retenue à l'aide de schémas, d'information contenus dans la base des effets et/ou des brevets, etc. afin de déterminer les exigences et conditions nécessaires pour sa mise en œuvre.
2. Génération des alternatives réalisées avec le couplage des différentes solutions dans une solution finale qui décrit la structure préliminaire du nouveau système (caractéristiques et une représentation graphique).
3. Sélection d'une alternative comme solution finale.

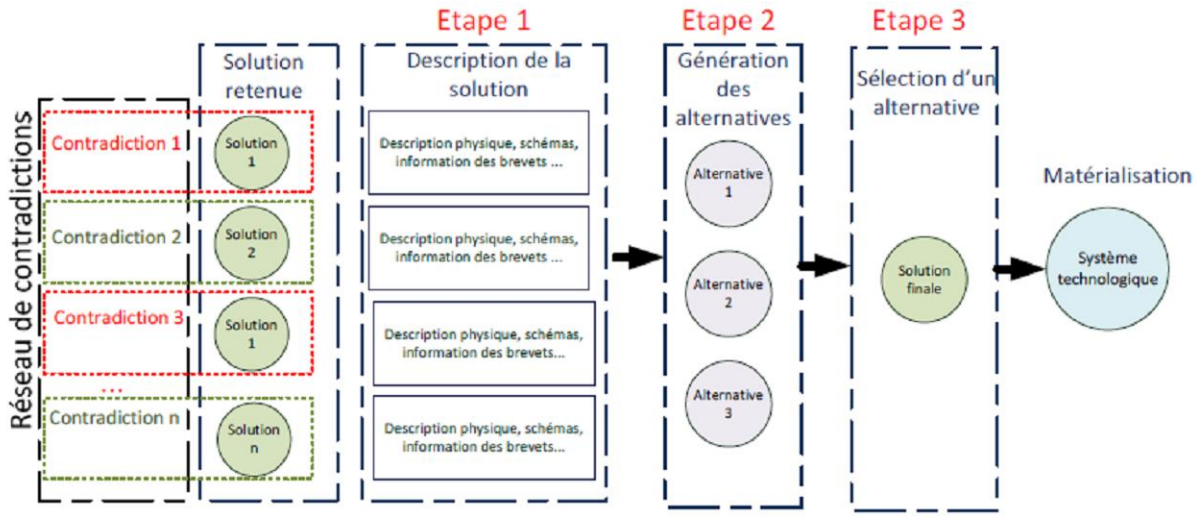



*Figure 4.37 : Couplage de solutions retenues pour former une solution finale.*

Enfin, afin d'améliorer la résolution des problèmes futurs, l'information générée dans le processus de résolution des contradictions doit être capitalisée, par exemple, les effets physiques utilisés et les champs-substances développés, ainsi que les principes de solution utilisés.

## 4.3 CONCLUSION

Ce chapitre présente le processus de résolution de problème formulés à l'aide de plusieurs contradictions. Ce processus est complexe car il implique la transformation d'une situation problématique sous la forme de plusieurs contradictions pour au final obtenir une solution physique réalisable. Dans notre approche les contradictions sont résolues individuellement en utilisant les outils (certains modifiés) de la théorie TRIZ afin de définir l'action désirée. Cette dernière est traduite sous la forme d'une fonction afin d'identifier un effet ou phénomène capable de la réaliser. L'utilisation des effets et phénomènes permet d'aboutir à des solutions concrètes, avec la possibilité de déterminer si une solution est physiquement réalisable ou non. Puis, ces effets et phénomènes sont transformés en solutions spécifiques. Les différentes solutions spécifiques générées pour résoudre chaque contradiction sont regroupées dans le réseau de solutions et une analyse est réalisée afin de vérifier l'existence de ressources communes à plusieurs solutions et donc vérifier la possibilité de pouvoir les coupler. Enfin les solutions générées pur chaque contradiction sont évaluées afin de définir les solutions les plus prometteuses. Ces solutions sont, finalement, regroupées en une solution finale. Différents méthodes et outils sont proposés pour faciliter la résolution des contradictions :

- l'utilisation d'une représentation graphique de la contradiction physique qui facilite l'identification du principe de transformation à utiliser,
- un guide de solution pour la méthode champs-substances afin de faciliter l'identification du standard à utiliser,
- la définition de fonction (action désiré) en utilisant une adaptation des fonctions de (Pahl et al. 2007),
- la modélisation des effets physiques, chimiques, géométriques et biologiques en utilisant la modélisation la théorie du processus qualitatif et la représentation graphique de champs-substances,

- l'utilisation de la programmation par contraintes pour faciliter l'association entre les différentes solutions proposées pour résoudre les contradictions et générer de nouvelles solutions.

Dans une dernière étape, la matrice de Pugh est utilisée pour évaluer et améliorer les solutions spécifiques des différentes contradictions par rapport à différents critères préétablis. Enfin, le processus d'analyse hiérarchique est utilisé pour sélectionner la solution la plus prometteuse.

Ainsi, l'utilisation des effets et phénomènes permet de produire des solutions plus créatives et concrètes. Néanmoins, le processus proposé présente aussi des limites : afin d'améliorer l'efficacité de l'utilisation des effets, il est nécessaire d'augmenter le nombre d'effets dans la base de donnés en ajoutant des effets de différents domaines. Cette extension de la base de données demande un temps important, demande de nombreuses connaissances pour établir l'ensemble des possibilités d'exploitation d'un effet. Par conséquent, un système d'extraction des connaissances des différentes bases de données (brevets, littérature scientifique…) faciliterait cette tâche. De plus, il est nécessaire d'améliorer la méthode d'évaluation des solutions proposées car cette évaluation reste très subjective en suivant le point de vue du concepteur Finalement, toute l'information générée dans le processus de résolution pourrait être capitalisée afin de faciliter les résolutions futures.

CHAPITRE 5

# APPLICATION DE LA DEMARCHE A LA GAZEIFICATION DE LA BIOMASSE

## 5.1 PRESENTATION DU CAS D'ETUDE

Dans le contexte énergétique et environnemental actuel, le recours à des sources d'énergie alternative est amené à s'accroître dans l'avenir. De plus la versatilité des cours du pétrole, l'ouverture des marchés de l'électricité, la raréfaction des ressources liquides et gazeuses impliquent d'une par une optimisation énergétique des procédés, et d'autre par une substitution des sources d'énergie par des énergies renouvelables efficaces et respectueuses de l'environnement. Parmi l'éventail des possibilités, la biomasse offre des voies intéressantes grâce à ses nombreux avantages et son potentiel élevé pour répondre aux exigences en matière de technologies d'approvisionnement en énergie.
La gazéification de la biomasse est une transformation thermochimique qui convertit un solide combustible en un gaz de synthèse chargé en hydrogène ($H_2$) et monoxyde de carbone (CO), en présence d'un mélange gazeux ; vapeur d'eau, oxygène, dioxyde de carbone. Ce gaz de synthèse est principalement utilisé dans des unités de cogénération de chaleur et d'électricité, mais d'autres voies de valorisation, sont également possibles : les biocarburants de deuxième génération (méthanol, le diméthyléther, procédé Fischer-Tropsch…) (Van Rossum et al. 2009), la production renouvelable d'hydrogène (Florin et Harris 2007), les piles à combustible (Xuan et al. 2009).
La gazéification est une réaction endothermique entre le carbone (contenu dans le solide) et le gaz réagissant :

$$C+H_2O \rightarrow CO+H_2$$

$$C+CO_2 \rightarrow 2CO$$

Pour que ces réactions puissent avoir lieu, il faut générer le charbon concentré en carbone, les réactifs ($CO_2$ et/ou $H_2O$) et l'énergie nécessaire. Par conséquent les procédés de gazéification de la biomasse se composent des étapes suivantes, figure 5.1 :

- Séchage : Evaporation d'eau présente dans la biomasse.
- Pyrolyse : Création du charbon (Char) et élimination des matières volatiles.
- Oxydation : Combustion des matières volatiles.
- Gazéification : Transformation du Char et des gaz pour générer le gaz de synthèse.
- Combustion : Une faible partie du charbon de bois est brûlée.

Les deux contraintes majeures au développement de la biomasse sont la diversité des biomasses alimentant le procédé (compositions variant fortement en fonction de son origine) et la présence de polluants dans le gaz de synthèse. En effet, suite à l'étape de pyrolyse des composés hydrocarbonés (nommés goudrons) se forment et sont néfastes à la future utilisation du gaz de synthèse : encrassement des conduites et appareils, chute de pression, problèmes de maintenance… La teneur en goudrons est directement liée à la qualité de la biomasse et au procédé retenu. En effet, en fonction de leurs conceptions et conditions opératoires, certains procédés diminuent la présence de ces goudrons. L'élimination (souvent partielle) de ces derniers génère des coûts d'investissement et de maintenance importants. Bien que des progrès

importants aient été réalisés ces dernières années dans la conception des installations de gazéification pour résoudre ce problème, la purification des gaz reste le verrou limitant à l'utilisation de la biomasse en particulier pour la production d'électricité.

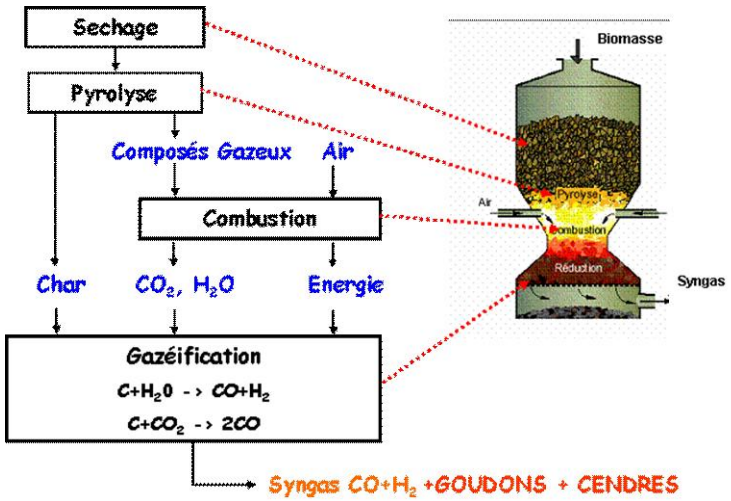
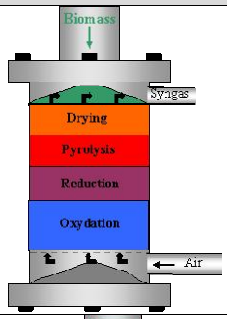
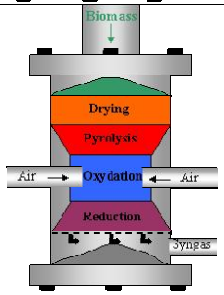



*Figure 5.1: Représentation schématique des mécanismes dans le procédé.*

Il existe deux principaux types de technologies pour la gazéification : les procédés à lits fixes classés selon la façon de les alimenter en air ou en oxygène, et les procédés à lits fluidisés dépendant de la vitesse superficielle du gaz. Une analyse succincte des diverses technologies est résumée dans le tableau 5.1.

| Nom | Illustration | Forces | Faiblesses |
|---|---|---|---|
| **Lits fixes** | | | |
| Downdraft (co-courrant) |   | - Conception simple<br>- Taux de conversion élevé<br>- Faible sensibilité à la composition du combustible<br>- Gaz de synthèse avec une faible concentration en goudrons | - Possibilité de fusion des cendres<br>- Combustible avec une faible humidité<br>- Fort coût de maintenance<br>- Production d'énergie limitée (350 kWe) |
| Updraft (contre courant) |   | - Faible perte de charge<br>- Conception simple<br>- Efficacité thermique élevée<br>- Grande flexibilité par rapport à l'humidité du combustible<br>- Faible tendance à la formation de scories | - Faible température du gaz pouvant générée de la condensation<br>- Forte concentration en goudrons dans le gaz de synthèse<br>- Non approprié pour la production d'électricité |
| **Lits Fluidisés** | | | |

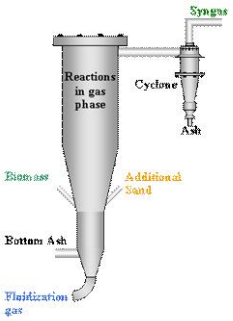
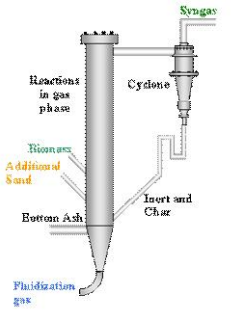
| | | | |
|---|---|---|---|
| Lit fluidisé dense Bubbling Fluidized Bed ($v_{fl}$=1 to 2 m/s) |  | - Bon contrôle de la température<br>- Bon contact gaz-solide<br>- Possibilité de traitement catalytique dans le lit<br>- Cinétiques des réactions rapides. | - Difficulté de contrôle du niveau du lit lors de variations de charge.<br>- Présence de particules dans le gaz de synthèse<br>- Forte perte de charge<br>- Particules de faibles tailles, sensibilité à la distribution de tailles des particules.<br>- Biomasse avec une faible teneur en eau (<20%)<br>- Présence modérée voire élevée de goudrons dans le gaz de synthèse<br>- Taux conversion du carbone faible |
| Lit fluidisé Circulant Circulating Fluidized Bed ($v_{fl}$=4 to 6 m/s) |  | - Bon contrôle de la température et des cinétiques<br>- Grande flexibilité par rapport au combustible (type et taille)<br>- Taux modéré de goudrons en sortie<br>- Fort taux de conversion | - Forte concentration de particules dans le gaz de synthèse.<br>- Biomasse avec une faible teneur en eau (<20%)<br>- Forte perte de charge à cause des cendres |
| Lit fluidisé entraîné Transported Bed ($v_{fl}$>>6 m/s) |  | - Gaz de synthèse de grande qualité grâce à la température atteinte 1200-1500°C (peu de goudrons)<br>- Bon mélange et contact gaz/solide<br>-Taux de conversion du carbone correct (non total car le temps de séjour du solide est faible). | - Coût élevé de préparation du combustible d'entrée (forme pulvérulente)<br>- Technologie complexe<br>- Production d'énergie minimale importante (>50 MWe) pour construire une installation. |

*Tableau 5.1: Comparaisons des différentes configurations de réacteurs de gazéification.*

Le choix d'une technologie par rapport à une autre dépend de nombreux paramètres tels que la gamme de puissance attendue, l'utilisation finale du gaz de synthèse et l'origine de la biomasse. Toutefois les réacteurs à lits fluidisés sont considérés comme la technologie la plus avancée avec plusieurs configurations de réacteur proposées dans la littérature. Du point de vue industriel le lit fluidisé circulant est la technologie la plus implantée avec des installations dans des pays comme l'Autriche, la Suède et la Finlande. Par conséquent, cette technologie est plus particulièrement visée dans cette étude.

Ce procédé divise le lit fluidisé en deux chambres de fluidisation : une partie gazéification et une partie combustion du char, figure 5.2. La fluidisation est une opération unitaire qui met en suspension de fines particules de solide grâce à un

courant gazeux. Entre les deux chambres, une boucle de circulation est créée, un fluide caloporteur (généralement des particules solides) permet de récupérer de l'énergie de la combustion pour la fournir à la partie gazéification. La réaction exothermique de combustion fournit l'énergie nécessaire à la réaction endothermique de gazéification par l'intermédiaire du solide circulant. Cependant, les gaz de combustion et de gazéification restent séparés évitant ainsi la dilution de ces derniers par l'azote de l'air pour éviter la diminution du pouvoir calorifique. La biomasse est introduite dans la zone de gazéification et réagit avec la vapeur d'eau. Le lit de particules solides ainsi que du charbon produit dans la zone de gazéification passent dans la zone de combustion, où le charbon est brûlé. L'effluent gazeux produit lors de la combustion quitte le réacteur sans être en contact avec le gaz de gazéification. Ceci permet de produire un gaz de grande qualité sans utiliser d'oxygène pur.

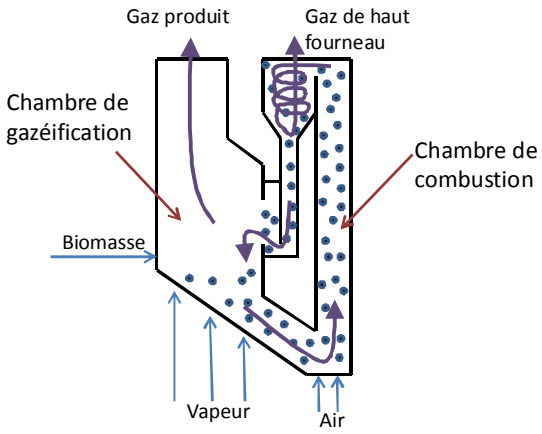



*Figure 5.2 : Gazéifieur à la vapeur à double lit fluidisé circulant interne.*

Bien que le procédé du lit fluidisé circulant limite l'apparition des goudrons, ces derniers sont tout de même présents dans le gaz de synthèse. De nos jours, il existe quelques procédés de traitements des goudrons mais aucun n'offre de réelle satisfaction à l'échelle industrielle (RECORD 2009). De plus ces solutions sont souvent des procédés de post traitement du gaz en sortie de la gazéification. Ces procédés ont des coûts d'investissement et de fonctionnement élevés. Dans le lit fluidisé circulant, en plus des goudrons, le gaz de synthèse nécessite également une purification pour le débarrasser des particules solides entrainées par le courant gazeux : les cendres. Ces cendres sont générées par les matières inorganiques (métaux alcalins) présentes dans la biomasse initiale et qui se retrouvent emportées par fluidisation. Leur élimination génère également des coûts de post-traitement.

Le but de cette étude de cas est de réduire voire d'éliminer la présence de polluants (i.e. goudrons et cendres) dans le gaz de synthèse. Pour ce faire, nous allons utiliser la démarche présentée dans les chapitres 3 et 4.

## 5.2 ETAPE 1 : DESCRIPTION DE LA PROBLEMATIQUE

### 5.2.1 *Etape 1.1 : Le modèle « TONGS » environnemental*

#### 5.2.1.1 Etape 1.1.1 : Description de la situation initiale

Il est nécessaire de trouver une solution économiquement peu onéreuse, industriellement satisfaisante permettant d'éliminer la présence de goudrons et de cendres dans le courant de sortie d'une installation de gazéification de la biomasse fonctionnant selon un procédé à lit fluidisé circulant. Cet obstacle économique est le verrou majeur à l'expansion de la biomasse en tant que source énergétique. Toutefois nous sommes confrontés à une contrainte supplémentaire : il subsiste encore une mauvaise connaissance scientifique sur les mécanismes de formation des goudrons, ce qui complique l'amélioration de la conception des procédés pour essayer de limiter leurs apparitions.

#### 5.2.1.2 Etape 1.1.2 : Solution environnementale la plus désirée

On souhaite accroître l'utilisation industrielle d'une énergie renouvelable basée sur la gazéification de la biomasse. Pour ce faire, il faut produire un gaz de synthèse propre, c'est-à-dire débarrassé des impuretés dès la sortie de l'étape de gazéification. L'utilisation de procédés de purification en sortie de gazéification n'est pas envisageable. Outre les aspects économiques, d'un point de vue environnemental cette solution demande une plus grande consommation d'énergie et de matières.

#### 5.2.1.3 Etape 1.1.3 : Objectifs environnementaux

L'amélioration de la production de gaz de synthèse par réduction de la présence de polluants est liée aux actions suivantes de la production durable :

- La réduction de la dispersion de produits toxiques et du gaspillage énergétique. Dans le cas présent, le terme toxique n'est pas à interpréter selon son sens premier mais plutôt comme l'effet néfaste de l'action de certains produits sur le procédé.
- L'amélioration de la production.

#### 5.2.1.4 Etape 1.1.4 : Définition de la barrière

La barrière principale à la gazéification de la biomasse est la génération de polluants, plus particulièrement la production de goudrons, et dans une moindre mesure celle de cendres. Une difficulté supplémentaire sur cette barrière est le manque de connaissances chimiques sur l'explication de l'apparition des goudrons. Par conséquent il est difficile de jouer sur les conditions opératoires pour limiter leurs formations.

#### 5.2.1.5 Etape 1.1.5 : Solution partielle

Une solution à cette problématique est de produire un gaz de synthèse propre. On pourrait envisager d'augmenter la température dans la chambre de gazéification pour réaliser un craquage thermique. Ce craquage permettrait d'éliminer une partie des goudrons produits. En contrepartie, cette élévation de température a pour

conséquence d'accroître la consommation énergétique dans cette chambre et donc de diminuer l'efficacité du procédé. En effet cet apport énergétique est amené par combustion de biomasse. Par conséquent, cette biomasse consommée pour l'apport énergétique n'est plus utilisable pour la production du gaz de synthèse.

Cette problématique générale est représentée sur la figure 5.3.

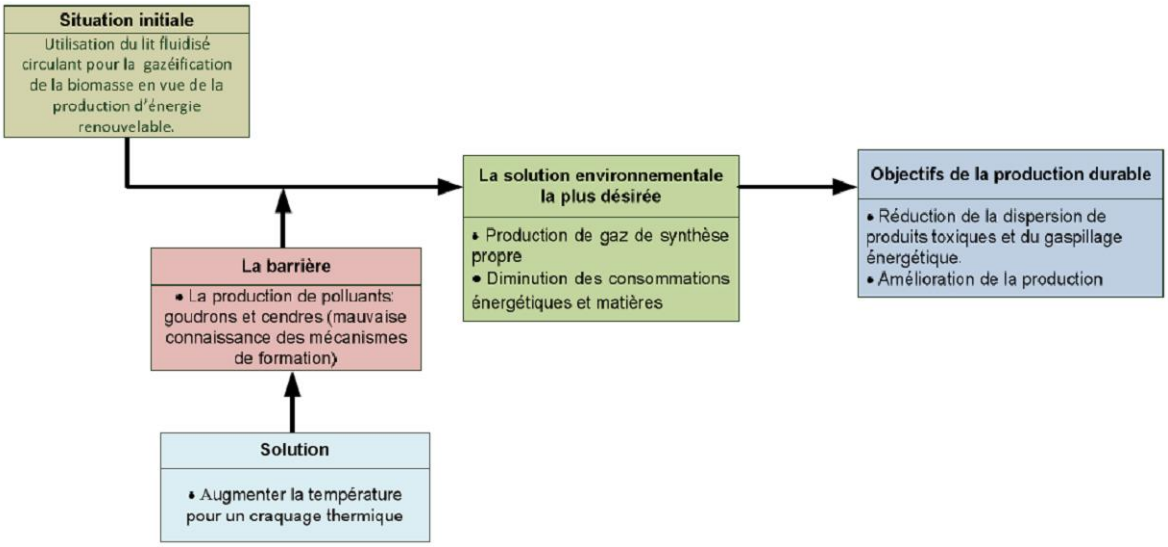



*Figure 5.3: Modèle « TONGS » environnemental pour la gazéification.*

### 5.2.2 *Etape 1.2 : Collecte d'information*

Lorsque le gaz de synthèse est utilisé dans un but de cogénération, le procédé global de transformation de la biomasse est composé des étapes suivantes (figure 5.4) : stockage, gazéification, nettoyage du gaz produit et cogénération. La problématique se situe au niveau des étapes de gazéification et de nettoyage du gaz de synthèse. Ce procédé n'est pas satisfaisant à cause du nombre d'étapes sur le trajet énergétique. Il faudrait les réduire afin de gagner en efficacité et d'assurer une meilleure conductibilité énergétique (au sens de TRIZ, loi d'évolution 2). La phase amont étant le stockage et la phase avale la cogénération, il convient de se concentrer sur ces deux phases intermédiaires.

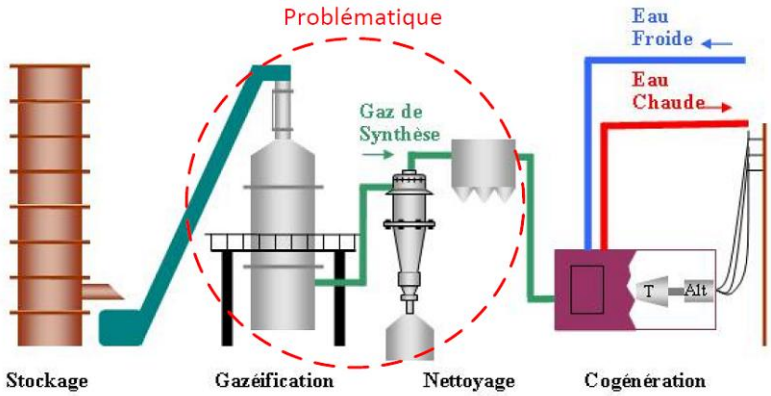



*Figure 5.4 : Le procédé de gazéification de la biomasse.*

Concernant l'étape de gazéification de nombreuses informations ont été données dans la partie 1 sur la présentation de l'étude de cas, dont certaines sont résumées sur la figure 5.1. La gazéification étant globalement endothermique, il est indispensable de fournir de l'énergie pour la transformation de la biomasse. L'utilisation de l'air comme oxydant et pour la combustion partielle de la biomasse dans le réacteur de gazéification est la méthode la plus facile. Cependant, dans ce cas, le gaz produit contient un pourcentage d'azote élevé et a donc un pouvoir calorifique bas. Un gaz contenant peu d'azote et d'une plus grande capacité calorifique peut être produit en utilisant l'oxygène pur comme oxydant. Cependant, le coût de production de l'oxygène est élevé. La dilution par l'azote peut être évitée en utilisant de la vapeur d'eau comme agent oxydant. La vapeur d'eau améliore la gazéification du carbone et les réactions de reformage, et ainsi augmente le rendement en produits gazeux : $H_2$, CO, $CO_2$. Toutefois, la vapogazéification de la biomasse peut conduire à une perte d'énergie thermique à cause de la séparation de l'excès de vapeur par condensation. Pour apporter l'énergie nécessaire pour les réactions fortement endothermiques de vapogazéification, une possibilité consiste à utiliser un réacteur fluidisé circulant à double lit. Avec ce procédé, les inconvénients liés au choix du gaz réactif et décrits précédemment n'existent plus.

Concernant les goudrons, ils sont communément définis comme un mélange complexe d'hydrocarbures condensables composés de plusieurs noyaux aromatiques, d'hydrocarbures oxygénés et d'hydrocarbures aromatiques complexes. Lorsque la biomasse est chauffée, les liaisons chimiques de ses différents composants organiques sont rompues. Les molécules les plus petites sont sous forme gazeuse, celles dont le poids moléculaire est plus élevé sont appelées goudrons primaires. Ces goudrons primaires se transforment en goudrons secondaires par réactions successives à la même température puis en goudrons tertiaires à plus haute température, figure 5.5.

Les goudrons provoquent des problèmes associés à leur condensation, et à leur polymérisation en structures complexes. La quantité et la composition des goudrons dépendent de la nature et des propriétés de la biomasse (taille, humidité), des conditions de gazéification (pression, température, temps de séjour), du type de réacteur de gazéification. Il en résulte des différences sur leurs propriétés (enthalpie de combustion, viscosité, densité ou acidité).

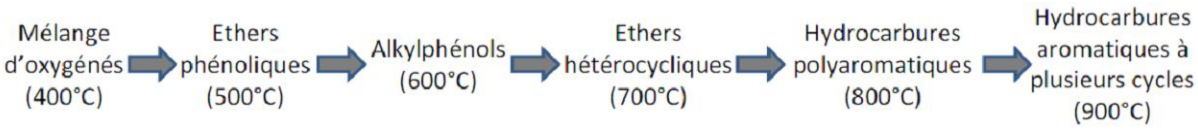



*Figure 5.5 : Formation des goudrons.*

La présence des goudrons et cendres occasionne des bouchons dans les conduites (échangeurs notamment), des nettoyages réguliers des filtres, des dépôts de goudrons sur les turbines lors de l'utilisation du gaz pour la cogénération pouvant conduire à la rupture de certains appareils (turbines…). . . Il est donc primordiale de diminuer les coûts générés par le nettoyage et la maintenance des appareils, voire même de supprimer une (ou plusieurs) étape(s) de post traitement du gaz.

Les technologies d'élimination des goudrons peuvent être séparées en deux catégories selon l'approche choisie : traitements directement dans le réacteur (méthodes primaires) ou purification après le réacteur de gazéification (méthodes secondaires). Les méthodes primaires cherchent à prévenir la formation des goudrons ou à les transformer dans le réacteur de gazéification. Actuellement, l'ensemble des réactions ayant lieu lors des méthodes primaires n'est pas complètement bien compris. L'obtention d'un gaz de meilleure qualité passe par l'optimisation des performances du gazéifieur (conditions opératoires, utilisation d'additifs solides ou de catalyseurs...). Cette amélioration de performance pourra être réalisée grâce aux changements de conception et de conditions opératoires du réacteur. Le but des méthodes primaires est de s'affranchir des traitements secondaires pour la purification des gaz produits.

Les méthodes secondaires consistent en un traitement des gaz chauds issus du réacteur. Il existe deux voies principales de traitement en fonction de la température retenue, figure 5.6. Ces traitements peuvent être physiques ou chimiques :

- Craquage thermique ou catalytique des goudrons à la sortie du réacteur de gazéification.
- Méthodes mécaniques comme par exemple des cyclones, filtres, laveurs…

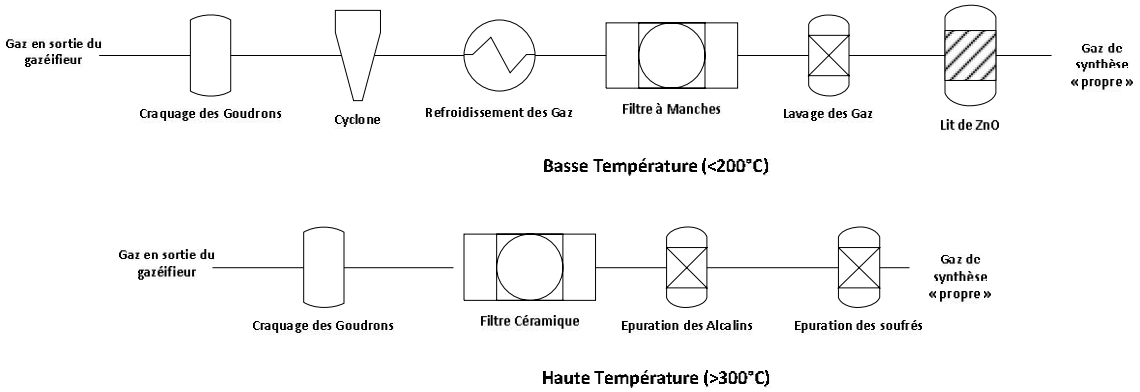



*Figure 5.6 : Méthodes secondaires pour la purification des gaz.*

Bien qu'efficaces pour la diminution des goudrons, ces méthodes ne sont pas toutes économiquement viables. Par exemple, la purification des gaz dans un laveur est coûteuse en énergie de même que le traitement des eaux de lavage. L'efficacité globale du procédé de gazéification diminue si les goudrons sont éliminés du flux de gaz produits car l'énergie de leur combustion ou transformation n'est plus utilisable. De plus, les goudrons récupérés dans les eaux de lavage ne sont pas détruits. Par contre, la purification des gaz chauds permet l'élimination des goudrons en les convertissant en produits gazeux désirables. Aucun nouveau flux n'est pollué par les goudrons.

Une possibilité pour la diminution des goudrons, est de réaliser un craquage thermique à haute température, préférentiellement comprise entre 950°C et 1100°C. Toutefois, le craquage thermique qui est une option de purification des gaz chauds, nécessite, pour atteindre des conversions élevées, des températures plus grandes que celles des gaz à la sortie des gazéifieurs (> 1100°C) et donc une forte dépense énergétique. Le craquage est une opération qui consiste à casser les molécules

organiques complexes en molécules plus petites comme par exemple des alcanes, des alcènes… Les conditions opératoires (température, pression) sont déterminantes pour la réussite de cette opération. Dans les installations à lit fluidisé circulant, la température en sortie de gazéification est d'environ 850°C. Cette température a une limite supérieure notamment due à un équilibre thermique entre la température de la chambre de combustion, la réaction endothermique, et les pertes thermiques. Une solution envisageable pour augmenter la température de la gazéification serait d'augmenter la température dans la chambre de combustion. Mais tout comme la température de gazéification, la température de combustion (environ 1000°C) est également contrainte d'une part par le point de fusion des cendres (mâchefer) et d'autre part par la rentabilité du procédé. En effet, une élévation de cette température impliquerait également une plus grande consommation de biomasse dans cette opération, et donc une plus faible production de gaz de synthèse. Une autre alternative pour accroître l'échange thermique entre les deux chambres, serait d'augmenter le temps de résidence du gaz dans la chambre de combustion. Ce choix aurait pour conséquence d'accroître la taille de la chambre de combustion et donc une augmentation des pertes thermiques. De plus, plus le temps de séjour est accru, plus le flux d'énergie vers la chambre de gazéification est réduit.

## 5.3 ETAPE 2 : RESEAU DE PROBLEMES

### 5.3.1 *Etape 2.1 : Analyse de la situation problématique et Développement du réseau de problèmes*

Une fois l'information recueillie, l'analyse de la situation problématique est réalisée pour générer le réseau de problèmes. Cette analyse commence par la barrière principale définie précédemment puis elle continue par un examen progressif des sous problèmes générés. Ainsi, la figure 5.7 résume le réseau de problèmes sur le cas d'étude. Cette figure n'est pas totalement exhaustive car certaines branches de l'arbre conduisant rapidement à des impasses ont été volontairement omises par souci de clarté.

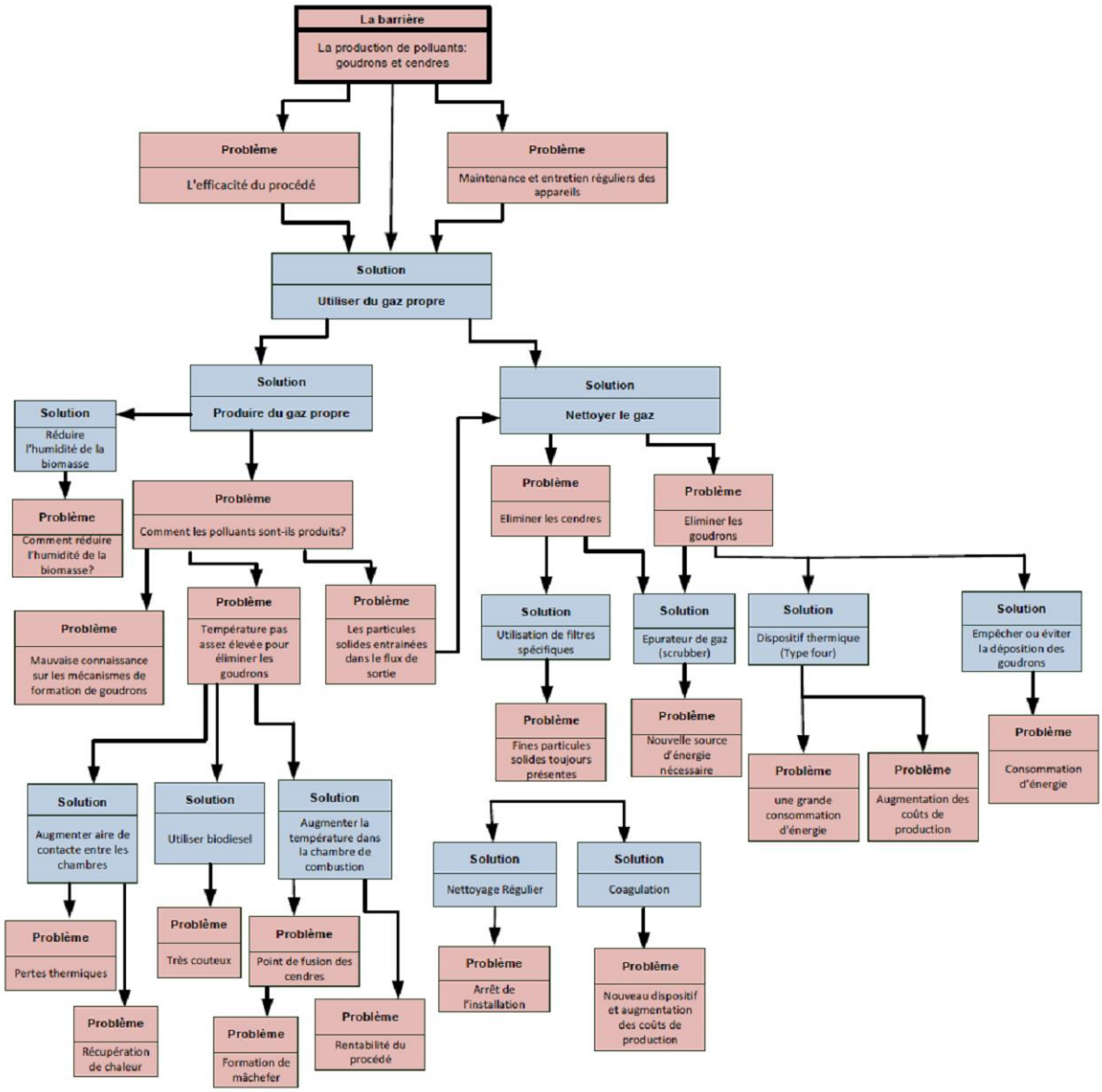



*Figure 5.7 : Le réseau de problèmes.*

La présence des polluants génère deux grandes catégories de problème (figure 5.7) : efficacité des procédés, maintenance et le nettoyage réguliers de l'installation. Les deux principales voies de solution pour traiter ces problèmes sont : la production de gaz de synthèse propre ou la purification de ce dernier avant utilisation. En plus des solutions proposées sur la figure 5.7, une autre solution pour la maintenance et l'entretien réguliers serait d'arrêter périodiquement le procédé (ou de le faire fonctionner en mode dégradé). Or cette solution a des conséquences économiques importantes liées à la baisse de production, mais elle conduit également à des problèmes de sécurité et supervision liés aux phases transitoires d'arrêt et de redémarrage de l'unité. (Khomenko et al. 2007) ont présenté une autre vision du problème de la biomasse avec une analyse plus détaillée de la solution partielle « Nettoyage périodique ». Même si nous l'avons étudiée, cette branche du réseau n'est volontairement pas abordée sur la figure 5.7. En effet, nous nous sommes mis comme contrainte spécifique d'éviter ces phases transitoires toujours délicates à piloter d'un point de vue industriel. Bien évidemment sur les autres branches du

réseau, il y a des parties similaires entre l'analyse de (Khomenko et al. 2007) et la nôtre mais chacune a également ses propres spécificités comme par exemple une analyse plus générale pour les auteurs précédemment cités et une vision avec une orientation procédé dans notre cas (d'où le développement moindre de la branche liée à l'arrêt périodique). De même (Khomenko et al. 2007) ont étudié plus en profondeur la partie du réseau évoquant l'utilisation d'un filtre mais pour des raisons technologiques (pertes de charge à compenser) et économiques cette voie de recherche a été également rapidement abandonnée dans notre analyse.

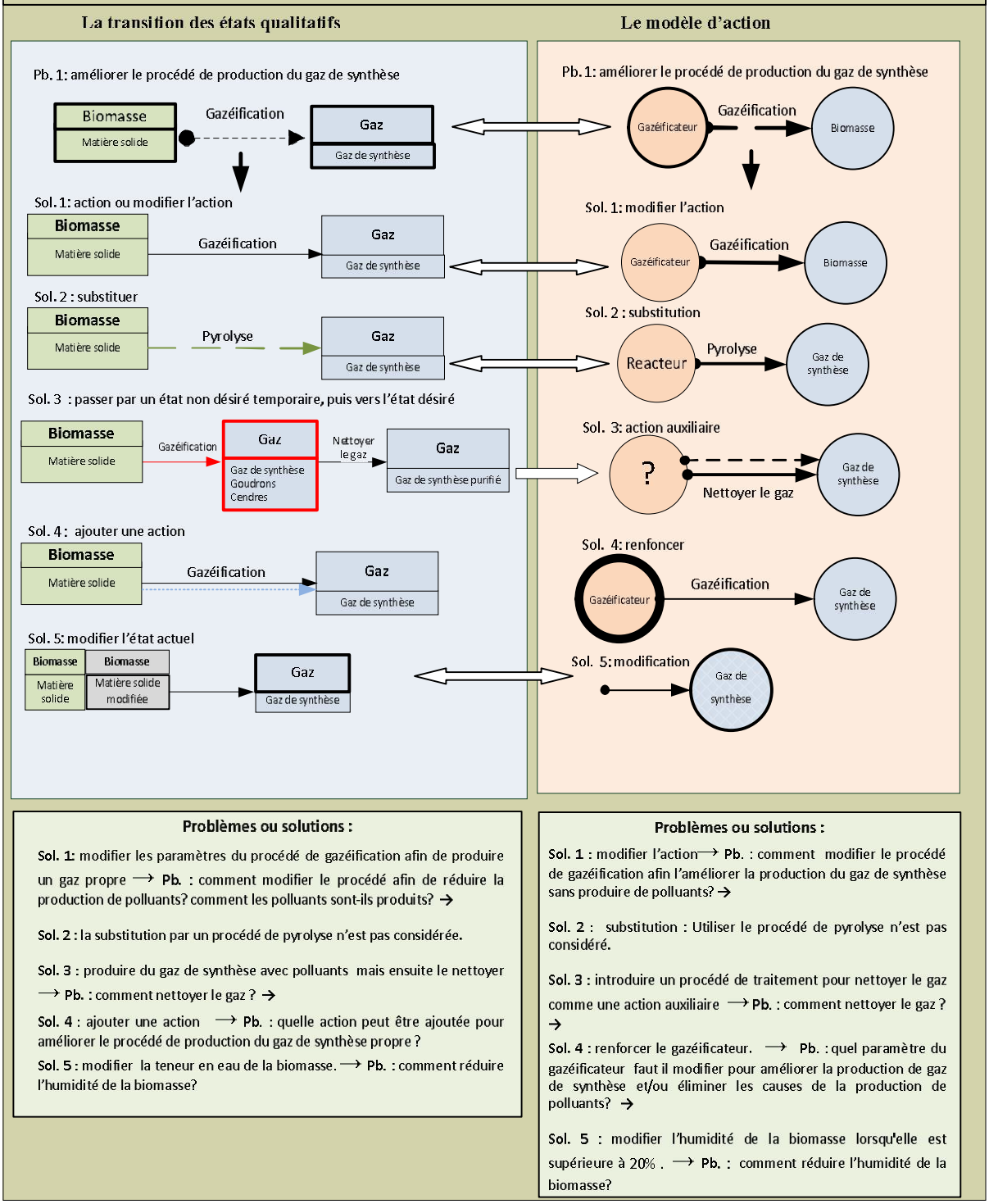
Pour le développement progressif des alternatives de ce réseau, les différentes situations problématiques ont été analysées au travers de la fenêtre des états qualitatifs et de la fenêtre du modèle d'action. Certaines des analyses des sous problèmes sont détaillées sur les figures suivantes.

**Solution :** utiliser gaz de synthèse propre.

**Description de la situation initiale**

Dans la gazéification de la biomasse, la production de gaz de synthèse est accompagnée de la génération de polluants. L'étude vise à améliorer le procédé de gazéification de la biomasse de façon à produire du gaz de synthèse propre sans polluants. Cela permettrai d'éliminer un des plus importants verrous en vue de favoriser l'utilisation de la biomasse comme une source d'énergie renouvelable.

**Analyse**




**Problèmes ou solutions :**

**Sol. 1:** modifier les paramètres du procédé de gazéification afin de produire un gaz propre ⟶ **Pb.** : comment modifier le procédé afin de réduire la production de polluants? comment les polluants sont-ils produits? →

**Sol. 2 :** la substitution par un procédé de pyrolyse n'est pas considérée.

**Sol. 3 :** produire du gaz de synthèse avec polluants mais ensuite le nettoyer ⟶ **Pb.** : comment nettoyer le gaz ? →

**Sol. 4** : ajouter une action ⟶ **Pb.** : quelle action peut être ajoutée pour améliorer le procédé de production du gaz de synthèse propre ?

**Sol. 5 :** modifier la teneur en eau de la biomasse. ⟶ **Pb.** : comment réduire l'humidité de la biomasse?

**Problèmes ou solutions :**

**Sol. 1 :** modifier l'action⟶ **Pb.** : comment modifier le procédé de gazéification afin l'améliorer la production du gaz de synthèse sans produire de polluants? →

**Sol. 2 :** substitution : Utiliser le procédé de pyrolyse n'est pas considéré.

**Sol. 3 :** introduire un procédé de traitement pour nettoyer le gaz comme une action auxiliaire ⟶ **Pb.** : comment nettoyer le gaz ? →

**Sol. 4 :** renforcer le gazéificateur. ⟶ **Pb.** : quel paramètre du gazéificateur faut il modifier pour améliorer la production de gaz de synthèse et/ou éliminer les causes de la production de polluants? →

**Sol. 5** : modifier l'humidité de la biomasse lorsqu'elle est supérieure à 20% . ⟶ **Pb.** : comment réduire l'humidité de la biomasse?

*Figure 5.8 : Analyse de la branche sur la production du gaz de synthèse propre.*

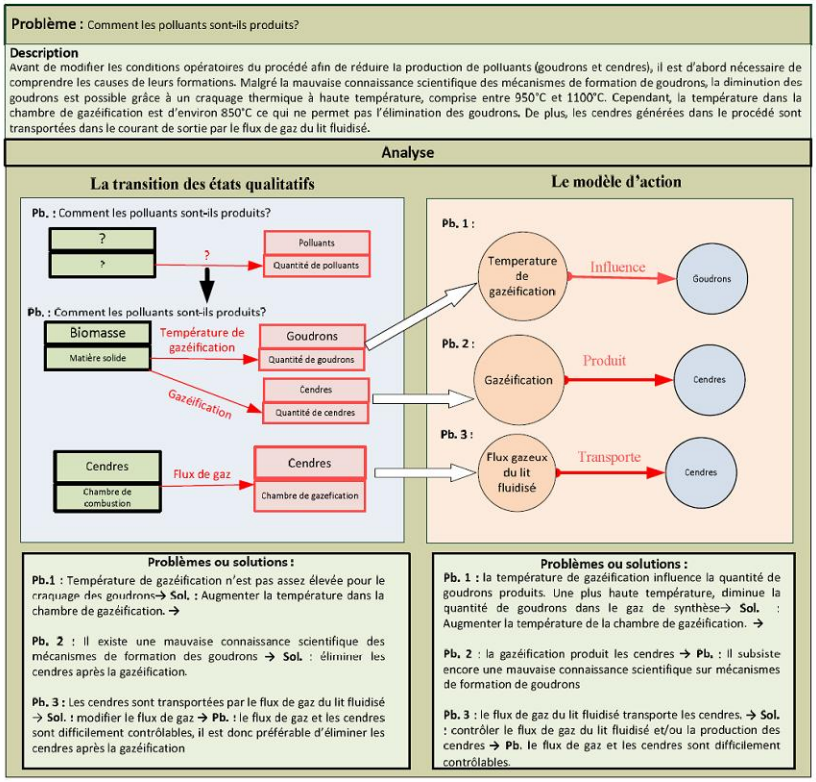



*Figure 5.9 : Analyse de la génération de polluants.*

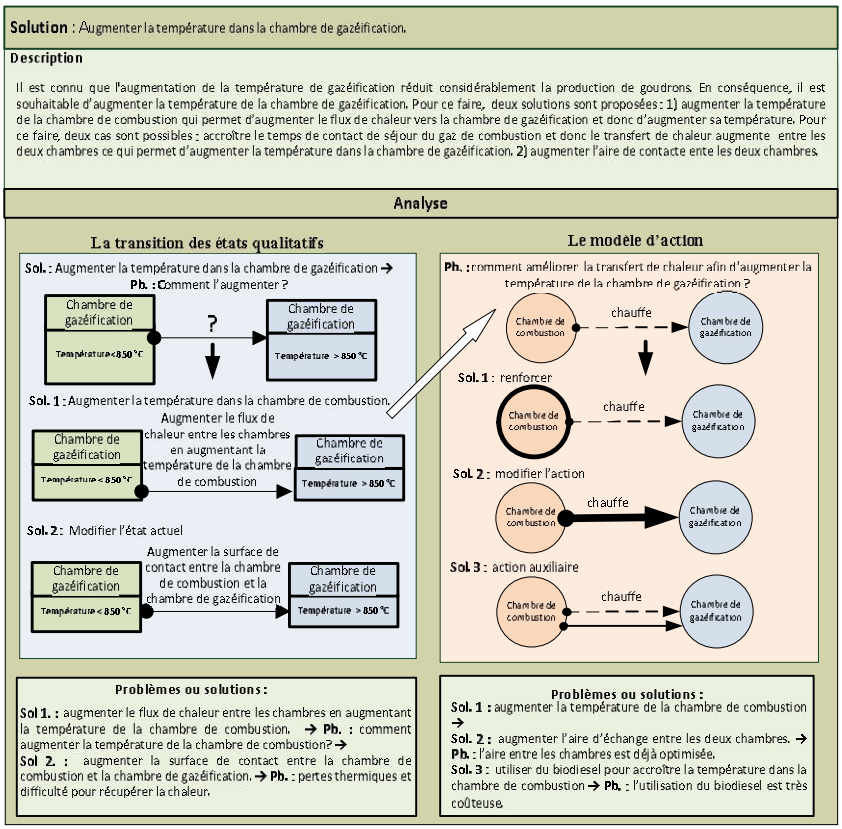



*Figure 5.10 : Analyse des effets de l'augmentation de la température dans la chambre de gazéification.*

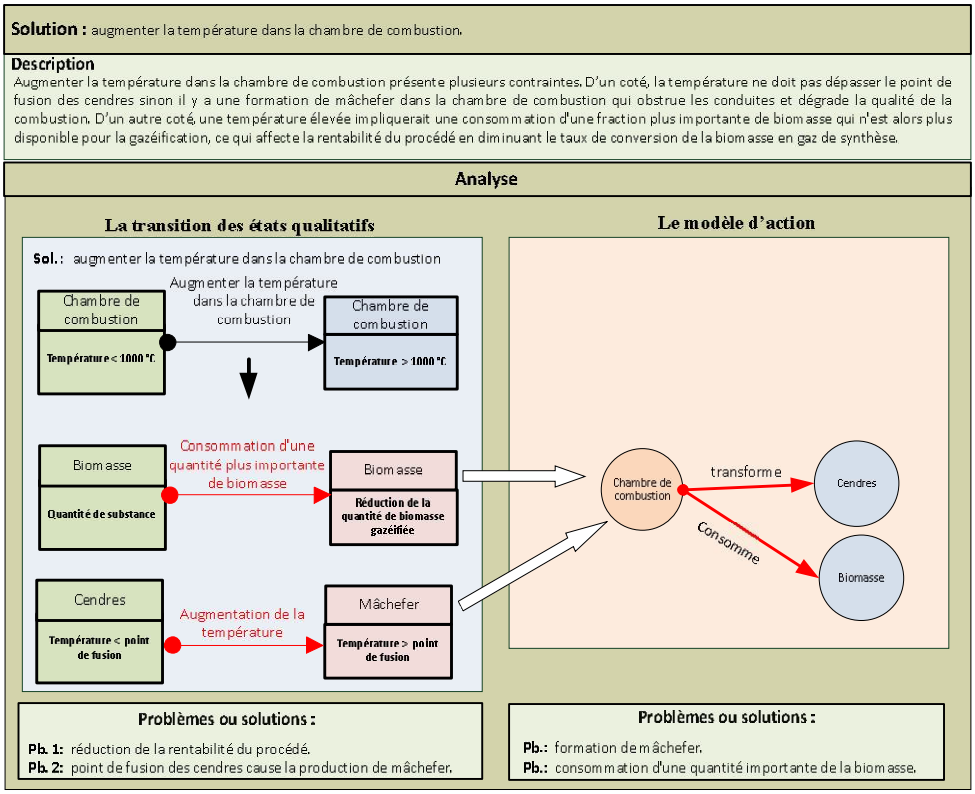



*Figure 5.11 : Analyse des effets de l'augmentation de la température dans la chambre de combustion.*

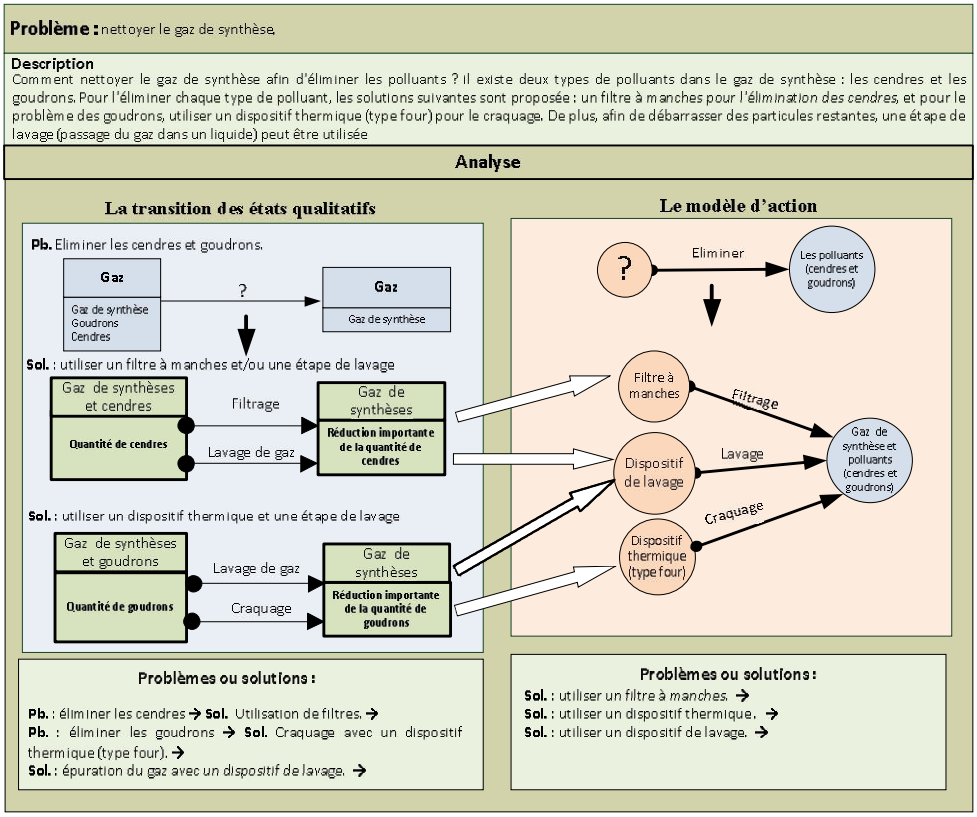



*Figure 5.12 : Analyse des conséquences du nettoyage du gaz de synthèse.*

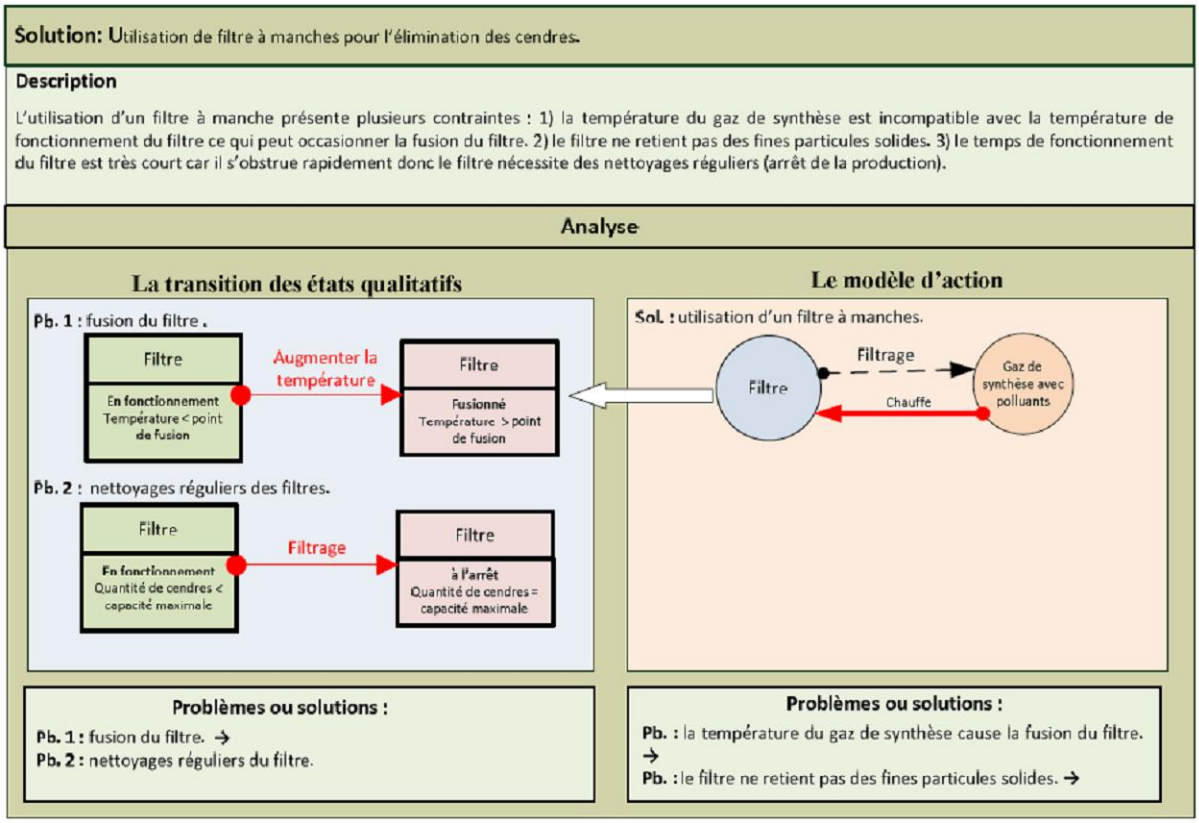



*Figure 5.13 : Analyse de l'utilisation d'un filtre à manches pour le nettoyage du gaz de synthèse.*

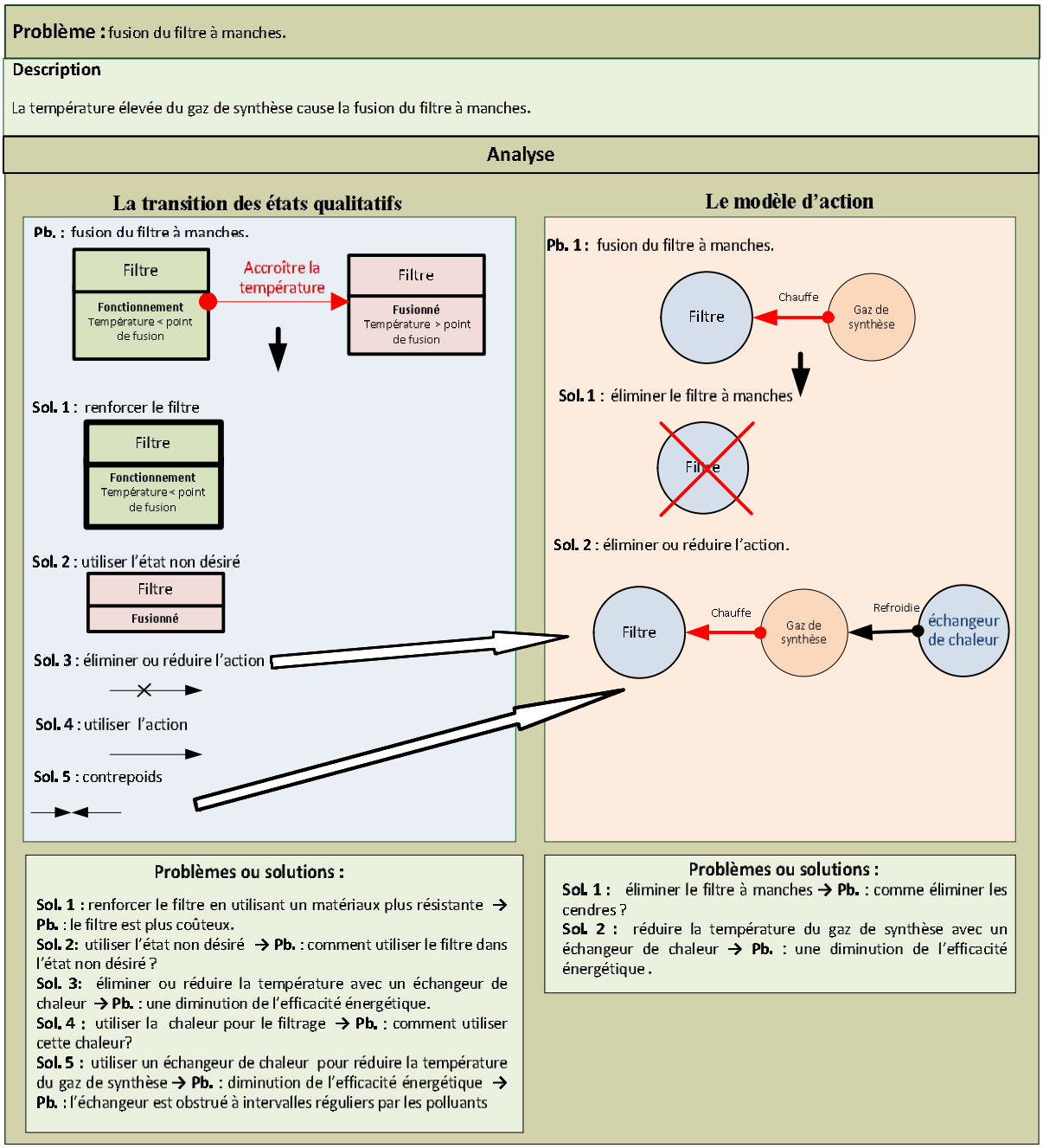



*Figure 5.14 : Analyse de la fusion du filtre à manches.*

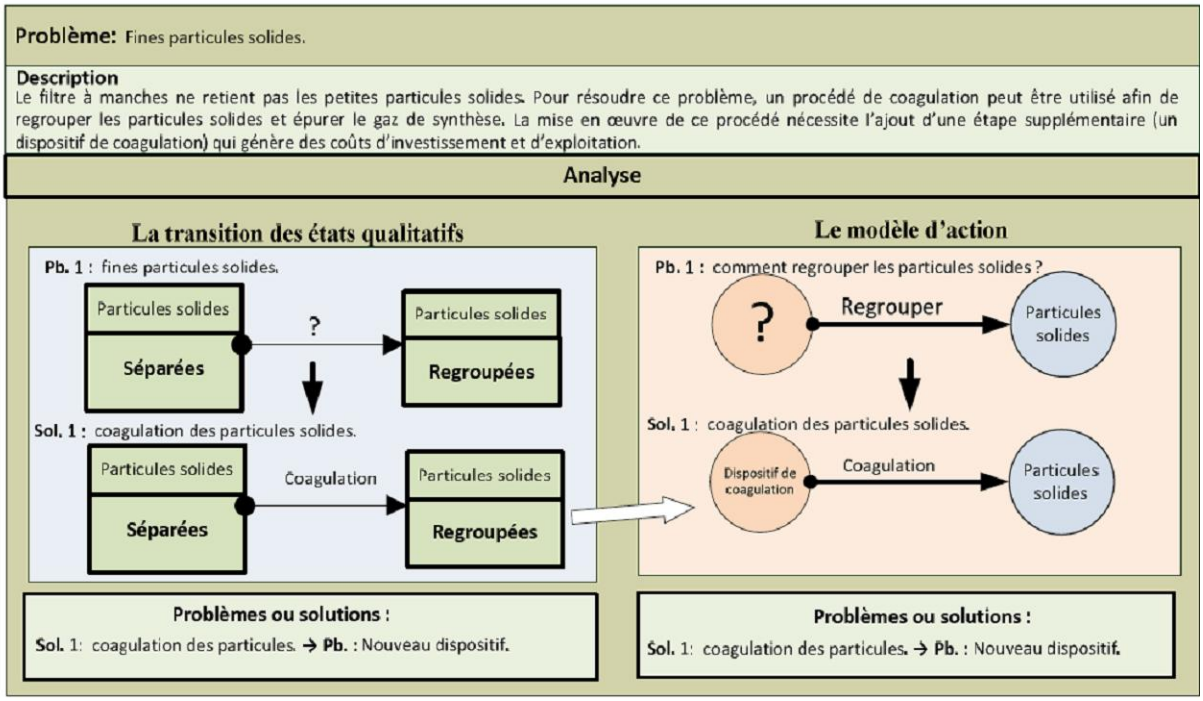



*Figure 5.15 : Analyse sur les fines particules solides.*

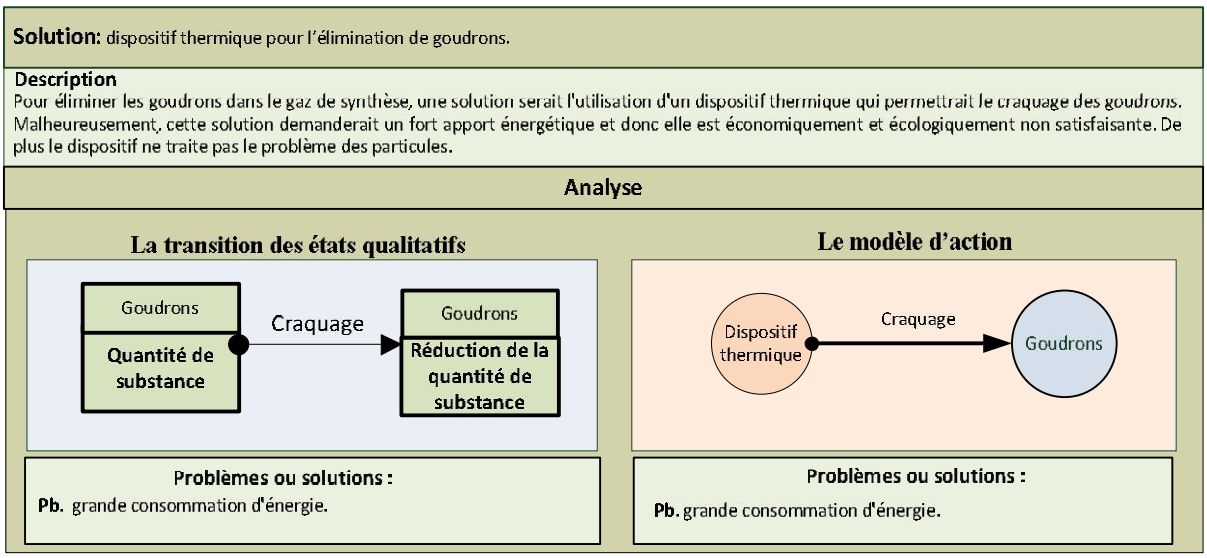



*Figure 5.16 : Analyse sur l'utilisation d'un dispositif thermique pour l'élimination des goudrons.*

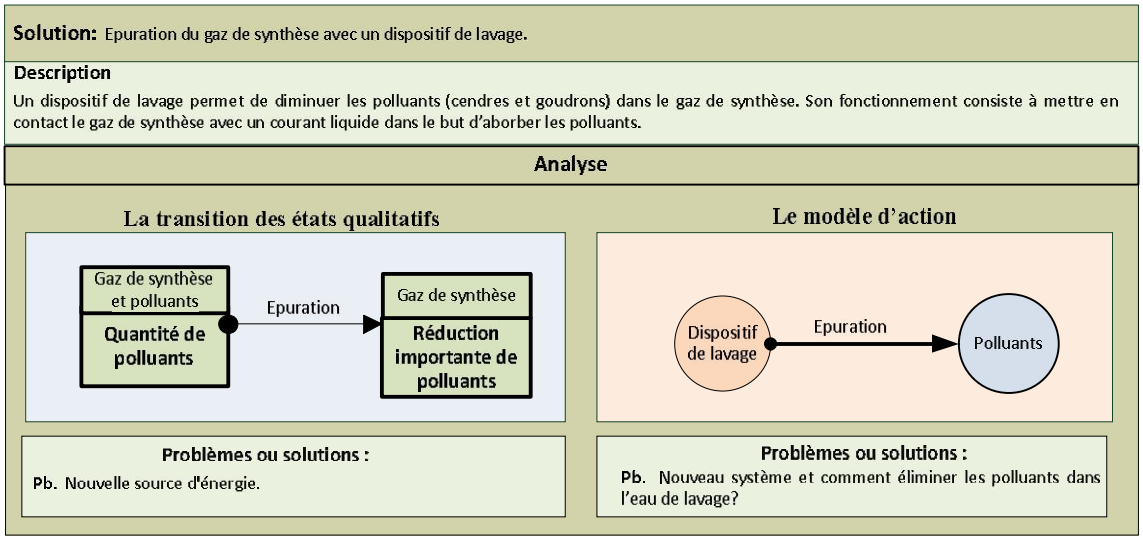



*Figure 5.17 : Analyse de l'éventualité d'ajouter un dispositif de lavage pour la purification du gaz de synthèse.*

### 5.3.2 *Etape 2.2 : Définition des problèmes principaux*

Une fois que le réseau précédent n'évolue plus, l'étape suivante cherche à extraire les problèmes principaux dans le but de les transformer en contradictions. Selon l'analyse du réseau de problèmes, le problème principal est l'élimination de polluants. Parmi les deux stratégies principales d'élimination du problème, nous nous concentrons plus spécifiquement sur la branche de nettoyage du gaz. La raison principale de ce choix est le manque d'information sur les mécanismes de formation des goudrons d'où la difficulté à formuler correctement et précisément ce sous problème et par voie de conséquence les contradictions qui en découlent. Suite à ces choix, la situation problématique peut être réduite à deux sous-problèmes : l'élimination des goudrons et l'élimination des cendres. Ainsi, les problèmes qui seront transformés en un réseau de contradictions sont ceux liées à ces deux problématiques (figure 5.18).

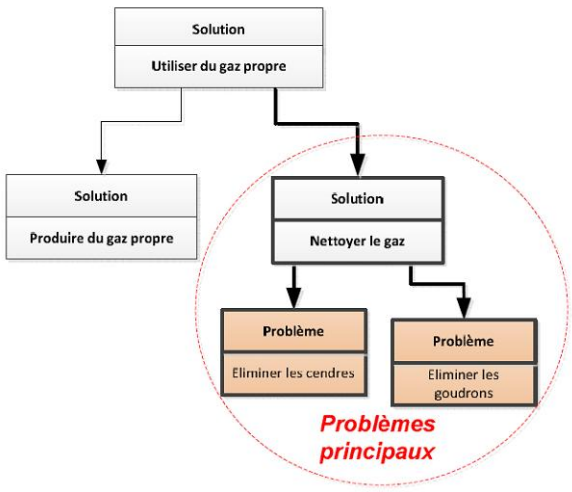



*Figure 5.18 : Problèmes retenus pour développer le réseau des contradictions.*

Une fois les problèmes principaux choisis, il est nécessaire de définir les objectifs et les contraintes particulières liés à ces problèmes afin de faciliter le développement du réseau de contradictions. De plus, ces objectifs peuvent être utilisés dans le processus d'évaluation des solutions proposées. Ainsi, les objectifs et contraintes de cette problématique sont les suivants :

**Objectifs** :

- Eliminer les polluants (goudrons et cendres).
- Augmenter l'efficacité énergétique.
- Faciliter l'entretien et la maintenance.

**Contraintes** :

- Température dans la chambre de combustion ne peut pas dépasser les 1000°C à cause du point de fusion des cendres.
- Diminuer le nombre d'étapes du procédé global de cogénération par rapport à l'existant.
- Diminuer la consommation de biomasse dans la chambre de combustion.

Suite à la définition des objectifs et contraintes, le processus d'analyse peut entrer dans sa dernière étape à savoir la définition du réseau des contradictions.

## 5.4 ETAPE 3 : CONTRADICTIONS

### 5.4.1 *Etape 3.1 : Développement du réseau de contradictions*

Ainsi, les deux problèmes principaux constituent le réseau de contradictions comme l'illustre la figure suivante :

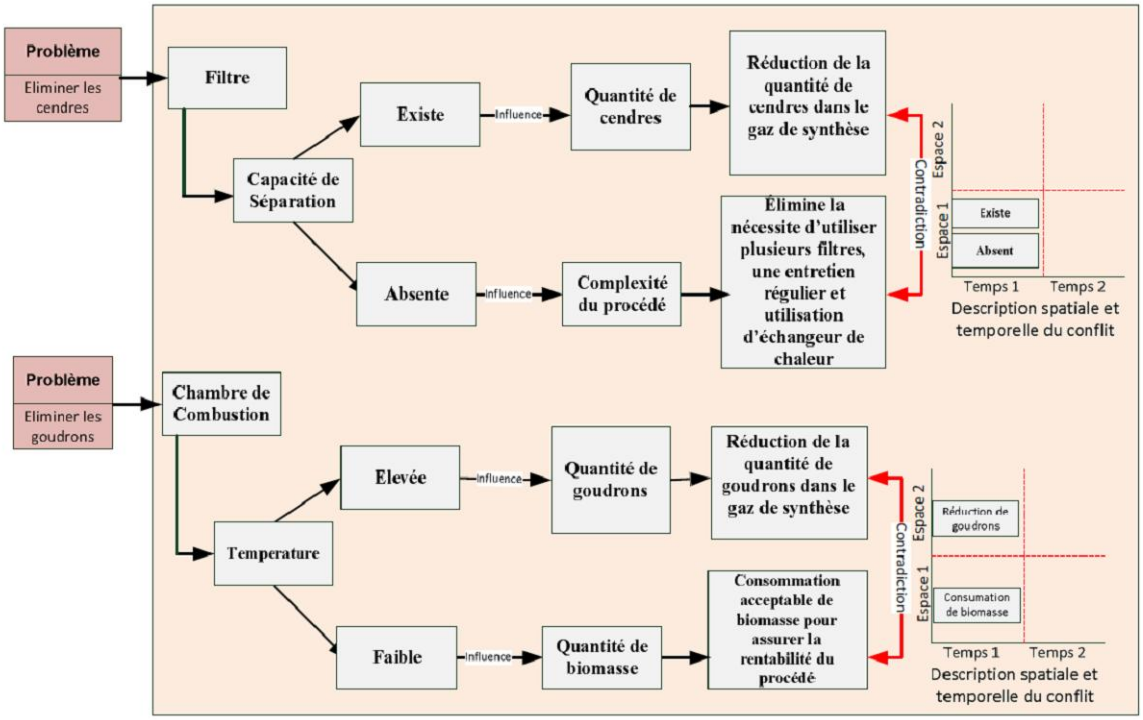



*Figure 5.19 : Réseau de contradictions du problème.*

### 5.4.2 *Etape 3.2 : Développement du réseau de paramètres spécifiques*

Après la définition du réseau de contradictions, le réseau de paramètres est défini, figure 5.20 :

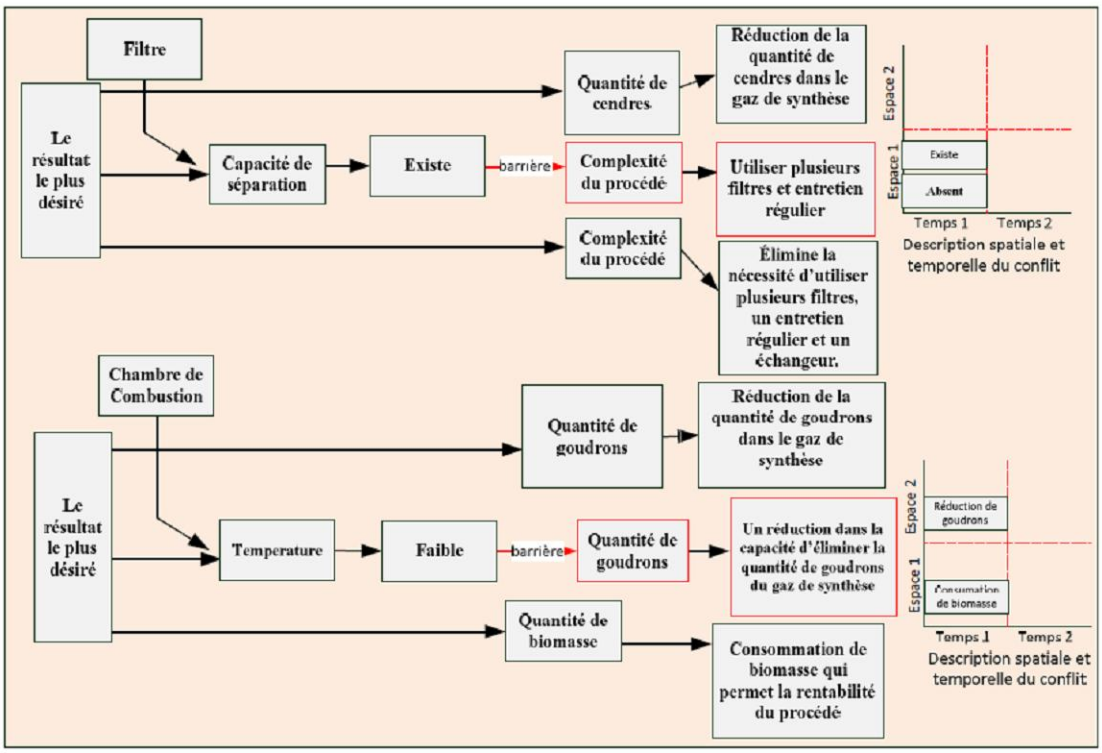



*Figure 5.20 : Réseau de paramètres du problème d'élimination des goudrons et cendres.*

### 5.4.3 *Etape 3.3 : Modélisation des ressources*

Après avoir située la zone conflit de chaque contradiction, les ressources disponibles sont identifiées, tableau 5.2. Dans notre exemple, comme les deux sous problèmes sont localisés dans le même sous système, le recensement des ressources sera le même pour les deux cas.

| **Ressources** | |
|---|---|
| Substances | Gazeuses : CO, $CO_2$, $H_2O$, $O_2$, $N_2$ $CH_4$, $H_2$, HCN HCL, $H_2S$, Hydrocarbures aromatiques…<br>Solide : Métaux, cendre char, biomasse, olivine (fluide caloporteur, $(MGO,9FE0.1)SiO_4$ )… |
| Champs | Champs thermiques : chambre de combustion, chambre de gazéification<br>Champs de pression : chambre de combustion, chambre de gazéification<br>Champ mécanique : introduction biomasse dans la chambre de gazéification (vis sans fin)<br>Force centrifuge (cyclone dans la chambre de combustion)<br>Champ de gravité |
| Ressources matières | Point de fusion (Cendres)<br>Polymérisation (goudrons)<br>Capacité de dépôt (goudrons)<br>Propriétés corrosives (cendres)<br>Production de $H_2$ à partir des goudrons… |
| Ressources fonctionnelles | Capacité d'adhésion (cendres et goudrons)<br>Capacité de coagulation (Cendres) |
| Ressources d'espace | Espace libre dans les deux chambres |

*Tableau 5.2 : Recensement des ressources.*

## 5.5 ETAPE 4 : MODELISATION ET RESOLUTION DES CONTRADICTIONS

Dans cette partie du chapitre, nous allons aborder la partie résolution de la méthodologie proposée (présentée au chapitre 4). Pour résoudre la contradiction il est nécessaire de reformuler les informations présentes dans les réseaux de contradictions et de paramètres selon l'outil à utiliser. Le processus de résolution commence par la contradiction technique, si les principes obtenus avec la matrice de résolution des contradictions techniques ne permettent pas de définir l'action désirée, on continue avec la contradiction physique, puis l'analyse champs-substances si l'action désirée n'est toujours pas identifiée. Dans cette étude de cas, afin d'illustrer la méthodologie, nous allons volontairement passer par ces différentes étapes même si l'action désirée aurait pu être identifiée dès la formulation de la contradiction technique.

### 5.5.1 *Etape 4.1 : Utilisation des outils de TRIZ*

#### 5.5.1.1 Matrice de résolution des contradictions techniques

Les deux problématiques principales sont traitées séparément, la contradiction liée à l'élimination des cendres et celle liée à l'élimination des goudrons sont représentées

sur la figure 5.21 ainsi que les principes de solution proposés suite à l'utilisation de la matrice de étendue à 46 paramètres.

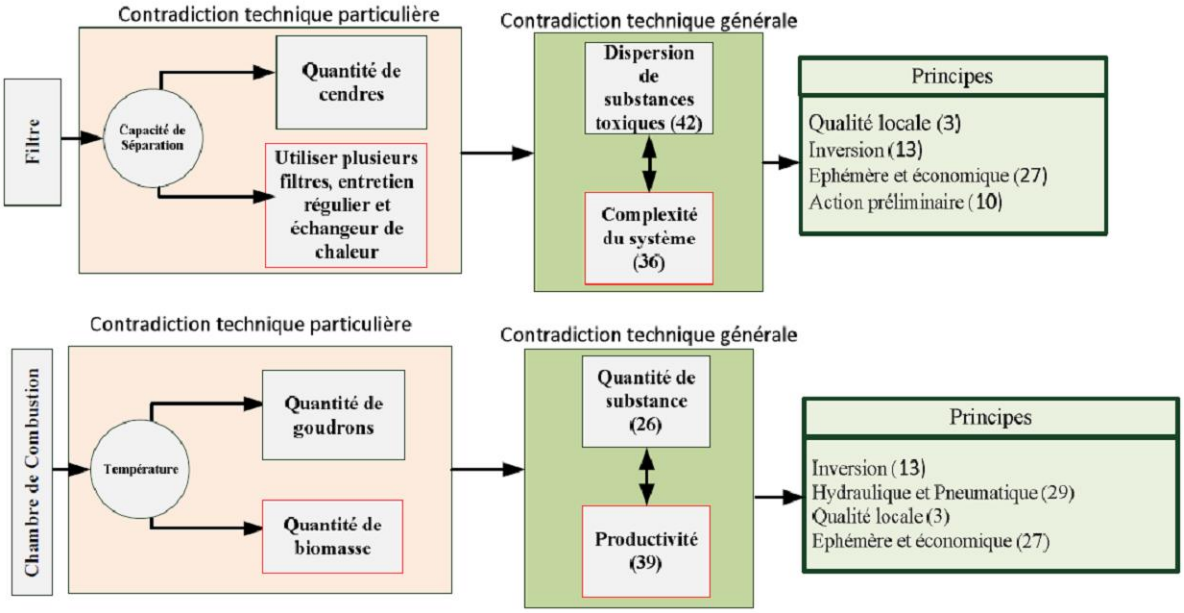



*Figure 5.21 : Contradictions techniques et principes associés*

Les principes (et sous principes) proposés à l'aide de la matrice ne permettent pas de déterminer l'action désirée donc nous préférons continuer avec une analyse plus précise en utilisant la formulation de la contradiction physique.

### 5.5.1.2 Contradiction Physique

Les figures 5.22 et 5.23 présentent la formulation de la contradiction physique respectivement pour l'élimination des cendres et des goudrons.

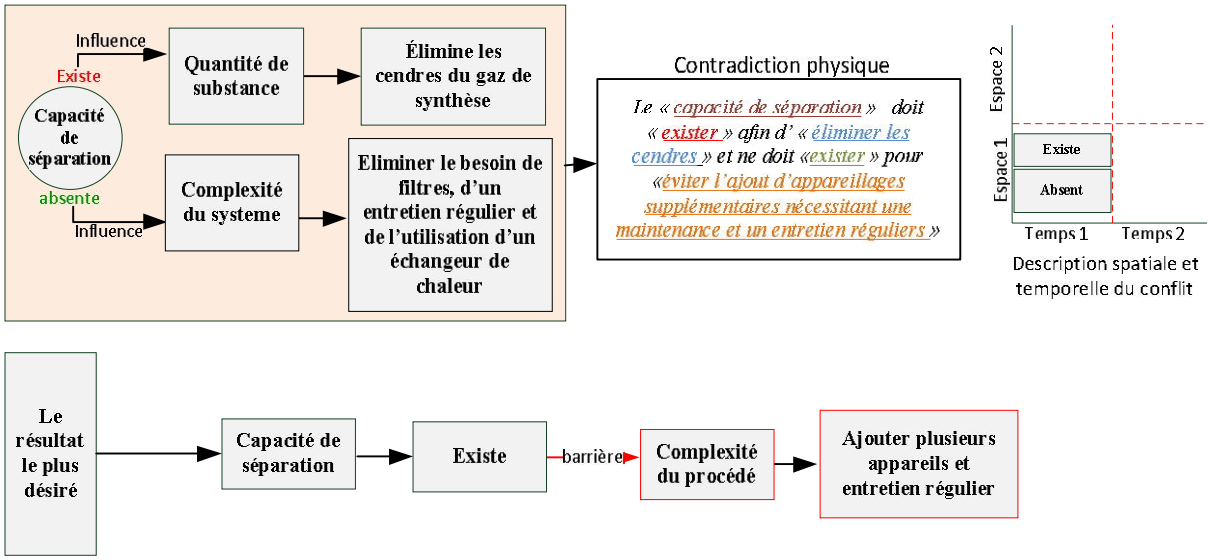



*Figure 5.22 : Formulation de la contradiction physique associée à l'élimination des cendres.*

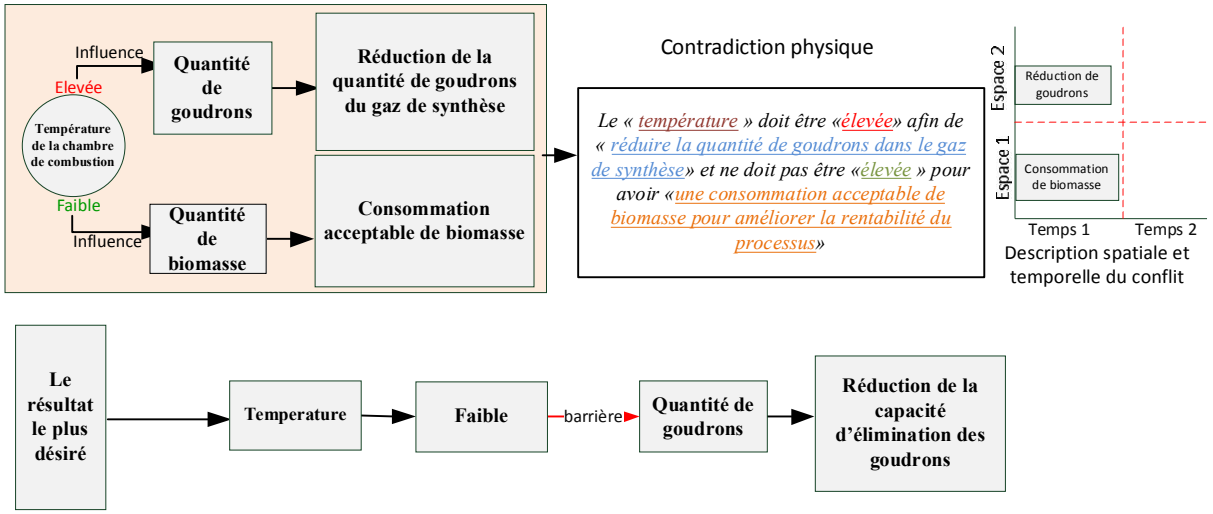



*Figure 5.23 : Formulation de la contradiction physique associée à l'élimination des goudrons.*

Afin d'illustrer toutes les étapes de la méthodologie, posons comme hypothèse que l'utilisation des 11 principes ne permet pas d'identifier l'action désirée pour l'élimination des cendres. Il faudra alors passer par un modèle champs-substances (prochaine section).

Concernant les goudrons, les propriétés opposées sont localisées dans deux espaces différents ce qui facilite le choix de la séparation à appliquer : séparation dans l'espace. Cela implique qu'il convient de conserver le même niveau de température dans la chambre de gazéification (espace 1) mais d'augmenter la température une fois que le gaz de synthèse est sorti de cette dernière (espace 2). Cette élévation de température doit être réalisée de préférence dans un espace qui permettrait de limiter l'apport énergétique et qui serait non sensible à la formation de goudrons. Dans ces conditions, une solution serait de tirer profit du niveau de température de la chambre de combustion pour réaliser un échange thermique avec

le gaz de synthèse. Cette récupération énergétique permettrait d'atteindre partiellement l'action désirée : élimination d'une substance.

#### 5.5.1.3 Modèle champs substances

Seule la problématique sur les cendres, non encore résolues, sera modélisée à l'aide d'un modèle champs-substances. Les cinq phases à suivre (présentées dans le paragraphe 4.1.1.4 du chapitre 4) pour l'utilisation du guide proposé se décline comme suit :

1. ***Identification des éléments dans la contradiction :***
   - Séparateur (choix d'un terme générique car moins porteur d'inertie psychologique par rapport au terme filtre par exemple).
   - Gaz de synthèse.
   - Champ de pression.

2. ***Modélisation de la situation problématique :***

Le séparateur doit être présent pour réaliser la purification du gaz de synthèse et doit être absent pour éliminer la présence d'appareillages supplémentaires de post traitement, et par conséquent des coûts induits d'investissement, d'entretien et de maintenance. De plus, le séparateur doit être amélioré car actuellement les plus fines particules solides ne sont pas retenues. Il serait également préférable que le système puisse avoir des conditions opératoires proches de la température du gaz de synthèse. Cette problématique est représentée sur la figure 5.24.

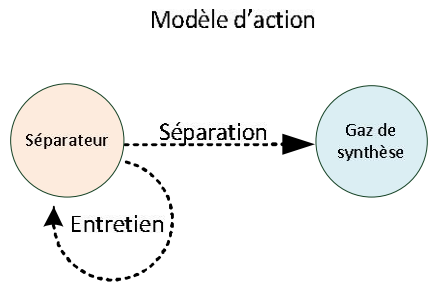



*Figure 5.24 : Modèle pour l'élimination des cendres.*

3. ***Définition du type d'interaction***

La problématique précédente doit être transformée en un modèle standard. Dans ce modèle, les deux actions séparation et entretien, sont considérées comme insatisfaisantes (figure 5.25). Par conséquent, parmi les six différents types d'interaction proposés, le numéro quatre « Amélioration de deux ou plusieurs actions utiles » a été retenu.

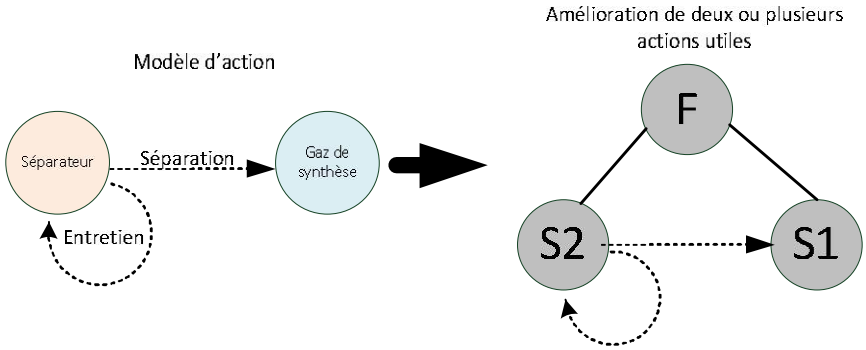



*Figure 5.25 : Modèle standard du problème.*

### *4. Utilisation du guide et identification des solutions potentielles*

Le guide (annexe 2) propose les solutions standards suivantes pour l'interaction identifiée :

- Coupler les actions au sein d'un même système. Cette efficacité augmente avec la combinaison de systèmes qui réalisent des actions contraires utiles. Après cette intégration, le système peut réduire ses composants.
- Changer ou modifier le système de telle façon que des substances différentes réalisant deux ou plusieurs actions, soient remplacées par une substance capable de toutes les réaliser.
- Changer ou modifier le système de telle façon qu'en utilisant les ressources internes ou externes, deux ou plusieurs actions soient réalisées par un même système.
- Améliorer les actions utiles grâce au changement de phase ou d'état d'un des éléments du système, ou remplacer un des éléments du système par une substance à deux voire plusieurs phases.
- Changer ou modifier le système de telle façon qu'en utilisant un effet physique et/ou une transition de phase, deux ou plusieurs actions soient réalisées par un même système.
- Coordonner ou décoordonner la fréquence du champ des actions avec la fréquence naturelle du système.
- Coordonner ou décoordonner les actions avec la fréquence naturelle des éléments du système.
- Coordonner ou décoordonner la fréquence des champs utilisés.

### *5. Génération de la solution*

Les solutions nous guident vers la transformation du système de filtrage de sorte que les deux actions (séparation et entretien) soient réalisées par un même système, soit dans une même fenêtre temporelle ou non.

Pour ce faire, le système de filtrage actuel (filtre à manches) doit être capable de concilier deux propriétés contradictoires (que l'on aurait pu obtenir en affinant l'analyse avec la contradiction physique) : la taille du maillage du filtre doit être lâche pour faciliter l'entretien et serrée pour une bonne efficacité de filtrage. Parmi les voies de solution précédentes, la solution standard nous proposant l'utilisation d'un effet ou d'une transition de phase pour réaliser simultanément les deux actions, nous conduit soit à utiliser un nouvel effet comme par exemple l'effet magnétique, soit à

remplacer le solide (filtre) par une phase liquide (car le courant à purifier est à l'état gazeux) pour réaliser l'action de séparation.

### 5.5.2 *Etape 4.2 : Définition de l'action désirée*

Après avoir identifié différentes voies de solutions en utilisant nos outils, elles sont traduites sous forme d'actions désirées. Le tableau 5.3 présente une analyse des solutions et la définition des actions ou caractéristiques désirées pour résoudre la contradiction.

| Contradiction | Action ou Caractéristique désirée |
|---|---|
| Elimination des cendres | Pour éviter la problématique liée à la taille de la maille du filtre, il est envisageable d'utiliser un champ magnétique ce qui impose que la substance à séparer est les propriétés requises pour interagir avec le champ. Ce qui n'est pas le cas des cendres donc cette voie est rejetée.<br>Dans le cas de la transition de phase, il faut trouver un constituant ou un mélange qui permet d'une part de réaliser la séparation (par absorption par exemple) et d'autre part qui est un point d'ébullition élevé pour rester à l'état liquide dans les conditions opératoires de notre procédé. |
| Elimination des goudrons | Les différents concepts de solution nous guident à transformer les goudrons dès la sortie de la chambre de gazéification. Ils nous amènent à utiliser la chaleur générée dans la chambre de combustion réaliser un craquage thermique. Il est donc nécessaire de trouver un moyen de récupérer le maximum d'énergie provenant de la chambre de combustion, tout en continuant à apporter l'énergie nécessaire aux réactions endothermiques de gazéification. |

*Tableau 5.3 : Définition de l'action ou caractéristique désirée.*

### 5.5.3 *Etape 4.3 : Définition de la fonction*

Les actions ou caractéristiques désirées sont transformées en fonctions en utilisant les fonctions générales, le tableau 5.4 fournit les détails de cette transformation. Couplées au recensement des ressources, ces fonctions permettront réaliser la recherche dans la base de données sur les effets.

| Contradiction | L'action ou la caractéristique désirée | Fonction désirée |
|---|---|---|
| Elimination des cendres | Séparer les cendres du gaz de synthèse | Connecter moins (solide-gaz) |
| Elimination des goudrons | Eliminer une substance | Transformer moins |

*Tableau 5.4 : Définition de la fonction désirée.*

## 5.6 ETAPE 5 : RECHERCHE DE SOLUTIONS SPECIFIQUES

### 5.6.1 *Etape 5.1 : Recherche des effets et phénomènes comme effet solution*

Suite à la formulation de la fonction, une recherche d'effets et de phénomènes physiques, chimiques, biologiques et géométriques est réalisée. Ainsi, la base des effets est utilisée, les effets obtenus pour chaque fonction sont indiqués dans les tableaux suivants (5.5 et 5.6). Les effets en rouge ne sont pas utilisables dans notre cas d'étude.

| Fonction | Effet | Observations |
|---|---|---|
| Connecter moins (solide-gaz) | Filtration Membranaire | Les membranes céramiques peuvent résister à de hautes températures. Néanmoins, elles conservent l'inconvénient de l'entretien. |
| | Flottation | L'utilisation d'un liquide comme un moyen d'éliminer les impuretés. |
| | Séparation électrique | Précipitation électrostatique. |
| | Séparation magnétique | La substance doit avoir des propriétés magnétiques. |
| | Centrifuge (Cyclone) | Effet déjà utilisé pour l'élimination des cendres. |

*Tableau 5.5 : Les effets solution pour l'élimination des cendres.*

| Fonction | L'effet | Observations |
|---|---|---|
| Transformer moins | Craquage thermique | Le niveau de température à atteindre pour un craquage efficace doit être supérieur au niveau actuel (>1100°C). Actuellement craquage partiel. |
| | Craquage Chimique | Cet effet impose l'ajout d'une nouvelle ressource : le catalyseur, par contre il permet à la fois de purifier le gaz de synthèse et d'augmenter la quantité d'$H_2$ produite (amélioration de la conversion de la biomasse). |

*Tableau 5.6 : Les effets solution pour l'élimination des goudrons.*

### 5.6.2 *Etape 5.2 : Génération de solutions spécifiques*

Lors de cette étape, les effets sont interprétés, adaptés afin de proposer une solution concrète, prête à être implémentée. Les figures suivantes présentent une proposition de solution pour chacun des effets précédents.

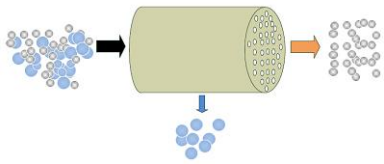
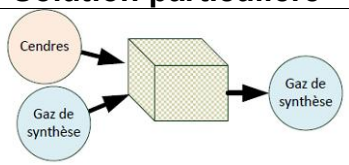
| Solution générale | Solution particulière |
|---|---|
|  Utilisation de Membranes céramiques |   Malgré sa résistance aux températures élevées, cette solution conserve toujours les inconvénients liés à l'entretien et la maintenance. |

*Figure 5.26 : Utilisation de membranes céramiques pour l'élimination des cendres.*

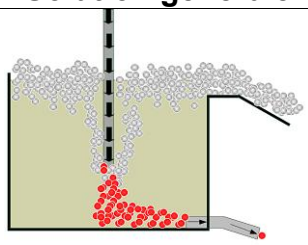
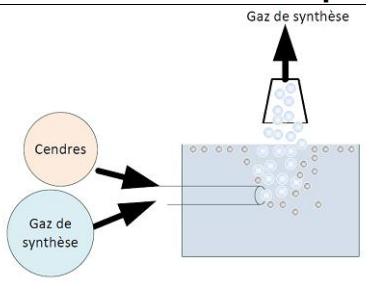
| Solution générale | Solution particulière |
|---|---|
| <br>Flottation<br>Utilisation dans le traitement de l'eau ou en minéralogie | <br>Pour implémenter cette solution, il faudra utiliser un liquide avec un point d'ébullition élevé comme par exemple des sels fondus et éventuellement des agents coagulent pour les particules les plus fines. |

*Figure 5.27 : La flottation pour l'élimination des cendres.*

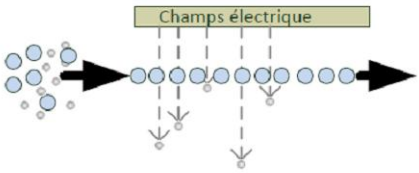
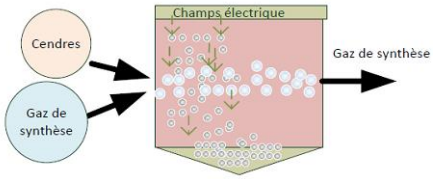
| Solution générale | Solution particulière |
|---|---|
| <br>Séparation électrique | <br>La précipitation électrostatique qui utilise cet effet perd rapidement en efficacité notamment lorsqu'ils sont exposés à certains produits chimiques, au dépôt de substance dans le filtre, à une humidité relative ou à cause de la résistivité électrique des particules à retenir |

*Figure 5.28 : La séparation électrique pour l'élimination des cendres.*

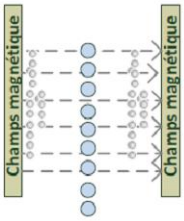
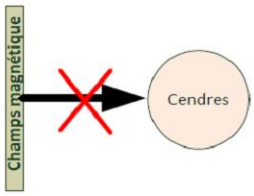
| Solution générale | Solution particulière |
|---|---|
| <br>Séparation magnétique | <br>La substance doit avoir de propriétés magnétiques ce qui n'est pas le cas des cendres. Cet effet ne peut donc pas être implémenté dans notre cas. |

*Figure 5.29 : La séparation magnétique pour l'élimination des cendres.*

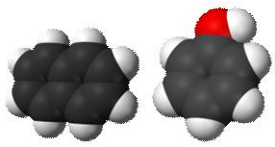
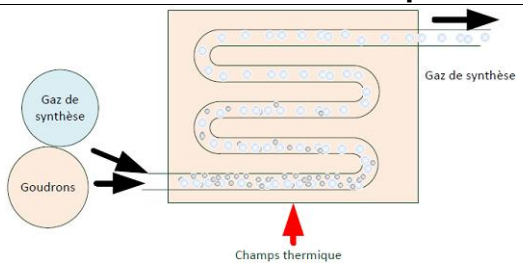
| Solution générale | Solution particulière |
|---|---|
| <br>Craquage Thermique | <br>Cette solution permet de récupérer une partie de l'énergie produite par les réactions exothermiques de la chambre de combustion. Pour pouvoir l'implémenter, il faut atteindre une température d'au moins 900° C |

*Figure 5.30 : Craquage thermique pour l'élimination des goudrons.*

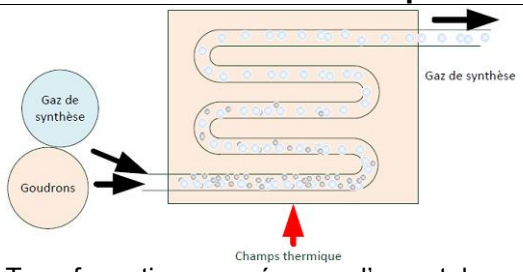
| Solution générale | Solution particulière |
|---|---|
| <br>Craquage Catalytique | <br>Transformation en présence d'un catalyseur des grosses molécules à longues chaînes hydrocarbonées en alcane, alcène… de masse molaire plus faible. |

*Figure 5.31 : Craquage Catalytique pour l'élimination des goudrons.*

### 5.6.3 *Etape 5.3 : Réseau de solutions*

Les solutions développées pour chaque contradiction forment le réseau de solutions (figure 5.32). Toutes les propositions précédentes peuvent venir alimenter ce réseau (généralement option recommandée). Toutefois, dans certains cas lorsque la mise en pratique de certaines solutions particulières demande des efforts trop importants (financiers, technologiques…), ces dernières peuvent être exclues du réseau. Pour notre exemple, seule une solution pour la contradiction sur les cendres et les deux solutions sur celle des goudrons sont retenues. Suite à l'ajout des ressources supplémentaires nécessaires à la mise en œuvre des effets retenus (sels fondus, coagulant, catalyseur), une deuxième recherche d'effets a été réalisée, mais ne conduisant à aucun ajout dans le réseau des solutions.

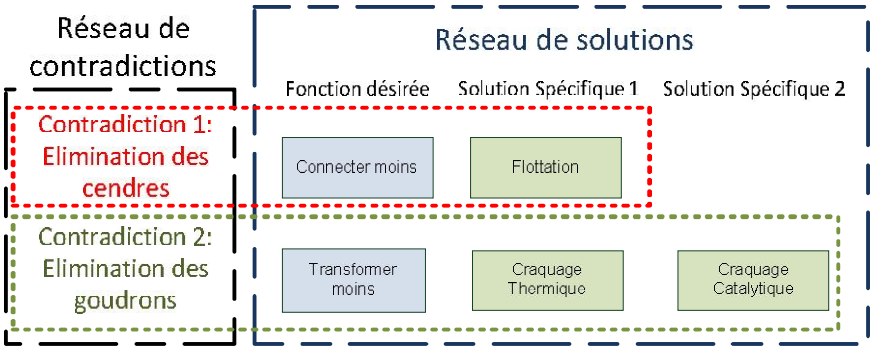



*Figure 5.32 : Le réseau de solution.*

## 5.7 ETAPE 6 : ASSOCIATION DE SOLUTIONS

### 5.7.1 *Etape 6.1 : Association de solution du réseau de solutions*

Chaque solution dans réseau de solution doit être détaillée afin de clairement définir les différentes fonctions et ressources de chaque effet sélectionné. Le modèle de programmation par contraintes est bâti à l'aide des informations recueillies et conformément à la définition faîte au chapitre 4.

Suite à la résolution du problème, des éléments communs sont identifiés entre le craquage thermique et le craquage catalytique d'une part, et le craquage catalytique et la flottation d'autre part, figure 5.33 (sur cette figure seuls les éléments communs sont spécifiés, ce qui explique pourquoi la liste des ressources n'est pas exhaustive). Cette figure nous incite à coupler le craquage catalytique soit avec le craquage thermique soit avec la flottation. Mais, comme les trois effets sont complémentaires aussi bien sur les ressources que sur les fonctions et actions, il serait intéressant de les coupler au sein d'un même appareillage et donc de combiner les solutions, figure 5.34. En effet, le liquide nécessaire à la flottation pourrait servir de catalyseur pour le craquage catalytique. De même, l'apport énergétique dont les deux craquages ont besoin pourra se faire dans un même échangeur mais à condition que le temps de séjour soit suffisamment long afin d'atteindre la température requise et afin d'éliminer la plus grande majorité des goudrons. Au final, l'intégration de tous ces effets au sein d'un même système nous permet de proposer un appareil multifonctionnel intensifié : réaction, séparation et échange thermique. Ce type de solution intégrée va bien dans le sens des objectifs du cas d'étude mais plus généralement dans le sens de l'évolution du génie des procédés vers l'intensification des procédés.

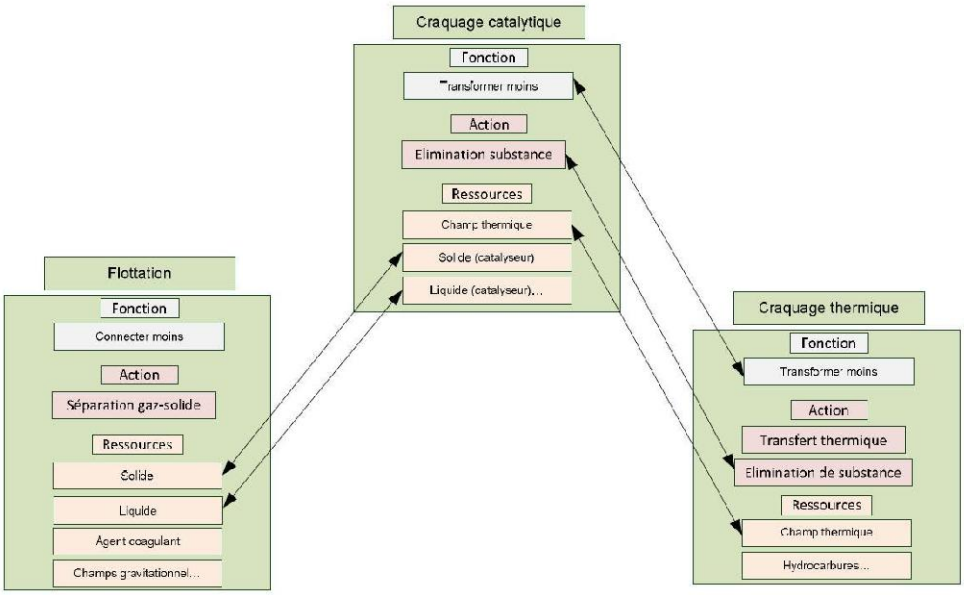



*Figure 5.33 : Points de similitude entre les solutions.*

Remarque : *Pour éviter les pertes thermiques le nouvel appareil sera positionné directement dans la chambre de combustion (température la plus élevée). Cette solution utilise l'effet géométrique d'emboitement. Pour aller plus loin avec cet effet, on pourrait également envisager de mettre la chambre de combustion dans la chambre de gazéification pour maximiser la surface d'échange entre les chambres et ainsi améliorer le transfert thermique. La chambre de gazéification son tour pourrait être située dans la cellule de stockage, ceci permettrait d'isoler thermiquement la chambre de gazéification mais aussi d'éliminer une partie de l'eau contenue dans la biomasse. Toutefois, la température dans la cellule de stockage ne doit pas être supérieure à 150°C pour éviter les risques d'ignition de la biomasse (nécessité d'une couche d'isolation entre la chambre de gazéification et le stockage).*

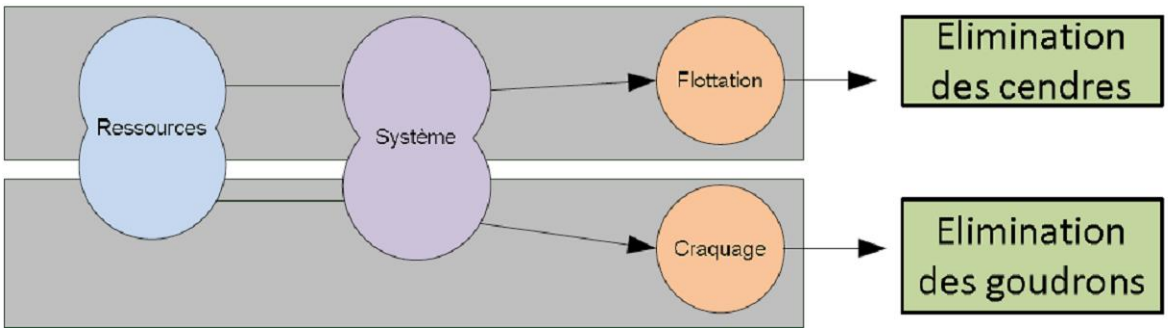



*Figure 5.34 : Similitudes entre les solutions.*

Ainsi, la figure 5.35 donne une représentation schématique simple du nouveau système. Le dispositif mis en place consiste à faire passer le gaz de synthèse dans un siphon rempli de liquide (sels fondus), ce siphon étant positionné dans l'enceinte de combustion pour récupérer l'énergie des gaz de haut fourneau. Dans la partie descendante, le gaz de synthèse passe dans de multiples conduits pour accroître sa température, puis il est injecté dans le liquide sous forme de bulles. Le liquide doit

non seulement rester à haute température mais éventuellement posséder un effet catalytique vis-à-vis de la réaction de craquage. Des déflecteurs sont disposés dans la partie ascendante de façon à accroître le temps de séjour des bulles dans le liquide et donc le temps de contact. Cette mise en contact gaz-liquide provoque également la mise en suspension des cendres dans le liquide (qu'il faudra nettoyer, opération simple et peu onéreuse de raclage périodique de la surface). Le gaz ainsi purifié de ces goudrons et cendres est évacué vers son utilisation avale. L'efficacité de ce système est accrue en améliorant les échanges thermiques par augmentation des surfaces d'échange grâce à des moyens mécaniques : allongement de la longueur des multiples conduites, ajout d'ailettes entre l'enceinte contenant le liquide et le milieu extérieur.

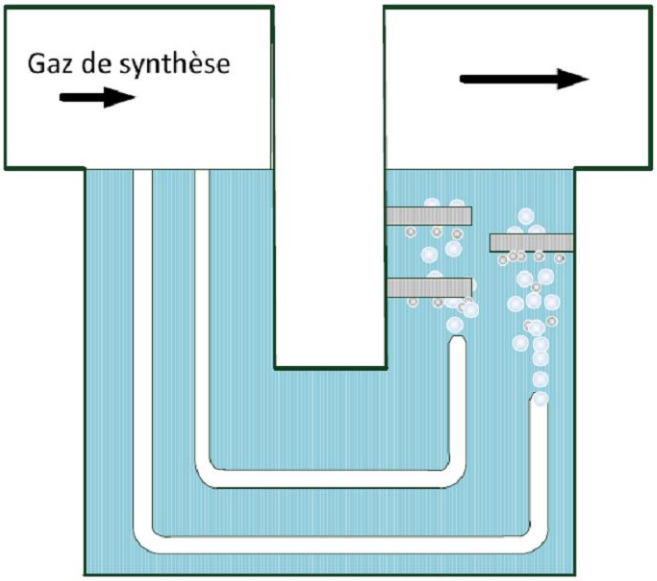



*Figure 5.35 : Nouveau système pour l'élimination des cendres et goudrons.*

## 5.8 ETAPE 7: EVALUATION DE LA SOLUTION

### 5.8.1 *Etape 7.1 : Evaluation et analyse des solutions spécifiques*

Une fois le nouveau système proposé, il doit être soumis à une évaluation afin de vérifier si les objectifs de conception sont atteints, les exigences respectées, mais aussi de comparer ses performances (sur les critères retenus) à celles d'une solution de référence. Dans notre cas, une la solution précédente qui élimine les deux contradictions est évaluée. Ainsi, le processus d'évaluation est présenté sur les figures suivantes :

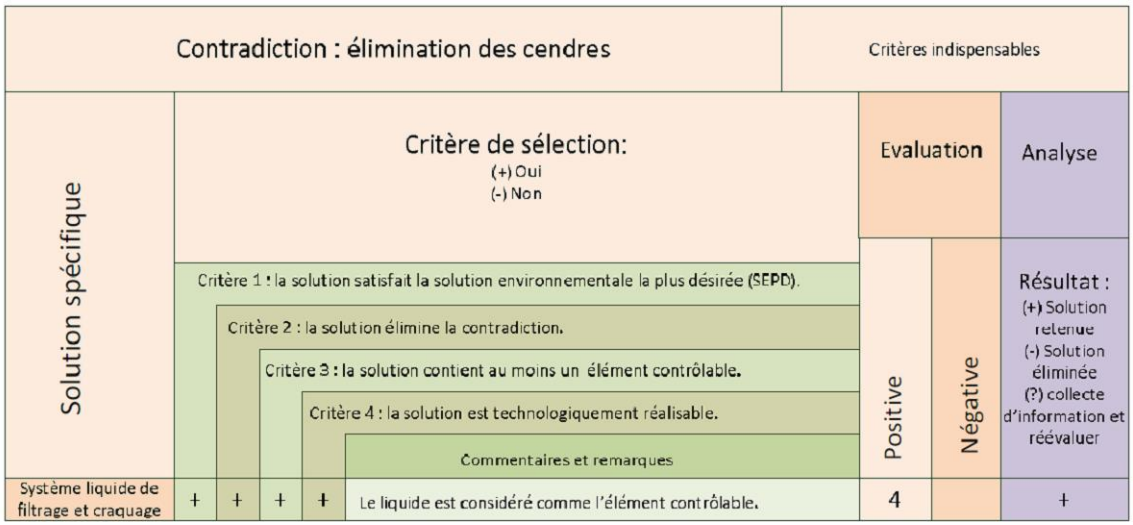



*Figure 5.36 : Evaluation des critères indispensables pour l'élimination des cendres.*

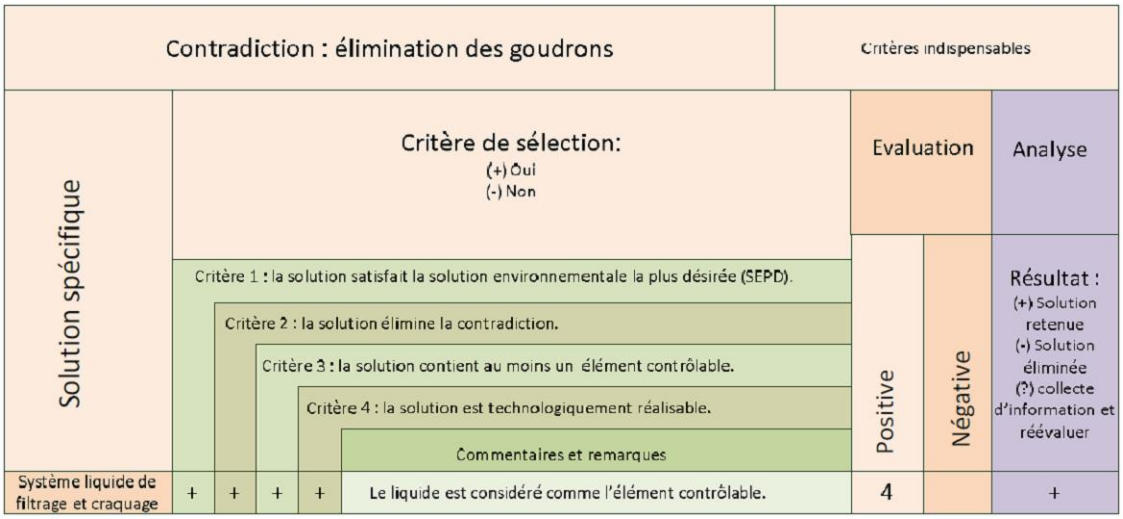



*Figure 5.37 : Evaluation des critères indispensables pour l'élimination des goudrons.*

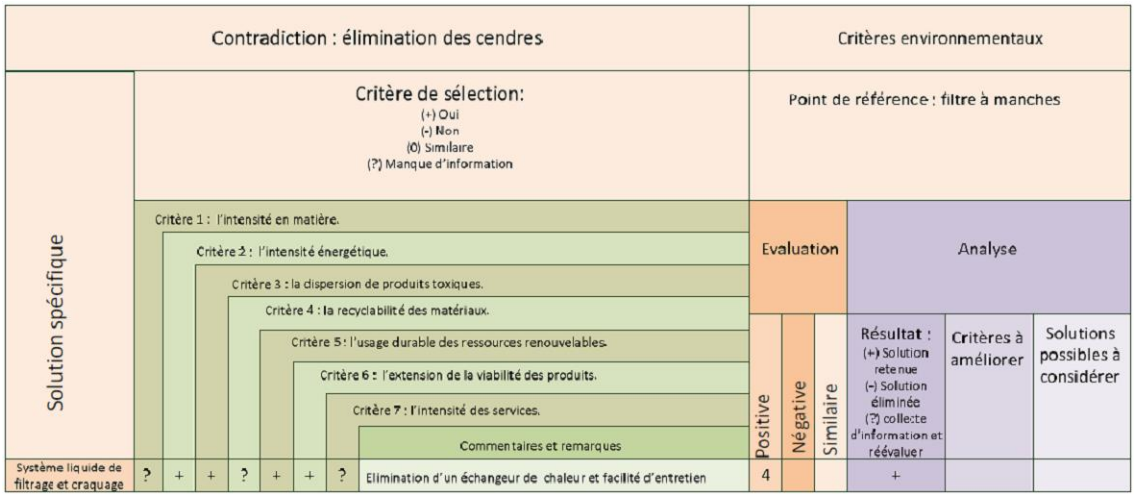



*Figure 5.38 : Evaluation de critères environnementaux pour l'élimination des cendres.*

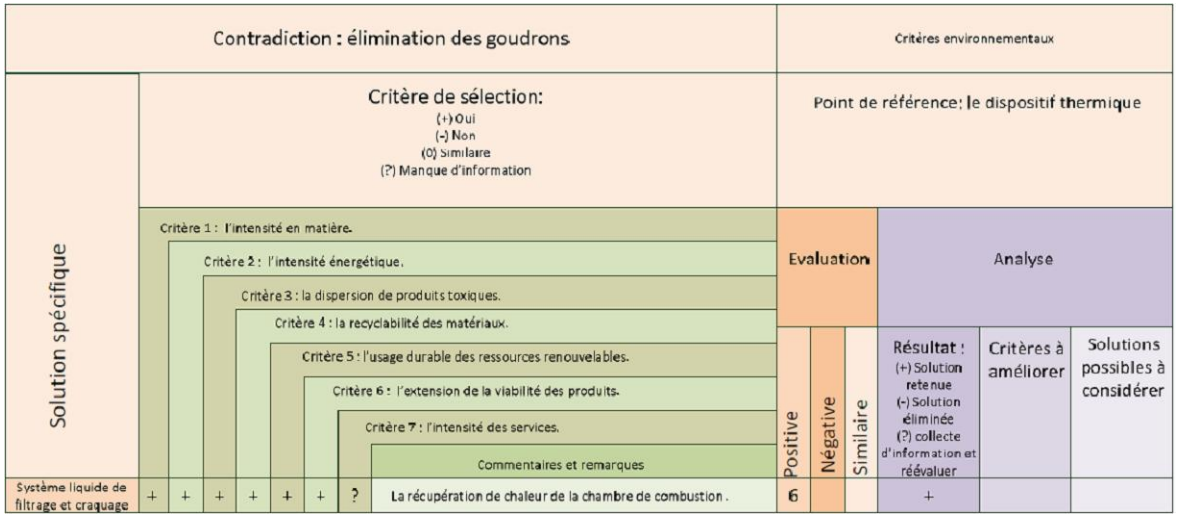



*Figure 5.39 : Evaluation des critères environnementaux pour l'élimination des goudrons.*

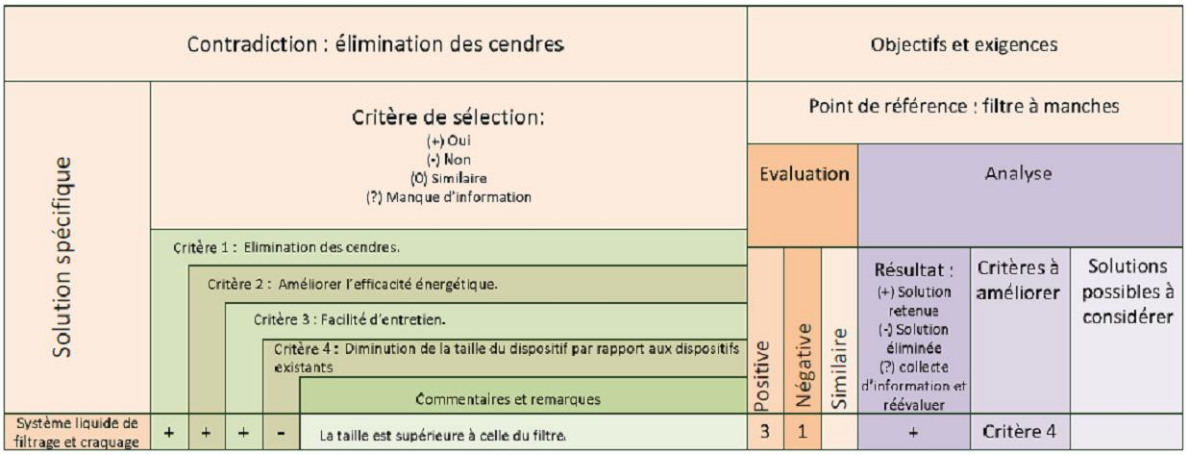



*Figure 5.40: Evaluation des objectifs et exigences pour l'élimination des cendres.*

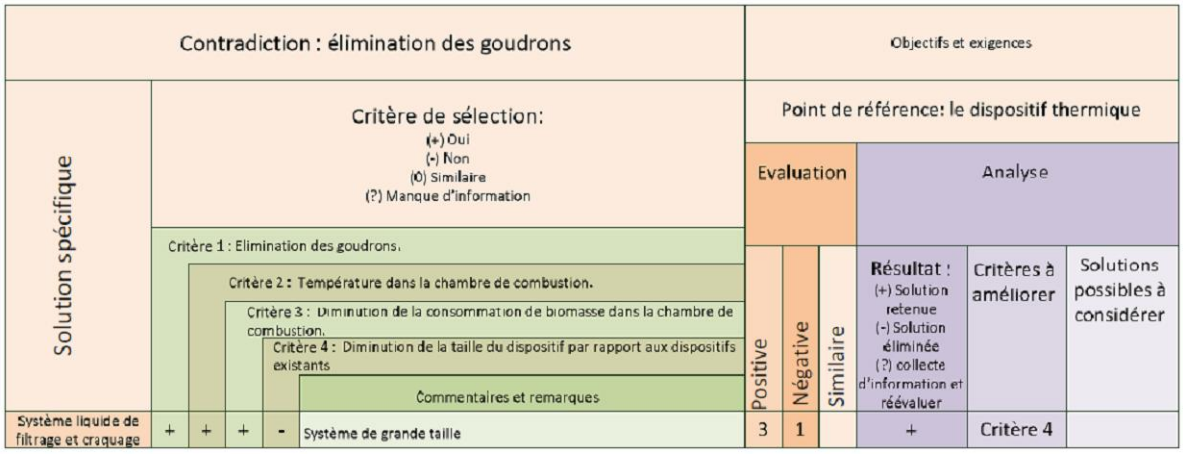



*Figure 5.41: Evaluation des objectifs et exigences pour l'élimination des goudrons.*

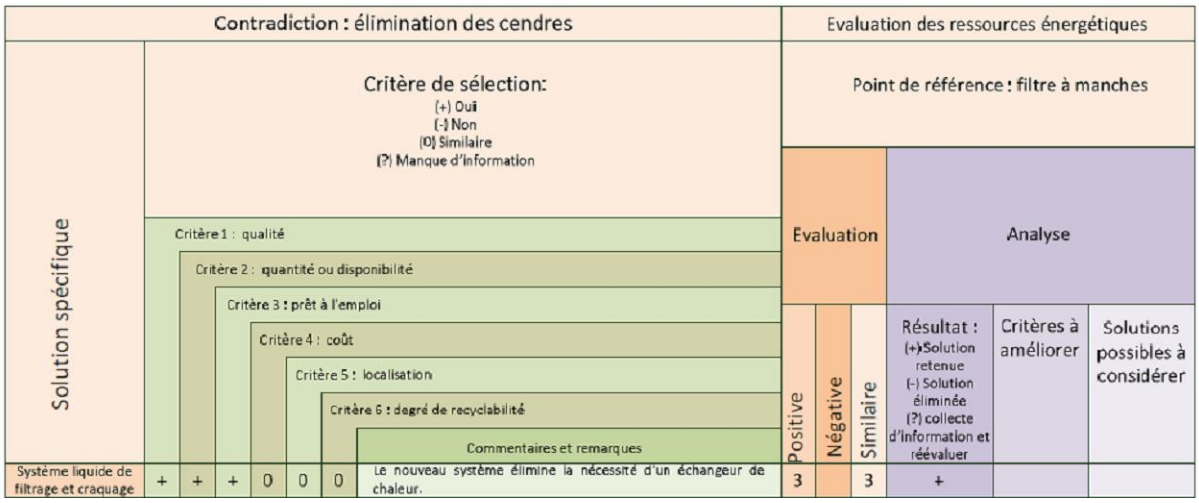



*Figure 5.42: Evaluation des ressources pour l'élimination des cendres.*

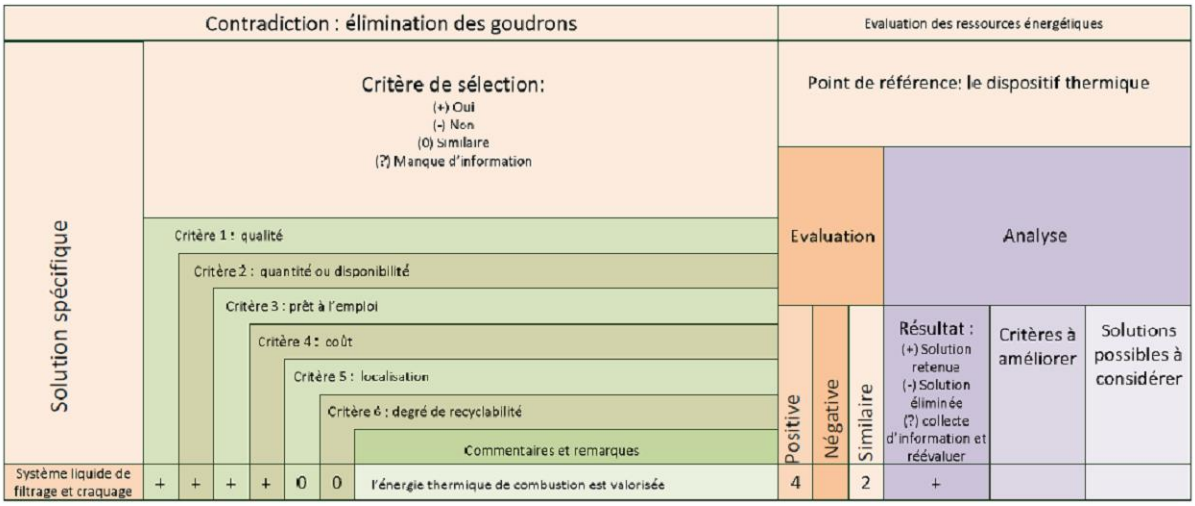



*Figure 5.43: Evaluation des ressources pour l'élimination des goudrons.*

Les résultats de cette évaluation révèlent que le système proposé aux attentes sur les critères environnementaux et sur l'utilisation des ressources. Néanmoins, le système présente un point faible : la taille du nouveau système risque d'être trop importante pour son introduction dans la chambre de combustion (pré dimensionnement rapide). On cherche à limiter voire éliminer ce risque dans l'étape d'amélioration.

### 5.8.2 *Etape 7.2 : Amélioration de la solution spécifique*

Afin d'améliorer la solution spécifique développée, il est nécessaire de réduire la taille du dispositif mais cela implique une réduction de la longueur des tubes d'introduction du gaz de synthèse dans le sel fondu. Cette diminution de la longueur a pour conséquence de réduire la surface d'échange entre le liquide et le gaz. De même la réduction de taille du dispositif, réduit également le temps de séjour des bulles de gaz et donc impacte le craquage catalytique. Pour résoudre ce problème de diminution de la taille du dispositif tout en conservant une surface d'échange

suffisante, nous proposons de remplacer le faisceau de tubes linéaires par un faisceau de serpentin (utilisation d'un effet géométrique), figure 5.44.



*Figure 5.44: Utilisation de serpentin.*

Concernant le temps de séjour, la seule façon de conserver un temps acceptable est d'augmenter le nombre et la performance des déflecteurs. La solution finale proposée est illustrée sur la figure 5.45.

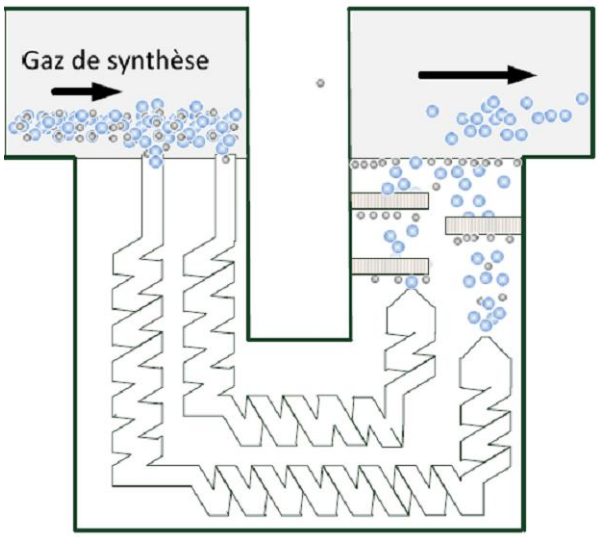



*Figure 5.45: Amélioration du nouveau système pour l'élimination de cendres et goudrons.*

### 5.8.3 *Etape 7.3 et 7.4 : La solution retenue*

Comme seule la solution proposée dans la partie précédente a été développée, l'étape de sélection de solution n'est pas nécessaire. En résumé le nouveau système permet d'atteindre :

- différents objectifs de la production durable : revalorisation énergétique, diminution de l'intensité matière, l'amélioration de la production du gaz de synthèse qui résulte en une meilleure utilisation des ressources naturelles (biomasse), et une réduction de la dispersion de polluants.
- la solution environnementale la plus désirée mais aussi d'augmenter la production de $H_2$ grâce au craquage catalytique des goudrons.
- Les objectifs d'augmenter l'efficacité énergétique et la élimination de polluants ont été atteint.
- une taille raisonnable du nouveau dispositif de façon à l'introduire dans la chambre de combustion limitant ainsi une surconsommation de biomasse.
- une solution commune aux deux contradictions et sans compromis.

## 5.9 CONCLUSION

La méthodologie proposée sur formulation et résolution de problèmes liés à l'écoinnovation a été appliquée à l'amélioration du procédé à lit fluidisé circulant pour la gazéification de biomasse. Une des limitations actuelles de l'utilisation industrielle de ce procédé est la présence de polluants dans le gaz de synthèse produit : des goudrons et cendres. A l'heure actuelle l'élimination de ces polluants demandent la mise ne place d'une succession d'étapes de purification en sortie du procédé (méthodes secondaires). L'objectif de cette étude de cas est de proposer une solution qui permet de traiter ces polluants tout en limitant les coûts d'investissement et de fonctionnement liés à la mise en œuvre de la solution. En effet, les traitements actuels ne sont pas satisfaisants car, ils font appels à des opérations unitaires qui demandent une consommation énergétique importante (four par exemple) mais aussi des traitements supplémentaires des effluents (eaux de lavage). Suite à la phase d'analyse du problème, très rapidement est apparue l'idée de réaliser de la récupération énergétique et de tirer profit de l'énergie dégagée dans la chambre de combustion (réaction exothermique). Cette valorisation de l'énergie nous a rapidement orientés vers une voie de traitement des polluants, directement dans le réacteur (méthode primaire).

Grâce à cette méthodologie, un nouveau système a été conçu, il s'agit d'un appareil intensifié qui permet d'éliminer au sein du même appareil les cendres et les goudrons. Dans ce réacteur-échangeur, le gaz de synthèse traverse un liquide où les cendres en suspension sont récupérées en surface grâce à la force de portance (flottation). Ce dispositif sert également à élever la température du gaz de synthèse afin de réaliser un craquage thermique des goudrons. Cependant, ce craquage n'est que partiel car la température maximale atteignable ne permet pas un craquage total (niveau de température de la chambre de combustion trop faible). Pour assurer l'élimination totale des goudrons, un craquage catalytique est également réalisé dans cet échangeur. Dans ces conditions le choix du liquide est important car : il doit rester liquide même à très hautes températures (supérieures à 1000°C) mais également avoir des propriétés catalytiques pour la réaction de craquage. Des sels fondus comme de l'hydroxyde de sodium, de l'hydroxyde de potassium, du carbonate de potassium pourraient être utilisés. A noter que des déflecteurs sont disposés dans la partie ascendante du gaz, de façon à augmenter le temps de séjour des bulles de gaz et donc à favoriser le craquage catalytique. De plus, lors de la réaction de craquage du $H_2$ est produit ce qui améliore l'efficacité du procédé avec une plus grande conversion de la biomasse.

Cette étude de cas, a permis de mieux appréhender les forces et surtout les faiblesses et les limites de l'approche. Par conséquent, des pistes de recherche pour améliorer l'efficacité de la méthode et des outils sont données dans les perspectives de ce travail.

# CONCLUSION

# Conclusion

Comme de nombreuses industries, le génie des procédés va devoir opérer des changements importants en vue de produire autrement et de rendre son développement durable. L'exploitation des ressources naturelles et les impacts environnementaux générés par les ateliers de production rendent impossible l'extension du modèle industriel et des technologies actuelles. Dans ces conditions, des contraintes prendront une importance majeure dans le processus de conception : la raréfaction des ressources, le recours à des énergies de substitution avec ces conséquences sur le transport et le mode de production (impact sur les choix de procédés), le développement de nouvelles applications ou produits (mais également matériaux) issus d'autres industries… Un remède à cette mutation consiste en une remise en cause profonde de la façon de produire d'une part et de concevoir les produits, procédés et services de demain d'autre part afin de réduire les impacts environnementaux associés au cycle de vie d'un produit.

Les industries du procédé ont le potentiel pour devenir une force motrice dans ce nouveau challenge en créant de nouveaux procédés, produits qui aident à réduire les impacts négatifs. Les initiatives pour améliorer les performances environnementales sont variées et ont progressivement évolué. Au début, elles se limitaient à la mise en œuvre de technologie en fin de procédé pour traiter les effluents et réduire les rejets dans les courants sortants de sortie. Le respect des normes de rejet donnait le sentiment de réduire la compétitivité des entreprises par la mise en place d'investissements pour y répondre mais qui pénalisaient la rentabilité économique (cause environnementale perçue comme un fardeau). D'un point de vue du procédé, des appareillages ont été ajoutés en sortie de procédé : filtres, colonnes de traitement, stations de traitement des eaux… Puis, est apparue une approche plus proactive focalisée sur les causes de la pollution. Le procédé est alors modifié afin de réduire son impact environnemental. De nombreuses approches d'écoconception ont alors vu le jour résultant sur des évolutions incrémentales sur cet impact. En effet, la plupart de ces méthodes sont centrées sur l'amélioration des pratiques de production, reconception, modification et optimisation des produits ou procédés existants, diminution des rejets, amélioration énergétique, utilisation efficace des ressources… Les frontières d'analyse se sont ensuite élargies passant de la vision produit ou procédé à l'ensemble de la chaîne de production, la prise en compte des stratégies de valorisation en fin de vie (aspect temporel) mais aussi l'intégration des systèmes de production avec la création de partenariat environnemental comme les éco-parcs (aspect spatial).

Actuellement cette évolution sur les produits et les procédés, se traduit par une restructuration des méthodes de production et par voie de conséquence par un besoin d'innovation technique radicale. Les innovations doivent prendre en compte les aspects environnementaux dès la phase de conception préliminaire afin de générer des produits et procédés plus respectueux de l'environnement. Pour les procédés il faut inventer de nouvelles technologies qui diminuent l'utilisation des ressources, minimisent la génération de déchets et de polluants (évolution vers l'idéalité au sens de TRIZ). Pour les produits en plus de minimiser l'impact environnemental sur leur cycle de vie il faut également intégrer leur fin de vie dès la conception (de même pour certains procédés). Bien que les industries des procédés

se soient préoccupées très tôt des conséquences environnementales de leurs ateliers de production, ce critère pèse de plus en plus dans les choix de conception de procédé : passage de solutions curatives à son intégration progressive en conception détaillée puis en conception préliminaire. Ce glissement vers l'amont du processus de conception reflète l'importance croissante du poids de ce critère. Il est donc nécessaire d'élaborer des outils permettant à la fois de prendre en compte les aspects technologiques mais aussi d'y inclure et de structurer la mise en place de connaissances environnementales dès le stade de la recherche de concepts.

Au cours de ces dernières années, l'équipe Procédés et Systèmes Industriels du Laboratoire de Génie Chimique s'est orientée vers le développement de méthodes et outils qui facilitent l'innovation produits et procédés, et plus particulièrement dès lors de l'étape de conception préliminaire. Parmi les différentes approches sur cette thématique, la théorie TRIZ de par ses nombreux avantages (évoqués dans le chapitre 1). Dès lors, des contributions ont été réalisées dans le but d'accroître les performances de cette théorie : proposition d'un couplage avec le raisonnement à partir de cas, introduction des ontologies métiers pour la rendre plus applicable au domaine d'étude. Cette thèse s'inscrit dans la continuité de ces travaux, et se focalise plus particulièrement sur l'étape de formulation et de résolution d'un problème écoinventif. En effet, la motivation de ce travail est de répondre à certains manques identifiés dans les travaux précédents : nécessité d'avoir des méthodes et d'outils plus performants pour l'analyse et la formulation d'un problème, introduire le point de vue environnemental, savoir résoudre des problèmes formulés avec plusieurs contradictions tout en intégrant les conditions spécifiques du problème.

Dans cette thèse, l'analyse sur la production durable et l'écoconception dans l'industrie chimique, présentée dans le chapitre 1, démontre l'importance de l'innovation comme moteur du développement de la production durable mais aussi l'importance d'aborder l'écoconception dès l'étape de conception préliminaire. Ce chapitre dresse un panorama des méthodes d'écoconception utilisées dans ce domaine et met en lumière leurs limites lorsqu'il s'agit de rechercher une solution inventive. Le chapitre 2 se focalise sur les méthodes d'innovation et d'écoinnovation couramment rencontrées dans la littérature. Son objectif est de positionner la problématique de recherche. Les chapitres 3 et 4 abordent respectivement la partie analyse et formulation du problème, et la partie résolution. L'objectif est de fournir une méthodologie d'aide à la résolution de problème écoinventifs. Elle se décompose en une suite d'étapes à réaliser pour guider le concepteur de la clarification du problème, à la formulation des contradictions jusqu'à leurs résolutions tout en intégrant les aspects environnementaux. La mise en œuvre de la méthode proposée est illustrée dans le chapitre 5 sur une étude de cas traitant de la réduction de polluants présents dans le gaz de synthèse en sortie de l'étape de gazéification de la biomasse.

## Contributions

La première contribution de cette thèse porte sur un cadre d'analyse de la situation problématique dont la finalité est d'aboutir à la formulation de contradictions. Ce cadre est composé de trois étapes principales dont le but est d'acquérir une connaissance approfondie du problème et de pouvoir le formaliser indépendamment

du domaine d'application. Ce cadre permet non seulement de sourcer la connaissance nécessaire à la compréhension et à la résolution du problème (étape cruciale lorsqu'on cherche des solutions inventives) mais aussi de les modéliser. De plus, le formalisme retenu facilite les manipulations, traitements et évolutions des modèles tout au long des étapes de la méthode proposée.

Afin de réaliser cette analyse de la situation problématique, la théorie générale de la pensée avancée (OTSM) a été adaptée pour y inclure une vision environnementale. Tout d'abord, le modèle TONGS est modifié pour introduire les objectifs environnementaux et ainsi établir la solution environnementale la plus désirée mais aussi la barrière qui empêche l'atteinte de cette solution. Cette barrière est le point de départ du réseau des problèmes : structure arborescente récapitulant l'ensemble des problèmes principaux successifs identifiés au fur et à mesure de l'analyse. Ce réseau est ensuite transformé en un réseau de contradictions et de paramètres avant de passer à l'étape de résolution. Afin de faciliter et d'accélérer la construction de ces réseaux, nous avons proposé de les modifier pour intégrer les objectifs de notre étude, et de les coupler avec d'autres outils d'analyse. Ainsi la construction du réseau des problèmes réalisée à l'aide de la fenêtre de transition des états qualitatifs et du modèle d'action, qui permettent non seulement d'approfondir l'analyse mais aussi de générer des solutions intermédiaires complètes ou partielles à un conflit. Ce couplage permet d'une certaine façon d'éliminer l'inertie psychologique, par exemple en considérant un état non désiré comme une solution potentielle, mais aussi grâce à l'organisation du réseau de problèmes en incluant la vision de ses causes et effets. Une autre contribution porte sur l'étape de formulation des contradictions, avec l'introduction de la description temporelle et spatiale dans les réseaux de contradictions et de paramètres. Cette analyse permet de situer les deux exigences ou états contradictoires de façon graphique ce qui permet d'orienter la réflexion lors de la résolution.

La seconde contribution majeure concerne la proposition d'un processus de résolution du problème. Ce processus s'appuie sur les méthodes et outils de la théorie TRIZ qui sont progressivement utilisés en fonction de la connaissance disponible sur le problème à traiter et de l'expertise du concepteur. Les différentes possibilités de modélisation, ainsi que les bases de connaissances associées, sont progressivement utilisées afin de réduire le niveau d'abstraction sur les modèles et les bases de connaissances (de plus en plus concrètes au fur et à mesure que l'on se rapproche du niveau de connaissances du domaine), figure 6.1. Tout comme dans la partie modélisation, les outils de TRIZ ont été modifiés pour répondre aux objectifs de la méthodologie proposée :

- La matrice de résolution des contradictions techniques a été étoffée pour intégrer les paramètres d'écoefficacité afin de formuler des contradictions traitant des aspects environnementaux.
- Le réarrangement des solutions standards dans un guide qui les organise selon le type d'action recherchée et des restrictions de la situation problématique. Ainsi, à chaque type d'action est associé différents standards inventifs pour résoudre cette situation. Cette idée est née de la difficulté à

associer notre représentation du problème (états qualitatives et modèle d'actions) et les standards de solution.

- La modélisation des effets physiques, chimiques, géométriques et biologiques à l'aide des processus qualitatifs et de la représentation champs-substances. Cela permet d'un côté d'utiliser des variables qualitatives pour décrire un effet et de l'autre cela procure un moyen graphique pour représenter cet effet. L'avantage de la représentation qualitative est qu'elle permet de généraliser la représentation de l'effet sans l'utilisation de variables quantitatives, de représenter les ressources comme les substances et l'énergie pour réaliser l'effet comme des objets, il est possible décrie les conditions nécessaires pour l'existence d'un effet, ainsi comme les relations imposés par les différents variables.

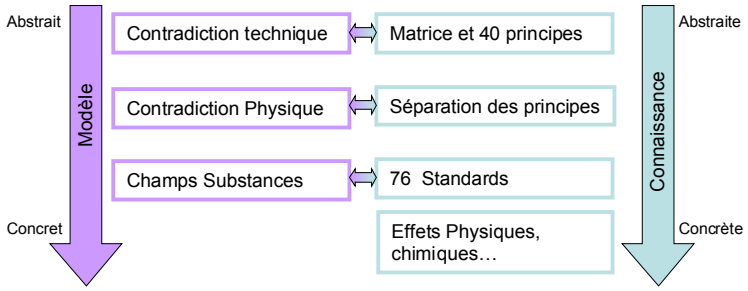



*Figure 6.1 : Modèles et Connaissances de TRIZ*

Sur la figure 6.1, d'un côté, la contradiction technique et la matrice de résolution offrent un outil conceptuellement simple, facile d'utilisation en première approche mais qui demeure à un haut niveau d'abstraction. Les principes inventifs souvent très abstraits, il faut alors les transcrire et les valider dans le domaine d'application. De l'autre le modèle champs-substances nécessite une analyse plus fine du problème ainsi qu'une connaissance plus pointue de la méthode de modélisation mais en contrepartie il s'appuie sur des bases de connaissances, i.e. les standards et les effets, qui sont plus proches de solutions concrètes. Il est alors intéressant d'allier la simplicité conceptuelle de la contradiction avec la proximité de la réalité des effets. Après une étude détaillée sur l'analyse de solutions inventives, on peut identifier que derrière chaque principe (11 principes de séparation ou 40 principes) ou standards de solution, un ou plusieurs effets ont été utilisés. Donc, cette observation nous amène à l'utilisation des effets comme solution, ce qui procure l'avantage d'avoir de solutions prêtes à l'emploi, reste à les implémenter. Néanmoins, le passage de la formulation de la contradiction à l'utilisation d'un effet comme solution n'est pas immédiat. Pour ce faire, nous avons proposé de traduire la voie de solution issue de l'utilisation des principes ou standards sous la forme d'une fonction. La fonction permet de faire le lien entre les exigences et le comportement physique d'un système. L'utilisation des fonctions a pour but de généraliser les actions désirées et de pouvoir les associer aux différents effets et phénomènes pour générer une solution spécifique.

Dans le processus de recherche des effets solution pour résoudre la contradiction, le problème est modélisé comme un problème de satisfaction par contraintes et donc un effet solution représenté une instanciation qui satisfait les contraintes (la fonction désirée et ressources existant). En autre, la programmation par contraintes est

utilisée afin de vérifier la possible association entre solutions de chaque contradiction, Ainsi, cette association permet générer de solutions plus efficaces ou avec de ressources partagées. C'est le cas par exemple de la gazéification de la biomasse (chapitre 5).

Lorsqu'un problème est résolu, plusieurs solutions peuvent être proposées et donc une évaluation des différentes options est nécessaire. Ainsi, nous avons adapté la matrice de Pugh pour réaliser une évaluation selon différents critères : Critères sur les objectifs et exigences du problème, Critères environnementaux et Critères sur l'utilisation des ressources. Cette évaluation nous permet d'éliminer ou retenir une solution, mais aussi offre la possibilité d'améliorer les solutions retenues. De plus, cette évaluation donne la capacité d'adapter aux solutions retenues certaines caractéristiques positives d'une solution éliminée.

## Perspectives

Ainsi, la méthode développée dans ce manuscrit présente une première approche vers la création d'un outil afin d'aide à l'ecoconception innovante de produits et procédés en génie des procédés. Néanmoins, lors du développement de cette thèse nous nous sommes confrontés à différents verrous, dont certains ont été levés. Toutefois, pour lever les verrous restants et continuer le développement de ce projet, les différentes perspectives envisagées sont décrites ci-dessous :

- Une première perspective est d'utiliser d'autres outils de la théorie TRIZ et OTSM qui n'ont pas été utilisés dans notre approche. Néanmoins, ces outils doivent évoluer et être adaptés pour intégrer une vision environnementale. Par exemple, nous pouvons définir des lois d'évolutions environnementales en se basant sur l'évolution présentée au chapitre 1, étendre les opérateurs Dimension-Temps-Coûts à d'autres paramètres, reconsidérer voire proposer de nouveaux standards aux 76 standards déjà proposés. De plus, nous ne devons pas seulement considérer les outils de la théorie TRIZ, il serait aussi intéressant de proposer d'autres outils spécifiquement dédiés aux problèmes environnementaux. Par exemple, l'analyse exergétique a démontré son efficacité en génie des procédés pour l'évaluation et l'indentification d'une situation problématique. Ainsi, cette analyse exergétique peut être intégrée à notre méthode afin de pouvoir développer de nouveaux procédés et améliorer les procédés existants. De plus, dans un contexte actuel d'économie circulaire, cette analyse pourrait également servir à identifier et qualifier des voies de valorisation (recyclage) pour des produits en fin de vie.
- Les différents domaines technologiques sont une importante source de connaissance pour la base des effets et phénomènes de notre approche. De nos jours, cette connaissance, qui est en constante évolution grâce à de nouvelles applications des effets et phénomènes, n'est pas complètement utilisée et il n'existe pas de méthodes pour leur capitalisation. En conséquence, il serait intéressant de développer des outils capables de capitaliser et modéliser tout cette connaissance. Dans ce contexte, les approches issues du champ de l'Intelligence Artificielle, peuvent apporter des réponses potentielles. Ainsi, une telle démarche permettrait l'intégration de

connaissance de multiples domaines en un seul domaine général afin de faciliter la résolution de problèmes inventifs.

- La capitalisation des connaissances est une possibilité pour accélérer le processus d'innovation. Comme nous l'avons mentionné dans ce manuscrit, lors de travaux antérieurs nous avons fait une proposition en ce sens avec le couplage entre les outils de TRIZ et le Raisonnement à Partir de Cas. Le but de cette perspective est d'intégrer ce couplage dans la méthode développée dans cette thèse. Même si nous avons anticipé cette intégration dans le développement de notre méthode, elle n'est pas immédiate car les outils de TRIZ utilisés dans le couplage ont été modifiés dans notre approche. De plus, la méthode proposée ne se limite pas à la partie résolution mais intègre également la partie analyse. Il serait également utile de capitaliser la connaissance déployée durant cette phase.
- La recherche et développement d'innovation demande de plus en plus de connaissances. Par conséquent l'innovation a évolué vers l'innovation ouverte. L'innovation ouverte postule qu'il est plus efficace et rapide, dans un esprit de travail collaboratif, de ne plus se baser principalement sur la seule et propre connaissance pour innover mais de chercher des connaissances au-delà du périmètre de l'entreprise. Dans le domaine des procédés, des entreprises comme Procter et Gamble ou Véolia ont déjà mis en pratique ce type d'innovation. Sur cette perspective, le département Procédés et Systèmes Industriels du Laboratoire de Génie Chimique a commencé une thèse intitulée : plateforme collaborative d'innovation assistée par ordinateur pour l'écoconception en génie de procédés. En plus des aspects collaboratifs cette plateforme devra intégrer des outils d'externalisation ouverte ou collaborat (crowdsourcing), des outils d'analyse des réseaux sociaux (mesure de centralités…) et s'appuiera sur le WEB 2.0 et notamment sur le Web sémantique pour la gestion des connaissances.
- Les trois derniers points démontrent qu'il existe un besoin pour le développement d'un vocabulaire commun à tous les différents participants externes et internes à un projet d'écoinnovation. En effet, un projet interdisciplinaire implique que les participants peuvent utiliser un langage différent (pire un même terme peut avoir des significations différentes d'une discipline à l'autre), une façon différente de modéliser, d'interpréter les paramètres d'un système, d'exprimer leurs expériences, etc. En conséquence, l'utilisation d'ontologies est un moyen pour faciliter la communication, l'échange d'information et la capitalisation des connaissances. Ainsi, une ontologie permettrait de standardiser le vocabulaire et de favoriser la synergie entre les différents outils proposés précédemment. La modélisation des processus qualitatifs et les fonctions générales utilisées dans le chapitre 4 pour modéliser les effets et phénomènes, peuvent apporter les premiers éléments pour le développement d'une telle ontologie. A plus long terme, au travers du développement cette ontologie, on envisage de réaliser une extension de l'outil d'écoinnovation ouverte assistée par ordinateur en un système de gestion de connaissance et écoinnovation ouverte afin de capitaliser et réutiliser les connaissances internes et externes sur l'ensemble du processus d'innovation.

# BIBLIOGRAPHIE

## CHAPITRE 1

**Alternatives Economiques, 2009**. Une économie sans déchets. *Alternatives Economiques*.

**Aoe, 2003**. Introduction and development of a factor X (eco-efficiency) tool. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment,* pp. 371 -376.

**Arvanitoyannis, 2008**. 3 - ISO 14040 : Life Cycle Assessment (LCA) — Principles and Guidelines. *Waste Management for the Food Industries*. Amsterdam : Academic Press, pp. 97-132.

**Ashford, 1994**. Government Strategies and Policies for Cleaner Production. *United Nations Environmental Program*, France.

**Asprion, Rumpf et Gritsch, 2011**. Work flow in process development for energy efficient processes. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), pp. 2067-2072.

**Berneman, Lanoie, Plouffe et Vernier, 2009.** L'éco-conception : Quels retours économiques pour l'entreprise, *Working paper (Discussion paper IEA-09–03) HEC Montréal, Canada*.

**Bhamra, Evans, McAloone, Simon, Poole et Sweatman, 1999.** Integrating environmental decisions into the product development process : Part 1 The early stages. *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Proceedings. EcoDesign'99 : First International Symposium*, pp. 329 -333.

**Brezet et Hemel, 1997**. EcoDesign : A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption, *United Nations Environment Programme, Industry and Environment, Cleaner Production*.

**Brezet, Bijma, Ehrenfeld et Silvester, 2001**. The design of eco-efficient services. *Delft University of Technology, Design for Sustaianblity Program, Delft*.

**Byggeth et Hochschorner, 2006**. Handling trade-offs in Ecodesign tools for sustainable product development and procurement. *Journal of Cleaner Production*, *14(15–16)*, pp.1420-430.

**Chang et Chen, 2004**. The conflict-problem-solving CAD software integrating TRIZ into eco-innovation. *Advances in Engineering Software, 35 (8-9)*, pp. 553–566

**Chick et Charter, 1997**. « Editorial Notes ». *Journal of Sustainable Product Design*, 1, pp. 5-6.

**Cooper, 2005** Product Leadership: Creating and Launching Superior New Products, 2nd Edition Basic Books Cambridge, 2005.

**Erkman et ECHO–Martigny**, **2004**. L'écologie industrielle : une stratégie de développement. *ETOPIA Centre d'Animation et de Recherche en Ecologie politique, Namur.*

**Fiksel, 2009.** Design for Environment, Second Edition : A Guide to Sustainable Product Development : Eco-Efficient Product Development 2e éd., McGraw-Hill Professional.

**Fresner, Jantschgi, Birkel, Bärnthaler et Krenn, 2010**. The theory of inventive problem solving (TRIZ) as option generation tool within cleaner production projects. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), pp.128-136.

**Fussler, 1997.** Driving Eco-Innovation : A Breakthrough Discipline for Innovation and Sustainability, Financial Times/Prentice Hall.

**IUCN, 1980.** World conservation strategy : living resource conservation for sustainable development, Gland, Switzerland : IUCN.

**Kengpol et Boonkanit, 2011**. The decision support framework for developing Ecodesign at conceptual phase based upon ISO/TR 14062. *International Journal of Production Economics*, 131(1), pp. 4-14.

**Knight et Jenkins, 2009**. Adopting and applying eco-design techniques : a practitioners perspective. *Journal of Cleaner Production*, 17(5), pp. 549-558.

**Kumana, 2002**. Pinch analysis for process energy optimization. *Energy engineering*, 99(4), pp. 18–41.

**Lagerstedt, 2003**. Functional and environmental factors in early phases of product development-Eco Functional Matrix. *Thèse de Doctorat, KTH Machine Design*.

**Lagerstedt et Luttropp, 2006**. Guidelines in ecodesign : a case study from railway industry. *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development*. *Springer Netherlands*, pp. 245-254.

**Lindahl, 2006.** Engineering designers' experience of design for environment methods and tools – Requirement definitions from an interview study. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), pp. 487-496.

**Lindahl, 2001**. Environmental effect analysis - how does the method stand in relation to lessons learned from the use of other design for environment methods. *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Proceedings EcoDesign 2001 : Second International Symposium*, pp. 864 -869.

**Luttropp et Lagerstedt, 1999**. Customer benefits in the context of life cycle design. *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. EcoDesign'99 : First International Symposium,* pp. 482-487.

**Millet, 1995.** Prise en compte de l'environnement en conception : proposition d'une démarche d'aide à la conception permettant de limiter les ponctions et rejets engendrés par le produit sur son cycle de vie.*Thèse de doctorat, ENSAM, Paris.*

**OECD, 2010**. Eco-Innovation in Industry : Enabling Green Growth, Paris : Organisation for Economic Co-operation and Development.

**Pahl et Beitz, 1996**. Engineering Design: a Systematic Approach, SpringerVerlag, London, 2nd Edition.

**Perotto, Canziani, Marchesi et Butelli, 2008**. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context : a case study. *Journal of Cleaner Production*, 16(4), pp. 517-530.

**PIPAME,2010.** Rapport PIPAME 2010 : Mutations économiques dans le domaine de la chimie.

**Sakao, 2007**. A QFD-centred design methodology for environmentally conscious product design. *International Journal of Production Research*, 45(18-19), pp. 4143-4162.

**Sakao, Oberender, Krone, Shimomura, Birkhofer et Reich , 2006**. Evaluating customer requirements in Eco-VA. In *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven*.

**Sakao, Masui, Kobayashi, Aizawa et Inaba, 2001**. Quality function deployment for environment : QFDE (2nd report)-verifying the applicability by two case studies. *Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, pp. 858-863.

**Samet, 2010.** Développement d'une méthode d'éco-innovation : Eco-MAL'IN. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers*

**Scaravetti, 2004**. Formalisation préalable d'un problème de conception, pour l'aide à la décision en conception préliminaire. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers.*

**Seider, Seader, Lewin et Widagdo, 2004.** Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation, 2nd Edition, Wiley.

**Seider, Seader, Lewin et Widagdo, 2010**. Product and Process Design Principles : Synthesis, Analysis, and Evaluation, 3rd Edition, Wiley.

**SETAC, 1991.** A Technical Framework of Life-Cycle Assessment. Smugglers Notch (Vt), Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC).

**Sherwin et Evans, 1998**. Ecodesign innovation : is 'early' always 'best'? *Design*, 44, pp.112-117.

**Suh, 1990.** The Principles of Design, Oxford University Press, Cambridge, U.K..

**SusChe, 2010.** Rapport: la feuille de route de SusChem France 2010

**Technologies clés 2015, 2011.** Rapport Technologies clés 2015.Le ministère de l'Economie des Finances et de l'Industrie.

**Ulrich, Eppinger, 2000** Product Design and Development, McGraw-Hill, New York**.**

**WBCSD, 2000.** Eco-Efficiency : Creating more value with less impact. *World Business Council for Sustainable Development.*

## CHAPITRE 2

**Altshuller, 1996**. And Suddenly the Inventor Appeared : TRIZ, the Theory of Inventive Problem Solving 2nd éd., Technical Innovation Center, Inc.

**Boldrini, 2005.** L'accompagnement des projets d'innovation : le suivi de l'introduction de la méthode TRIZ dans les entreprises de petite taille, Thèse de doctorat Université de Nantes.

**Bonjour, 2008.** Contributions à l'instrumentation du métier d'architecte système : de l'architecture modulaire du produit à l'organisation du système de production, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Franche Comté.

**Chandy, Hopstaken, Narasimhan et Prabhu, 2006.** From Invention to Innovation: Conversion Ability in Product Development. *Journal of Marketing Research* 43 (3), pp. 494-508.

**Chang, 2005**. The Study of Integrating Su-Field Analysis Modeling with Eco-Innovative Concept for Product Design, Ecodesign05 (IEEE), pp. 663-670.

**Chang et Chen, 2004**. The conflict-problem-solving CAD software integrating TRIZ into eco-innovation. Advances in Engineering Software, 35 (8-9), pp. 553–566

**Chen et Liu, 2001**. An eco-innovative design approach incorporating the TRIZ method without contradiction analysis, Journal of Sustainable Product Design ,1, pp 263-272.

**Chen et Liu, 2003**. An Eco Innovative design method by green QFD and TRIZ tools, *International Conference on Engineering Design, ICED03*.

**Christensen, 2003.** The Innovator's Solution – Creating and Sustaining Successful Growth, Harward Business School Press.

**Cooper, 2005.** Product Leadership: Creating and Launching Superior New Products, 2nd Edition Basic Books Cambridge.

**Cortes Robles, 2006.** Management de l'innovation technologique et des connaissances : synergie entre la théorie TRIZ et le Raisonnement à Partir de Cas*. Thèse de Doctorat INP Toulouse*.

**Dewar et Dutton, 1986**. The Adoption of Radical and Incremental Innovations: An Empirical Analysis. *Management Science* 32 (11), pp. 1422-1433.

**Dodgson, 2000**. Systemic Integration of the Innovation Process within a firm, *National Innovation Summit, Melbourne*.

**Fernez-Walsh, 2001**. Managements de projets : limites et obstacles rencontrés par les praticiens de l'innovation, AFITEP, Actes du Congrès Francophone du Management de Projet, pp. 89-101.

**Hatchuel et Le Masson, 2001**. Innovation répétée et croissance de la firme. Micro Economie et gestion des fonctions de conception, Disponible en ligne, Paris CNRS Ecole des Mines.

**Henderson et Clark, 1990.** Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. *Administrative Science Quarterly* 35 (1) .

**Hüsig et Kohn, 2009**. Computer aided innovation—State of the art from a new product development perspective. *Computers in Industry* 60 (8), pp. 551-562.

**Hüsig et Kohn, 2011**. «Open CAI 2.0 » – Computer Aided Innovation in the era of open innovation and Web 2.0 . *Computers in Industry* 62 (4), pp.407-413.

**Klemmer, Lehr et Loebbe, 1999.** Environmental Innovation. Volume 3 of publications from a Joint Project on Innovation Impacts of Environmental Policy Instruments. *Synthesis Report of a project commissioned by the German Ministry of Research and Technology, Analytica-Verlag, Berlin*.

**Leon, 2009**. The future of computer-aided innovation. *Computers in Industry* 60 (8), pp. 539-550.

**Lenfle, 2004.** Faire de la recherche en management de projet, Paris, Vuibert, pp. 35-54.

**Mac Gregor, Arana, Parra et Lorenzo, 2006**. Supporting new product creation in the Mondragon Valley, European Journal of Innovation Management, 9 (4), pp. 418-443.

**Nonaka et Hirotaka, 1995**. The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford University Press, USA.

**OCDE, 2005.** Principes directeurs proposés pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation technologique, Editions OCDE.

**OECD, 2009**. Sustainable Manufacturing and Eco-Innovation Framework, Practices and Measurement Organisation for Economic Co-operation and Development.

**OECD, 2010**. Eco-Innovation in Industry: Enabling Green Growth. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.

**Penide, Pingaud, Gourc, Peillon, 2010.** Ingénierie des processus innovants : représentation et définition du processus d'innovation, *MOSIM'10*.

**Perrin, 2001**. Concevoir l'innovation industrielle, méthodologie de conception de l'innovation, Paris, CNRS Editions.

**Roper, Dun, Love, 2008.** Modelling the innovation value chain, *Research Policy, 37*, pp. 961-977.

**Rubik, 2001**. Environmental sound product innovation and Integrated Product Policy (IPP). *The Journal of Sustainable Product Design* 1 (4), pp. 219-232.

**Samet, 2010.** Développement d'une méthode d'éco-innovation : Eco-MAL'IN, *Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers*.

**Seider, Seader, Lewin et Widagdo,** 2010. Product and Process Design Principles : Synthesis, Analysis, and Evaluation, 3rd Edition, Wiley.

**Srinivasan et Kraslawski, 2006.** Application of the TRIZ creativity enhancement approach to design of inherently safer chemical processes, *Chem. Eng. Proc.*, 45 pp. 507-514.

**Stankiewicz et Moulijn. 2000**. Process intensification: Transforming chemical engineering. *Chemical Engineering Progress*. *96*, 22.

**Terninko, Zusman et Zlotin, 1998.** Systematic Innovation : An Introduction to TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) 1re éd., CRC Press.

**Tushman et O'Reilly, 2002.** Winning through Innovation : a practical guide to leading organizational change and renewal, Harvard Business School Publishing Corporation,

**Ullman, 2009**. The Mechanical Design Process 4e éd., McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

**Yen et Chen, 2005.** An eco-innovative tool integrating FMEA with TRIZ methods, *4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Ecodesign05*, *Tokyo Japa*n.

**Zha et Du, 2006**. Knowledge-intensive collaborative design modelling and support Part I : R*eview, distributed models and framework, Computers in Industry, 57*, pp. 39-55.

## CHAPITRE 3

**Cavallucci, Khomenko et Morel, 2005.** Towards inventive design through management of contradictions. *15th international CIRP design seminar*.

**Cavallucci et Khomenko, 2007**. From TRIZ to OTSM-TRIZ : addressing complexity challenges in inventive design. *International Journal of Product Development*, 4(1/2), pp. 4-21.

**Charroux, Osmani et Thierry-Mieg**, **2005**. UML 2, Pearson Education.

**Clausing et Fey, 2004**. Effective Innovation : The Development of Successful Engineering Technologies. Professional Engineering Publishing.

**Cortes Robles, 2006.** Management de l'innovation technologique et des connaissances : synergie entre la théorie TRIZ et le Raisonnement à Partir de Cas*. Thèse de Doctorat INP Toulouse*.

**De Kleer, 1992**. Qualitative physics. *Encyclopedia of Artificial Intelligence*. Wiley-Interscience, *New York,* pp. 807–814.

**Fey et Rivin, 2005**. Innovation on Demand : New Product Development Using TRIZ. Cambridge University Press.

**Forbus, 2008**. Qualitative Modeling. *Handbook of Knowledge Representation*. *Elsevier Science,* pp. 361-387.

**Horowitz, 1999**. Creative problem solving in engineering design. *Thèse de Doctorat. Tel-Aviv University, Faculty of Engineering*.

**Khomenko et Ashtiani, 2007**. Classical TRIZ and OTSM as a scientific theoretical background for nontypical problem solving instruments. *7th ETRIA TRIZ Future Conference, Frankfurt, Germany*.

**Khomenko et Cooke, 2010**. Inventive problem solving using the OTSM-TRIZ « TONGS » model. *ETRIA TRIZ Future Conference*.

**Khomenko et Sokol, 2000**. New models and methodology for teaching OTSM-TRIZ. *TRIZCON2000, the proceedings of the Altshuller Institute Conference*.

**Khomenko, De Guio, Lelait et Kaikov, 2007**. A framework for OTSM TRIZ-based computer support to be used in complex problem management. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 30(1/2), pp. 88-104.

**Khomenko, De Guio et Cavallucci, 2009**. Enhancing ECN's abilities to address inventive strategies using OTSM-TRIZ. *International Journal of Collaborative Engineering*, 1(1), pp. 98-113.

**Khomenko et De Guio, 2007.** OTSM Network of Problems for representing and analysing problem situations with computer support. In N. León-Rovira, éd. *Trends in Computer Aided Innovation*. IFIP The International Federation for Information Processing. Springer US, pp. 77-88.

**Orloff, 2003.** Inventive Thinking through TRIZ : A Practical Guide 2nd éd., Springer.

**Salamatov, 1999**. Triz : the Right Solution at the Right Time : A Guide to Innovative Problem Solving, Insytec BV.

**Savransky, 2000**. Engineering of Creativity : Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving 1re éd., CRC Press.

**Terninko, Zusman et Zlotin, 1998.** Systematic Innovation : An Introduction to TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) 1re éd., CRC Press.

**Tomiyama, Kiriyama et Yoshikawa, 1992**. Conceptual design of mechanisms: A qualitative physics approach. *Concurrent Engineering: Automation, Tools, and Techniques*. pp. 131–152.

## CHAPITRE 4

**Altshuller, 1984**. Creativity as an exact science : The theory of the solution of inventive problems, CRC.

**Apt, 2003**. Principles of constraint programming, Cambridge University Press.

**Cavallucci et Khomenko, 2007**. From TRIZ to OTSM-TRIZ : addressing complexity challenges in inventive design. *International Journal of Product Development*, 4(1/2), pp. 4-21.

**Cortes Robles, 2006.** Management de l'innovation technologique et des connaissances : synergie entre la théorie TRIZ et le Raisonnement à Partir de Cas. *Thèse de Doctorat INP Toulouse*.

**Fey et Rivin, 2005**. Innovation on Demand : New Product Development Using TRIZ. Cambridge University Press.

**Forbus, 1984**. Qualitative process theory. *Artificial intelligence*, 24(1-3), pp. 85–168.

**FRON, 1994**. Programmation par Contraintes, France : Addison-Wesley.

**Karasik, 1980**. On classification of dualities in technical systems. *Proceedings of the USSR Conference on the Advanced Methods of Engineering Design. Moscow*, pp. 141-145.

**Khomenko et Ashtiani**, **2007**. Classical TRIZ and OTSM as a scientific theoretical background for nontypical problem solving instruments.*7th ETRIA TRIZ Future Conference, Frankfurt, Germany*.

**Kitamura, Kashiwase, Fuse et Mizoguchi, 2004.** Deployment of an ontological framework of functional design knowledge. *Advanced Engineering Informatics*, *18(2)*, pp.115–127.

**Mann, Dewulf, Zlotin et Zusman, , 2003**. *Matrix 2003 Updating the Contradiction Matrix*, Creax Press: Belgium

**Mizoguchi et Kitamura, 2000.** Foundation of Knowledge Systematization : Role of Ontological Engineering. *Industrial Knowledge Management - A Micro Level Approach, Rajkumar Roy Ed., Chapter* 1, pp. 17–36.

**Negny, Belaud, Cortes Robles, Roldan Reyes et Barragan Ferrer, 2012.** Toward an eco-innovative method based on a better use of resources : application to chemical process preliminary design. *Journal of Cleaner Production*, 32(0), pp. 101-113.

**Orloff, 2003**. Inventive Thinking through TRIZ : A Practical Guide. 2nd éd., Springer.

**Pahl, Beitz, Feldhusen et Grote, 2007.** Engineering Design : A Systematic Approach 3rd éd., Springer.

**Pugh, 1990**. Total Design : Integrated Methods for Successful Product Engineering 1re éd., Prentice Hall.

**Saaty, 2008**. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), pp. 83-98.

**Salamatov, 1999**. Triz : the Right Solution at the Right Time. A Guide to Innovative Problem Solving, Insytec BV.

**Sasajima et Kitamura**, 1995. FBRL : a function and behavior representation language. In *Proceedings of the IJCAI '95*.

**Savransky, 2000**. Engineering of Creativity : Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving 1re éd., CRC Press.

**Ullman, 2009**. The Mechanical Design Process 4e éd., McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

**Umeda, Tomiyama et Yoshikawa, 1995**. FBS modeling : modeling scheme of function for conceptual design. *Proceedings of the 9th International Workshop on Qualitative Reasoning*. pp. 271– 278.

## CHAPITRE 5

**Florin et Harris, 2007.** Hydrogen production from biomass coupled with carbon dioxide capture: The implications of thermodynamic equilibrium. International Journal of Hydrogen Energy, 32(17), pp. 4119-4134.

**Khomenko et De Guio, 2007.** OTSM Network of Problems for representing and analysing problem situations with computer support. In N. León-Rovira, éd. *Trends in Computer Aided Innovation*. IFIP The International Federation for Information Processing. Springer US, pp. 77-88.

**RECORD, 2009.** Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse.

**Van Rossum, Potic, Kersten et Van Swaaij, 2009.** Catalytic gasification of dry and wet biomass. Catalysis Today, 145(1–2), pp.10-18**.**

**Xuan, Leung, Leung et Ni, 2009.** A review of biomass-derived fuel processors for fuel cell systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(6–7), pp.1301-1313.

## ANNEXE 1

**Altshuller, 1984**. Creativity as an exact science : The theory of the solution of inventive problems, CRC.

**Altshuller, 1996**. And Suddenly the Inventor Appeared : TRIZ, the Theory of Inventive Problem Solving 2nd éd., Technical Innovation Center, Inc.

**Altshuller et Rodman, 1999**. The innovation algorithm : TRIZ, systematic innovation and technical creativity, Technical Innovation Ctr.

**Altshuller et Zhuravlyova, 2005**. Ballad of the Stars : Stories of Science Fiction, Ultraimagination and TRIZ, Technical Innovation Center, Inc.

**Clausing et Fey, 2004**. Effective Innovation : The Development of Successful Engineering Technologies. Professional Engineering Publishing.

**Cortes Robles, 2006.** Management de l'innovation technologique et des connaissances : synergie entre la théorie TRIZ et le Raisonnement à Partir de Cas. *Thèse de Doctorat INP Toulouse*.

**Dubois, 2004**. Contribution à la formulation des problèmes en conception de systèmes techniques. Etude basée sur la TRIZ. *Thèse de Doctorat INSA de Strasbourg*.

**Fey et Rivin, 2005**. Innovation on Demand : New Product Development Using TRIZ, Cambridge University Press.

**Gonchar, 2008**. Inside Beijing's Big Box of Blue Bubbles. Disponible à : http://continuingeducation.construction.com/article_print.php?L=5&C=418.

**Horowitz, 1999**. Creative problem solving in engineering design. *Thèse de Doctorat. Tel-Aviv University, Faculty of Engineering*.

**Kaplan, 1996.** An introduction to TRIZ : The russian theory of inventive problem solving, Ideation International.

**Lowry, 1938.** Double Glazed Window. Disponible à : http://www.google.com/patents/US2228358.

**Orloff, 2003.** Inventive Thinking through TRIZ : A Practical Guide 2nd éd., Springer.

**Pahl, Beitz, Feldhusen et Grote, 2007.** Engineering Design : A Systematic Approach 3rd éd., Springer.

**Salamatov, 1999**. Triz : the Right Solution at the Right Time. A Guide to Innovative Problem Solving, Insytec BV.

**Savransky, 2000**. Engineering of Creativity : Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving 1re éd., CRC Press.

**Sushkov**, **Mars et Wognum, 1995**. Introduction to TIPS : a theory for creative design. *Artificial Intelligence in Engineering*, 9(3), pp. 177-189.

**Terninko, 1996.** TRIZ/QFD Synergy Results in Customer Driven Innovation. *The Transactions of The Ninth Symposium on Quality Function Deployment, Novi, MI : QFD Institute*.

**Terninko, Zusman et Zlotin, 1998.** Systematic Innovation : An Introduction to TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) 1re éd., CRC Press.

**Vikentyev, 2005**. Do We Really Understand Geometry? Disponible à : http://www.triz-chance.ru/geometry_en.html.

## ANNEXE 2

**Altshuller, 1984**. Creativity as an exact science : The theory of the solution of inventive problems, CRC.

**Fey et Rivin, 2005**. Innovation on Demand : New Product Development Using TRIZ, Cambridge University Press.

**Salamatov, 1999**. Triz : the Right Solution at the Right Time. A Guide to Innovative Problem Solving, Insytec BV.

**Savransky, 2000**. Engineering of Creativity : Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving 1re éd., CRC Press.

## ANNEXE 3

**Bailleux, 2011**. Programmation par contraintes. *Support de cours de Master 2 BD-IA et Image-IA. UFR Sciences et Techniques, Université de Bourgogne, France.*

**Benelallam, 2010**. Approches complètes pour la résolution des problèmes DisCSPs et DCOPs. *Thèse de Doctorat à la Faculté des Sciences de Rabat*, *Maroc*.

**Benhamou, McAllester et van Hentenryck**, **1994.** CLP (Intervals) revisited. ILPS'94 MIT Press, Cambridge MA, pp. 124–138.

**Bessiere, 2006**. Constraint propagation. *Foundations of Artificial Intelligence*, 2, pp. 29–83.

**Bessiere, Freuder et Regin, 1995**. Using inference to reduce arc consistency computation. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 592–599.

**Boivin, 2005.** Résolution d'un problème de satisfaction de contraintes pour l'ordonnancement d'une chaîne d'assemblage automobile. *Mémoire de master à l'Université du Québec,* Chicoutimi, Canada.

**Chenouard, 2007**. Résolution par satisfation de contraintes appliquée à l'aide à la décision en conception architecturale. *Thèse de Doctorat de l'Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM.*

**Dechter, 1990**. Enhancement schemes for constraint processing : Backjumping, learning, and cutset decomposition. *Artificial Intelligence*, 41(3), pp. 273–312.

**Delobel, 2000**. Résolution de systèmes de contraintes réelles non linéaires. *Thèse de doctorat de l'Université de Nice*, Sophia Antipolis.

**Fages, 1996**. *Programmation logique par contraintes*, Ellipses.

**Gaschig, 1979**. Performance measurement and analysis of certain search algorithms, *Technical Report CMU-CS-79-124, Carnegie-Mellon University*.

**Ginsberg, 1993**. Dynamic backtracking. *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol.1, pp. 25-46.

**Hyvönen, 1992.** Constraint reasoning based on interval arithmetic : the tolerance propagation approach. *Artificial Intelligence*, 58(1), pp. 71–112.

**Lecoutre, Boussemart et Hemery, 2003**. De AC3 à AC7. *12ème JFPLC'03*, pp. 267-280.

**Lecoutre, Boussemart et Hemery, 2003**. Au coeur de la consistance d'arc. *Actes de JNPC'03*, pp. 233–247.

**Lhomme, 1993**. Consistency techniques for numeric CSPs. *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 232–232.

**Mackworth, 1977**. Consistency in networks of relations. *Artificial intelligence*, 8(1), pp. 99–118.

**Minton, Johnston, Philips et Laird. 1992**. Minimizing conflicts : a heuristic repair method for constraint satisfaction and scheduling problems. *Artificial Intelligence*, 58(1), pp. 161–205.

**Moore, 1966.** Interval Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (NJ), USA.

**Neumaier, 1991**. Interval Methods for Systems of Equations. Encyclopedia of mathematics and its Applications, vol. 37.

**Prosser, 1996**. An empirical study of phase transitions in binary constraint satisfaction problems. *Artificial Intelligence*, 81(1–2), pp. 81-109.

**Salido et Barber, 2003**. A constraint ordering heuristic for scheduling problems. *Proceeding of the 1st Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications*, pp. 476-490.

**Sam, 1995.** Constraint consistency techniques for continuous domains. *Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne*.

**Shapiro , Feldman et Dechter, 1997.** On the complexity of interval-based constraint networks. *Rapport Technique, n$^{o}$ 76, University of California, Irvine*.

**Van Oudenhove De Saint Gery, 2006.** Contribution à l'élaboration d'un formalisme gérant la pertinence pour les problèmes d'aide à la conception à base de contraintes. *Thèse de Doctorat INP Toulouse*.

**Vareilles, 2005**. Conception et approches par propagation de contraintes : contribution à la mise en œuvre d'un outil d'aide interactif. *Thèse de Doctorat INPT Toulouse*.

**Wallace, 1992.** Ordering heuristics for arc consistency algorithms. *Proceedings of the Biennial Conference-Canadian Society for Computational Studies of Intelligence*, pp. 163–163.

ANNEXE 1

# ANNEXE 1 : LA THEORIE TRIZ

## A1.1 LES CONCEPTS ESSENTIELS DE LA THEORIE TRIZ

La théorie TRIZ est composée de méthodes et d'outils pour guider le concepteur dans sa recherche de solutions inventives. Afin d'utiliser ces outils, il est nécessaire de comprendre certains concepts essentiels que Altshuller a développé. Ces concepts ont pour but de changer la perception du concepteur sur le processus de résolution de problèmes, mais également sur les notions de créativité et d'innovation, de développement de systèmes technologiques, et sur la pensée en général. Le but final est de développer des « technologies idéales » pour créer une « humanité idéale » (Altshuller et Zhuravlyova 2005). Dans cette partie nous allons présenter les concepts essentiels qui facilitent la mise en pratique de la théorie TRIZ.

### *A1.1.1 Niveaux d'innovation ou d'inventivité*

Dès son analyse de brevets, Altshuller a constaté l'existence de différences profondes sur le degré d'innovation des solutions brevetées : de solutions simples non inventives à des grandes découvertes qui sont à l'origine de nouveaux systèmes technologiques. Ainsi, Altshuller a divisé les brevets en 5 niveaux selon le degré d'inventivité des solutions. Selon Terninko (Terninko 1996) les principaux critères utilisés pour cette classification sont :

- *L'éloignement entre la connaissance utilisée pour résoudre le problème et le domaine où celle-ci était appliquée*.
- *Le nombre d'essais nécessaires afin de trouver la solution (si la méthode des essais-erreurs était utilisée).*
- *L'impact du changement accompli sur le système technologique au travers de la solution implémentée.*

En prenant en compte ces critères, les 5 niveaux d'inventivité proposés par Altshuller sont les suivants :

1. Niveau 1 : ce niveau englobe 32 % des inventions brevetées. Les solutions proposées utilisent des méthodes bien connues dans le domaine d'apparition du problème (Terninko et al. 1998). Elles sont considérées comme des solutions routinières où le système technique ne change pas, seules certaines caractéristiques sont améliorées (Kaplan 1996).
2. Niveau 2 : les solutions de ce niveau correspondent à des améliorations mineures du système afin de surpasser la contradiction existante sur le système, mais avec un certain compromis entre les paramètres contradictoires (Kaplan 1996). Ces solutions représentent 45% des brevets analysés. Pour arriver à ces solutions, les inventeurs utilisent des méthodes ou des connaissances bien connues dans le domaine industriel d'origine du problème.
3. Niveau 3 : les solutions de ce niveau représentent 18 % des inventions analysées où une contradiction existant dans le système est résolue. Les solutions sont des améliorations majeures du système ou l'introduction d'un nouvel élément (Terninko et al. 1998). Les solutions

de ce niveau sont développées avec des méthodes et connaissances d'autres domaines technologiques.

4. Niveau 4 : cette catégorie représente 4 % des brevets. Normalement les solutions sont atteintes grâce à l'utilisation de principes de solutions basées sur l'utilisation des effets et phénomènes physiques d'un domaine technologique complètement différent de celui du problème. Selon Altshuller : « *les solutions ne sont pas dans la technologie sinon dans la science* » (Kaplan 1996).
5. Niveau 5 : ce niveau est associé aux nouvelles découvertes, les solutions vont au-delà des limites de la connaissance scientifique. Elles représentent 1 % des inventions. Les inventions sont essentiellement de nouveaux systèmes basés sur une nouvelle découverte, un nouveau phénomène ou une nouvelle science. Par exemple, le laser, dans les années 60. A noter que ses découvertes donnent ensuite lieu à des inventions de niveau plus faible : le laser est actuellement utilisé dans d'autres applications comme la mesure optique, les interventions chirurgicales…

Alshuller s'est essentiellement focalisé sur les inventions de niveau 2,3 et 4, car les solutions du niveau 1 sont considérées comme non inventives. A l'inverse, les solutions du niveau 5 sont des solutions qui exigent un grand corpus de connaissances pour aboutir à des solutions inventives (d'où leur rareté). Les inventions des niveaux 2, 3 et 4 s'appuient sur un transfert de connaissances entre différents domaines technologiques, c'est-a-dire, un grand nombre d'inventions ont été proposées en utilisant des solutions similaires découvertes dans des domaines différents de celui d'apparition du problème. De plus, certaines solutions ont été reproduites plusieurs fois dans différents domaines avec parfois avec un lapse de temps important entre les deux brevets. Par exemple, un premier brevet déposé pour enlever les graines à l'intérieur de piments, figure A.1. Afin d'automatiser cette étape les piments sont disposés dans une cuve hermétique dans laquelle la pression est augmentée graduellement. Ainsi, grâce au principe d'équilibre de la pression entre l'intérieur des piments et l'intérieur de la cuve, ces derniers se rompent en leur point le plus fragile (point d'accroche des graines). Les graines se retrouvent ainsi dissociées de l'enveloppe mais à l'intérieur des piments. Dans une seconde étape, on fait brusquement chuter la pression dans la cuve ce qui provoque une éjection des graines (toujours selon le principe d'équilibre des pressions). Cette solution d'augmentation graduelle de la pression suivie d'une chute rapide se retrouve également dans d'autres brevets déposés dans des industries différentes de l'agroalimentaire : brevet sur le nettoyage de filtre à particules, brevet sur la purification de diamants. A partir de cette analogie sur les invariants de résolution de problèmes, Altshuller a découvert que les solutions inventives font l'objet d'une certaine répétabilité et prévisibilité et ne sont pas basées sur un processus hors du contrôle humain. Il a ensuite construit des modèles, qui font abstraction du domaine scientifique de découverte, qui cherchent à exploiter cette répétabilité et cette prévisibilité de manière à faciliter le transfert de connaissance entre les domaines et la génération de solutions inventives.



*Figure A1.1 : Procédé d'extraction de graines (Terninko et al. 1998) .*

### *A1.1.2 Lois d'évolution*

L'analyse de brevets a permis à Altshuller de constater que les systèmes technologiques n'évoluent pas aléatoirement mais selon des modèles d'évolution. De ce fait, Altshuller a démontré que l'évolution des technologies est régie par certaines tendances objectives indépendantes de la volonté humaine. Par conséquence, il a qualifié ces tendances dans un outil dénommé lois d'évolutions, afin d'anticiper l'évolution future d'un système technologique et de prévoir l'apparition des nouveaux problèmes (Salamatov 1999).

Il existe 8 lois d'évolutions classiquement divisées en 3 groupes :

- Les lois statiques qui définissent la structure d'un système technique.
- Les lois cinématiques qui définissent l'évolution d'un système technique indépendamment des facteurs physiques et techniques (Altshuller 1984).
- Les lois dynamiques qui expriment l'évolution d'un système technique sous l'effet de facteurs physiques et techniques spécifiques (Altshuller 1984).

#### A1.1.2.1 Les lois statiques

Selon Altshuller : « *Tout système technique résulte de la synthèse de parties séparées en un tout. Mais toute synthèse des parties est loin de pouvoir former un système technique apte à fonctionner. Il existe au moins trois lois dont les règles doivent être respectées pour que le système technique soit opérationnel* » (Cortes Robles 2006).

**Première loi** : Intégralité des parties d'un système technologique. Une condition nécessaire afin qu'un système technique puisse « fonctionner » et être opérationnel, est qu' il doit comprendre quatre éléments indispensables (Altshuller 1984) (Kaplan 1996) :

- Un moteur : qui transforme une source d'énergie externe, en une énergie utilisable par le système.
- Un organe de transmission : élément qui permet la transmission de l'énergie du moteur à l'organe de travail.
- L'organe de travail : un élément qui réalise la fonction du système (actionneurs).

- Un organe de contrôle : élément indispensable pour assurer le fonctionnement du système. Le terme contrôle signifie « changer les propriétés d'un objet de manière désirée » (Altshuller 1984).

Si l'un des éléments ci-dessus manquait ou son fonctionnement serait insuffisant, alors le système serait incapable de « fonctionner ». La figure A1.2 représente les éléments de cette première loi.

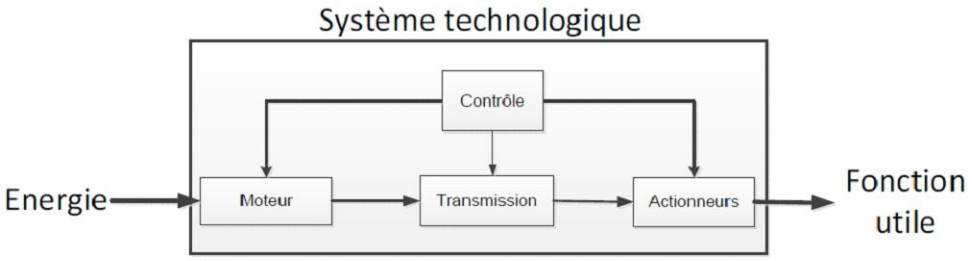



*Figure A1.2 : Les éléments indispensables d'un système technique.*

**Deuxième loi** : loi de la conductivité énergétique. Une condition indispensable pour la viabilité et le fonctionnement d'un système est le libre passage de l'énergie à travers tous les éléments du système (Altshuller 1984). En conséquence, les systèmes technologiques évoluent vers l'amélioration de l'efficacité de transmission de l'énergie du moteur à l'organe de travail. La transmission peut être réalisée grâce à une substance (e.g. un arbre de transmission), un champ (e.g. champ magnétique) ou un champs-substance (e.g. un flux de particules chargées) (Kaplan 1996). La sélection du type de transmission d'énergie est un problème inventif récurrent. Le but peut être également de minimiser le nombre de transformation de l'énergie sur le trajet énergétique et/ou de minimiser la quantité d'énergie nécessaire.

**Troisième loi** : coordination du rythme des parties d'un système technologique. Une condition indispensable pour la viabilité et le fonctionnement d'un système est la coordination ou la discordance intentionnelle du rythme (fréquence naturelle, vibration, périodicité) de toutes ses parties. Un grand nombre de contradictions et de fonctionnements irréguliers ont un lien de casualité avec la coordination des rythmes d'un système technologique (Cortes Robles 2006).

### A1.1.2.2 Les lois cinématiques

Les lois cinématiques prennent en compte les lois qui définissent des systèmes techniques sans considérer les facteurs techniques et physiques concrets déterminant cette évolution (Dubois 2004).

**Quatrième loi** : augmentation du niveau d'idéalité d'un système technologique. Le développement d'un système technologique tend vers l'idéalité (Altshuller 1984). Un système idéal est celui qui réalise sa fonction principale utile, mais n'utilise pas de ressources, n'a aucun coût et ne produit aucun effets nuisibles. Le degré d'idéalité d'un système est défini par le rapport entre les effets utiles du système (des fonctionnalités du système) et les effets nuisibles (coût du système, énergie

nécessaire, l'espace utilisé) provoqués par la réalisation des effets utiles (Kaplan 1996). Ce rapport est représenté sur la figure A1.3.

$$\textbf{Degré d'idéalité} = \frac{\sum \text{Effets utiles}}{\sum \text{Effets nuisibles}}$$

*Figure A1.3 : Le degré d'idéalité.*

**Cinquième loi** : développement inégal des parties d'un système technologique. Les parties d'un système technologique se développent de manière inégale. Plus le système est complexe, plus le développement de ses parties est inégal (Altshuller 1984). Le développement inégal est la cause de l'occurrence des contradictions techniques et physiques. De nous jours, le développement inégal entre les aspects économiques, et environnementaux dans le développement d'un produit ou d'un procédé est la cause d'une grande partie des problèmes environnementaux actuels ce qui provoque l'occurrence des « contradictions environnementales ».

**Sixième loi** : la transition du système vers un super – système. Apres d'avoir épuisé toutes les possibilités de développement d'un système, son développement ultérieur aura lieu au niveau du super-système (Altshuller 1984). Dans ce cas, la fonction du sous- système est réalisée par le super-système. Suite à ce développement, le super-système améliore sa performance (Kaplan 1996). Un exemple de la transition vers un super système est la combinaison de la cellule solaire et le système d'électrolyse vers un même système (figure A1.4).

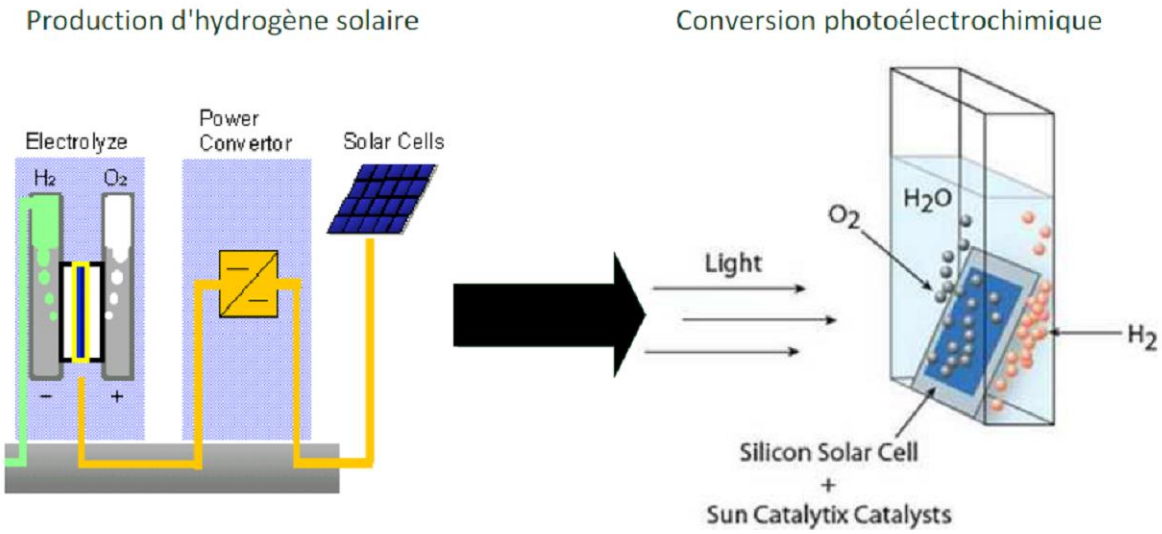



*Figure A1.4 : Transition du système vers un super – système.*

### A1.1.2.3 Les lois dynamiques

Les lois dynamiques décrivent les tendances d'évolution des systèmes techniques actuels. A l'inverse, les lois statiques et cinématiques décrivent les tendances

d'évolution de tout type de systèmes, techniques ou non (biologiques, sociaux, etc.) (Dubois 2004).

**Septième loi** : transition d'un macro niveau vers un micro niveau. L'organe de travail des systèmes techniques évolue d'abord au niveau macro puis au niveau micro. Cela signifie que les systèmes ont tendance à changer leur principe de fonctionnement en utilisant des objets plus fractionnés : molécules, atomes, électrons, etc. (Altshuller 1984). Ce type de transition permet une diversification des fonctions et caractéristiques du système, et un meilleur contrôle (Cortes Robles 2006). Selon Altshuller, c'est la tendance principale des systèmes technologiques (Altshuller 1984). Sur la figure A1.5, nous pouvons noter l'évolution du système d'usinage de métaux : le point de départ est une fraiseuse, puis la découpe au plasma et finalement la découpe laser.

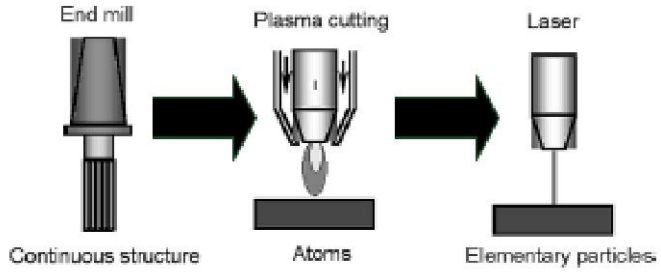



*Figure A1.5 : Transition d'un macro niveau vers un micro niveau (Fey et Rivin 2005).*

**Huitième loi** : l'augmentation de l'utilisation d'un champs-substance. L'évolution des systèmes techniques est toujours vers l'augmentation de l'utilisation de champs et de substances plus contrôlables. Ainsi, par exemple, la transition d'un champ mécanique vers un champ électromécanique dans l'ouverture d'une porte d'un bâtiment augmente l'automatisation du processus d'ouverture.

Parallèlement, plusieurs autres auteurs (Kaplan 1996), (Fey et Rivin 2005), (Savransky 2000) ont identifié des tendances complémentaires aux lois d'évolution. Par exemple, la loi d'augmentation du dynamisme : les systèmes techniques évoluent toujours vers l'augmentation du niveau de dynamisme et de flexibilité de sa structure qui permet une adaptabilité à différentes exigences ou conditions. Ainsi, la transformation d'un système rigide en un système dynamique permet d'aboutir à une structure plus flexible et adaptable aux changements.

### *A1.1.3 Idéalité et le Résultat Idéal Final (RIF)*

L'analyse des brevets et la définition des lois d'évolutions ont révélé que les systèmes techniques évoluent vers l'augmentation de leur degré d'idéalité. Le concept d'idéalité n'est pas uniquement utilisé dans la théorie TRIZ, il est plus largement utilisé afin de développer des théories axiomatiques et d'analyse d'objets réels, comme par exemple le concept de gaz idéal (Dubois 2004). Dans la théorie TRIZ, le concept d'idéalité peut être utilisé comme un critère pour évaluer la solution obtenue. Dans ce cas, l'idéalité est définie comme la relation entre les effets utiles et les effets nuisibles produits par le système (figure A1.3). Ainsi, un système idéal est

un système qui réalise sa fonction principale (effet utile) mais qui n'utiliserait pas de ressources, ne produirait pas d'effets nuisibles (Altshuller 1984).

Le concept d'idéalité peut également être utilisé comme un point de référence vers la direction à prendre lors de la résolution d'un problème. Dans ce cas, il est utilisé dans le résultat idéal final (RIF). Selon Altshuller « *Le RIF est une fantaisie de l'esprit, un rêve. Il est inaccessible, mais il ouvre la voie vers la résolution du problème* » (Cortes Robles 2006). En effet, le RIF permet d'éliminer certaines barrières psychologiques du concepteur et ainsi de trouver des solutions alternatives sans compromis. Avec le RIF le concepteur imagine une solution au-delà de la réalité technologique : une machine idéale, un procédé idéal ou la substance idéale. Cette réflexion oriente le concepteur vers une analyse différente du problème : définir les fonctions à réaliser, les systèmes à améliorer, et identifier les contraintes principales. Finalement grâce à cette réflexion, le concepteur peut formuler le résultat idéal final : un élément du système ou de l'environnement a la capacité d'éliminer, par lui-même, l'effet non désiré, en préservant sa capacité à réaliser la fonction principale sans nouveaux désavantages (Cortes Robles 2006). Le but principal du RIF est d'aider le concepteur à vaincre la rigidité de la pensée ou l'inertie psychologique (décrite par la suite) et donne la capacité pour produire des solutions plus inventives.

Sur l'exemple du double vitrage d'une fenêtre (brevet US 22 283 581) (Lowry 1938), l'objectif est d'améliorer l'isolation thermique. Dans ce cas le concept d'idéalité donne : il est nécessaire d'introduire une substance idéale qui permet de fournir le maximum d'isolation thermique sans modifier la fenêtre (e.g. sans trop augmenter son épaisseur pour réduire le transfert de chaleur). Ce concept de idéalité guide le concepteur vers la cherche d'une substance presque idéale : l'air qui est un excellent isolant thermique et le plus économique (il ne coute rien). L'idée importante dans cet exemple est que la solution proposée est proche de l'idéalité (réalise une fonction désirée et elle est gratuite), le système ne change pas radicalement.

### *A1.1.4 Inertie psychologique*

Le moment le plus créatif mais aussi le plus difficile pour un concepteur est la recherche d'idées afin de générer des solutions. Le défi est de proposer des alternatives de solutions et de choisir la plus appropriée. La plupart du temps, l'étape de génération des idées suit « le vecteur de inertie psychologique » (Altshuller 1984), représenté sur la figure A1.6. Le concepteur suit certaines directions de recherche ou schémas de pensée, généralement dictés par son expertise, sa connaissance, ses expériences passées ou ses habitudes de raisonnement (Dubois 2004). Ce vecteur présente également une résistance au changement et à l'acceptation des idées hors de l'expertise du concepteur. Ce comportement est dénommé inertie psychologique qui est considérée comme une rigidité de la pensée ou la tendance humaine de chercher des idées dans son propre domaine d'expérience. Par exemple, quand l'ingénieur en mécanique fait face à un problème, il cherche des solutions dans son propre domaine et accepte difficilement des solutions hors de son expertise comme des idées provenant de l'industrie chimique. De plus, cette inertie psychologique altère la vision de certains phénomènes que l'on l'appelle « la diabolisation des effets ». Par exemple, ce même ingénieur en mécanique sait que la cavitation est un

effet indésirable dans les pompes centrifuges et l'idée de l'utiliser comme un effet utile est hors de sa perception du phénomène. Ainsi, l'inertie psychologique est considérée comme le principal obstacle à la créativité, elle limite la pensée ou nous emprisonne dans notre propre schéma de pensée en limitant la recherche de solutions inventives seulement au domaine de notre propre expertise.

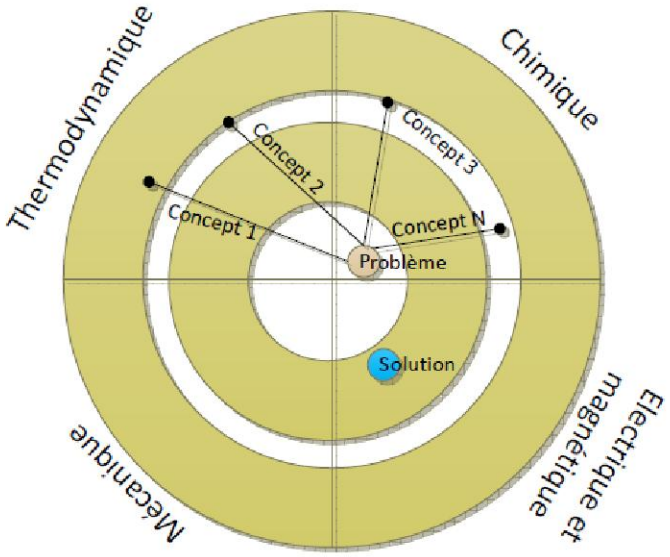



*Figure A1.6 : Le vecteur de l'inertie psychologique.*

Afin d'éliminer l'inertie psychologique, la théorie TRIZ apporte certains éléments : remplacer tous les jargons spécialisés par des mots plus simples sans connotation. Il faut donc faire une abstraction du domaine comme par exemple : remplacer « souder » deux pièces métalliques par unir les pièces. Par ailleurs, la théorie TRIZ possède différents outils spécialisés afin de surmonter l'inertie psychologique, comme par exemple les hommes miniatures et les operateurs temps, espace et coût qui seront décrits ultérieurement.

Selon Salamatov (Salamatov 1999), il existe trois types d'inertie psychologique :

- Inertie terminologique.
- Inertie d'image.
- Inertie causée par l'orientation fonctionnelle spécifique.

Finalement, Dubois propose quelques règles afin de réduire l'inertie psychologique (Dubois 2004):

- Ne jamais être persuadé que la solution réside dans le domaine de notre propre expertise.
- Favoriser la multidisciplinarité.
- Identifier les termes ou expressions porteurs de l'inertie psychologique et les replacer par d'autres termes neutres.
- Respecter toutes les idées, même les plus fantaisistes.

### *A1.1.5 Le concept de contradiction*

La différence entre un problème inventif et un problème routinier est que l'inventeur doit résoudre le problème en éliminant au moins une contradiction (Altshuller 1984). En général, la contradiction est décrite comme l'opposition entre deux paramètres incompatibles (Savransky 2000). Le concept de contradiction n'est pas exclusif à la théorie TRIZ, il existe dans tous les domaines de la science. La résolution des contradictions est considérée comme une méthode universelle de résolution de problèmes. La théorie TRIZ considère que les solutions les plus inventives sont celles qui surmontent une ou plusieurs contradictions. Ainsi, une contradiction surgit lorsque deux exigences ou besoins d'un système technologique sont mutuellement exclusifs, mais doivent être associés pour concourir au même objectif. Donc, les systèmes technologiques évoluent en éliminant les contradictions qui empêchent son développement (Altshuller 1996). Altshuller définit trois types de contradictions : la contradiction administrative, la contradiction technique et la contradiction physique.

De nous jours, selon Svransky (Savransky 2000) cette classification n'est plus appropriée car il est difficile d'y intégrer des domaines non techniques. Toutefois, dans le cadre de ce manuscrit nous sommes intéressés par l'aspect technique de la théorie TRIZ, par conséquent, nous garderons cette classification

#### A1.1.5.1 Contradiction administrative

Cette contradiction définit la situation problématique de manière superficielle ou générale. Le problème est formulé comme une action nécessaire afin de réaliser une nouvelle fonction, améliorer un effet existant ou éliminer un effet non désiré, mais les questions sur comment aborder le problème et comment le résoudre n'ont pas de réponses. Le problème parait d'une grande difficulté car il n'existe pas encore de direction de recherche de solution, par conséquent, une analyse plus détaillée sera nécessaire.

#### A1.1.5.2 Contradiction technique

Cette contradiction existe lorsqu'un paramètre utile d'un système est amélioré, mais il provoque la dégradation inadmissible d'un autre paramètre du système (Altshuller 1996). En général, les méthodes de résolution abordent ce problème en essayant d'établir un compromis entre les paramètres contradictoires. En revanche dans TRIZ, le but est de satisfaire les deux paramètres, et donc la contradiction doit être éliminée sans compromis. La formulation de la contradiction présente une grande difficulté car la plupart du temps elle est cachée dans la description du problème. Si elle est mal définie, elle peut guider le concepteur vers des solutions inappropriées. En reprenant l'exemple de l'isolation thermique d'une fenêtre, on peut identifier la contradiction suivante : si l'on augmente l'épaisseur de la fenêtre, l'isolation thermique augmente, mais le poids et le coût augmente également (effets non désirables).

La plupart du temps ces contradictions représentent un conflit entre deux sous-systèmes (Savransky 2000) et se produisent si :

- L'amélioration ou la création d'une fonction utile dans un sous-système occasionne une fonction inutile ou accroit les effets d'une fonction inutile déjà existante dans un autre sous-système.
- L'élimination ou la réduction d'une fonction inutile ou non désirée dégrade une fonction utile dans un autre sous-système.
- L'intensification d'une fonction utile ou la réduction d'une fonction inutile d'un sous-système augmente la complexité d'un sous-système voire même du système complet.

#### A1.1.5.3 Contradiction physique

Ce type de contradiction exprime que certains paramètres du système doivent avoir deux états mutuellement exclusifs ou deux propriétés opposées (la propriété A et la propriété anti-A) afin de satisfaire les exigences du problème. La propriété du système se contredit elle-même. Savransky (Savransky 2000) affirme que de telles contradictions apparaissent si :

- L'intensification d'une fonction utile d'un sous-système provoque simultanément l'intensification d'une fonction inutile dans le même sous-système.
- La réduction d'une fonction inutile d'un sous-système cause simultanément la réduction de la fonction utile du système.

Ainsi, l'intensification ou la réduction d'une fonction se résument de trois manières différentes (Cortes Robles 2006):

- L'exécution d'une fonction et la non-exécution d'une fonction.
- Une valeur d'une caractéristique et une valeur opposée.
- La présence et l'absence d'un élément.

Un exemple d'une contradiction physique est apparu lors du développement de l'aquarium le plus grand du monde à Dubaï : les différentes espèces de poisson doivent être ensembles dans l'aquarium, mais doivent être séparées à cause de certains prédateurs qui menacent la vie d'autres espèces de poissons (la résolution de cette contradiction est décrite dans la suite de ce manuscrit).

#### A1.1.5.4 La relation entre la contradiction technique et la contradiction physique

Kaplan (Kaplan 1996) représente la relation existante entre la contradiction technique et la contradiction physique de la manière suivante : afin d'améliorer un paramètre A d'un sous-système, il est nécessaire de changer un autre paramètre dénommé paramètre de contrôle (C). Dans le même temps le paramètre de contrôle affecte négativement un autre paramètre (B). Donc la contradiction technique est représentée par le conflit entre les paramètres A et B. Par exemple, afin d'améliorer la résistance d'un matériau (paramètre A), il est nécessaire d'augmenter l'épaisseur du système (paramètre C). Lorsque le paramètre C augmente, le poids du système augmente (paramètre B) qui est un effet non désiré. La contradiction physique est présentée par le paramètre de contrôle C, c'est-a-dire, nous devons augmenter le paramètre C afin d'améliorer la résistance, mais dans un même temps il faut diminuer le paramètre C afin de réduire le poids du système. C'est de cette façon que nous pouvons identifier dans un problème inventif le lien entre la contradiction technique et la contradiction physique. Cela permet de transformer un problème spécifique en un ensemble de problèmes inventifs sous la forme de contradictions

physiques. La figure A1.7 représente la relation entre la contradiction physique et la contradiction technique.

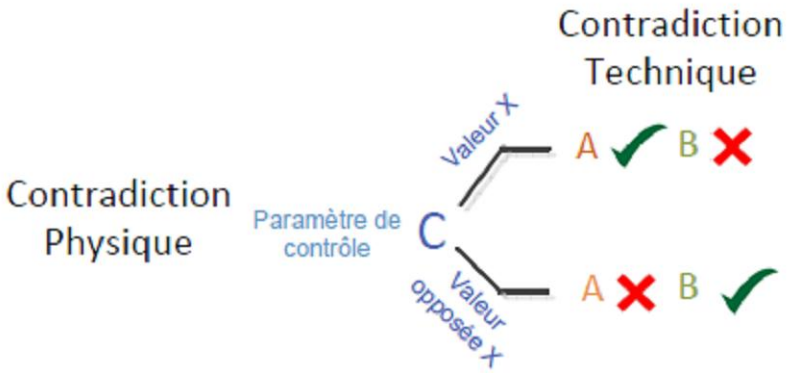



*Figure A1.7 : Relation entre contradiction physique et technique.*

### *A1.1.6 Les ressources*

Dans la théorie TRIZ, une ressource est une substance (y compris les déchets et le vide), un champ, le temps disponibles dans le système ou son environnement et susceptibles d'être utilisés afin de réaliser une fonction utile (Terninko et al. 1998). Les ressources jouent un rôle important car elles permettent de générer de nouvelles idées, résoudre les contradictions et guider l'évolution d'un produit, un procédé ou une technologie (Cortes Robles 2006). Ceci implique l'utilisation de manière créative des ressources existant dans le système et son environnement ou des ressources dérivées des premières (création de nouvelles ressources par réaction chimique par exemple). Un grand nombre de problèmes inventifs sont résolus grâce à l'utilisation de ressources, pour cette raison il est important de les identifier. Les ressources peuvent donc être classifiées de la manière suivante (Savransky 2000) :

- Ressource de temps : les intervalles de temps avant, pendant et après de la réalisation d'une fonction.
- Ressources d'espace : la relation, la position, l'emplacement dans l'espace d'un sous système, d'un système ou super système.
- Ressources de l'environnement : toute substance ou tout champ existant dans la nature.
- Ressources du système : toutes les propriétés nouvelles ou existantes d'un système.
- Ressources fonctionnelles : toutes les substances d'un système ou l'environnement capables de réaliser une fonction additionnelle.
- Ressources énergétiques : tous les différents types d'énergie existant dans un système ou produit par le système.
- Ressources matières : toutes les substances et leurs propriétés existantes dans un système ou produites par le système

Après la formulation du problème, les ressources sont identifiées et sélectionnées afin de résoudre le problème, la sélection est basée selon certains critères tels que (Orloff 2003) :

- Valeur : gratuite, bon marché, coûteuse.
- Qualité : utile, neutre, néfaste.
- Quantité : illimitée, suffisante, insuffisante.
- Disponibilité : prête à utiliser, doit être modifiée, doit être développée.

Les ressources sont d'importance vitale dans les systèmes techniques, comme le décrit Cortes Robles ( 2006) :

- *Il y a un nombre limité de voies de solution pour remplir une fonction, et celles-ci sont basées sur l'utilisation des ressources.*
- *Les directions d'évolution d'un système technologique sont limitées, et celles-ci sont basées sur l'utilisation et la consommation des ressources présentes dans le système. Cette consommation est hiérarchisée : d'abord seront utilisées les ressources facilement disponibles, suivent les ressources dérivées, et enfin les ressources complexes ou cachées.*

## A1.2 LES OUTILS DE LA THEORIE TRIZ

Différents outils ont été développés afin d'analyser, formuler et résoudre les problèmes à l'aide de la théorie TRIZ. Ces outils sont classés en tant que : outils de déblocage de l'inertie phycologique, outils de modélisation, et outils de résolution. Nous allons présenter ces différents outils.

### *A.1.2.1 Neuf écrans*

Les neuf écrans est un outil d'analyse d'un système technique à travers son évolution avec une approche systémique. Traditionnellement, le concepteur regarde le système comme un objet statique, le but des neuf écrans est de visualiser l'évolution des systèmes selon deux perspectives : temporelle et spatiale. Sur l'aspect spatial, au lieu d'analyser l'objet lui-même, il faut le regarder en liaison avec son super système, mais aussi au travers de ses sous-systèmes … Au niveau temporel, l'évolution (passée, présente, future) de chacune des 3 perspectives spatiales doit être envisagée (Savransky 2000). Finalement, les deux perspectives construisent à neufs écrans du système (A1.8) qui décrivent l'évolution du système. L'objectif des neufs écrans est de décrire plusieurs visions de niveaux systémiques différents qui permettent d'analyser l'évolution suivie par le système, mais aussi la transition entre les différentes étapes du système et les contradictions qui ont été résolues (Cortes Robles 2006). Cette analyse permet également d'envisager quelles seront les contradictions futures et de prévoir le future développement du système.

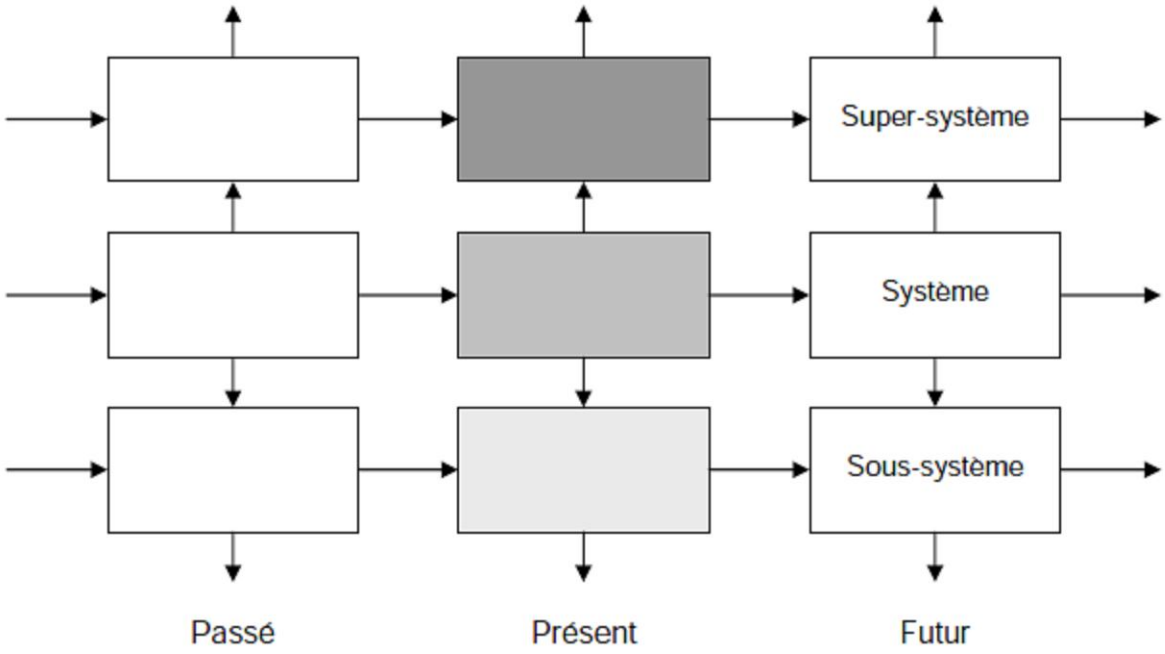



*Figure A1.8 : Les neufs écrans.*

A noter que l'outil ne se limite pas aux neufs écrans, mais il est envisageable d'augmenter le nombre d'écrans selon les deux dimensions. La difficulté principale de cet outil vient de l'augmentation du système et de la détermination du pas de discrétisation spatial ou temporel.

### *A1.2.2 Operateurs Dimension-Temps-Coût (DCT)*

Cet outil est utilisé dans l'analyse du problème afin de combattre l'inertie psychologique qui empêche l'imagination et la créativité humaine, mais aussi de passer outre l'image préconçue que l'on se fait du système (Altshuller 1996). L'outil DCT crée différents scenarios où les conditions du système sont poussées aux extrêmes suivant trois opérateurs : Temps, Dimension et Coût. Il en résulte six scenarios hypothétiques qui maximisent et minimisent les effets d'un paramètre physique, temporel ou fonctionnel. Ces six différents scenarios obligent le concepteur à imaginer les systèmes selon différentes perspectives non habituelles grâce à une distorsion de la réalité et créent de nouvelles directions de recherche lors de la résolution d'un problème (Altshuller et Rodman 1999). Chaque scenario est composé d'une question qui permet d'imaginer une situation exagérée du comportement du système quand le paramètre est changé. Ces scenarios sont décrits dans le tableau suivant (Cortes Robles 2006) :

| Scenario | Description de la question |
|---|---|
| Dimension →∞ | La taille d'un objet, système ou sous-système augmente infiniment. Que va-t-il se passer si les dimensions de l'objet où se localise le problème augmentent? |
| Dimension →0 | Les dimensions du problème ou système sont réduites jusqu'à zéro (D→0). Quelles seront les conséquences, si au contraire, la dimension diminue ? |
| Temps →∞ | La vitesse de l'objet (de changement, de déplacement, de réaction, etc.) augmente à l'infini. Que va-t-il se passer si l'action dans le système s'exécute de plus en plus lentement ? |
| Temps→0 | Si le système opère en un rien de temps T→0. Que va-t-il se passer si l'action analysée, se réalise à une vitesse de plus en plus rapide? Si elle s'exécute quasi instantanément ? |
| Coût →∞ | Le coût d'un objet augmente à l'infini C→∞. Le coût (d'opération, de fabrication, de maintenance, etc.) de la machine / objet où le problème est identifié, devient inabordable ? |
| Coût →0 | Le système a une valeur nulle C→0. Le coût (d'opération, de fabrication, de maintenance, etc.) de la machine ou objet où le problème est localisé, devient infime et négligeable ? |

*Tableau A1.1 : Les six scenarios du DTC.*

Cet outil permet au concepteur de percevoir d'une manière différente le système à développer et permet de briser les stéréotypes psychologiques, mais il est limité à trois paramètres. Néanmoins, il est possible d'appliquer les mêmes operateurs aux autres paramètres et donc d'augmenter les scenarios possibles et les directions de recherche de solutions.

### *A1.2.3 Les hommes miniatures*

Les hommes miniature est un autre outil afin surmonter l'inertie psychologique. Cet outil est basé sur la méthode de l'empathie ou l'analogie personnelle proposée par William Gordon dans les années 60. Dans cette méthode le concepteur s'imagine à l'intérieur du système ou réalisant l'action du système où se localise le problème. Ceci permet de créer différents points de vue du problème et des directions de recherche de solution (Altshuller 1996). Néanmoins, l'empathie présente des inconvénients notamment lorsque le concepteur donne certaines émotions humaines au système. En conséquence, il donne des préférences à certaines actions confortables et évite des situations qui ne sont pas acceptables pour l'être humain comme la destruction, la séparation des parties ou une température supérieure à 100º C. Finalement, toutes les situations qui pour un être vivant ne sont pas imaginables ou dangereuses.

Son utilisation est très simple, il faut s'imaginer le système comme un ensemble d'hommes de petite taille (microscopique), au travers de ces petits hommes le concepteur peut observer le système depuis l'intérieur. Ces petits hommes peuvent se comporter selon les envies du concepteur, ils peuvent se diviser, s'organiser, changer de couleur, etc. Ceci lui permet d'éliminer les inconvénients de l'empathie,

de surmonter l'inertie psychologique et de développer l'imagination afin de mieux affronter un problème.

Les étapes à suivre pendant l'utilisation des hommes miniatures sont les suivantes (Altshuller 1984) :

- Délimiter la zone de l'objet qui ne réussit pas à réaliser l'action souhaitée (contradiction), puis l'imaginer sous la forme d'hommes miniatures.
- Diviser les hommes miniatures en différents groupes qui se comportent selon les spécifications du problème, par exemple en mouvement, flexibles, statiques, etc.
- Analyser le modèle obtenu dans l'étape précédente puis, reconstruire un autre modèle afin d'obtenir l'action voulue ou le comportement souhaité (résolution de la contradiction).
- Transférer la situation désirée en une solution technique.

L'analyse des hommes miniatures est représentée sur deux diagrammes différents : celui de la situation problématique et, un autre avec le comportement souhaité (solution idéale). Il est également possible d'inclure un troisième diagramme qui représente la situation résolue (solution technique). La figure A1.9 montre l'exemple de l'utilisation des hommes miniature. Dans la situation problématique, les hommes miniatures représentent les mâchoires d'un étau qui ne peuvent être adaptes à la forme géométrique de la pièce à saisir. Dans la solution idéale les hommes miniatures s'adaptent facilement à la forme de la pièce à serrer. Ainsi, les hommes guident le concepteur vers une direction de recherche de concept de solution. La solution de cet exemple est décrite dans la suite de ce manuscrit.

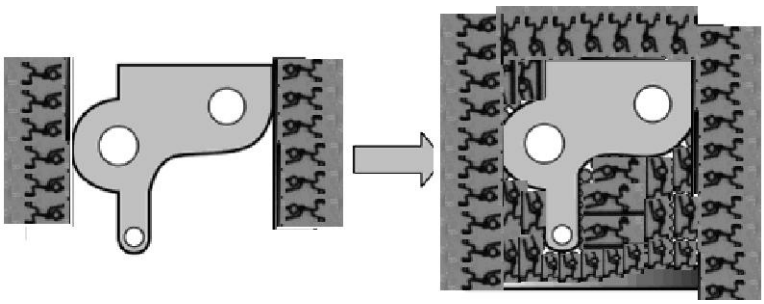


*Figure A1.9 : Les hommes miniatures.*

### *A1.2.4 L'utilisation de mots simples*

Un des freins à la créativité est l'utilisation de termes spécifiques, car ils peuvent imposer une direction spécifique dans la recherche de concepts de solutions (inertie psychologique). Dans la théorie TRIZ, une des règles est de remplacer les termes spécifiques par des mots simples afin de réduire l'inertie psychologique. Ce processus dénommé méthode des mots simples est décrit comme :
« *La méthode des mots simples consiste à définir et exprimer une contradiction ou situation problématique, puis à remplacer les mots ou expressions porteurs de l'inertie psychologique, par d'autres plus neutres* » (Cortes Robles 2006).

### *A1.2.5 La matrice de résolution des contradictions techniques*

Régulièrement, la résolution de problèmes est basée sur des expériences passées au travers d'un raisonnement par analogies, c'est-à-dire, la personne qui est confrontée à un nouveau problème cherche des similitudes avec des problèmes résolus précédemment. La capacité à résoudre les problèmes par analogie dépend des expériences accumulées (Terninko et al. 1998). Ainsi, quand la personne fait face à un problème similaire, elle peut arriver facilement à une solution grâce à ses expériences. Néanmoins, quand la personne doit résoudre un problème qu'elle n'a jamais rencontré, elle utilise en général, la méthode d'essais-erreurs ou le brainstorming afin d'arriver à une solution. Ces méthodes exigent de nombreuses itérations pour générer une solution. Pour éliminer ce désavantage, il existe une approche plus efficiente qui consiste en la recherche de problèmes standards et leurs solutions associées : la matrice de contradictions techniques est un des outils de la théorie TRIZ basés sur ce mode de fonctionnement par analogie.

**Les 40 principes de solution**

Lors de l'analyse de brevets sur la recherche d'invariants de solutions, Altshuller a déterminé les grandes voies de solution que les inventeurs avaient mis en pratique pour résoudre leurs problèmes : les 40 principes de solution (Altshuller 1984). Chaque principe est une suggestion générique (abstraite et non pas une solution spécifique), une ligne directrice pour résoudre de façon inventive les problèmes. En revanche, ils limitent le domaine de recherche d'une solution en préconisant des directions privilégiées à explorer. Par exemple pour le problème d'isolation thermique d'une fenêtre, on applique le principe « intermédiaire » qui a également été utilisé dans le développement de la piscine olympique « Cube d'eau » (Gonchar 2008) afin de contrôler la température à l'intérieur de la piscine (figure A1.10).

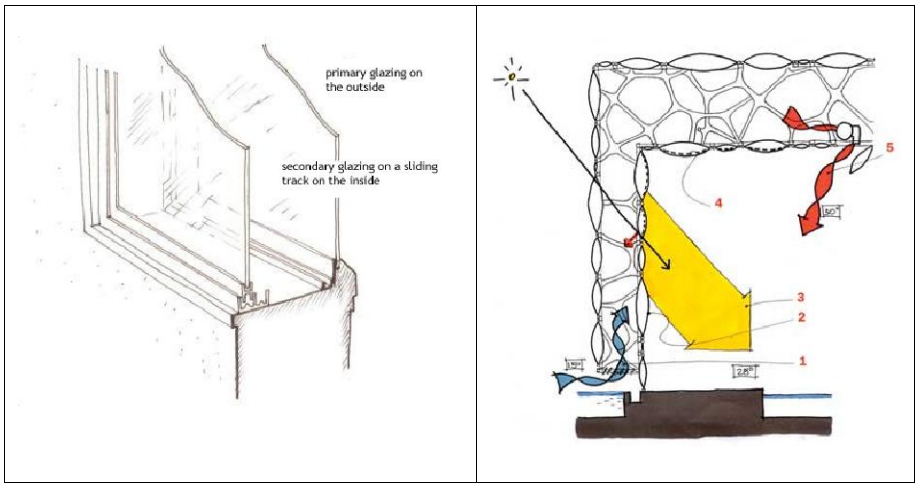



*Figure A1.10 : L'utilisation du principe « intermédiaire ».*

Il faut noter que les 40 principes ne donnent pas de solutions « prêtes à emplois », ils restreignent le domaine de recherche de solution afin de transformer le système technique ou le procédé technique porteur de la contradiction (Cortes Robles 2006). Les 40 principes sont listés dans le tableau 1.2.

| Principes | | | |
|---|---|---|---|
| La segmentation | 1 | Changement de vitesse | 21 |
| L'extraction | 2 | La transformation d'un plus en moins | 22 |
| La qualité locale | 3 | La rétroaction | 23 |
| L'asymétrie | 4 | L'intermédiaire | 24 |
| La combinaison | 5 | Le self service | 25 |
| L'universalité | 6 | La copie | 26 |
| Le placement interne (poupées russes) | 7 | L'éphémère et l'économique | 27 |
| Le contrepoids | 8 | La reconception | 28 |
| L'anti-action préliminaire | 9 | Le système hydraulique et pneumatique | 29 |
| L'action préliminaire | 10 | La membrane flexible et les films minces | 30 |
| La compensation | 11 | Les matériaux poreux | 31 |
| L'équipotentialité | 12 | Le changement de couleur | 32 |
| L'inversion | 13 | L'homogénéité | 33 |
| La sphéricité – courbes | 14 | Le rejet et la régénération | 34 |
| Le degré de dynamisme | 15 | La modification des paramètres | 35 |
| Actions partielles ou excessives | 16 | L'utilisation des changements de phase | 36 |
| Le changement de dimension | 17 | L'expansion thermique | 37 |
| Les vibrations | 18 | L'oxydation | 38 |
| L'action périodique | 19 | L'environnement inerte | 39 |
| La continuité de l'action d'utilité | 20 | Les matériaux composites | 40 |

*Tableau A1.2 : Les 40 principes inventifs.*

**Les 39 paramètres**

Suite à l'analyse de brevets, Altshuller a constaté que les problèmes inventifs sont associés à une contradiction entre des paramètres d'un système technique. Cette analyse révélait également que dans les brevets de différents domaines, il y a une similitude entre les paramètres associés aux contradictions et que les solutions utilisées dans ces différents domaines étaient d'une même nature. En conséquence, il était possible de les généraliser afin de construire une méthode de résolution de contradictions. Ainsi, Alshuller a identifié 39 paramètres d'ingénierie couramment rencontrés dans les systèmes et qui sont à l'origine des contradictions. La contradiction exprime un problème d'incompatibilité entre deux valeurs de paramètre dans la zone opérationnelle. Elle est donc formalisée par une paire de ces paramètres. Le premier traduit la caractéristique que l'on cherche à améliorer tandis que le second matérialise la dégradation inacceptable causée sur le système.

Les 39 paramètres peuvent être divisés en 3 groupes (Cortes Robles 2006) :

- Paramètres physiques et géométriques : la masse (1et 2), la longueur (3 et 4), la surface (5 et 6), le volume (7 et 8), la vitesse (9), la force (10), la tension et pression (11), la forme (12), la température (17), la brillance (18) et la puissance (21)
- Paramètres négatifs : la durabilité d'une action (15 et 16), l'énergie dépensée (19 et 20), le gaspillage (22 et 23), la perte (24 et 25), la quantité de substance (26) et les facteurs nuisibles (30 et 31).
- Paramètres positifs : stabilité (13), la résistance (14), la fiabilité (27), la précision (28 et 29), l'usinabilité (32), la facilité d'utilisation (33), l'aptitude à la

réparation (34), l'adaptabilité (35), la complexité (36 et 37), le degré d'automatisation (38) et la productivité (39).

Les 39 paramètres génériques sont listés dans le tableau 1.3.

| Paramètres d'ingénierie | | | |
|---|---|---|---|
| Masse d'un objet mobile | 1 | Puissance | 21 |
| Masse d'un objet immobile | 2 | Gaspillage d'énergie | 22 |
| Longueur d'un objet mobile | 3 | Gaspillage de substance | 23 |
| Longueur d'un objet immobile | 4 | Perte d'information | 24 |
| Surface d'un objet mobile | 5 | Perte de temps | 25 |
| Surface d'un objet immobile | 6 | Quantité de substance | 26 |
| Volume d'un objet mobile | 7 | Fiabilité | 27 |
| Volume d'un objet immobile | 8 | Précision de la mesure | 28 |
| Vitesse | 9 | Précision de l'usinage | 29 |
| Force | 10 | Facteurs nuisibles agissant sur l'objet | 30 |
| Tension et pression | 11 | Facteurs nuisibles générés par l'objet | 31 |
| Forme | 12 | Facilité de fabrication | 32 |
| Stabilité d'un objet | 13 | Facilité d'utilisation | 33 |
| Résistance | 14 | Aptitude à la réparation | 34 |
| Durée de l'action d'un objet mobile | 15 | Adaptabilité | 35 |
| Durée de l'action d'un objet immobile | 16 | Complexité du système | 36 |
| Température | 17 | Complexité de contrôle | 37 |
| Brillance | 18 | Degré d'automatisation | 38 |
| Énergie dépensée par l'objet mobile | 19 | Productivité | 39 |
| Énergie dépensée par l'objet immobile | 20 | | |

*Tableau A1.3 : Les 39 paramètres d'ingénierie.*

**Matrice de résolution des contradictions techniques**

Ainsi, à partir des 39 paramètres et 40 principes de solution, Altshuller a développé sa première méthode de résolution de problèmes inventifs : la matrice de résolution des contradictions qui permet de résoudre un grand nombre de contradictions techniques sans compromis. L'idée de la création de la matrice était d'organiser la résolution de problèmes en partant du conflit entre deux paramètres d'un système (contradiction) puis de lui associer un ou plusieurs principes de solutions les plus prometteurs afin d'éradiquer la contradiction identifiée, évitant ainsi une énumération systématique de tous les principes. Une matrice 39*39 a été créée, qui correspond aux 39 paramètres génériques de l'ingénierie.

Le fonctionnement de la matrice est relativement simple : sur les lignes on identifie le paramètre à améliorer, sur les colonnes celui qui est détérioré suite à cette amélioration (formalisation de la contradiction). La cellule de la matrice se situant à la croisée de la ligne et de la colonne identifie un ou plusieurs principes (le numéro des principes) donnant des voies de recherche de solution à explorer, principes classés par ordre préconisé d'utilisation (figure A1.11). L'affectation des principes à une cellule vient de l'analyse des brevets. Pour une contradiction donnée lorsque le principe fût régulièrement utilisé (au-delà d'un seuil non connu) dans les brevets pour résoudre la contradiction alors il apparait dans la cellule. Cette matrice des contradictions contient 1201 problèmes génériques afin d'aider le concepteur à faire face aux problèmes inventifs.

L'algorithme pour l'utilisation de la matrice est le suivant :

1. Identification et traduction du conflit.
2. Traduction du conflit à l'aide des 39 paramètres.
3. Utilisation de la matrice pour identifier les principes.
4. Transformation des voies générales indiquées par les principes en proposition de concepts (phase d'expression de la créativité).

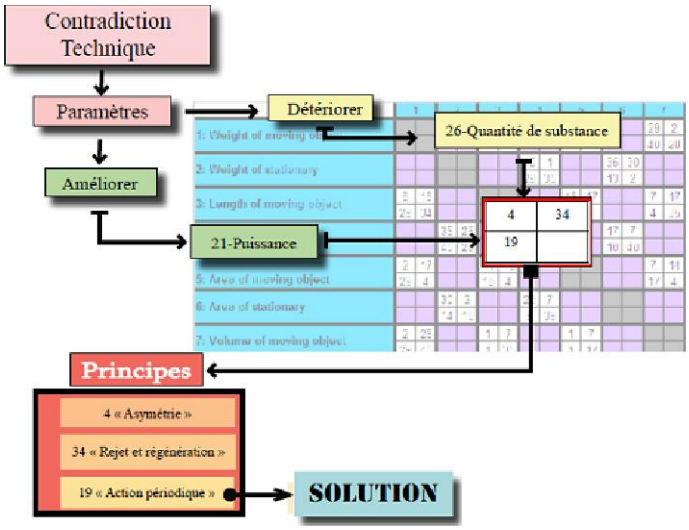



*Figure A1.11 : La matrice de résolution des contradictions techniques.*

### *A1.2.6 Résolution des contradictions physiques*

Une contradiction physique se traduit comme suit : « afin de fournir une fonction spécifique, un sous-système ou un composant, doit posséder la propriété A (fonction, caractéristique ou propriété, paramètre, etc.), et en même temps, il est nécessaire d'avoir la condition Anti-A la fonction opposée, pour satisfaire les conditions ou restrictions du problème » (Cortes Robles 2006). Les propriétés A et anti-A sont deux conditions mutuellement exclusives mais nécessaires afin de satisfaire le problème. La contradiction physique est considérée comme le cœur d'un problème inventif (Salamatov 1999). Par exemple, dans l'exemple de l'aquarium (A1.1.5.3) les poissons doivent être ensembles et en même temps séparés.
Étant donné qu'il n'est pas possible d'avoir simultanément deux conditions antithétiques, la seule façon de résoudre cette contradiction physique est de séparer les propriétés en conflit. Alshuller a proposé 11 principes de transformation physiques (Salamatov 1999) :

1. Séparation des propriétés contradictoires dans l'espace.
2. Séparation des propriétés contradictoires dans le temps.
3. Fusion de plusieurs systèmes : homogènes ou hétérogènes en un super système.
4. Fusion d'un système et son opposé (antisystème), ou transformation d'un antisystème vers un système.
5. Séparation des propriétés opposées entre le système et ses sous-systèmes.

6. Changement de phase d'une partie du système, ou de son environnement.
7. Transition d'un système vers le micro niveau.
8. Transition « dynamique » de phase d'un système selon les conditions de fonctionnement.
9. Utilisation des phénomènes associés aux changements de phase.
10. Remplacement d'une substance à une seule phase par une substance à deux voire plusieurs phases.
11. Transformation d'une substance par combinaison ou décomposition physico-chimique.

Néanmoins, plusieurs experts de TRIZ ont réduit ces 11 principes en 4 classes principales :

- Séparation dans l'espace.
- Séparation dans le temps.
- Séparation sur la condition.
- Séparation entre le système et ses composants.

#### A1.2.6.1 Transformation d'une contradiction technique en une contradiction physique

Comme nous l'avons mentionné précédemment, il existe une relation entre la contradiction technique et la contradiction physique. Parfois, il est plus favorable d'aborder un problème à partir d'une contradiction physique, mais malheureusement seule la contradiction technique a été identifiée. Dans ce cas, la contradiction technique doit être transformée en une contradiction physique. Pour ce faire, le processus à suivre est le suivant (Cortes Robles 2006) :

- Identifier le résultat désiré et le résultat non désiré.
- Identifier le composant, produit ou sous-système où se présente le problème.
- Exprimer cette interaction avec les phrases qui suivent :
    - Le facteur (nom) doit avoir lieu ou doit être (indiquer le paramètre « positif ») afin de (définir l'état désiré du système).
    - Le facteur (nom) ne doit pas avoir lieu ou ne doit pas être (indiquer le paramètre « négatif»), afin de (définir le deuxième l'état désiré du système).

Exemple : Dans l'exemple d'isolation thermique d'une fenêtre, la contradiction technique est décrite comme :
Si l'on augmente l'épaisseur de la fenêtre, l'isolation thermique augmente, mais son poids et son coût augmentent également.

En utilisant les étapes précédentes afin de transformer la contradiction technique en une contradiction physique on obtient :

- Le verre de la fenêtre doit être épais afin de réduire le flux de transferts de chaleur et ne doit être épais afin de faciliter son utilisation et sa fabrication.

#### A1.2.6.2 Séparation dans l'espace

Ce principe consiste à séparer les deux conditions mutuellement exclusives dans l'espace. Il faut essayer de diviser le système en sous systèmes de façon à assigner à chacun des sous systèmes une des conditions contradictoires (Terninko et al. 1998). Afin de déterminer si ce principe peut être utilisé, il faudra répondre au critère

suivant (Savransky 2000) : est-il nécessaire que le paramètre en question soit « positif » ou « négative » dans l'ensemble du système mais existe-t-il des composants ou des sections dans le système où cette condition n'est pas nécessaire ?

Exemple : dans le problème de l'aquarium : les différentes espèces de poisson doivent être ensembles dans l'aquarium, mais simultanément elles doivent être séparées à cause de certains prédateurs.

Solution : les poissons sont séparés grâce à un champ de pression. Ainsi, dans une même zone de pression les poissons prédateurs qui menacent les autres poissons ne viennent pas. La contradiction est résolue avec le principe de séparation dans l'espace : les poissons ne peuvent pas se mélanger car ils ne peuvent pas supporter la même pression de l'eau, mais en même temps ils sont dans le même aquarium.

#### A1.2.6.3 Séparation dans le temps

Ce principe consiste à séparer dans le temps les exigences contradictoires dans une contradiction physique. Il faut essayer de séparer les deux conditions dans le temps ou réarranger les opérations effectuées par le système. Afin de déterminer si ce principe peut être utilisé, il faudra répondre au critère suivant (Savransky 2000) : est-il nécessaire que le paramètre en question doit être tout le temps « positif » ou « négatif » dans le système ou existe-t-il des intervalles, durant lesquels cette condition n'est pas nécessaire ? Par conséquent, si un tel type d'intervalle existe, il est possible d'utiliser le principe de séparation dans le temps.

L'exemple de l'aiguille : pour faire passer un fil épais par le chat d'une aguille. Le chat doit être grand pour faire passer le fil, mais il doit également être petit pour faciliter la couture.

Solution : Une nouvelle conception d'une aiguille a été inventée, elle est composée par deux parties souples qui se croisent. Ainsi, quand il est nécessaire de faire passer un fil, une force est appliquée dans le sens contraire de la direction de la torsade, et donc un grand orifice apparait afin de faciliter l'insertion du fil. Puis, une fois le fils passé, l'aguille reprend sa forme initiale en retenant le fils (figure A1.12).

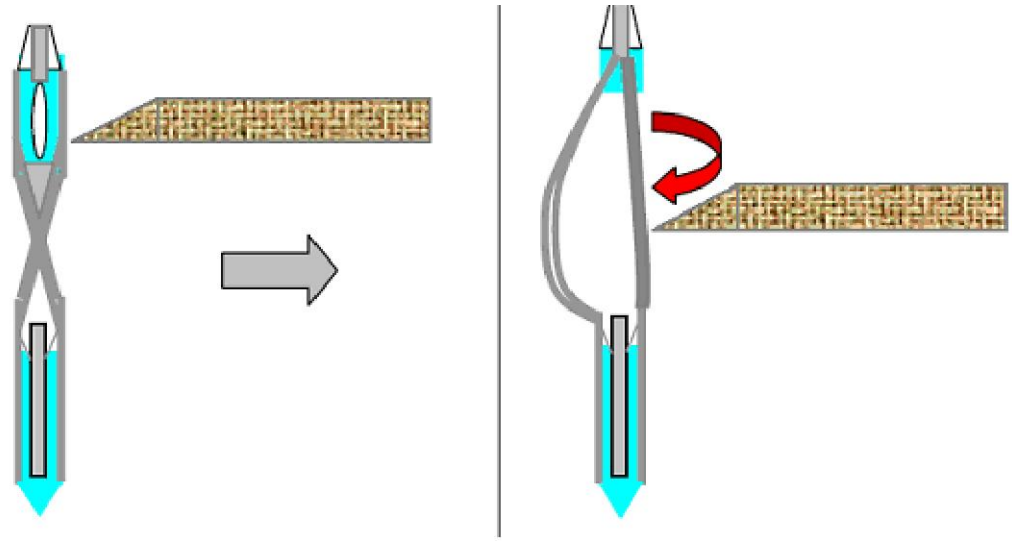


*Figure A1.12 : Le principe de séparation dans le temps (Cortes Robles 2006).*

### A1.2.6.4 Séparation sur les conditions

Cette contradiction se manifeste quand une fonction ou un état désiré du système est efficace sous certaines conditions mais il devient inefficace ou inefficient lorsque cette condition change. Par exemple, l'eau peut être considérée comme un objet « souple » ou « dur » en fonction de sa vitesse. A grande vitesse l'eau peut se comporter comme un objet « dur » capable de couper des objets comme les jets d'eau utilisés pour la découpe de plaques métalliques.

### A1.2.6.5 La séparation entre le système et ses composants.

Pour satisfaire les conditions contradictoires, il faut essayer de fractionner le système et de fournir une condition contradictoire à un sous-système (ou plusieurs sous-systèmes). De cette façon le système dans son ensemble conserve la fonction A tandis que le sous système a la fonction Anti A (anti-système) (Terninko et al. 1998).

Un exemple : Dans le fonctionnement d'un étau ordinaire les mâchoires de l'étau doivent être rigides pour serrer les objets, mais elles doivent être également flexibles afin de s'adapter aux différentes formes géométriques des pièces à saisir. Pour résoudre cette contradiction, on ajoute à l'étau ordinaire des cylindres en caoutchouc pour qu'ils puissent s'adapter librement à la forme de l'objet et en même temps transmettre uniformément la force de serrage (figure A1.13). Pour ce faire, la pièce devra préalablement être introduite dans une enceinte à paroi plate.

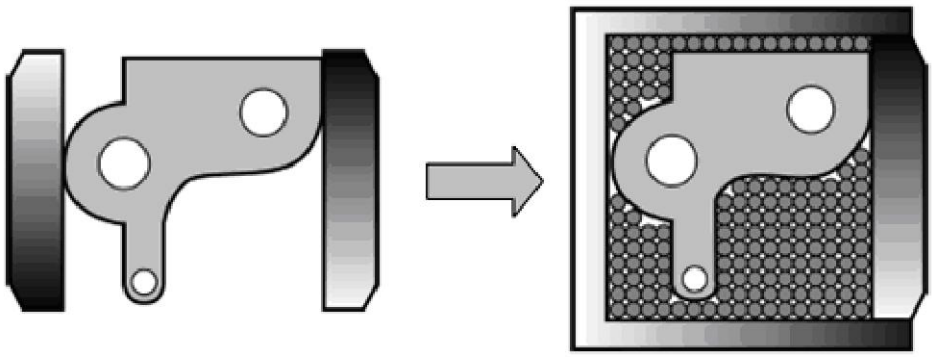


*Figure A1.13 : Principe de séparation entre le système et ses composants (Terninko et al. 1998).*

### *A1.2.7 L'analyse Substances - Champs*

Tous les systèmes techniques sont développés afin de réaliser une fonction. Dans la théorie TRIZ, une fonction peut être représentée à partir de trois élément : des substances, des champs et leurs interactions réciproques (effet, action, connexion, etc.) (Altshuller 1984). Cette représentation est dénommée modèle champs – substances. Ainsi, dans ce modèle, une fonction est représentée, sous une forme graphique simple, comme le produit de l'interaction entre une substance (S1), avec une autre substance (S2) par le biais d'un champ énergétique (Champ) (Terninko et al. 1998). De cette façon, la substance fait référence à un objet matériel, quelque soit son niveau de complexité (un couteau, un avion, un atome). Les champs représentent, les champs bien connus de la physique, de la chimie et de la biologie… L'interaction représente le lien entre les trois parties précédentes.

Dans la théorie TRIZ, ces trois éléments forment la base de l'analyse champs-substances afin de modéliser et simplifier les systèmes techniques, et donne une indication pour diriger la recherche de solution d'un problème inventif ( Cortes Robles 2006). Dans sa version minimaliste l'analyse champs-substances doit comporter deux substances et un champ, également nommé vépole (contraction de champs substance en russe) (figure A1.14). La vépole symbolise le modèle minimal d'un système technique, fonctionnel et contrôlable. Pour définir des modèles plus complexes, le triangle se transforme en figure plus complexes

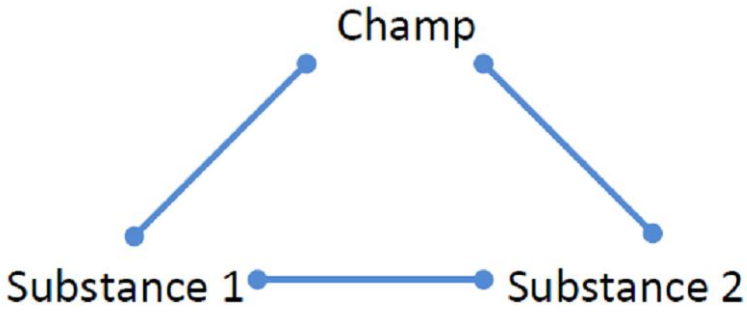



*Figure A1.14 : Le modèle Champs – substance.*

Les parties principales d'un champs-substances sont les suivantes :

- Dans tout système technique, on peut distinguer deux objets ou substances, S1 et S2, qui peuvent représenter : deux parties d'un système, ou le système et son produit, ou le système et son environnement (Kaplan 1996). Ils peuvent également représenter l'outil (artefact) qui réalise l'action et l'objet (instrument) qui reçoit l'action (Clausing et Fey 2004). La différence est que l'instrument est l'objet qui est contrôlé (changé, déformé, détecté) et l'artefact contrôle les paramètres d'un objet. Ces substances peuvent se représenter comme des objets dans différents états physiques (solide, liquide, mousse) ou des objets avec certaines caractéristiques spécifiques.
- Ces substances interagissent ou communiquent à travers un champ, par exemple : mécanique, acoustique, thermique, électrique, magnétique, gravitationnel…
- La qualité de l'interaction peut prendre 4 formes différentes (figure A1.15) :
    a. Interaction satisfaisante : elle réalise correctement un effet souhaité ou une fonction désirée.
    b. Interaction néfaste : ce type d'interaction génère des effets non désirés dans le système.
    c. Interaction excessive : elle réalise l'action utile mais elle l'intensifie, de sorte qu'elle devienne une interaction non désirée.
    d. Interaction insuffisante : l'interaction génère un effet désiré, mais insuffisant afin de réaliser l'action désirée.

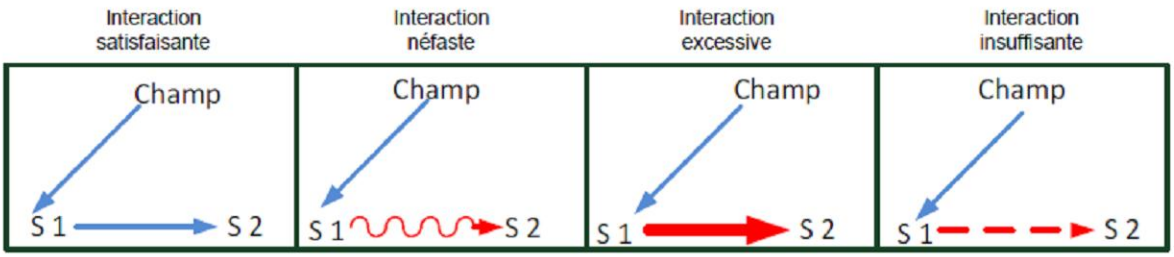



*Figure A1.15 : Différentes interactions.*

Il y a quatre modèles de base pour représenter les systèmes techniques sous la forme d'un champs-substances (Terninko et al. 1998) :

1. Le système incomplet : il faut compléter ou développer le système technique.
2. Le système effectif complet : les deux substances et champ réalisent une action effective.
3. Le système non-effectif complet : il faut améliorer ou développer le système afin de réaliser l'effet souhaité.
4. Le système nuisible complet : il faut éliminer tous les effets nuisibles.

Si l'un des trois éléments manque, le modèle champs-substances identifie la direction de développement du système afin qu'il devienne complet. De plus, s'il manque plus d'un élément dans le système, le modèle champs-substances donne

également des suggestions sur la façon de le modifier afin d'améliorer la performance (Terninko et al. 1998).

Les étapes à suivre afin de développer un modèle champs-substances sont (Terninko et al. 1998) :

1. Identifier les éléments. Le champ agit sur les deux substances ou il est intégré avec la substance 2 (S2) comme un système.
2. Construire le modèle. En utilisant les champs et substances identifiés construire un modèle qui représente leur interaction.
3. Après avoir complété les étapes 1 et 2, évaluer si le système est complet et effectif. S'il y a des éléments manquants, il faut essayer de les identifier.
4. Considérer les solutions à partir des 76 solutions standards (elles seront décrites par la suite).
5. Développer un concept de solution.

Afin de développer un modèle champs substances, les symbolismes à utiliser sont les suivants :

| Nomenclature | Symbole |
|---|---|
| Modèle Su – Field | $F_1$ $S_1 \rightarrow S_2$ |
| Connexion normale | |
| Action excessive | |
| Action dirigée, ou effet désiré | |
| Interaction mutuelle | |
| Inaction | |
| Action déficiente | |
| Action nocive | |
| Coupure dans la connexion | X |
| Transformation | |
| Champ en entrée | F → |
| Champ en sortie | → F |
| État du champ en entrée | F' |
| État du même champ en sortie (les paramètres changent, mais pas la nature du champ) | F'' |
| Champ en transition | F~ |
| État de la substance en entrée | S' |
| État de la substance en sortie | S'' |
| Transition de substance se trouvant dans l'état S' ou l'état S'' | S'-S'' |

*Tableau A1.4 : Symbolisme champs- substances (Cortes Robles 2006).*

Enfin, le modèle champs-substances est un outil qui permet de représenter de manière graphique et simple la situation problématique.

### *A1.2.8 Les solutions standards*

L'analyse des différents problèmes inventifs dans les diverses branches de la technologie en utilisant le modèle champs- substances a révélé certaines situations similaires et des méthodes similaires dans la façon de résoudre les problèmes (analogies). En conséquence, Altshuler introduit le terme « standard » comme des solutions « prêtes à l'emploi » dans les problèmes inventifs. Les solutions standards sont des règles afin de transformer un système avec un comportement non désiré en un comportement désiré en utilisant certaines stratégies comme par exemple, le remplacement d'un composant du système par un champ capable de réaliser la même fonction. Altshuller a défini 76 standards afin de générer des recommandations pour résoudre le problème. L'objectif est de modéliser un problème sous la forme d'un champs-substances, puis d'utiliser les standards afin de résoudre le problème en suivant ces recommandations. Les standards sont utiles lorsque le lien entre le problème et la contradiction n'est pas explicite. Ainsi, les standards spécifient comment le modèle initial doit être transformé afin de satisfaire les exigences du problème, c'est-a-dire, passer d'une action non désirée, insuffisante ou manquante à une action satisfaisante. Les standards sont construits selon le schéma suivant (Dubois 2004) :

Si <condition 1> et < condition 2>, alors <recommandation>

Les deux conditions permettent d'identifier le type de standard associé au problème. Ainsi, le problème est formulé au travers de conditions ou contraintes du problème, et les 76 standards proposent une ou plusieurs recommandations permettant la construction du modèle de solution.

La résolution des problèmes grâce à l'utilisation de standards est structurée en deux parties (figure A1.16):

- La partie de gauche représente la formulation du problème comme un effet non désiré ou insuffisant. Dans cette partie, les conditions du problème sont spécifiées ainsi que le type de modèle de champs substance du problème.
- Dans la section de droite, le type de transformation nécessaire afin d'atteindre le résultat désiré.

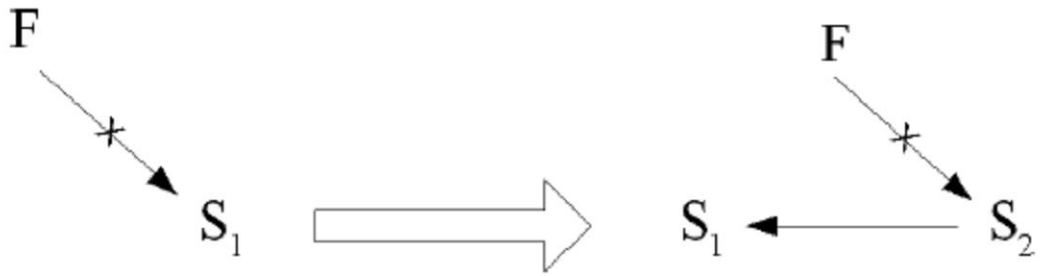



*Figure A1.16 : Structure d'un problème champs – substances.*

Par exemple le standard 1.2.3 :

Si <il est nécessaire d'éliminer une action non désirée d'un champ sur une substance> et si <il n'y a pas de limitation à l'introduction d'une autre substance > alors <on résout le problème en introduisant une deuxième substance qui élimine l'effet non désiré du champ et forme un champ substance > (figure A1.17).

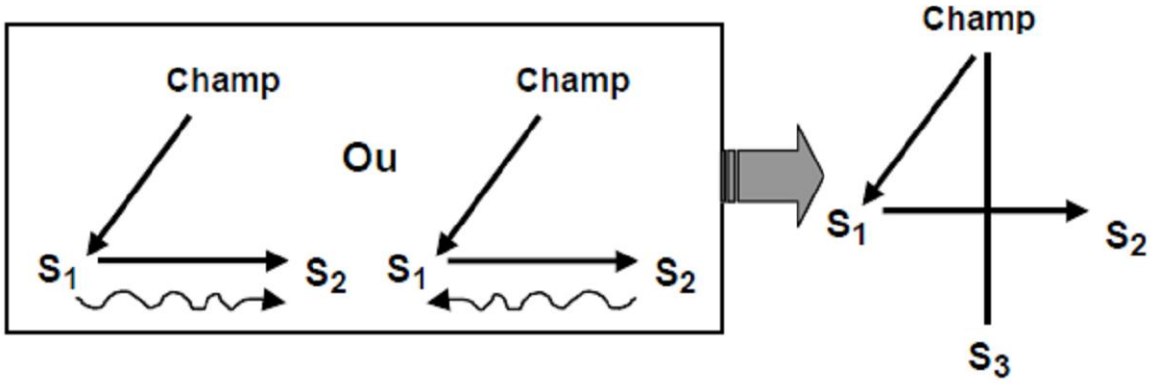



*Figure A1.17: Exemple du standard 1.2.3.*

Les standards de la théorie TRIZ sont classés en 5 groupes différents (Terninko et al. 1998) :

- Les standards des différents niveaux d'évolution des systèmes : le premier groupe correspond à la construction et destruction de champs- substances, le deuxième correspond au développement des champs- substances et dans le troisième à la transition vers un super système ou le micro niveau.
- Les standards de mesure et détection : ce type de standards correspond au quatrième groupe et ils sont spécifiques aux problèmes de mesures ou de détection.
- Les standards de mise en application des standards : enfin, le cinquième groupe correspond aux standards qui aident à l'application des standards, des groupes de 1 à 4.

Comme dans les standards il n'y a pas besoin de formuler la contradiction, ils sont très utiles lorsque :

- Un problème comprend un effet désiré et/ou non désiré entre deux sous-systèmes.
- Un système est incomplet ou doit être amélioré.
- Lorsqu'un paramètre d'un sous-système doit être modifié mais dont les moyens pour le faire ne sont pas connus.
- Une action d'un sous-système est soit trop faible ou soit trop importante sur un autre sous- système.

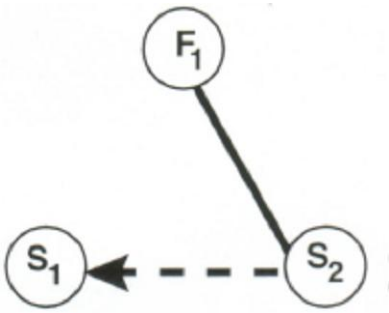
Exemple : Un personnel de maintenance cherche une petite fuite dans un système de réfrigération. Il a besoin d'une méthode, de préférence un moyen optique, rapide et facile pour détecter les fuites. Malgré l'utilisation d'une lampe, il est difficile de détecter le liquide frigorifique car il est invisible.

La résolution du problème en utilisant les solutions standards est décrite comme suit :

Identifier les éléments.

- S1 : un personnel de maintenance.
- S2 : le gaz réfrigérant.
- F1 : la lampe.

Construction du modèle.

| | |
|---|---|
|  | Le modèle champs substance est complet, mais il existe une interaction insuffisante : le gaz est difficilement détectable malgré l'utilisation d'une lampe. |

Solution : la solution est contenue dans le standard 4-2-2 : si le système ou sous-système n'est pas approprié pour permettre la détection ou mesure, le problème est résolu avec la transformation interne ou externe des champs-substances avec l'introduction d'une substance supplémentaire qui est facilement détectable ou mesurable (figure A1.18).

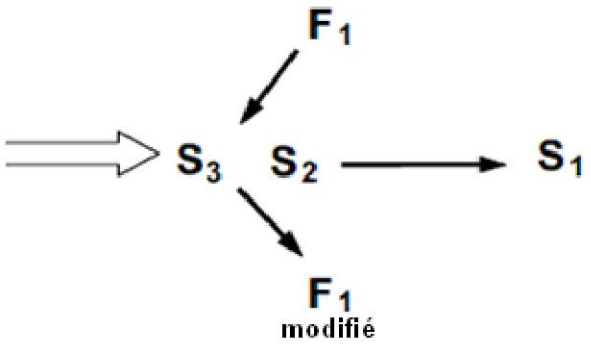



*Figure A1.18 : Solution du champ substance*

Développement de la solution :
La solution standard conseille l'introduction d'une substance qui soit facilement détectable. Ainsi, dans le liquide frigorifique est introduite une poudre luminescente qui est facilement détectable en utilisant la lampe (Salamatov 1999).

Les standards sont des outils qui permettent la résolution de problèmes à travers de la construction de modèles (champs - substances) et de leur modification grâce à certaines recommandations ou solutions standards. Les standards s'appuient sur les lois d'évolution ce qui permet une résolution du problème en accord avec ces lois (Dubois 2004). Les solutions standards sont considérées comme des outils plus spécifiques que les principes de résolution des contradictions, car ils incluent les meilleures pratiques et solutions existant dans les 40 principes. De plus, les

standards agissent avec des modèles physiques du problème, au contraire des principes de solution qui agissent avec des paramètres génériques. Néanmoins, les standards ne spécifient pas avec exactitude les substances ou les champs nécessaires dans les modèles de solutions et comment ils doivent être introduits. Ils indiquent seulement les méthodes de transformation de systèmes (Sushkov et al. 1995).

### *A1.2.9 Les effets dans la théorie TRIZ*

Suite à l'analyse de brevets, Altshuller a constaté qu'une grande partie des brevets d'un haut niveau d'inventivité ont été obtenus en utilisant des effets (lois de la physique, effets et phénomènes physiques, chimiques et géométriques) qui avaient rarement ou jamais été appliqués précédemment dans le domaine d'émergence du problème. Altshuller a pris en compte l'existence d'un grand nombre d'effets physiques, chimiques et géométriques qui peuvent être la clé pour la résolution de nombreux problèmes inventifs, Néanmoins, la plupart du temps, une grande partie de ces effets, et de leurs potentialités ou caractéristiques restent inconnus pour le monde industriel. Par exemple, il existe plusieurs milliers d'effets dans la littérature scientifique or moins de 400 sont employés dans le monde industriel. Un ingénieur connaît environ une centaine d'effets souvent très ciblés dans son domaine de connaissances (Savransky 2000). Les causes de cette méconnaissance est, en grande partie, due à la façon de décrire les effets et phénomènes. En effet, les descriptions actuelles donnent des informations sur leurs propriétés et caractéristiques d'un point de vu scientifique et non comment ils peuvent être utilisés afin de réaliser certaines fonctions techniques.

De ce fait, dans les années 70, Altshuller a commencé l'élaboration « d'une liste des effets et phénomènes physiques » réalisée sur la base d'une analyse d'inventions dans différents domaines technologiques afin de combler le fossé entre la science et l'ingénierie (Altshuller 1984). Le but de la liste était d'associer un effet (physique, chimique ou géométrique) à différentes fonctions techniques que l'effet est capable de réaliser. Ainsi, le concepteur a la possibilité de choisir différents effets pour réaliser une fonction particulière et, donc de proposer différentes alternatives afin d'améliorer ou de développer un nouveau système technique. Par exemple, afin qu'un objet réalise des déplacements millimétriques très précis (effet de déplacement d'un objet), au lieu d'utiliser un mécanisme complexe, il peut être réalisé en utilisant l'effet d'expansion thermique pour contrôler la distance de déplacement.

Dans la théorie TRIZ, un effet est défini comme : «*une réponse spécifique et automatique d'une substance, à une action régie par les lois de la nature et les propriétés particulières des matériaux. En raison de la nature déterministe de ces lois, ces réponses sont reproductibles et fiables »* (Cortes Robles 2006). Par exemple, un effet désiré est de mesurer la température ainsi plusieurs phénomènes physiques peuvent être utilisés : l'expansion thermique, la transition de phase, le point Curie, l'effet Seebeck ...

Pour prendre en considération l'importance des effets et phénomènes physiques, il est nécessaire de trouver une façon de les organiser afin de les rendre facilement

applicables. Ainsi , Altshuller et ses collaborateurs ont construit un guide composé de deux parties (Cortes Robles 2006):

1. Un livre de référence contenant une description de l'effet donné, le résultat obtenu après l'application de l'action de l'effet, et des exemples d'application.
2. Un tableau de sélection : le tableau est divisé en deux parties. Dans la première se trouve l'effet désiré et dans la deuxième les phénomènes physiques chimiques et géométriques qui fournissent l'effet désiré (voir le tableau A1.5).

| **Effet désiré** | **Phénomènes physiques, chimiques et géométriques.** |
|---|---|
| Accumulation d'énergie mécanique | Inertie, déformation, effet gyroscopique, transition de phase. |
| Changer la friction | Effet Johnsen-Rahbek., radiation, effet Kraselsky, l'électrolyse |
| Changer la forme | Expansion thermique, l'effet piézoélectrique, l'effet mémoire de forme, la magnétostriction et l'électrostriction |

*Tableau A1.5 : Exemple du guide d'effets.*

L'organisation des effets est similaire aux guides utilisés par l'approche de Pahl et Beitz (Pahl et al. 2007) pour la conception de système mais à la différence que le guide des effets de la théorie TRIZ donne une grande importance à la relation entre les fonctions techniques et les effets chimiques et géométriques. Par exemple, l'effet géométrique du ruban de Möbius qui se matérialise par une torsion d'un demi-tour à une longue bande, puis en collant les deux extrémités (figure A1.19). Ceci permet à une ponceuse à bande d'avoir une surface de travail doublée pour une même longueur de bande. La différence entre les trois différents types d'effets se fait sur les champs énergétiques : les effets chimiques permettent la transformation d'une substance à travers de l'absorption ou du dégagement d'énergie, les effets physiques permettent la transformation d'une forme d'énergie en une autre et les effets géométriques redistribuent les flux d'énergie et les substances qui sont présents (Vikentyev 2005).

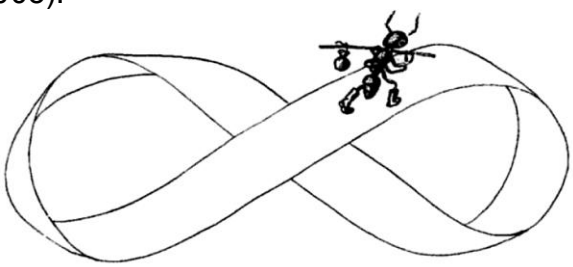


*Figure A1.19 : Le ruban de Möbius (Altshuller 1996).*

Les effets jouent un rôle important dans l'amélioration et le développement de système technique car l'introduction d'un nouvel effet ou l'utilisation nouvelle d'un

effet connu dans un autre contexte conduit à la proposition de nouvelles idées grâce à l'utilisation de nouvelles ressources non suffisamment voire pas exploitées par le passé (Altshuller 1984).

### *A1.2.10 Algorithme ARIZ :*

L'algorithme de résolution de problèmes inventifs (ARIZ) est une séquence d'actions et règles utilisées pour résoudre des problèmes très complexes. ARIZ intègre les différents outils et concepts de la théorie TRIZ. La première version de l'algorithme ARIZ a été développée en 1956 puis plusieurs modifications ont été réalisées, la version la plus récente, ARIZ-85, a été publiée en 1985, elle contient les étapes suivantes (Horowitz 1999):

1. Analyse initiale du problème où les données du problème sont recueillies et analysées afin de déterminer le but final de la solution, définir les caractéristiques du système technique à améliorer et les contraintes du problème.
2. Description du problème (description du mini-problème) : cette étape correspond à une définition plus précise du problème. Il faut définir la fonction à réaliser et les effets non souhaités qui doivent être éliminés. Le mini problème est défini c'est-a-dire parmi les différentes alternatives de résolution, on choisit le problème le plus facile afin d'aboutir à l'objectif du système.
3. Identification du conflit (définition de la contradiction technique). L'identification de la contradiction est mise en œuvre par deux moyens :
   a) lorsque l'on essaye d'éliminer l'effet non souhaité, la fonction utile est dégradée
   b) lorsque l'on essaye d'améliorer une fonction utile, l'effet non désiré augmente.
   Puis, l'un des deux conflits est sélectionné afin de continuer dans les étapes suivantes.
4. Déterminer et décrire la zone d'opération dans le temps et dans l'espace du conflit. Dans cette étape, la zone d'opération est divisée en deux : la zone d'opération de l'action utile et la zone d'opération de l'action néfaste.
5. Enumérer les ressources disponibles dans la zone d'opération.
6. Définir le résultat idéal final (RIF).
7. Essayer d'utiliser les ressources disponibles afin de résoudre le problème.
8. Définir la contradiction physique.
9. Mettre en œuvre les modèles de champs substances et utiliser les standards.
10. Mettre en pratique les principes de solution de la contradiction physique : séparation dans le temps, l'espace, sur les conditions et entre le système et ses composants…
11. Utiliser la méthode des hommes miniatures.
12. Mettre en pratique la liste d'effets.
13. Si le problème ne peut pas être résolu, le concepteur retourne à la formulation du problème et réalise une analyse plus méticuleuse pour formuler un autre problème et un autre mini-problème. Au contraire, avec l'obtention d'une solution, il faut la transformer en une solution

technologique : définir la méthode et le système afin aboutir à la fonction désirée.

14. Évaluer la solution obtenue dans l'étape précédente, par exemple : satisfaisante par rapport au RIF? quelle contradiction a été éliminée ? la solution obtenue a au moins un élément contrôlable ? la solution obtenue, est-t-elle appropriée pour la production en série? Evaluer la solution par rapport aux brevets pour confirmer que la solution est une invention.

## A1.3 CONCLUSION

TRIZ peur être considérée comme une méthode d'invention systématique. D'une part, elle décrit les tendances naturelles ou lignes d'évolution que suivent les systèmes technologiques. D'autre part, TRIZ fournit des outils dérivés de ces observations, afin de proposer des voies d'évolution des futurs développements d'un système technologique ou comme un support pour aborder des problèmes inventifs, et de donner au concepteur des voies de résolutions plus convenables. Néanmoins, bien que la théorie TRIZ exige un grand effort pour son apprentissage, cet effort est récompensé par la qualité des solutions. Enfin, la théorie TRIZ peut être utilisée comme un outil d'enseignement et d'apprentissage aux futurs concepteurs afin de changer leur approche pour la résolution de problèmes et comme un outil pour améliorer leur créativité.

ANNEXE 2

# ANNEXE 2 : GUIDE DE SOLUTION AUX DIFFERENTS TYPES D'INTERACTION DANS UN PROBLEME INVENTIF

Ce guide classe les voies de solutions envisageables en fonction du type d'interaction (action) existant. Il se base sur les 76 solutions « standards » de l'analyse champs-substances (Salamatov 1999) (Fey et Rivin 2005) (Savransky 2000) que l'on notera Standard, les 10 standards (notés Std) (Altshuller 1984) et les solutions des différents types modèles problèmes inventifs (notés Types) (Altshuller 1984). Son but est de proposer différentes voies de solutions lorsqu'un problème à est défini à l'aide de son type d'interaction. Pour rappel, les différents types interactions décrits dans le chapitre 4, sont regroupés comme suit :

1. Création ou élimination d'une action.
2. Amélioration d'une action.
3. Actions en conflit.
4. Amélioration de deux ou plusieurs actions utiles.
5. Problèmes de mesure.
6. Problèmes d'introduction d'un champ ou d'une substance.

## A2.1 CREATION ET ELIMINATION D'UNE ACTION

### *A2.1.1 Création d'une action*

Il est nécessaire que la substance réalise l'action désirée, soit dans un état désiré ou son contrôle doit être assuré (figure A2.1).

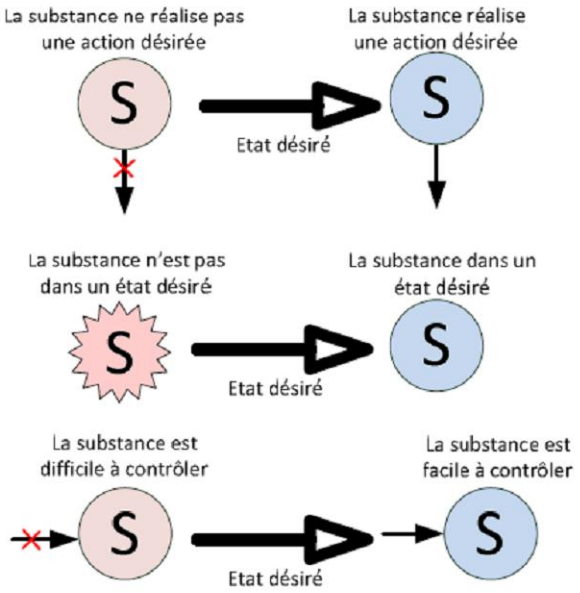



*Figure A2.1 : De l'état actuel du système vers l'état désiré.*

Pour résoudre ce type de problèmes, les solutions proposées sont décrites dans la section suivante.

#### A2.1.1.1 Il est possible modifier le système

- Introduire un champ et /ou une substance, et construire un nouveau champ-substance. Exemple :
  - Standard 1-1-1.
  - Standard 1-1-2.
  - Std.1.
  - Type 1.
- Changer la substance (ou le système) de telle sorte qu'elle réalise l'action à l'aide d'un effet physique utilisant des ressources existantes.
  - Standard 4-1-1.
  - Standard 1-2-5.
  - Standard 4-4-5.
- Utiliser le changement de phase ou d'état de la substance. Exemple :
  - Standard 5-3-1.
- Utiliser des effets avec un état de transition. Exemple :
  - Standard 5-3-3.

#### A2.1.1.2 Il est nécessaire d'ajouter un élément nouveau (champ et /ou substance), mais il n'est pas possible de modifier le système

- Voir section 6.

### *A2.1.2 Elimination d'une action*

Il est nécessaire d'éliminer une action non désirée entre deux éléments (deux substances, deux champs, un champ et une substance) ou un champ-substance (figure A2.2).

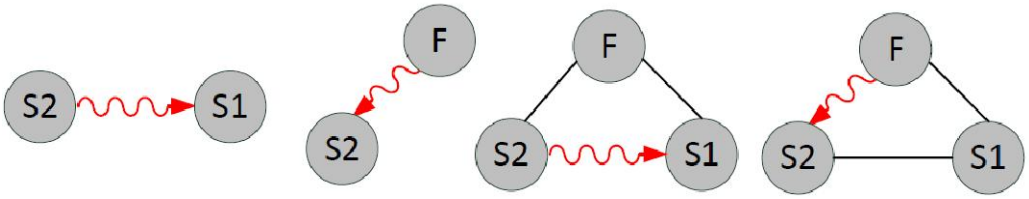



*Figure A2.2 : Les états non désirés.*

#### A2.1.2.1 Une action non désirée (néfaste) existe entre deux éléments ou dans un champ substance mais il n'est pas obligatoire garder le contact entre les éléments.

- Eliminer au moins un des éléments. Exemple :
  - Standard 1-1-1 (inverse).
- Introduire une troisième substance ou un champ capable d'éliminer l'action nuisible ou d'absorber l'action nuisible. Cette substance ou ce champ peut être produit avec les ressources du système. Exemple :
  - Std. 3
  - Standard 1-1-1.
  - Standard 1-2-2.
  - Standard 1-2-3.
- Utiliser un effet physique capable d'éliminer ou réduire l'action non désirée ou de passer d'un état actif à inactif. Exemple :

- Standard 1-2-5.

- Utiliser un champ capable de déconnecter les deux éléments, ou d'éviter l'interaction entre le champ-substance ou d'éliminer l'action non désirée. Exemple :
  - Standard 1-2-5.

A2.1.2.2 L'action non désirée (néfaste) existe mais il est nécessaire de maintenir le lien entre les deux éléments ou le champ-substance.

- Introduire une troisième substance (une variation d'une des substances) capable d'éliminer l'action nuisible. Exemple :
  - Std. 3.
- Combiner le système avec un système existant pour former un multi-système. La combinaison peut être sur les substances et/ou les champs. Exemple :
  - Standard 3-1-1.
- Introduire un champ qui neutralise l'action non désirée ou la transforme en une action désirée. Exemple :
  - Standard 1-2-4.
- Utiliser un effet physique capable d'éliminer ou réduire l'action non désirée. Passer d'un état actif à inactif. Exemple :
  - Standard 1-2-5.

A2.1.2.3 Une action nuisible existe entre deux éléments ou dans un champ substance, mais l'introduction d'éléments nouveaux est impossible.

- Voir section 6.

## A2.2 AMELIORATION D'UNE ACTION EXISTANTE

Il est nécessaire d'améliorer une action (difficile à changer ou contrôler), ou l'interaction existante dans un champ-substance (figure A2.3).

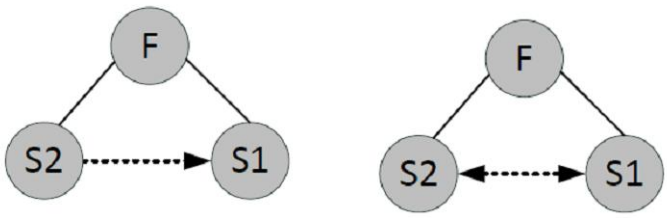



*Figure A2.3 : Interaction ou action inefficiente entre deux éléments.*

### *A2.2.1 Amélioration d'une action ou interaction existante avec la possibilité de changer ou modifier le système.*

- Utiliser un élément interne (champ et/ou substance) qui permet l'amélioration de l'action ou de la propriété désirée. Exemple :

    - Standard 1-1-2.
    - Std. 6.
- Introduire un deuxième champ facilement contrôlable afin d'améliorer l'action existante. Exemple :
    - Standard 2-1-2.
    - Standard 2-2-1.
- Considérer un élément du champs-substance comme un objet indépendant qui est ensuite transformé en un champ – substance contrôlable. Exemple :
    - Standard 2-1-1.
    - Standard 1-1-1.
- Remplacer un champ existant par un champ facilement contrôlable. Exemple :
    - Standard 2-2-1.
- Augmenter le degré de fragmentation d'un objet ou la transition d'un objet solide vers un objet poreux ou liquide. Exemple :
    - Standard 2-2-2.
    - Standard 2-2-3.
- Utiliser les effets physiques liés à la transition entre différents états d'un objet. Exemple :
    - Standard 2-2-3.
- Augmenter le dynamisme du champ-substance, c'est-à-dire le transformer en une structure variable ou flexible : par exemple l'une des substances, l'un des champs (permanent, périodique, pulsé). Exemple :
    - Standard 2-2-1.
    - Standard 2-2-4.
    - Standard 2-2-5.
    - Standard 2-4-8.
    - Standard 2-4-9.
- Utiliser des éléments dans l'environnement afin d'améliorer la contrôlabilité de l'objet.
    - Standard 2-4-6.
- Transformer une substance uniforme en une substance avec une structure spatio-temporelle prédéfinie. Exemple :
    - Standard 2-2-6.
- Utiliser un élément ou remplacer une des substances par une substance ferromagnétique et un champ magnétique. De plus l'amélioration de l'efficacité de contrôle de la substance ferromagnétique augmente avec le degré de fragmentation de la substance (grain, poudre, ions…). Exemple :
    - Standard 2-4-1.
    - Standard 2-4-2.
- Si une substance ferromagnétique est déjà utilisée, son efficacité peut être améliorée avec l'utilisation d'une substance ferromagnétique liquide, ionique ou une suspension colloïdale, avec une structure poreuse ou un fluide électro rhéologique. Exemple :
    - Standard 2-4-3.
    - Standard 2-4-4.
    - Standard 2-4-12.
- Utiliser des effets physiques liés à une transition de phase. Exemple :
    - Standard 2-4-7.
    - Standard 5-3-3.

- L'efficacité d'une action peut être améliorée avec le changement de phase ou d'état de la substance ou le remplacement une substance avec un unique état par une substance avec plusieurs états avec interaction. Exemple :
  - Standard 5-3-1.
  - Standard 5-3-5.
- Améliorer l'efficacité d'une action en développant des liens entre différents éléments du système. Exemple :
  - Standard 3-1-2.
- Utiliser l'action au niveau requis, puis éliminer les excès. Le surplus d'une substance est enlevé par un champ ou l'excès d'un champ est enlevé par une substance. Exemple :
  - Standard 1-1-6.
- Utiliser l'action au régime maximal mais il faut l'appliquer indirectement en utilisant une autre substance liée à l'objet. Exemple :
  - Standard 1-1-7.

*A2.2.2 Amélioration d'une action grâce à la coordination du rythme entre les éléments du système.*

- Coordonner ou décoordonner la fréquence du champ et la fréquence naturelle des éléments du système. Exemple :
  - Standard 2-3-1.
- Coordonner ou décoordonner la fréquence naturelle des éléments du système. Exemple :
  - Standard 2-4-10.
- Coordonner ou décoordonner la fréquence des champs utilisés dans le système. Exemple :
  - Standard 2-3-2.

*A2.2.3 Amélioration d'une action avec des restrictions naturelles.*

A2.2.3.1 L'action exige d'améliorer les spécifications techniques (dimension, poids, vitesse, etc.) mais il existe des restrictions naturelles

- L'introduire en tant que sous système dans un système plus complexe, l'action est déléguée au système plus complexe. Exemple :
  - Std 5
  - Standard 3-1-4.

A2.2.3.2 L'action exige d'améliorer les indicateurs techniques (précision, vitesse, productivité, etc.) mais il existe des restrictions naturelles

- Transposer l'action d'un niveau macro à un niveau micro. Ainsi le système est remplacé par une substance capable de réaliser l'action exigée avec l'interaction d'un champ. Exemple :
  - Std 9
  - Standard 3-2-1.

*A2.2.4 Amélioration d'une action avec une transition vers un multi-système*

- Combiner le système avec un autre système existant (homogène ou hétérogène) ou combiner des sous-systèmes pour former un multi-système.

La combinaison peut être réalisée grâce aux substances et/ou champs. Exemple :
  - Standard 3-1-1.

*A2.2.5 Amélioration d'une action avec une transition vers un micro—système*

- Améliorer l'efficience d'une action par le remplacement d'une substance capable de réaliser l'action exigée avec l'interaction d'un champ facilement contrôlable au niveau du micro système. Exemple :
  - Standard 3-2-1.
- Améliorer l'efficience d'une action grâce à l'interaction d'un champ au niveau micro système et l'utilisation des effets physiques. Exemple :
  - Standard 2-2-3.

*A2.2.6 Action à régime maximal ou minimal est nécessaire pour améliorer l'action désirée*

A2.2.6.1 L'action à son régime minimal est nécessaire mais les conditions de la situation problématique ne permettent pas sa réalisation.

- Utiliser l'action maximale et éliminer le surplus. L'excès d'une substance est enlevé par un champ ou l'excès d'un champ est enlevé par une substance. Exemple :
  - Standard 1-1-6.

A2.2.6.2 L'action à son régime maximal est nécessaire mais les conditions de la situation problématique ne permettent pas sa réalisation.

- L'action à son régime maximal est préservée mais elle est appliquée indirectement en utilisant une autre substance liée à l'objet. Exemple :
  - Standard 1-1-7.

A2.2.6.3 L'action à son régime maximal est nécessaire mais l'intensité du champ ou la quantité de substance sont trop faibles pour la réaliser.

- Il est nécessaire de mener la substance transformatrice dans un état proche de l'état critique. Ainsi, l'énergie s'accumule dans la substance et le signal d'entrée joue le rôle de déclencheur. Exemple :
  - Standard 5-4-2.

*A2.2.7 Amélioration d'une action ou interaction existante avec l'impossibilité de changer ou modifier le système.*

- Voir section 6.

### A2.3 ACTIONS EN CONFLIT

Une action nécessaire est en conflit avec une autre action, soit produite par la même substance ou champ, soit produite par des actions différentes qui agissent sur les mêmes champs et/ou substances (figure A2.4).

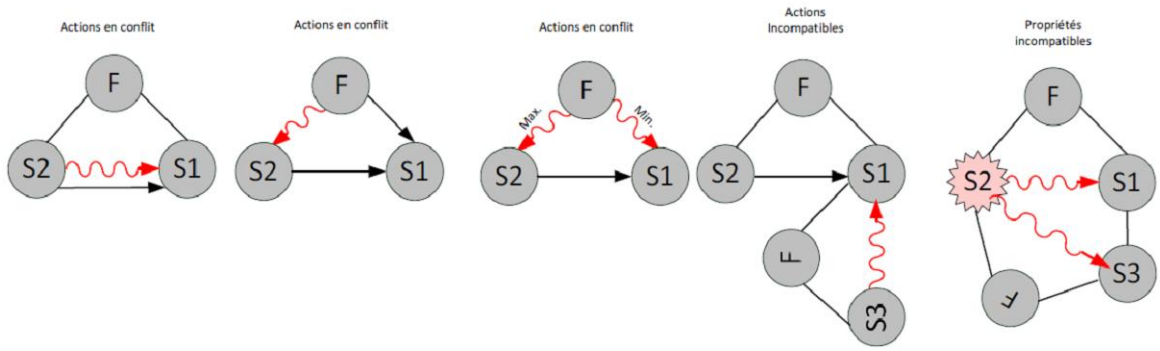



*Figure A2.4 : Différentes configuration des actions en conflit.*

Les différents types de conflit et les solutions proposées sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

### *A2.3.1 Une action utile est accompagnée d'une action nuisible*

#### A2.3.1.1 Les actions utile et nuisible se produisent entre deux substances

*Il n'est pas nécessaire de maintenir le contact entre elles.*

- Introduire une troisième substance capable d'éliminer l'action non désirée tout en conservant l'action désirée. Exemple :
  - Standard 1-2-1.
  - Standard 1-2-2.
  - Standard 1-2-3.
- Préserver l'action utile mais elle est appliquée indirectement en utilisant une autre substance qui élimine l'action nuisible liée à l'objet. Exemple :
  - Standard1-1-7.

*Il est nécessaire de maintenir le contact entre les deux substances*

- Préserver l'action utile et introduire un champ pour neutraliser l'action nuisible. Le champ peut être de nature identique mais de direction opposée. Exemple :
  - Standard 1-2-4.
  - Type 3
- Préserver l'action utile et éliminer l'action nuisible avec un effet physique. L'effet permet l'action utile mais neutralise l'action nuisible. Exemple :
  - Standard 1-2-5.
- Changer ou modifier le système ou un de ses composants de telle façon qu'en utilisant les ressources existantes, l'action nuisible soit éliminée ou réduite. Exemple :
  - 4-1-1.

*Il n'est pas nécessaire de conserver le contact entre les deux substances mais l'introduction d'une substance est interdite.*

- Utiliser la variation d'une ou plusieurs substances existantes afin d'éliminer l'action nuisible. Exemple :
  - Standard 1-2-2.

- Utiliser la variation d'une ou plusieurs substances existantes avec l'interaction avec un champ existant pour éliminer l'action nuisible. Exemple :
    - Standard 1-2-2.

#### A2.3.1.2 L'action utile et nuisible sont produites par un champ

- Introduire une substance capable d'éliminer ou absorber l'action nuisible (le vide est considéré comme une substance). Exemple :
    - Standard 1-2-3.
- Introduire un champ capable d'éliminer ou absorber l'action nuisible (le vide est considéré comme une substance). Exemple :
    - Standard 1-2-4.
- Préserver l'action utile mais éliminer l'action nuisible avec un effet physique. L'effet permet l'action utile mais neutralise l'action nuisible. Exemple :
    - Standard 1-2-5.
- Changer ou modifier le système ou un de ses composants de telle façon qu'en utilisant les ressources internes ou externes, l'action nuisible soit éliminée. Exemple :
    - Standard 4-1-1.
- Changer ou modifier le champ rapidement afin d'éliminer l'effet nuisible. Exemple :
    - Pas de standard.

### *A2.3.2 Deux actions sont nécessaires : une minimale et une maximale*

#### A2.3.2.1 Conservation de l'action maximale

- Conserver l'action maximale mais introduire une substance protective à l'endroit où l'action doit être minimale. Exemple :
    - Standard 1-1-8-1.

#### A2.3.2.2 Conservation de l'action minimale

- Conserver l'action minimale à l'endroit et au moment nécessaires, l'action maximale est réalisée avec une substance ou un champ qui amplifient l'action aux endroits nécessaire. Exemple :
    - Standard 1-1-8-2.

### *A2.3.3 Actions incompatibles ou mutuellement exclusives*

#### A2.3.3.1 Séparation des actions

- Réaliser les actions séparément de telle façon qu'une action soit réalisée pendant les pauses de la seconde. En général, le moment de pause d'une action doit être occupé avec une autre action utile. Dans ce cas, les champs ou les substances peuvent être séparés en S' et S'' et F' et F''. Exemple :
    - Standard 2-3-3.
    - Std. 7.
    - Type 3.

#### A2.3.3.2 Combinaison des actions

- Intégrer les actions dans un même système de façon à les rendre compatibles. Par conséquent, cela génère une réduction des composants d'un système. Exemple :
  - Standard 3-1-3.
  - Standard 3-1-4.

#### A2.3.3.3 Remplacement des actions

- Changer ou modifier le système de telle façon qu'en utilisant les ressources internes ou externes, deux ou plusieurs actions sont réalisées par un même système ou éliminent la nécessité d'une action. Exemple :
  - Standard 4-1-1.
- Changer ou modifier le système de telle façon qu'en utilisant un effet physique et/ou une transition de phase, deux ou plusieurs actions soient réalisées par un même système. Exemple :
  - Standard 5-3-3.

### *A2.3.4 Actions avec les propriétés en conflit.*

Une action exige la propriété A et l'autre action l'anti-A.

#### A2.3.4.1 Deux actions utiles exigent d'avoir des propriétés incompatibles

- Donner une propriété aux sous-systèmes et la propriété opposée au système. Exemple :
  - Standard 3-1-5.

#### A2.3.4.2 Deux actions utiles exigent d'avoir une substance avec une double propriété

- Utiliser le changement de phase de la substance pour obtenir la double propriété selon les conditions de fonctionnement. Exemple :
  - Standard 5-3-1.
  - Standard 5-3-2.
- Remplacer une substance avec un état unique par une substance avec un double état. Ce double état est possible grâce à l'interaction (physique ou chimique) de l'objet avec le système. Exemple :
  - Standard 5-3-4.
  - Standard 5-3-5.

#### A2.3.4.3 Alternance entre deux différents états physiques pour réaliser des actions différentes

- Remplacer une substance avec un état unique par une substance avec un double état. Ce double état est possible grâce à l'interaction (physique ou chimique) de l'objet avec le système. Exemple :
  - Standard 5-3-5.
- Réaliser la transition grâce à l'utilisation d'un effet physique qui permet la transformation de la substance. Exemple :
  - Standard 5-4-1.
- Subdiviser la substance en deux substances S' et S'', une action interagit avec S' et l'autre action avec S''. De façon similaire, le champ peut être subdivisé en F' et F'' et une action interagit avec F' et une autre avec F''.

- Type 3.

#### A2.3.4.4 Deux actions exigent des propriétés incompatibles pour un système ou un objet

- Séparer les propriétés dans l'espace, le temps ou la structure. Si la transition d'une propriété à une autre est réalisée chronologiquement, il est recommandé qu'elle soit faite automatiquement. Exemple :
  - Type 1.

### *A2.3.5 Interaction entre deux actions, une action doit être améliorée sans dégrader l'autre*

- Ajouter un champ et/ou une substance afin d'améliorer l'action sans affecter l'autre action. Le champ peut être de nature identique mais de direction opposée. Exemple
  - Type 2.
- Subdiviser la substance en deux substances S' et S'', une action interagit avec S' et l'autre action avec S''. De façon similaire, le champ peut être subdivisé en F' et F'' et une action interagit avec F' et une autre avec F''.
  - Type 3.

## A2.4 AMELIORATION DE DEUX OU PLUSIEURS ACTIONS UTILES

Il est nécessaire d'améliorer plusieurs actions utiles (elles sont difficiles à changer ou contrôler) ou d'améliorer l'interaction entre deux ou plusieurs actions utiles (figure A2.5).

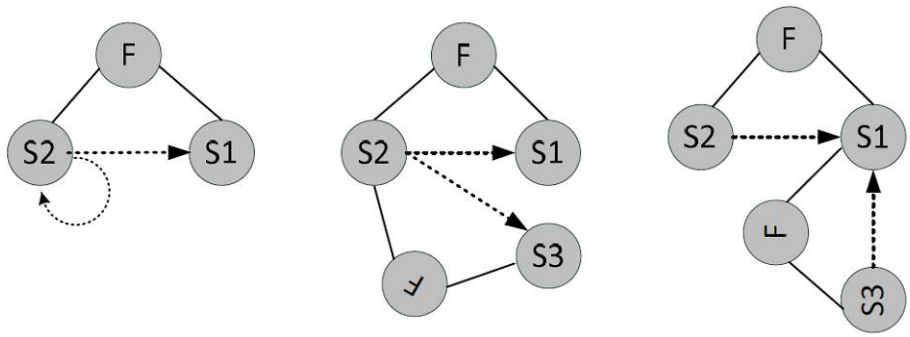



*Figure A2.5 : Amélioration de deux ou plusieurs actions utiles.*

Pour résoudre ce type de problèmes les solutions proposées sont les suivantes:

- Coupler les actions au sein d'un même système. Cette efficacité augmente avec la combinaison de systèmes qui réalisent des actions contraires utiles. Après cette intégration, le système peut réduire ses composants. Exemple :
  - Standard 3-1-3.
  - Standard 3-1-4.
- Changer ou modifier le système de telle façon que des substances différentes réalisant deux ou plusieurs actions, soient remplacées par une substance capable de toutes les réaliser. Exemple :
  - Standard 3-2-1.

- Changer ou modifier le système de telle façon qu'en utilisant les ressources internes ou externes, deux ou plusieurs actions soient réalisées par un même système. Exemple :
  - Standard 4-1-1.
- Améliorer les actions utiles grâce au changement de phase ou d'état d'un des éléments du système, ou remplacer un des éléments du système par une substance à deux voire plusieurs phases. Exemple :
  - Standard 5-3-1.
  - Standard 5-3-2.
  - Standard 5-3-5.
- Changer ou modifier le système de telle façon qu'en utilisant un effet physique et/ou une transition de phase, deux ou plusieurs actions soient réalisées par un même système. Exemple :
  - Standard 5-3-3.
- Coordonner ou décoordonner la fréquence du champ des actions avec la fréquence naturelle du système. Exemple :
  - Standard 2-3-1.
- Coordonner ou décoordonner les actions avec la fréquence naturelle des éléments du système. Exemple :
  - Standard 2-4-10.
- Coordonner ou décoordonner la fréquence des champs utilisés. Exemple :
  - Standard 2-3-2.
  - Standard 2-3-3.

## A2.5 PROBLÈMES DE MESURE

Il est nécessaire de mesurer ou d'identifier une propriété, une caractéristique ou un élément d'un système mais cela est très difficile à réaliser (figure A2.6).

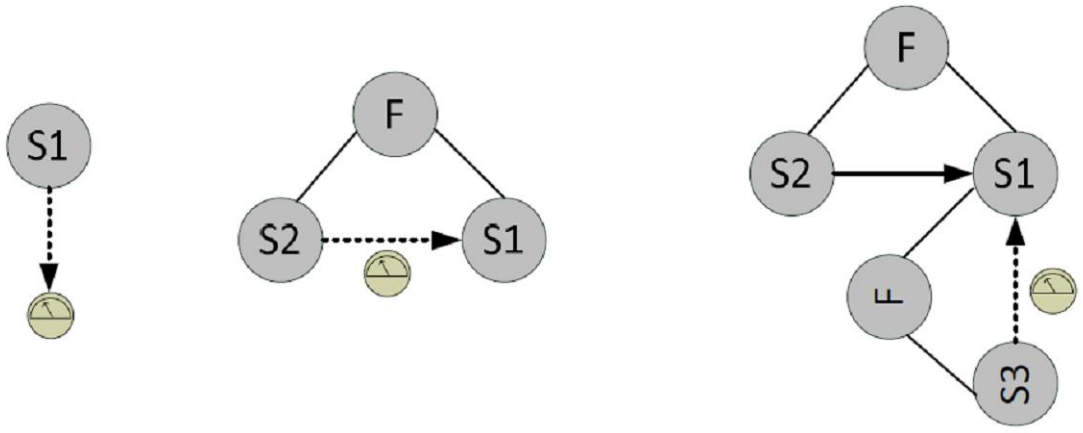



*Figure A2.6 : Problèmes de mesure.*

Pour résoudre ce type de problèmes les solutions proposées sont les suivantes :

### *A2.5.1 Problème de mesure avec la possibilité de changer le système*

- Changer ou modifier le système de telle façon qu'en utilisant les ressources existantes, la nécessité de mesure soit éliminée. Exemple :
  - Standard 4-1-1.

- Mesurer une autre propriété ou un autre élément du système avec l'utilisation d'une substance et/ou d'un champ qui permet de déterminer l'état du paramètre précédemment exigé. Exemple :
  - Standard 4-2-1.
  - Standard 4.2.4.
  - Type 1
- Ajouter des substances externes ou internes dans le système afin de faciliter la mesure ou la détection. Exemple :
  - Standard 4-2-2.
- Utiliser des effets ou une série d'effets afin de réaliser la mesure. Exemple :
  - Standard 4-3-1.
  - Standard 4-4-5.
- Mesurer la réponse du système à une stimulation : oscillation ou résonance. Exemple :
  - Standard 4-3-2.
- Mesurer le changement de la fréquence naturelle de l'objet ou de son environnement afin de déterminer l'état d'une propriété du système. Exemple :
  - Standard 4-3-3.
- Utiliser une substance ferromagnétique et un champ magnétique (soit en remplaçant une des substances déjà existantes soit en l'ajoutant) pour réaliser la mesure. Exemple :
  - Standard 4-4-1.
  - Standard 4 -4-2.
  - Standard 4-4-3.
- Mesurer les différentes propriétés exigées sur une copie du système. Exemple :
  - Standard 4-1-2.
  - Std. 2
  - Standard 5-1-7.
- Mesurer indirectement la propriété désirée grâce à des changements sur les autres propriétés du système ou avec des détections successives
  - Standard 4-1-3.
  - Standard 3-1-1.

### *A2.5.2 Problème de mesure avec l'impossibilité de changer le système*

#### A2.5.2.1 Il est nécessaire d'introduire une substance pour mesurer un système mais ce n'est pas possible.

- Utiliser un champ au lieu d'une substance et mesurer le changement. Exemple :
  - Std. 10.
  - Standard 5-1-2.
- Utiliser une substance externe qui interagit avec l'environnement externe et donc, avec la mesure du changement de l'environnement, rend possible la mesure précédemment exigée. Exemple :
  - Standard 4-2-3.
  - Standard 5-1-3.
  - Standard 1-1-3.

- Mesurer les différentes propriétés exigées sur une copie du système. Exemple :
  - Standard 4-1-2.
  - Std. 2.
  - Standard 5-1-7.
- S'il n'est pas possible de générer des copies du système, transformer le problème de détection par des changements successifs. Exemple :
  - Standard 4-1-3.
  - Standard 3-1-1.
- S'il n'est pas possible de stimuler par oscillation ou résonance, la mesure peut être réalisée avec le changement de la fréquence naturelle de l'objet ou de son environnement. Exemple :
  - Standard 4-3-3.
- S'il n'est pas possible de substituer une des substances par une substance ferromagnétique, la substance ferromagnétique est ajoutée comme une substance temporaire ou permanente dans le système et les mesures sont réalisées avec un champ magnétique.
  - Standard 4-4-3.
- Utiliser une substance très active et mesurer. Exemple :
  - Standard 5-1-4.
- Utiliser une substance très active en petite quantité dans certains endroits et mesurer.
  - Standard 5-1-5.
- Utiliser une substance temporaire et mesurer. Exemple :
  - Standard 5-1-6.
- Utiliser un composant chimique et mesurer (le composant peut être supprimé par décomposition, séparation,…). Exemple :
  - Standard 5-1-8.
- Changer l'état d'une partie de l'objet ou de l'environnement externe et réaliser la mesure. Exemple :
  - Standard 5-1-9.
  - Standard 5-1-2.
- Introduire une substance qui, après la mesure, disparaît ou devient imperceptible dans le système. Exemple :
  - Standard 5-1-3.
- Utiliser ressources existantes (champs et/ou substances) dans le système comme un moyen de produire un champ qui peut être utilisé pour réaliser une mesure. Exemple :
  - Standard 5-2-3.
- Décomposer une substance en une structure supérieure pour produire la substance exigée par la mesure. Exemple :
  - Standard 5-5-1.

#### A2.5.2.2 L'introduction d'un champ est impossible pour réaliser la mesure

- Utiliser des champs présents dans le système pour réaliser la mesure d'un autre paramètre du système pour en déduire indirectement la mesure du paramètre désiré. Exemple :
  - Standard 5-2-1.

- Utiliser un champ externe pour réaliser une mesure d'un autre paramètre du système pour en déduire indirectement la mesure du paramètre désiré. Exemple :
  - Standard 1-1-3.
- Utiliser les champs ou ressources existants comme un moyen pour produire un champ utile pour mesurer directement ou indirectement le paramètre désiré. Exemple :
  - Standard 5-2-3.

#### A2.5.2.3 Utilisation de l'environnement pour réaliser les mesures

- Ajouter des substances à l'environnement, et avec la mesure du changement produit sur l'environnement, il devient possible de réaliser la mesure précédemment exigée. Exemple :
  - Standard 4-2-3.
- Changer l'état de l'environnement et mesurer ce changement. Exemple :
  - Standard 4-2-4.
- S'il est impossible de substituer une des substances par une substance ferromagnétique du système, la substance ferromagnétique est introduite dans l'environnement externe ce qui permet de réaliser la mesure. Exemple :
  - Standard 4-4-4.
- Utiliser des champs présents dans l'environnement pour mesurer le paramètre désiré. Exemple :
  - Standard 5-2-2.
- Remplacer l'environnement afin de faciliter la mesure de l'état du système. Exemple :
  - Standard 1-1-5.
  - Standard 4-2-4.
- Mesurer le changement dans la fréquence naturelle de l'environnement. Exemple :
  - Standard 4-3-3.

### *A2.5.3 Amélioration de l'efficacité d'une mesure*

- Combiner le système avec un système existant et former un multi-système afin de faciliter la mesure. Exemple :
  - Standard 4-5-1.
  - Standard 3-1-1.
- Utiliser la mesure des dérivées de la fonction du paramètre à analyser : mesure de la fonction, puis mesure de la première dérivée, deuxième dérivée, etc. Ainsi, la dérivée d'une quantité pourrait, à son tour, être un autre paramètre qui peut être mesuré. Exemple :
  - Standard 4-5-2.

## A2.6 PROBLEMES D'INTRODUCTION D'UN CHAMP OU D'UNE SUBSTANCE

Pour la création ou l'amélioration d'une ou plusieurs actions, ou l'élimination d'une action non désirée, il est nécessaire d'introduire d'un champ ou une substance mais cela n'est pas possible à cause de contraintes sur le système (figure A2.7).

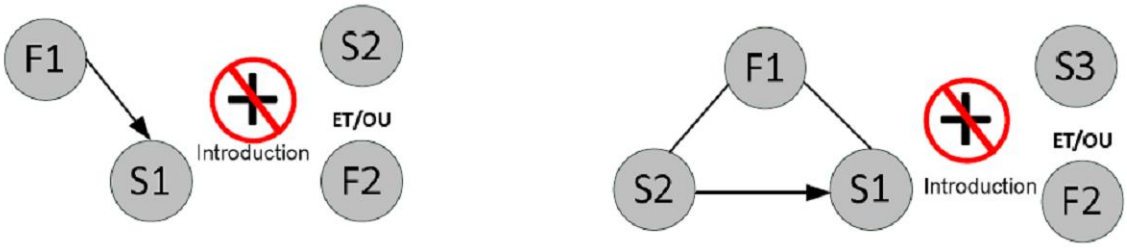



*Figure A2.7 : Problème d'introduction d'un champ ou d'une substance.*

Pour résoudre ce type de problèmes les solutions proposées sont les suivantes :

### *A2.6.1 Introduction d'une substance comme supplémentaire mais c'est impossible*

- Transformer une des substances du système, en deux substances (avec des états ou phases différents) ou utiliser une substance capable de passer d'un état à une autre en fonctions des conditions opératoires. Exemple :
  - Std. 3.
  - Standard 5-1-2.
  - Standard 5-3-1.
  - Standard 5-3-2.
- Transformer une des substances du système en deux substances avec des caractéristiques différentes grâce à l'utilisation d'un effet physique accompagnant la transition de phase. Exemple :
  - Standard 5-3-3.
- Utiliser une substance avec des propriétés différentes obtenues par la transition de phase. Exemple :
  - Standard 5-3-4.
- Utiliser un champ à la place d'une substance. Exemple :
  - Std. 10.
  - Standard 5-1-1-2.
  - Standard 2-4-11.
- Utiliser le vide à la place d'une substance. Exemple :
  - Standard 5-1-1-1.
  - Standard 5-1-1.
- Introduire une substance extérieure au lieu d'une substance interne. Exemple :
  - Standard 5-1-1-3.
- Utiliser une substance ou un champ externe. Exemple :
  - Standard 1-1-3.
  - Standard 2-4-5.
- Utiliser une substance très active. Exemple :
  - Standard 5-1-1-4.
- Utiliser une substance très active en petite quantité dans certains sous-systèmes. Exemple :
  - Standard 5-1-1-5.
- Utiliser une substance temporaire. Exemple :
  - Standard 5-1-1-6.
- Utiliser une copie dans laquelle peut être introduite une substance. Exemple :

    - Standard 5-1-1-7.
- Utiliser un composant chimique, éventuellement décomposable. Exemple :
    - Standard 5-1-1-8.
- Changer l'état d'une partie de l'objet ou de l'environnement externe. Exemple :
    - Standard 5-1-1-9.
    - Standard 2-4-6.
- Introduire une substance qui, après avoir réalisée l'action utile, disparaît ou devient imperceptible dans le système. Exemple :
    - Standard 5-1-3.
- Utiliser les ressources existantes (champs et/ou substances) comme un moyen pour produire une substance ou un champ utilisable. Exemple :
    - Standard 5-2-3.
- Décomposer une substance en une structure supérieure pour produire la substance exigée. Exemple :
    - Standard 5-5-1.
- Combiner une substance à un niveau inférieur pour produire la substance exigée. Exemple :

### *A2.6.2 L'introduction d'un champ est impossible*

- Utiliser les champs existants dans le système. Exemple :
    - Standard 5-2-1.
- Utiliser des champs présents dans l'environnement. Exemple :
    - Standard 5-2-2.
- Utiliser les ressources existantes (champs et/ou substances) comme un moyen pour produire une substance ou un champ utilisable. Exemple :
    - Standard 5-2-3.
- Utiliser un fluide électro-rhéologique. Exemple :
    - Standard 2-4-12

### *A2.6.3 L'utilisation de l'environnement*

- Utiliser l'environnement comme une substance externe. Exemple :
    - Standard 1-1-4.
- Utiliser des champs présents dans l'environnement ou introduire des champs dans l'environnement Exemple :
    - Standard 5-2-2.
    - Standard 2-4-11.
- Ajouter une substance dans l'environnement. Exemple :
    - Standard 1-1-5.
    - Standard 2-4-6.
- Remplacer l'environnement et l'utiliser comme une substance. Exemple :
    - Standard 4-2-3.
    - Standard 1-1-5.
    - Standard 4-2-4.

ANNEXE 3

# ANNEXE 3 : PROGRAMMATION PAR CONTRAINTES

## A3.1 ASPECTS MATHEMATIQUES DE LA PPC

Deux activités principales peuvent résumer la démarche de la PPC :

- La modélisation d'un problème (PSC) :
  - L'introduction des variables et la définition de leurs domaines.
  - La modélisation des contraintes selon un formalisme donné.
  - Les modifications possibles sur un modèle PSC déjà existant dans le but d'améliorer sa performance.
- La résolution d'un PSC :
  - Définir ou choisir un algorithme de recherche.
  - Définir ou choisir des heuristiques.
  - L'utilisation d'un solveur de contraintes.

Par la suite, on détaillera ces deux activités principales de la PPC et parallèlement on illustrera le propos à l'aide d'un exemple simplifié sur la configuration d'un réseau d'eau.

*Exemple : Configuration d'un réseau Hydraulique*
Dans un procédé industriel on voudrait définir un nouveau réseau d'eau d'appoint. Pour ce faire, on dispose de quatre pompes centrifuges de rendement et de type d'impulseur différents ($P_1$ à $P_4$), avec au total trois vitesses de rotation différentes ($R_1$ à $R_3$). Concernant les conduites, on dispose de trois diamètres ($D_1$ à $D_3$) de tubes, ainsi que trois types de matériaux ($M_1$ à $M_3$). Des études menées conduisent à un ensemble de contraintes de compatibilités techniques. Tout d'abord, pour des raisons de pertes de charge en sortie de pompe, il n'est pas possible de connecter tous les diamètres de tube sur toutes les pompes : les tubes de diamètre $D_1$ peuvent se montrer sur les pompes $P_2$ et $P_3$, ceux de diamètre $D_2$ sur les pompes $P_3$ et $P_4$ et enfin ceux de diamètre $D_3$ sur la pompe $P_4$. La vitesse de rotation $R_1$ est disponible sur les pompes $P_1$ à $P_3$, la vitesse $R_3$ seulement sur la pompe $P_3$. Comme la vitesse de rotation des pompes fixe le débit (puisque les pressions sont supposées constantes) et comme la vitesse de l'eau doit être comprise entre 1 et 2 m/s, ceci génère des contraintes entre diamètre de conduite et vitesse de rotation : la vitesse $R_1$ n'est compatible qu'avec les diamètres $D_1$, la vitesse $R_2$ avec le diamètre $D_2$, la vitesse $R_3$ avec les diamètres $D_2$ et $D_3$. Au niveau des matériaux, les tubes de diamètres $D_2$ sont forcément du type $M_1$, et ceux de diamètre $D_1$ et $D_3$ de type $M_2$.

## A3.2 LES ELEMENTS D'UN PSC

Le cadre de la PPC est basé sur les notions de variables, de domaines et de contraintes. On s'intéresse donc à trouver une affectation de toutes les variables qui satisfasse toutes les contraintes.

Les **variables**, aussi appelées contraintes inconnues, prennent leurs valeurs dans un ensemble donné, dénommé domaine. En générale elles peuvent être continues ou discrètes. Les techniques de traitement devront tenir compte du type de ces variables. Il est donc possible d'identifier trois types de PSC : discrets (pour des variables symboliques, numériques, entières ou réels), continus (domaines numériques infinis), mixtes (problèmes combinant les deux types précédents).

Une **contrainte** exprime une relation qui porte sur une ou plusieurs variables qui restreint le degré de liberté lié à l'évolution des variables. Cette relation peut être continue, discrète ou mixte (Sam 1995). C'est une expression reliant des variables de décision. Résoudre ou satisfaire une contrainte consiste à trouver, pour chaque variable du problème, une affectation qui satisfait la condition définie par celle-ci. Ainsi une contrainte provoque une restriction sur les valeurs que peuvent prendre simultanément les variables. Parmi les différents types de contraintes on distingue : les contraintes logiques, arithmétiques, explicites et complexes (e.g. globales : all−different).

Une **contrainte** peut être définie en extension (tous les tuples ou l'ensemble des valeurs autorisées), ou en intention (expression synthétique de la restriction sur les domaines des variables). En général on préfère la dernière approche, notamment pour les systèmes de grande taille car elle permet d'exprimer un problème de manière plus concise. Elle est également utilisée pour décrire les PSC numériques, car il n'est pas possible d'énumérer toutes les combinaisons de valeurs possibles pour des intervalles sur les nombres réels.

La **solution** d'un PSC est une instanciation de toutes les variables qui satisfait toutes les contraintes. Elle est une affectation totale et consistante des variables. Si un PSC a une ou plusieurs solutions, alors il est consistant par contre s'il n'y en a aucune on parle d'inconsistante. Selon l'objectif de résolution du PSC on peut chercher :

- Une solution, n'importe laquelle, satisfaisant l'ensemble des contraintes,
- L'ensemble des solutions du problème,
- Une solution optimale ou au moins une bonne solution par rapport à un critère,
- A prouver la non existence de solution.

## A3.3 LA MODELISATION D'UN PSC

La modélisation consiste à représenter un problème dans un formalisme particulier. On ne se soucie pas de savoir comment le résoudre, on cherche simplement à le spécifier formellement. Cette démarche constitue la principale difficulté pratique de la PPC, car une fois représenté dans le formalisme voulu, un problème peut être résolu automatiquement à l'aide d'un solveur adapté. Un PSC est donc défini par un triplet {**V, D, C**} tel que :

- $\boldsymbol{V} = \{V_1, V_2, ..., V_n\}$ est un ensemble fini de variables
- $\boldsymbol{D} = \{D_1, D_2, ..., D_n\}$ représente l'ensemble des domaines de valeurs des variables, avec $\forall i=1,.., n, x_i \in D_i$. Les domaines peuvent être :
  - Ensembles discrets et finis : {1, 2,…, *n*}, {2, 3, 5}, {rouge, noir, bleu}
  - Intervalles : [0, *k*], [1,2 ; 5,9]
  - Valeurs continus : [3,4 ; +∞[, ]-∞ ; +∞[
- $\boldsymbol{C} = \{C_1, C_2, ..., C_n\}$ est un ensemble de contraintes entre les variables, c'est-à-dire un sous-ensemble de $D_1 x ... x D_n$.

En général la modélisation d'un problème comprend plusieurs étapes :

- Identification de toutes les variables.

- Identification des domaines de valeurs de ces variables.
- Identification des contraintes.

Souvent il existe plusieurs modélisations possibles, critères de choix :
- Simplicité d'expression
- Efficacité : taille de l'espace de recherche de solutions

Exemple : Configuration d'un réseau Hydraulique
Dans l'exemple choisi, la formulation du problème permet de développer un modèle intégré par les éléments fondamentaux d'un PSC. Le problème peut être alors représenté par le triplet {V, D, C} :
- Variables (V) : Pompes, VitesseR, Diamètre, Matériau
- Domaines (D) : {$P_1$, $P_2$, $P_3$, $P_4$}, {$R_1$, $R_2$, $R_3$}, {$D_1$, $D_2$, $D_3$}, {$M_1$, $M_2$, $M_3$}
- Contraintes (C) : C1 (Pompe, Diamètre) ; C2 (VitesseR, Pompe) ; C3 (Diamètre, VitesseR) ; C4 (Matériau, Diamètre).

A noter que les contraintes sont exprimées en extension, et représentées sous la forme d'une macro-structure sur la figure 3.1. La macro structure est un graphe non orienté dont les nœuds sont les variables et les arêtes les contraintes du problème.

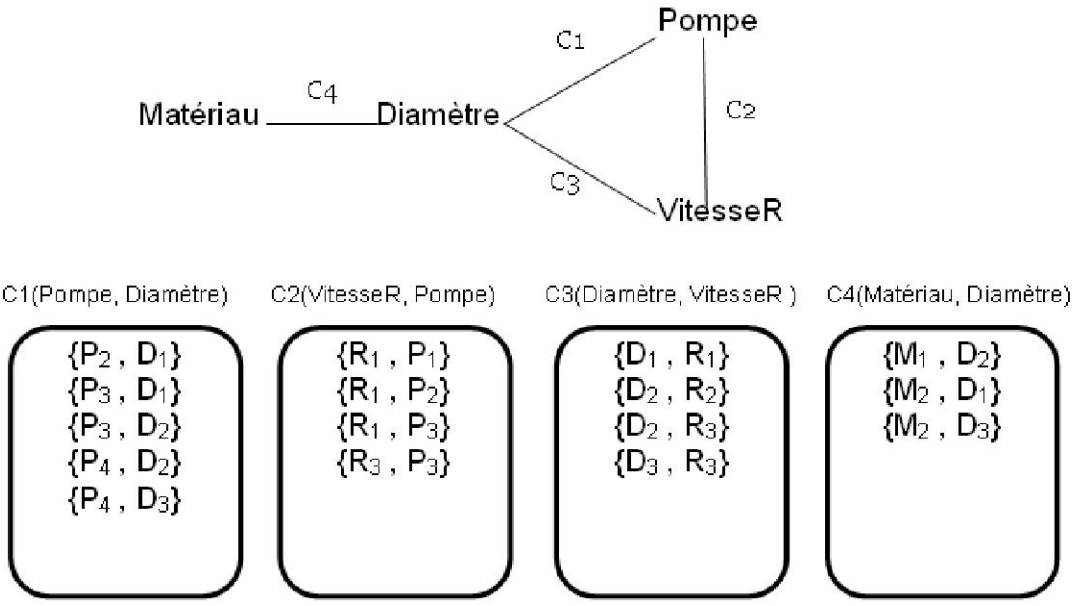



*Figure A3.1 : Représentation du problème de configuration de réseau*

A l'heure actuelle il n'existe pas une méthodologie spécifique pour la modélisation des PSC toutefois on peut énoncer les étapes suivantes (Bailleux 2011) :
- *Partir de la représentation d'une solution* : Il faut d'abord penser à la forme que doit prendre une solution du problème, et ainsi définir les variables.

- *Extraire les contraintes de l'énoncé* : L'énoncé du problème exprime les contraintes ou propriétés qui doivent être respectées par une solution. Il faut que l'expert isole chacune de ces contraintes, puis l'exprime sous la forme d'une relation entre les variables qui ont été préalablement définies.
- *Décomposer certaines contraintes* : Il arrive qu'une des contraintes extraites de l'énoncé du problème ne puisse pas directement être spécifiée dans le formalisme disponible. Il faut alors la décomposer en plusieurs contraintes.
- *Introduire des variables de liaison* : La décomposition de certaines contraintes requiert l'introduction de variables dites de liaison. Ces variables de liaison permettent l'introduction de « valeurs intermédiaires » qui seront utilisées dans de nouvelles contraintes.

## A3.4 LA RESOLUTION D'UN PSC

La résolution d'un PSC fait généralement appel à deux types d'algorithmes : les algorithmes de recherche et les algorithmes de propagation basés sur des opérateurs de réduction. Ces deux types d'algorithmes sont suffisamment génériques pour s'appliquer à tout type de problèmes.

La propagation de contraintes permet d'inférer des contraintes et des domaines plus restrictifs. Le principe d'une inférence est alors de propager les informations contenues dans une contrainte aux contraintes voisines. Ces inférences sont basées sur l'application de techniques de cohérence de domaines, aussi appelées techniques de consistance, qui permettent de filtrer les valeurs ou les ensembles de valeurs qui participent à une solution. Généralement les techniques employées pour résoudre les PSC dépendent des domaines et sur le type des contraintes utilisées.

Une résolution d'un PSC porte donc sur une affectation de valeurs aux variables de telle sorte que toutes les contraintes soient satisfaites. On distingue plusieurs types d'affectation :

- Affectation complète : affectation de toutes les variables.
- Affectation partielle : affectation de certaines variables.
- Affectation consistante : affectation qui ne viole aucune contrainte.
- Affectation inconsistante : affectation qui viole au moins une contrainte.

La résolution d'un PSC est un problème NP-complet dans le cas général. Le mécanisme de résolution consiste (schématiquement) à répéter les deux étapes :

- Réduction des problèmes par filtrage,
- Parcours exhaustive de l'espace de recherche à l'aide d'algorithme de recherche arborescente.

La réduction des problèmes par filtrage, repose sur des propriétés de consistance (ou cohérence) partielle : degré de compatibilité entre valeurs des domaines et contraintes. Différents algorithmes ont été développés pour résoudre les PSC, c'est-à-dire un processus d'instanciation des variables qui permet de déterminer s'il est satisfiable ou pas. Pour la résolution de ces problèmes on distingue trois parties : la consistance locale, les algorithmes de recherche et les heuristiques. Le choix des variables et la manière dont leur domaine est énuméré, sont souvent cruciaux pour l'efficacité de l'algorithme de résolution, par conséquent, des heuristiques peuvent

être mises en place. Une brève description des différentes techniques pour chacun des points précédents est donnée par la suite.

### *A3.4.1 Les algorithmes de recherche*

La recherche arborescente est l'algorithme de base pour explorer l'espace de recherche de manière systématique. Ils définissent la manière dont est généré et exploré cet arbre. La construction de cet arbre se fait en découpant le domaine d'une variable de manière à obtenir plusieurs sous problèmes à traiter séparément. Dans ces conditions un nœud représente une affectation partielle. Un nœud père et donc un problème équivalent à l'union des problèmes représentés par ses nœuds fils. La racine de l'arbre est une affectation vide, une feuille une affectation complète.

Il existe trois modes de parcours d'arbre de recherche : profondeur d'abord, largeur d'abord et meilleur d'abord (développer le meilleur nœud suivant une fonction d'évaluation). Par rapport aux deux autres modes, celui en profondeur d'abord comporte l'avantage principal d'avoir un espace mémoire requis polynomial. L'algorithme de recherche le plus souvent utilisé est l'algorithme de backtrack.

Les algorithmes de « backtracking » sont la base fondamentale des algorithmes de recherche systématique pour la résolution des PSC. Ces algorithmes ont pour but la recherche dans l'espace des assignations possibles de valeurs aux variables pour trouver une solution, s'il y en a une, ou démontrer que le problème n'a pas de solution.

Dans la recherche arborescente, dès qu'une affectation partielle courante n'est pas consistante alors un mécanisme de retour arrière sur le nœud précèdent est opéré afin d'explorer les prochaines branches. La figure A3.2 présente l'exécution de l'algorithme de backtrack pour résoudre le problème de configuration de réseau d'eau.

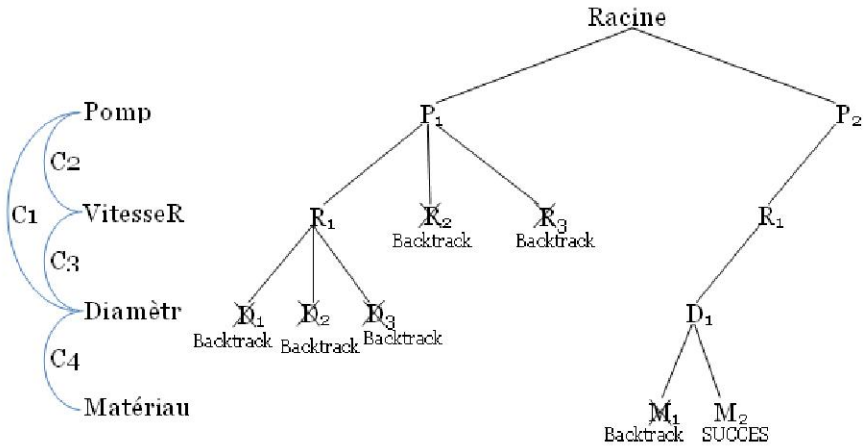



*Figure A3.2 : Algorithme de Backtracking appliqué à la configuration de réseau.*

Dans la littérature plusieurs algorithmes de recherche ont été créés, pour les domaines discrets et basés sur des variantes plus ou moins importantes du « Backtrack » comme : « backtraking chronologique », « backjumping » (Gaschig

1979), « conflict-direct backtracking » (Prosser 1996), « backtracking dynamique » (Ginsberg 1993). A titre d'exemple une amélioration consiste à effectuer les retours arrière de façon plus intelligente. En effet lors d'un échec, on va essayer de remonter à la variable fautive et non pas sur une variable dont on est sûr qu'elle ne joue aucun rôle dans l'incohérence trouvée. La figure A3.3 illustre un tel algorithme pour l'exemple traité. L'algorithme détecte que pour l'affectation partielle (Pompe= $P_1$ ; VitesseR= $R_1$) toutes les extensions suivantes sont incohérentes (contrainte C1 non respectée voire C3 pour certaines valeurs). Donc quelle que soit l'affectation de VitesseR, ses extensions seront incohérentes avec Pompe=$P_1$. Un Backtrack intelligent revient sur l'affectation de la variable Pompe pour passer à la valeur suivante.

L'une des principales difficultés des algorithmes de recherche est l'apparition d'inconsistances locales qui apparaissent continument (Mackworth 1977). Les inconsistances locales sont des valeurs individuelles ou des combinaisons de valeurs des variables qui ne peuvent pas participer à une solution puisqu'elles ne satisfont pas au moins une propriété de consistance. Par ailleurs une consistance globale signifie que toutes les valeurs qui ne peuvent pas participer dans une solution soient éliminées.

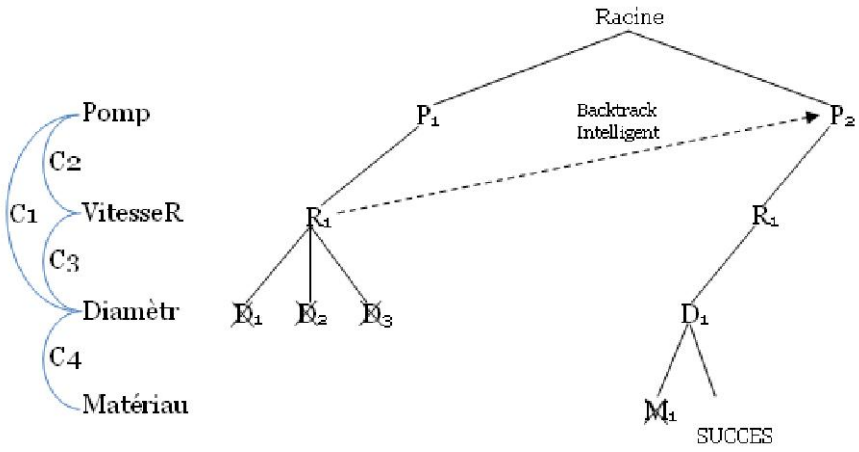



*Figure A3.3 : Algorithme de Backtrack intelligent.*

### *A3.4.2 Les heuristiques*

Les heuristiques sont des guides pour effectuer des choix, et sont d'une grande importance dans les résultats obtenus en programmation par contraintes (Fages 1996). Un algorithme de recherche requiert un ordre pour l'étude des variables, ainsi qu'un ordre avec lequel on va instancier les valeurs de chacune des variables. Choisir correctement l'ordre des variables et des valeurs peut notamment améliorer l'efficience de résolution. D'autres heuristiques peuvent tenir compte de la structure du problème et du réseau des contraintes (ordonnancement adéquat des contraintes) (Salido et Barber 2003). Parmi les différentes heuristiques on trouve notamment des heuristiques sur :

- L'ordonnancement des variables : Elles ont été élaborées afin de déterminer la prochaine variable à affecter (Boivin 2005). Les heuristiques d'ordonnancement des variables essaient de sélectionner, le plus tôt possible, les variables qui

restreignent les autres variables. Des heuristiques assez simples sont par exemple choisir en premier : la variable avec le plus petit domaine (adapté pour PSC discret), la variable avec le plus grand domaine (adapté pour PSC continu), la variable la plus contrainte. Sur la figure A3.4 on peut visualiser que le changement de l'ordre de variables réduit le nombre de retour arrière pour l'exemple.

- L'ordonnancement des valeurs dans les domaines. Elles changent l'ordre d'exploration des branches de l'arbre de recherche d'un problème. Elles influent fortement sur l'efficacité d'une méthode de recherche (Dechter 1990). L'heuristique « min-conflit » (Minton et al. 1992) est l'une des méthodes les plus connues. Elle choisit au hasard, une variable instanciée qui est en conflit avec une contrainte quelconque. Ensuite, elle attribue à cette variable la valeur qui réduira le plus grand nombre total de conflits. Une nouvelle itération recommence jusqu'à ce qu'une solution soit trouvée ou qu'un nombre maximal d'itérations soit atteint. Tout comme précédemment, différentes heuristiques peuvent être mises en œuvre en fonction du type des domaines (continu, discret).
- L'ordonnancement des inférences. Elle est effectuée par l'insertion des révisions à effectuer dans une structure particulière de données. Elle est aisément implémentée en traitant d'abord les révisions de contraintes issues des dernières suppressions. Dans le cas de problèmes inconsistants, il a été observé que ces révisions aboutissent plus rapidement à une solution (Bessiere et al. 1995). D'une façon plus générale Wallace et Freuder (Wallace et Freuder 1992) ont proposé différentes heuristiques d'ordonnancement de ces inférences. Les plus performantes choisissent dans la structure stockant les arcs à réviser, l'arc dont la contrainte possède la plus grande complexité, ou bien encore elles sélectionnent l'arc dont les variables ont les plus petits domaines (Benelallam 2010).

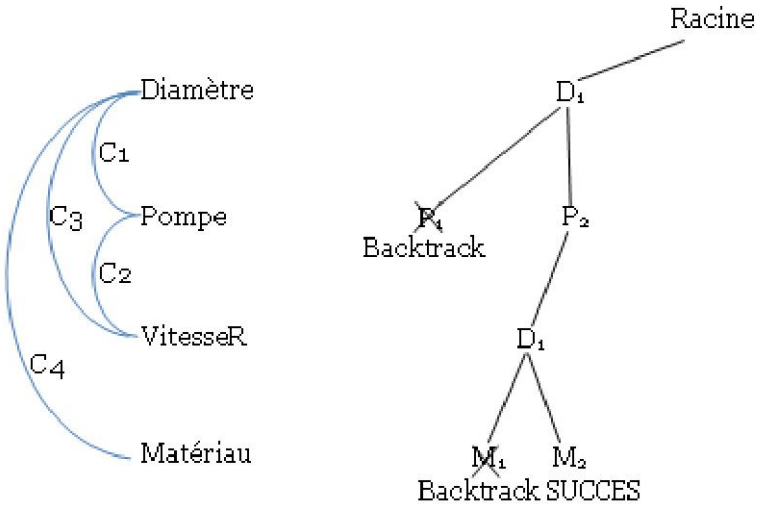



*Figure A3.4 : Backtrack avec heuristique sur ordre des variables*

### *A3.4.3 Filtrage sur des domaines discrets*

Dans la littérature il a été proposé plusieurs techniques de consistance locale afin d'améliorer l'efficience des algorithmes de recherche. De telles techniques éliminent des valeurs inconsistantes des domaines des variables ou induisent des restrictions

implicites qui aident à réduire l'espace de recherche. Ces techniques de consistance locale sont utilisées avant de commencer ou pendant la recherche afin de réduire l'arbre de recherche.
Dans les techniques de résolution précédentes, les contraintes sont utilisées que pour tester la cohérence d'une affectation (utilisation passive). Les techniques de filtrage utilisent les contraintes de manière active pour effectuer des déductions sur le problème. L'objectif principal de ces techniques est de détecter des affectations partielles incohérentes, et ainsi de réduire les domaines des variables en s'appuyant sur les contraintes. Une des techniques les plus utilisées est la cohérence d'arc. Cette dernière vérifie que toute valeur du domaine d'une variable est compatible avec chaque contrainte prise séparément.

Exemple : Configuration d'un réseau Hydraulique
Un exemple d'application du filtrage par arc cohérence au problème exposé dans l'exemple du réseau d'eau simplifie le problème initial à :

D (Pompe)= $\{P_2 ; P_3\}$ ; D(diamètre)= $\{D_1 ; D_2\}$
D (Vitesse R)= $\{R_1 ; R_3\}$ ; D(Matériau)= $\{M_1 ; M_2\}$

Il existe de nombreux algorithmes différents implémentant la cohérence d'arc (C. Lecoutre et al. 2003) , (Lecoutre et al. 2003) et (Bessiere 2006) en donnent un descriptif. En effet ils offrent un bon compromis entre force du filtrage et temps calcul. Le filtrage idéal supprime toutes les valeurs incohérentes de tous les domaines (filtrage global) mais le temps calcul devient rédhibitoire. Le degré de filtrage correspond donc au nombre de variables k participant à la vérification de la cohérence locale (par opposition à filtrage global), on parle de k-consistance. Si k =2, la 2-cohérence équivaut à la cohérence d'arc. Pour k>2, les algorithmes s'appliquent uniquement pour des contraintes binaires contrairement à la cohérence d'arc qui a été étendue à des contraintes n-aires. En général, les k-consistance (pour k>3) ont une complexité trop élevée pour une utilisation dans la plupart des problèmes.
Dans la pratique, les techniques de filtrage sont couplées avec des techniques de recherche arborescente. Une façon d'effectuer le couplage est de réaliser le filtrage pendant la recherche arborescente. A chaque nœud constituant un sous problème on effectue un filtrage. L'algorithme de « Forward Checking » combine un Back Tracking avec une anticipation par arc-cohérence. Cette dernière permet d'éliminer les valeurs des variables non encore instanciées qui sont incompatibles avec l'affectation partielle courante. Si un domaine d'une variable non instanciée devient vide alors l'affectation n'est globalement pas cohérente et un retour-arrière est effectué. La figure A3.5 démontre l'application de cet algorithme à l'exemple. L'affectation partielle Pompe=$P_1$ permet de réduire le domaine des variables VitesseR et Diamètre. Le domaine de cette dernière variable étant vide prouve que cette affectation partielle (Pompe=$P_1$) n'est pas globalement cohérente. Avec cet algorithme on n'effectue qu'un seul Backtrack sur l'exemple. A noter qu'il existe d'autres algorithmes que le Forward-cheking, on peut notamment citer l'algorithme Look-ahead.

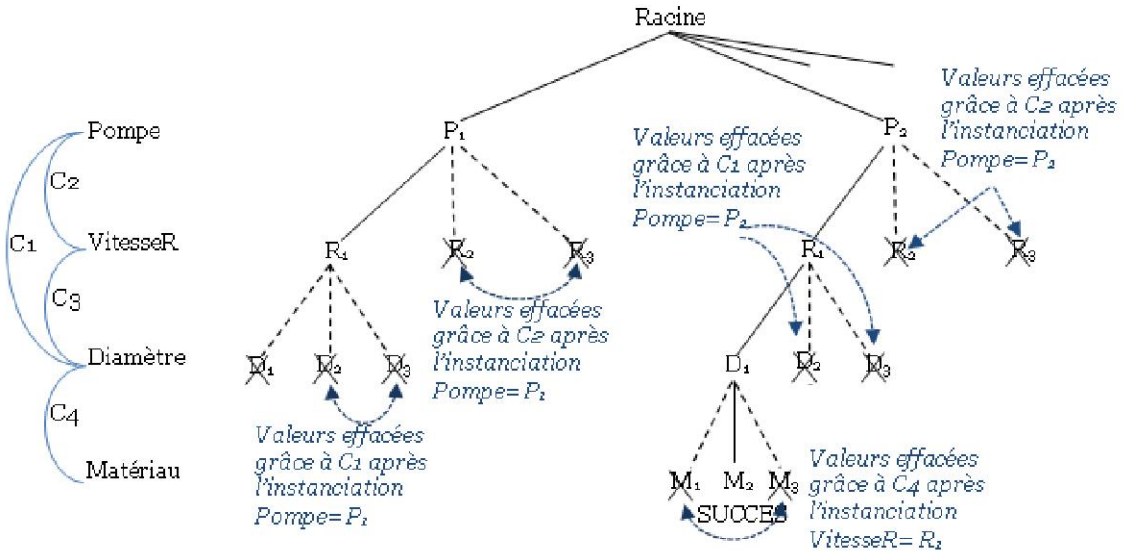



*Figure A3.5: Algorithme de Forward Checking appliqué à la résolution de l'exemple*

### *A3.4.4 Le filtrage sur les domaines continus*

D'après (Bessiere 2006) le traitement des domaines continus peut se faire suivant deux approches : par une discrétisation des domaines continus ou sur la base du calcul ensembliste. Pour cette dernière, diverses techniques mathématiques (équivalentes des méthodes de filtrage sur domaines discrets) ont été développées permettant de réduire les domaines continus afin de calculer des solutions consistantes. On appelle ces types de problèmes des PSC numériques. (Delobel 2000) a réalisé une classification des différentes méthodes de filtrage pour ces problèmes et (Vareilles 2005) les compare en termes de puissance et degré de filtrage. Chacune de ces méthodes est plus adaptée à certaines formes de contraintes numériques. Pour des fonctions continues monotones, la 2B-cohérence procure un filtrage suffisant. Pour des fonctions non-monotones (mais dérivables), la Box-cohérence est plus adaptée (Van Oudenhove 2006).

A noter que la recherche de toutes les solutions sur des PSC numériques pose des difficultés (mathématiques et de temps de calcul) notamment lors de l'identification de tous les éléments d'un ensemble infini. La recherche de solutions est complète et exacte pour les PSC discrets (problème NP-complet) alors qu'elle est approchée pour les PSC numériques (Van Oudenhove 2006). En effet, les techniques permettant de les résoudre reposent sur l'arithmétique des intervalles.

### *A3.4.5 L'arithmétique des intervalles*

Les bases de l'arithmétique des intervalles ont été établies dans les travaux de (Moore 1966). Celles-ci correspondent aux quatre opérations de base étendues aux intervalles. Soient [a; b] et [c; d] deux intervalles :

[a; b] + [c; d] = [a + c; b + d] ;
[a; b] - [c; d] = [a − d; b − c] ;
[a; b] * [c; d] = [min(ac, ad, bc, bd) ; max(ac, ad, bc, bd)] ;

[a; b] / [c; d] = [min(a/c, a/d, b/c, b/d) ; max(a/c, a/d, b/c, b/d)] si 0 ∈ [c; d],

Plus tard (Neumaier 1991) étend cette arithmétique aux fonctions élémentaires (e.g. cos, log) et (Shapiro et al. 1997) quant à lui, démontre qu'en l'étendant aux multi-intervalles, il n'y a pas d'explosion combinatoire. Dans cette dernière, les opérations de base deviennent les unions des opérations de base sur les produits cartésiens des intervalles. Dans l'exemple ci-dessous proposé par (Van Oudenhove 2006), une contrainte est étendue aux intervalles.

*Exemple : Extension d'une contrainte aux intervalles*
Soit a, b, c, d et z des variables continues définies sur :
Da,b,c,d = [1 ; 2] et Dz = [0 ; 10]
Soit la contrainte : z = 2 x a + b/c – d
Alors z = (2 x a) + (b / c) – d
= (2 x [1 ; 2]) + ([1 ; 2] / [1 ; 2]) – [1 ; 2]
= [2 ; 4] + [0,5 ; 2] – [1 ; 2]
= [2,5 ; 6] – [1 ; 2]
= [0,5 ; 5]

D'un côté, l'approche de satisfaction de contraintes par intervalles offre la possibilité de (Hyvönen 1992) : représenter des problèmes inexacts en termes d'intervalles, calculer des solutions à un niveau plus abstrait, raisonner dans des situations sous-contraintes et avec des données inconsistantes et représenter des solutions inexactes et généralisées. De l'autre, le filtrage par l'arithmétique des intervalles ( Van Oudenhove 2006) : est facile à mettre en œuvre (il suffit de définir les opérateurs mathématiques) et permet de ne pas trop alourdir les calculs, garantit de ne pas perdre de valeurs pouvant mener à des solutions et permet de filtrer plus ou moins efficacement tout type de fonction (pas d'hypothèses d'application contraignantes). Les points suivants décrivent deux des techniques les plus connues sur les intervalles.

### *A3.4.6 B-cohérence et Box cohérence*

La 2B-cohérence (Hull cohérence) est définie comme un filtrage aux limites des intervalles (Lhomme 1993). Une contrainte est donc 2B-cohérente si pour chacune des variables qu'elle englobe prenant la valeur des bornes de son intervalle de définition, il existe au moins une valeur dans le domaine des autres variables permettant de satisfaire la contrainte. La 2B-cohérence permet de ne pas perdre de valeurs pouvant mener à des solutions. Cependant, les hypothèses d'application de cette méthode de filtrage numérique sont trop contraignantes (Van Oudenhove 2006). Pour pouvoir appliquer la 2B-cohérence, les contraintes numériques doivent être des fonctions : sans multi-occurrence de variables (celles-ci n'apparaissant qu'une seule fois dans chaque contrainte), monotones et projetables sur chacune de leurs variables. D'après (Van Oudenhove 2006), en conception, ces trois conditions sont rarement remplies à cause de la complexité des problèmes.
La Box-cohérence se propose d'aller au-delà des conditions d'application de la 2B-cohérence (Benhamon et al. 1994). Le but de la Box-cohérence est de déterminer le domaine le plus petit possible par réduction successive des bornes supérieures et

inférieures du domaine de définition (Sam 1995). Une contrainte est Box-cohérente si pour toute variable $X_i$ appartenant à cette contrainte, les bornes de l'intervalle de la variable $X_i$ vérifient la contrainte obtenue en remplaçant chaque occurrence de $X_j$ ($X_j$, $X_i$) par l'intervalle de valeurs de $X_j$.

D'après (Chenouard 2007) face à des contraintes complexes (arité supérieure à trois), la Box-cohérence permet d'obtenir une meilleure approximation que la 2B-cohérence sur l'ensemble de solutions. En conception préliminaire cela semble avantageux car souvent les modèles comportent des contraintes complexes. (Chenouard 2007) propose une bonne alternative en combinant ces deux consistances afin d'obtenir de meilleurs résultats vis-à-vis du temps calcul.