



# UNIVERSITÉ AIX-MARSEILLE

École Doctorale en Mathématiques et Informatique-ED 184

Laboratoire d'Informatique et Systèmes / UMR CNRS 7020

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : Automatique

**Taher MARZOUGUI**

---

Réduction du coût énergétique d'un réseau d'irrigation agricole :  
optimisation de la facture, diagnostic de fuites et production  
énergétique locale à base des énergies renouvelables

---

Soutenue le 20/12/2018 devant le jury composé de :

<b>Catherine CADET</b>	MCF-HDR, Université de Grenoble	Rapporteur
<b>Hamid GUALOUS</b>	Pr, Université de Caen Normandie	Rapporteur
<b>Vicenç PUIG</b>	Pr, Université de Barcelone	Examineur
<b>Salah BOURENNANE</b>	Pr, École Centrale de Marseille	Président
<b>Nazih MOUBAYED</b>	Pr, Université Libanaise	Examineur
<b>Daniel HISSEL</b>	Pr, Université Franche Comté	Examineur
<b>Seifeddine BEN ELGHALI</b>	MCF, Université Aix Marseille	Co-encadrant
<b>Rachid OUTBIB</b>	Pr, Université Aix Marseille	Directeur
<b>Sandrine PIGNARD</b>	Directrice du Canal de Carpentras	Invitée
<b>Alain GUILLAUME</b>	Président du Canal de Carpentras	Invité



Cette oeuvre est mise à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

# Résumé

L'eau est abondante sur terre, cependant, elle n'est pas répartie de façon équitable sur le globe. C'est ainsi, que des systèmes de distribution d'eau ont été conçus pour répondre aux différents besoins. Dans ce cadre, pour rendre fertiles les terres au-dessus de la source, des réseaux d'irrigation ont été mis en œuvre en exploitant des systèmes de pompage. Cependant, les réseaux sous pression sont sources de dépenses énergétiques colossales et de pertes en eau qui représentent des enjeux économiques importants. Ceci constitue un défi majeur en vue de l'optimisation des dépenses énergétiques.

La présente thèse vise l'analyse du coût énergétique d'un réseau d'irrigation avec application au canal de Carpentras. L'objectif de ce travail est de minimiser les dépenses énergétiques du réseau. Pour ce faire, trois approches ont été explorées. Dans une première partie, une étude s'est focalisée sur l'optimisation des contrats d'électricité d'un point de vue administratif. Le but a été de proposer une méthodologie permettant d'optimiser le coût de la facture d'électricité en agissant sur des éléments du choix de l'exploitant. Dans la deuxième partie, une méthodologie pour la détection et localisation de fuites éventuelles, dans le réseau d'irrigation, est proposée. Cette méthode est fondée sur l'analyse de la circulation de l'eau. La troisième partie a été dédiée au dimensionnement d'un système de production énergétique basé sur l'utilisation des sources renouvelables.

**Mots clés :** réseau d'irrigation, optimisation de la facture énergétique, diagnostic des fuites, énergies renouvelables

# Abstract

Water is abundant on earth, however, it is not evenly distributed on the globe. Thus, water distribution systems have been designed to meet different needs. In this context, to make fertile lands above the source, irrigation networks were implemented by operating pumping systems. However, pressurized networks are a source of huge energy expenditures and water losses that represent important economic issues. This is a major challenge for optimizing energy expenditure.

The present thesis aims to analyze the energy cost of an irrigation network with application to the Carpentras canal. The objective of this work is to minimize the energy expenditure of the network. To do so, three approaches have been explored. Firstly, a study focused on the optimization of electricity contracts from an administrative point of view. The aim was to propose a methodology to optimize the cost of the electricity bill by acting on elements chosen by the operator. Secondly, a methodology for the detection and localization of possible leaks, in the irrigation network, is proposed. This method is based on the analysis of the circulation of water. Finally, a part was dedicated to the sizing of an energy production system based on the use of renewable sources.

**Keywords :** irrigation network, optimization of the energy bill, diagnosis of leaks, renewable energy

# Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre d'une thèse CIFRE réalisée en collaboration avec le Laboratoire d'Informatique et Systèmes (LIS) de l'Université d'Aix Marseille et l'Association Syndicale Autorisée du Canal de Carpentras.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) qui m'a permis grâce à une aide financière, d'achever ma thèse dans des conditions convenables.

Je voudrais tout d'abord exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Monsieur [Rachid Outbib](#) pour ses efforts et ses conseils avisés et pertinents tout au long de ce travail. Sans son aide, ce travail n'aurait pas été mené à terme. Je remercie également mon co-encadrant de thèse, Monsieur [Seifeddine Ben Elghali](#) pour son encouragement et son aide.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury d'avoir accepté l'évaluation de ce travail de thèse. Un remerciement particulier au président du jury, Monsieur [Salah Bourenane](#), à Madame [Catherine Cadet](#) et Monsieur [Hamid Gualous](#) qui m'ont fait l'honneur de rapporter ces travaux. Je remercie également Monsieur [Vicenç Puig](#), Monsieur [Nazih Moubayed](#) et Monsieur [Daniel Hissel](#), en leur qualité d'examinateurs d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

J'adresse mes remerciements à Monsieur [Alain Guillaume](#), président du canal de Carpentras, pour la confiance qu'il m'a témoignée. Mes remerciements vont ensuite naturellement à tout le personnel du canal de Carpentras pour leurs aides et leurs qualités humaines.

Je tiens à remercier tous les membres du laboratoire LIS pour la sympathie et la gentillesse dont ils m'ont fait part. Un grand merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce travail.

Je souhaiterais finir en exprimant ma profonde reconnaissance, à mes chers parents en Tunisie et à mon adorable famille pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce travail. Je leur adresse toute ma gratitude du fond du cœur. Avec tout respect et amour, je leur dédie ce travail.

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>4</b>
<b>Remerciements</b>	<b>5</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>9</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>11</b>
<b>Introduction</b>	<b>15</b>
<b>1 Généralités sur les systèmes de distribution d'eau</b>	<b>16</b>
1.1 Introduction	16
1.2 Réseaux de distribution d'eau	16
1.2.1 Description des réseaux sous pression	17
1.2.2 Modélisation mathématique d'un réseau	24
1.2.3 Méthodes de supervision	28
1.2.4 Méthodes de détection des fuites	31
1.2.5 Spécificités des réseaux d'irrigation	33
1.2.6 Usagers	34
1.2.7 Réseaux d'irrigation et enjeu énergétique	34
1.3 Canal de Carpentras	36
1.3.1 Historique	36
1.3.2 Chiffres clés	37
1.3.3 Description du canal	37
1.3.4 Instrumentation et information disponible	38
1.3.5 Usagers	40
1.3.6 Évolution de la demande	41
1.3.7 Pertes en eau	42
1.3.8 Évolution de la facture énergétique	43
1.4 Conclusion	44
<b>2 Optimisation des contrats d'électricité</b>	<b>46</b>
2.1 Introduction	46
2.2 Formulation mathématique du problème d'optimisation	47
2.2.1 Position du problème	47
2.2.2 Définitions	48
2.2.3 Souscription	49
2.2.4 Pénalités	49

2.2.5	Contraintes	50
2.2.6	Problème d'optimisation	51
2.3	Solution optimale à base des outils informatiques	52
2.3.1	Position du problème	52
2.3.2	Ensemble de réalisabilité	52
2.3.3	Principe de résolution	53
2.3.4	Réduction du temps de calcul	57
2.4	Résolution analytique du problème d'optimisation	61
2.4.1	Position du problème	61
2.4.2	Analyse de la fonction "objectif"	64
2.4.3	Résolution du problème d'optimisation	70
2.5	Application numérique	76
2.6	Conclusion	77
<b>3</b>	<b>Détection et localisation de fuites</b>	<b>78</b>
3.1	Introduction	78
3.2	Modélisation et analyse du bilan d'eau	79
3.2.1	Description de la circulation d'eau	79
3.2.2	Modélisation des pertes dues à la structure	81
3.2.3	Modélisation des pertes dues à l'évaporation	89
3.3	Stratégie de diagnostic	93
3.3.1	Information disponible	94
3.3.2	Description de la démarche	96
3.4	Étude de cas	98
3.4.1	Données numériques	98
3.4.2	Résultats et discussions	101
3.5	Conclusion	107
<b>4</b>	<b>Système de production locale d'énergie électrique</b>	<b>108</b>
4.1	Introduction	108
4.2	Description de la démarche	109
4.3	Courbe de charge, potentiel énergétique et capteurs	110
4.3.1	Courbe de charge	110
4.3.2	Analyse du potentiel énergétique	111
4.3.3	Modélisation des capteurs énergétiques	112
4.4	Position du problème d'optimisation	114
4.4.1	Notions préliminaires et hypothèses de travail	114
4.4.2	Position du problème	115
4.5	Résolution du problème	117
4.6	Application numérique	121
4.7	Discussion	129
4.8	Conclusion	129

<b>Conclusion</b>	<b>130</b>
<b>Publications</b>	<b>131</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>132</b>
<b>Annexes</b>	<b>138</b>



# Liste des figures

1.1	Représentation d'un réseau sous pression	18
1.2	Station de pompage	19
1.3	Courbe caractéristique d'une pompe	20
1.4	Conduites, jonctions et branchements	20
1.5	Exemple d'un réseau maillé	21
1.6	Rétrécissement d'une conduite	22
1.7	Différentes formes de bassins	22
1.8	Mécanisme des vannes	23
1.9	Canal composé d'une série de biefs	24
1.10	Bief de longueur L	26
1.11	Processus de supervision	29
1.12	Génération des résidus	30
1.13	Fuites d'eau	31
1.14	Réseau d'irrigation de Carpentras	36
1.15	Partie du réseau de Carpentras	38
1.16	Exemple de la consommation annuelle d'une station (2015)	39
1.17	Outils pour la gestion du réseau	40
1.18	Évolution du nombre d'adhérents	41
1.19	Évolution du nombre de bornes	41
1.20	Évolution de la surface irrigable	42
1.21	Évolution des pertes en eau (secteur "Grande Bastide")	43
1.22	Évolution de la facture énergétique du canal de Carpentras	44
1.23	Évolution de la consommation électrique du canal de Carpentras	44
2.1	Structure de la facture d'électricité	47
2.2	Décomposition temporelle de la période d'analyse	48
2.3	Contrainte ( $C2$ ) dans le cas de la France	51
2.4	Estimation du temps de calcul	56
2.5	Valeur moyenne du temps de calcul	56
2.6	Détermination de la valeur de $\theta$	58
2.7	Comportement de la fonction $f_i$	70
3.1	Circulation globale de l'eau	80
3.2	Exemple d'un secteur ("Les Saffras")	81
3.3	Présentation schématique d'un sous-réseau	82
3.4	Position du capteur de pression dans une station	82
3.5	Schéma simplifié d'un bassin de forme régulière	84
3.6	Évolution de la pression de saturation $p(T)$	90
3.7	Fonctionnement en présence d'un bassin de stockage	94

3.8	Exemple d'évolution lente de pression (secteur "Les Saffras")	95
3.9	Exemple d'évolution de la dérivée de pression (secteur "Les Saffras")	96
3.10	Exemple de sectorisation	97
3.11	Température de l'air (période du 01/03/2015 au 31/10/2015)	99
3.12	Vitesse du vent (période du 01/03/2015 au 31/10/2015)	99
3.13	Humidité relative (période du 01/03/2015 au 31/10/2015)	100
3.14	Température de l'eau (Bassin de "Valérie")	102
3.15	Pression de saturation à la surface (Bassin de "Valérie")	102
3.16	Volume d'eau évaporé (Bassin de "Valérie")	103
3.17	Variation de $\hat{J}(n)$	105
3.18	Variation des valeurs d'identification	106
4.1	Description générale de la démarche	108
4.2	Description des étapes à adopter en vue d'une démarche globale	109
4.3	Exemples des courbes de charge	111
4.4	Potentiel énergétique du site considéré	111
4.5	Estimation du coût d'énergie en fonction du potentiel énergétique	112
4.6	Système de production énergétique	113
4.7	Profil de charge-Station "Oasis"	121
4.8	Évolution de la facture–Réseau de panneaux (Rendement : 15 %, Prix : 1000 €)	122
4.9	Évolution de la facture–Réseau de panneaux (Rendement : 20 %, Prix : 500 €)	123
4.10	Évolution de la facture–Réseau de panneaux (Rendement : 30 %, Prix : 300 €)	123
4.11	Évolution de la facture–Réseau d'éoliennes (Rendement : 20 %, Prix : 1000 €)	124
4.12	Évolution de la facture–Réseau d'éoliennes (Rendement : 30 %, Prix : 500 €)	124
4.13	Évolution de la facture–Réseau d'éoliennes (Rendement : 45 %, Prix : 300 €)	125
4.14	Nouveau profil de charge-Station "Oasis"	125
4.15	Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau de panneaux (Rendement : 30 %, Prix : 300 €)	126
4.16	Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau de panneaux (Rendement : 20 %, Prix : 500 €)	126
4.17	Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau de panneaux (Rendement : 15 %, Prix : 1000 €)	127
4.18	Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau d'éoliennes (Rendement : 20 %, Prix : 1000 €)	127
4.19	Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau d'éoliennes (Rendement : 30 %, Prix : 500 €)	128
4.20	Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau d'éoliennes (Rendement : 45 %, Prix : 300 €)	128

# Liste des tableaux

1.1	Moyenne annuelle de l'évolution de la demande	42
1.2	Taux de pertes	42
1.3	Statistiques sur la consommation électrique	43
2.1	Valeurs numériques liées au cas pratique-Station "Oasis"	55
2.2	Valeurs numériques liées au cas pratique-Station "Oasis"	59
2.3	Puissances souscrites optimales-Station "Oasis"	59
2.4	Paramètres utilisés dans l'approche OEP	61
2.5	Puissances souscrites optimales trouvées par l'approche OEP	61
2.6	Données de la station "Oasis"	76
2.7	Données de la facturation-Station "Oasis"	76
2.8	Puissances souscrites actuelles	77
2.9	Puissances souscrites optimales	77
3.1	Étude comparative des relations	91
3.2	Valeurs numériques	98
3.3	Sous-secteurs en fonctionnement sain - Données d'identification	100
3.4	Données de certains sous-secteurs du réseau	101
3.5	Données des bassins de stockage	101
3.6	Volumes évaporés	103
3.7	Volume d'eau stocké entre deux niveaux	104
3.8	Valeurs numériques liées à la structure	104
3.9	Paramètres d'identification	105
3.10	Paramètres relatifs au seuil	106

# Nomenclature

## Variables

$D$	Durée
$H$	Niveau d'eau
$L$	Longueur
$N$	Nombre
$P$	Puissance
$p$	Pression
$Q$	Débit
$S$	Surface
$T$	Température
$t$	Temps
$V$	Volume
$v$	Vitesse
$z$	Altitude
$\mathcal{T}$	Période
$\Phi$	Variable d'analyse
$\phi$	Humidité relative
$\Delta_X t$	Période d'échantillonnage de la variable $X$

## Exposants

$a$	Abusive
$C$	Crête
$c$	Consommation
$d$	Dépassement
$E$	Été
$e$	Estimé
$H$	Hiver
$m$	Mesuré
$p$	Pompé
$r$	Perdu
$T$	Total
$t$	Transport

<i>U</i>	Unitaire
<i>u</i>	Utile
<i>min</i>	Minimum
<i>max</i>	Maximum
<i>op</i>	Optimal

### Indices

<i>A</i>	Air
<i>a</i>	Année
<i>B</i>	Bassin
<i>b</i>	Bief
<i>C</i>	Consommé
<i>E</i>	Eau
<i>e</i>	Éolienne
<i>F</i>	Fuite
<i>f</i>	Fournisseur
<i>I</i>	Conduite
<i>J</i>	Jonction
<i>m</i>	Installation
<i>N</i>	Naturel
<i>n</i>	Nominal
<i>O</i>	Autre
<i>P</i>	Pompe
<i>p</i>	Production
<i>Q</i>	Équilibre
<i>S</i>	Souscrite
<i>T</i>	Tarifaire
<i>t</i>	Structure
<i>U</i>	Utilisateur
<i>u</i>	Utile
<i>PV</i>	Panneau photovoltaïque
<i>SH</i>	Système hybride
<i>SP</i>	Système de production

### Abréviations

<i>ASA</i>	Association Syndicale Autorisée
<i>HMT</i>	Hauteur Manométrique Totale
<i>NGF</i>	Nivellement Général de la France
<i>OEP</i>	Optimisation par Essaim Particulaire
<i>SIG</i>	Système d'Information Géographique

# Introduction générale

L'eau est une ressource précieuse. Elle est abondante sur terre mais elle n'est pas répartie uniformément sur le globe. Il est donc primordial d'assurer une bonne gestion des réseaux de distribution pour préserver cette ressource. Il convient de noter que la consommation de l'eau s'effectue par rapport à des objectifs sociaux-économiques. À l'échelle mondiale, l'agriculture est le secteur le plus consommateur d'eau. Elle absorbe 70 % de cette ressource contre 20 % dans le secteur industriel et 10 % pour l'alimentation des usages domestiques ([1]). Au cours de ces dernières décennies, la superficie des terres cultivées et la demande en eau ont connu une tendance à la hausse pour faire face à l'accroissement de la population et des besoins alimentaires ([2]). Dans ce contexte, la consommation mondiale d'eau pour l'agriculture a été multipliée par six entre 1900 et 1975<sup>1</sup>. Cette augmentation peut être expliquée par le réchauffement climatique et l'accroissement de la consommation individuelle. Cependant, dans les réseaux d'irrigation agricole, les besoins en eau gardent toujours un caractère aléatoire du fait des changements des pratiques et des techniques d'irrigation, les conditions météorologiques, le type de sol, etc.

Dans ce contexte, les réseaux gravitaires seuls n'arrivaient pas à satisfaire la demande en termes d'irrigation. L'eau distribuée par les réseaux sous pression est donc un élément indispensable pour la pérennité des exploitations agricoles. Elle permet de raccorder des systèmes d'arrosage adaptés aux productions et économes en eau. Cependant, cette mise sous pression a un coût, notamment du fait de la puissance à mettre en œuvre pour monter l'eau des terrains altimétriques bas vers les terrains altimétriques plus élevés. Ainsi, la part de l'énergie électrique dans les dépenses des gestionnaires des réseaux de distribution atteint un niveau alarmant ([3]). Il est donc nécessaire d'optimiser le coût des systèmes de pompage afin de réduire la facture énergétique. La recherche du meilleur service satisfaisant la demande en eau des différents usagers avec un minimum de pertes et à moindre coût est devenue une véritable préoccupation ([4]).

Les travaux présentés dans cette thèse apportent une contribution à la problématique d'optimisation de la facture d'électricité des gros consommateurs. Le cas d'étude choisi pour ces travaux est le canal de Carpentras, un réseau d'irrigation géré par l'Association Syndicale Autorisée du Canal de Carpentras (ASACC). Plus précisément, cette association souhaite réduire sa facture énergétique liée au fonctionnement des stations de pompage. L'objectif de cette étude est de proposer des nouvelles solutions pour optimiser la facture et assurer une meilleure efficacité énergétique. Il convient de noter que très peu de travaux de recherche

---

1. Information de l'Agence de l'eau Seine-Normandie, 2009.

ont abordé le sujet de l'optimisation et de diagnostic des réseaux d'irrigation sous pression. En outre, la faible instrumentation du réseau et le déficit d'information font de cette problématique un défi scientifique.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les systèmes de distribution d'eau de façon générale et les réseaux d'irrigation de façon particulière. Plus précisément, nous allons traiter la classification des systèmes d'irrigation et les ouvrages qui les composent. L'objectif est de présenter d'une façon générale ces systèmes et les enjeux énergétiques qui les concernent. En outre, nous présentons le canal de Carpentras qui représente notre cas d'étude.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons une méthodologie pour optimiser les contrats souscrits auprès des fournisseurs d'électricité. Il s'agit de déterminer les puissances souscrites de façon optimale en respectant des contraintes, imposées par le fournisseur. La résolution du problème d'optimisation sous contraintes sera basée sur des approches informatiques et sur la résolution analytique à travers une méthode mathématique.

Dans le troisième chapitre, nous traitons la problématique de diagnostic du réseau. L'objectif est de proposer une méthodologie qui permet de détecter et localiser les fuites. Cette méthodologie sera fondée sur l'analyse de la circulation d'eau dans le réseau ou dans un secteur donné.

Dans le quatrième chapitre, nous aborderons le problème de la conception d'un système de production énergétique locale à base d'énergie renouvelable. Le but est de réaliser une étude de faisabilité fondée sur une optimisation du coût énergétique global.

Finalement, une conclusion générale et des perspectives seront données à la fin du mémoire.

# 1 Généralités sur les systèmes de distribution d'eau

## 1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié aux enjeux de l'énergie dans les systèmes de distribution d'eau. Une partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des systèmes d'irrigation de façon générale et les réseaux sous pression de façon particulière. Plus précisément, nous traitons la classification des systèmes d'irrigation et les ouvrages qui les composent. Dans le reste du chapitre, nous proposons des généralités sur les réseaux d'irrigation. Ensuite, nous présentons l'Association Syndicale Autorisée du Canal de Carpentras, le cas d'étude choisi pour les travaux de cette thèse.

## 1.2 Réseaux de distribution d'eau

Les réseaux de distribution d'eau sont des systèmes hydrauliques qui ont pour rôle l'acheminement de l'eau d'un point de prélèvement à un point de livraison. Il existe trois grands systèmes de distribution d'eau à des fins différentes : les systèmes de distribution d'eau potable, les systèmes d'assainissement des eaux usées et les systèmes d'irrigation agricole utilisant une eau brute, non traitée.

Les systèmes de distribution d'eau potable sont des structures constituées d'ouvrages de pompage, de réservoirs, de canalisations et d'accessoires. Ils garantissent l'approvisionnement d'une eau propre et douce depuis l'usine de traitement jusqu'au compteur de l'abonné. L'approvisionnement en eau nécessite des installations amont d'extraction et de traitement. Plus précisément, les systèmes de distribution d'eau potable traitent, stockent et distribuent l'eau dans des conduites d'adduction souterraines ([5]).

Les systèmes d'assainissement sont des réseaux dont le but est l'évacuation des eaux usées et des eaux pluviales. Plus précisément, ces systèmes servent à collecter et épurer les eaux usées avant leur rejet dans les milieux naturels. Il convient de noter que la boue complique la tâche de traitement. Pour remédier à ce problème, un double traitement a lieu. Le premier traitement sert à l'extraction des boues tandis que le deuxième traitement sert à la recirculation des boues.



Les systèmes d'irrigation agricole sont des réseaux hydrauliques servant à la distribution d'eau brute pour l'arrosage des parcelles agricoles ou des jardins. Les réseaux d'irrigation peuvent être naturels ou artificiels, ouverts ou couverts, gravitaires ou sous pression ([6]). On distingue trois techniques d'irrigation : l'irrigation goutte à goutte, l'irrigation par aspersion et l'irrigation gravitaire à la surface. Dans les réseaux traditionnels, l'eau s'écoule par force de gravité, d'un point haut (c'est-à-dire, la source) vers un point bas (c'est-à-dire, le point de consommation). Ces réseaux gravitaires sont dits généralement "canaux à surface libre". Ils sont constitués essentiellement par des canaux à ciel ouvert.

Ces canaux sont raccordés entre eux à l'aide d'un certain nombre d'ouvrages d'art tels que les aqueducs, les tunnels et les siphons. Chaque canal est composé d'une série de biefs et chaque bief représente une partie d'un cours d'eau située entre deux niveaux différents (voir Figures 1.9 et 1.10). Il convient de noter, dans cette configuration, que les terrains agricoles situés au-dessus de la source sont privés d'eau. La mise en place des systèmes de pompage a contribué à la fertilité de ces terrains agricoles. Elle a contribué également à la diversité des pratiques d'irrigation même dans des zones non adaptées à l'aide des serres agricoles.

L'agriculture est l'activité qui consomme le plus d'eau, de là l'intérêt porté aux réseaux d'irrigation agricole de façon générale et les réseaux sous pression de façon particulière ([4]).

## **1.2.1 Description des réseaux sous pression**

### **1.2.1.1 Topologie d'un réseau**

La structure d'un réseau sous pression peut se définir comme un ensemble de conduites enterrées, des bassins de stockage, des stations de pompage et des accessoires du réseau : les capteurs, les clapets anti-retour, les vannes, les bornes d'arrosage, les robinets, etc. L'eau se déplace sous l'effet de la différence de pression produite par les stations de pompage. Un réseau sous pression peut être représenté par un graphe orienté constitué d'un ensemble de nœuds (à savoir, la source d'eau et les points de consommation) et d'arcs (à savoir, les conduites principales et les branchements) comme le montre la Figure 1.1.

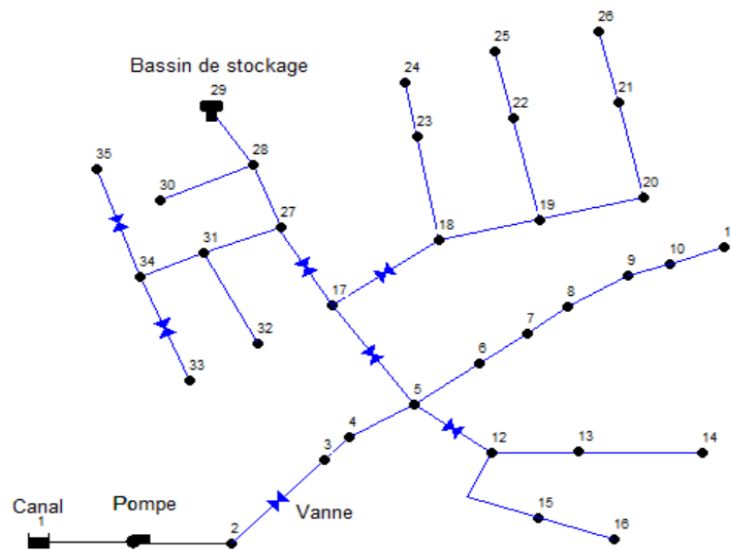


Figure 1.1 – Représentation d'un réseau sous pression

### 1.2.1.2 Modes de fonctionnement

Dans les systèmes de distribution d'eau sous pression, le fonctionnement automatique des pompes est guidé généralement par les valeurs de grandeurs liées à l'eau en circulation ; à savoir : la pression de service ou le niveau d'eau dans un bassin de stockage.

#### A. Fonctionnement par plage de pression

Le principe consiste à imposer au réseau de fonctionner dans une fourchette de pression. Cette pression, dite de refoulement, est mesurée à travers un capteur de pression installé au niveau de la station de pompage. Le démarrage de la pompe s'effectuerait lorsque la pression atteint le seuil bas de fonctionnement. Par ailleurs, la pompe s'arrête lorsque la pression atteint le seuil haut de fonctionnement. Le but de ce principe de fonctionnement est de maintenir la valeur de la pression dans une plage adéquate. Cependant, ce mode de fonctionnement présente certains inconvénients tels que la forte sollicitation des pompes par le cycle fréquent de marche/arrêt et l'interruption quasi immédiate de la distribution en cas d'une intervention de maintenance ou de simple entretien.

#### B. Fonctionnement par niveau du bassin

Lorsqu'un bassin est disponible pour le stockage d'eau, un fonctionnement similaire à celui de la plage de pression est prévu en fonction du niveau du bassin. Plus précisément, lorsque le niveau du bassin atteint le seuil bas, la pompe démarre afin de maintenir un niveau minimum d'eau dans le bassin. Lorsque le niveau du bassin atteint le seuil haut, la pompe s'arrête afin d'éviter le débordement du bassin. Ce mode de fonctionnement est plus coûteux à mettre en

œuvre, cependant, il offre de multiples avantages. En effet, en présence d'un bassin de stockage, les pompes sont moins sollicitées et le coût énergétique est plus faible. En effet, le fonctionnement des pompes peut être planifié durant les périodes tarifaires avantageuses. En outre, il est possible d'arrêter momentanément la station pour une intervention d'entretien sans interrompre le service. Mais, il faut rajouter au coût d'utilisation l'entretien du bassin.

### 1.2.1.3 Stations de pompage

Une station de pompage est composée d'un ensemble de pompes qui peuvent être de plusieurs types : centrifuge, volumétrique, à piston, etc. Dans le contexte des réseaux d'irrigation, ces pompes permettent d'aspirer l'eau pour la refouler à un niveau de plus grande altimétrie. Il convient de préciser que les pompes les plus utilisées sont les pompes centrifuges<sup>1</sup>.

L'entrée d'une pompe est généralement dotée d'une "crépine" permettant d'éviter l'entrée accidentelle de corps solides à l'intérieur durant la phase d'aspiration. Un "clapet anti-retour" est installé généralement à la sortie de la pompe pour contrôler le sens de la circulation du fluide. Le flux est donc bloqué si celui-ci s'inverse lors de l'arrêt des pompes. Ces dispositifs représentent ainsi des mesures de sécurité pour les pompes.



Figure 1.2 – Station de pompage

Il convient de mentionner que le comportement d'une pompe est représenté par une courbe caractéristique fournie par le constructeur. Cette courbe décrit la variation de la hauteur manométrique totale ( $HMT$ ) en fonction du débit de la pompe ( $Q_P$ ). La  $HMT$  désigne la pression totale que doit fournir une pompe pour élever l'eau d'un niveau bas à un niveau haut<sup>2</sup>.

1. Information de l'Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux, 1986.
2. La  $HMT$  s'exprime en mètre de colonne d'eau ( $mCE$ ).

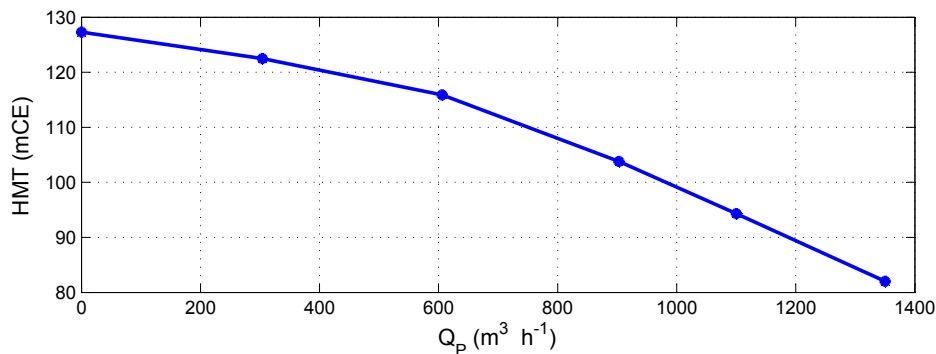


Figure 1.3 – Courbe caractéristique d'une pompe

### 1.2.1.4 Canalisations

Les canalisations sont constituées de conduites principales et des tuyaux connectés en vue d'acheminer l'eau d'un endroit à un autre. Chaque conduite est caractérisée par une longueur et un diamètre capable de faire passer un débit à une certaine pression. Des branchements sont conçus pour acheminer l'eau aux utilisateurs et des jonctions assurent la connexion entre les conduites principales et les branchements (voir Figure 1.4).

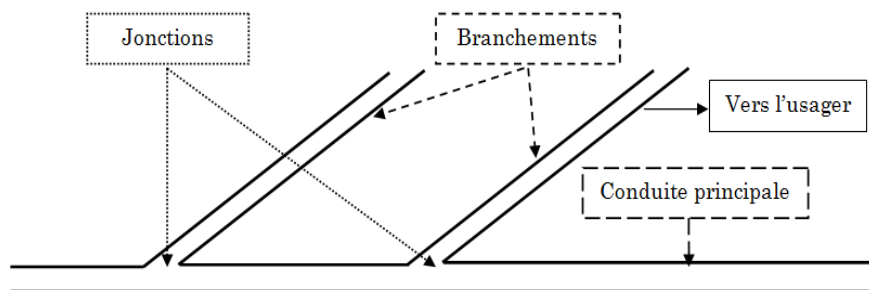


Figure 1.4 – Conduites, jonctions et branchements

En outre, l'interconnexion du réseau de distribution d'eau peut être assurée par un maillage (voir Figure 1.5). Le maillage désigne une topologie de réseau assurant une sécurité d'alimentation en eau. Plus précisément, l'eau peut être acheminée à l'utilisateur en parcourant une trajectoire parmi un ensemble de trajectoires possibles ([7] [8]). Cependant, cela nécessite un choix judicieux de la trajectoire optimale en termes de dépenses énergétiques. Il convient de noter que durant les périodes à faible demande en eau, par exemple en hiver, le réseau est moins sollicité. En conséquence, il est possible d'alimenter l'intégralité d'un

réseau avec moins de stations de pompage. Cela ne peut être réalisé que dans le cas d'un réseau maillé. Une telle planification permettrait une souscription hivernale partielle auprès d'un fournisseur d'électricité. En outre, elle assurerait des économies d'énergie et du coût de la maintenance. Durant les périodes à forte demande en eau, le maillage permet d'éviter la saturation d'une partie du réseau. Plus précisément, un maillage adapté garantirait un équilibre de charge globale des différentes sollicitations au réseau.

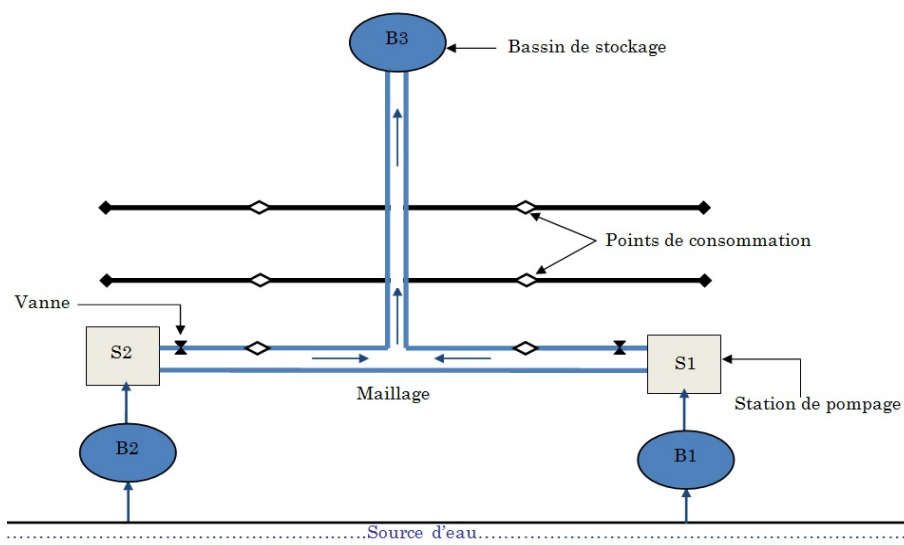


Figure 1.5 – Exemple d'un réseau maillé

Les phénomènes qui marquent le plus les conduites sont les pertes de charge et le coup de bélier. Ce dernier est un phénomène de surpression qui apparaît au moment d'une variation brusque de la vitesse d'écoulement d'eau, par exemple, suite à une fermeture instantanée d'une vanne. Ce phénomène correspond à des variations de pression importantes et peut être à l'origine de casses au niveau de la canalisation. Ce problème peut être résolu par la mise en place d'un dispositif, dit "anti-bélier", amortissant les ondes du choc. Concernant le phénomène des pertes de charge, la pression de l'eau diminue tout au long d'une canalisation dans laquelle elle s'écoule. Donc, elle subit des pertes dues aux frottements sur les parois internes des conduites. Ainsi, il y a des pertes dues aux obstacles de parcours tels que les coudes, les vannes et les rétrécissements (voir par exemple la Figure 1.6). Il convient de noter que le choix du matériau de la canalisation (à savoir du polyéthylène, le PVC ou la fonte) se fait par rapport à la dimension du diamètre de la tuyauterie et permet la réduction des pertes.

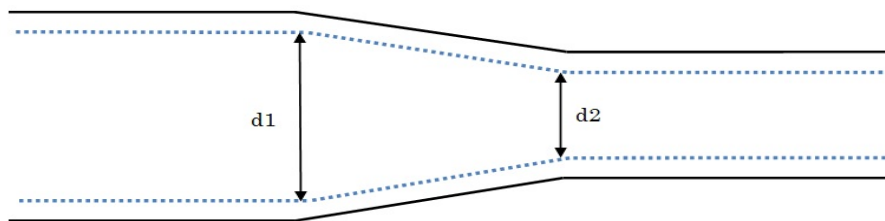


Figure 1.6 – Rétrécissement d'une conduite

### 1.2.1.5 Bassins de stockage d'eau

Les bassins utilisés dans les réseaux d'irrigation sont des ouvrages à ciel ouvert construits généralement en béton. Ils permettent de stocker les eaux pluviales ou celles pompées par une station de pompage. Habituellement, les bassins sont dotés d'une bâche pour éviter l'écoulement d'eau à la profondeur du sol. En outre, les bassins sont généralement équipés d'une rompe à l'entrée. La rompe est conçue pour permettre l'accès des engins à l'intérieur du bassin pour assurer les entretiens en fin de saison suite à une vidange. La mesure du niveau du bassin peut être réalisée à travers plusieurs mécanismes : sonde, flotteur à poire, etc. Les bassins de stockage peuvent présenter plusieurs types de forme. Dans les réseaux d'irrigation, la majorité des formes des bassins est de type non régulier. Cela peut être expliqué par les contraintes liées à l'environnement considéré à savoir la topographie du terrain et les surfaces disponibles pour construire des bassins (voir Figure 1.7). Par conséquent, il est difficile d'estimer la capacité d'un bassin à partir de sa géométrie. Il convient donc d'explorer d'autres approches pour quantifier l'eau stockée dans le bassin.

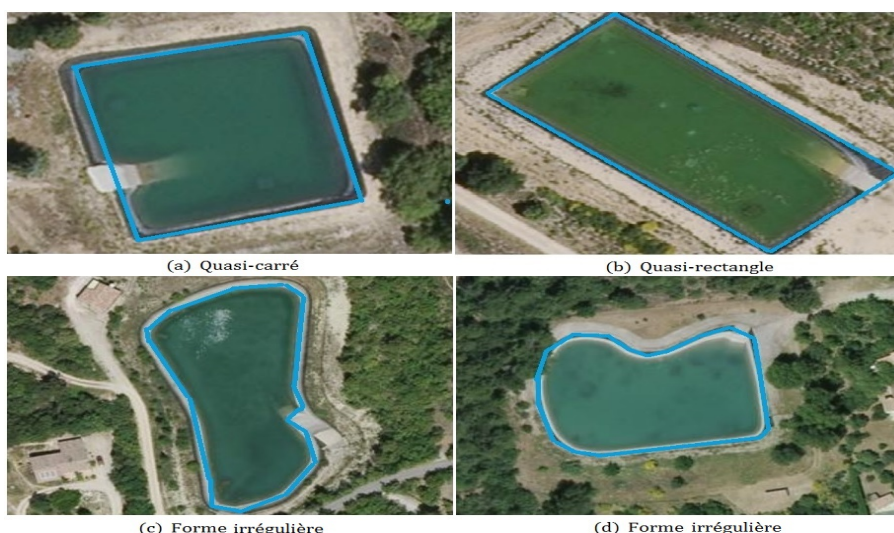


Figure 1.7 – Différentes formes de bassins

Initialement, au début de la saison d'exploitation, les bassins sont vides. La capacité d'un bassin peut être alors déterminée à partir du volume d'eau pompé par la station de pompage sous réserve de la fermeture de toutes les vannes de desserte des usagers. Ce volume d'eau peut être mesuré à travers un débitmètre installé au niveau de la station de pompage. Ensuite, il est possible de suivre l'évolution du volume d'eau dans le bassin en fonction de la hauteur.

### 1.2.1.6 Vannes

Une vanne est un dispositif placé après la pompe et le clapet anti-retour. Elle permet de modifier le débit de l'eau. Les vannes servent aussi à isoler un secteur donné du reste du réseau.

Dans les réseaux d'irrigation, les dispositifs les plus utilisés sont les vannes papillon et les vannes à opercules (voir Figure 1.8). Outre, un contrôle manuel de ces dispositifs, la commande peut être réalisée à travers des motorisations électriques, hydrauliques ou pneumatiques. Il convient de noter qu'une vanne papillon est constituée d'un disque vertical qui tourne autour d'un axe qui le traverse afin de modifier le débit. Son principe de fonctionnement est très similaire à un papillon de carburateur. Par ailleurs, le principe de fonctionnement des vannes à opercules est similaire à un volet de porte d'écluse. L'obturation est assurée par un axe qui se déplace perpendiculairement au flux dans le corps de la vanne. Ces vannes assurent une bonne étanchéité, par contre, elles représentent des points de pertes de charge.

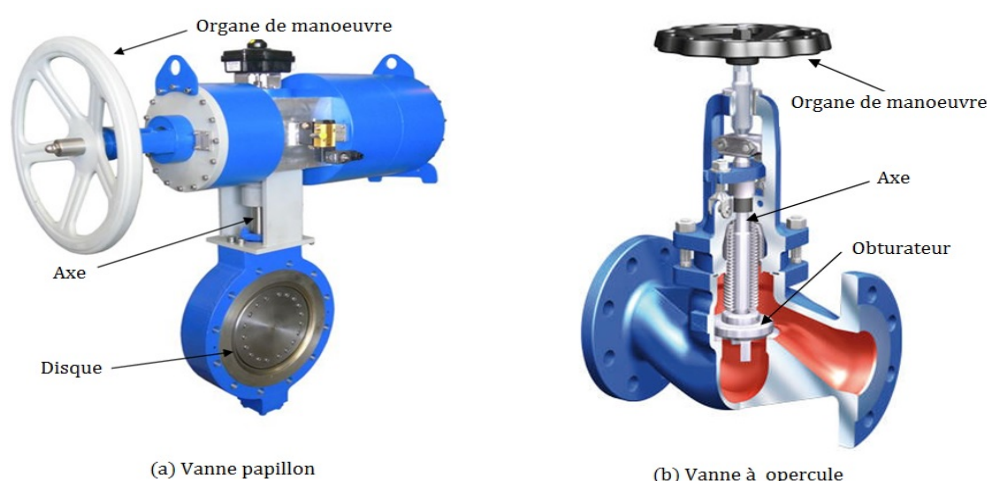


Figure 1.8 – Mécanisme des vannes

## 1.2.2 Modélisation mathématique d'un réseau

Les systèmes de distribution d'eau sont des réseaux complexes faisant intervenir de nombreux phénomènes physiques ([5]). Ces phénomènes sont dus essentiellement aux variations de la consommation, l'évaporation d'eau, l'apparition de fuites, les pertes de charge et le changement de l'écoulement. De façon générale, un réseau sous pression peut être représenté par un graphe orienté constitué d'un ensemble de nœuds et d'arcs (voir Figure 1.1).

Il convient de préciser que les nœuds sont généralement de trois sortes : un nœud ressource, un nœud de stockage et un nœud de consommation. Les arcs représentent les conduites principales et les branchements. De plus, de nombreux logiciels peuvent réaliser cette modélisation basée sur la théorie des graphes tels Epanet ([5]), Porteau ([9]) et SIC ([10]). Cependant, ces logiciels ne tiennent pas compte de certains phénomènes de façon indépendante. Dans ce contexte, une fuite peut être modélisée par une consommation supplémentaire au niveau des nœuds et cela indépendamment de la pression ([5]). Cela ne reflète pas la réalité du phénomène car le débit d'une fuite varie en fonction de la pression de service ([11]). En outre, il n'est pas possible de distinguer entre une fuite et une consommation normale à débit constant.

### 1.2.2.1 Modélisation des réseaux gravitaires

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été consacrés à la modélisation des canaux à surface libre ([4] [6] [10] [12]). Cette modélisation est basée sur l'écoulement d'eau dans les biefs (à savoir, l'écoulement torrentiel et l'écoulement fluvial) et vise la régulation de ces canaux. Cette régulation est assurée par des vannes de commande et fondée sur le contrôle des volumes d'eau dans chaque bief (voir Figure 1.9). En amont et en aval de chaque bief, le débit ( $Q$ ) et la hauteur d'eau ( $H$ ) sont surveillés dans le temps ( $t$ ) et dans l'espace ( $x$ ).

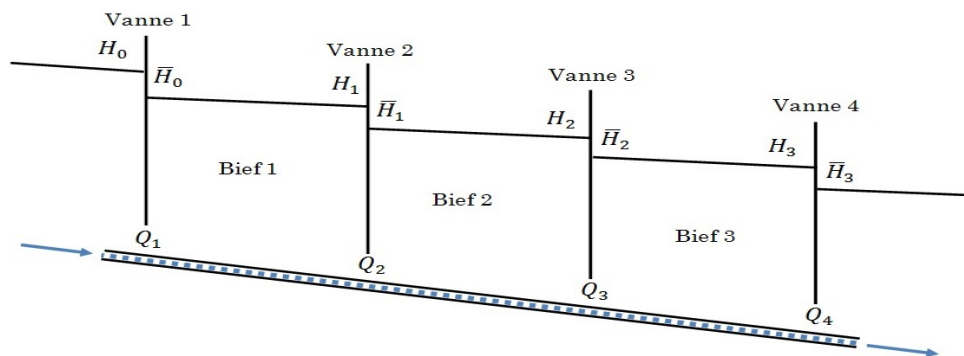


Figure 1.9 – Canal composé d'une série de biefs



## A. Modélisation de l'écoulement d'eau

La modélisation de l'écoulement d'eau dans les canaux à surface libre peut être réalisée à travers des équations aux dérivées partielles non linéaires telles que les équations de Navier-Stokes et les équations de Barré de Saint-Venant ([4]). L'écoulement d'eau dans les biefs est soumis aux lois de la mécanique des fluides notamment la conservation de la masse et la conservation de la quantité de mouvement. Ces lois sont décrites par les équations de Barré de Saint-Venant. Elles se résument à l'équation de continuité et à l'équation dynamique. Ces équations traduisent respectivement la conservation du volume d'eau et la conservation de la quantité de mouvement. Elles sont présentées respectivement par les équations :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = Q_1 \quad (1.1)$$

et

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2/S}{\partial x} + g S \frac{\partial Z}{\partial x} + g S J = k Q_1 \frac{Q}{S} \quad (1.2)$$

où  $x$  est la variable d'espace désignant une abscisse le long du canal,  $S$  la section mouillée,  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $Z$  la cote absolue de l'eau.  $k$  est un coefficient booléen qui vaut 0 lorsque  $Q_1 > 0$  et 1 lorsque  $Q_1 < 0$ .  $J$  désigne le coefficient de frottement donné par la formule de Manning-Strickler ([4] [10]).

$$J(x) = \frac{Q(x)^2}{K^2 S(x)^2 h(x)^{\frac{4}{3}}} \quad (1.3)$$

où  $K$  est le coefficient de Strickler<sup>3</sup> et  $h$  le rayon hydraulique<sup>4</sup>.

La résolution de ces équations nécessite des conditions aux limites et des conditions initiales. Ces dernières comportent généralement le débit d'écoulement  $Q(x, 0)$  et la hauteur d'eau  $H(x, 0)$  à l'instant initial (à savoir,  $t = 0$ ). Les conditions aux limites dépendent du régime d'écoulement. Plus précisément, dans le cas d'un écoulement fluvial, l'amont du bief est influencé par l'aval. Les conditions amont (c'est-à-dire,  $Q(0, t)$  et  $H(0, t)$ ) et aval (c'est-à-dire,  $Q(x, t)$  et  $H(x, t)$ ) sont nécessaires. Cependant, dans le cas d'un écoulement torrentiel, aucune influence n'a lieu de l'amont sur l'aval ([10]). Le comportement dynamique du bief peut être déterminé uniquement avec les conditions en amont.

La résolution analytique de ces équations est ardue sauf pour certains cas particuliers, par exemple, dans le cas d'un frottement nul ou le cas linéaire en régime uniforme. Généralement, et pour approcher les solutions des équations (1.1) et (1.2), les auteurs ont recours à des techniques d'approximation telles

---

3. Le coefficient de Strickler se détermine en fonction des propriétés de la surface d'eau.

4. Le rayon hydraulique est le rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillé.

que les méthodes de type éléments finis, les méthodes de différences finies, les méthodes de résidus pondérés, etc. En outre, certaines méthodes ont été obtenues dans le domaine fréquentiel en appliquant la transformation de Laplace aux équations de Saint-Venant linéarisées ([13]).

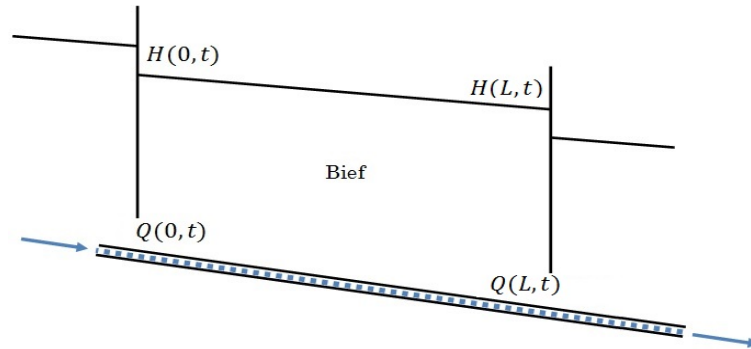


Figure 1.10 – Bief de longueur L

## B. Représentation d'état

La représentation d'état d'un système de distribution d'eau permet de modéliser la dynamique du système sous forme matricielle en utilisant des variables d'état telles que le débit d'écoulement ( $Q$ ) et la hauteur d'eau ( $H$ ) dans le bief. Les canaux d'irrigation sont des systèmes caractérisés par un temps de retard élevé mais aussi par des perturbations et des comportements fortement non linéaires ([6]).

Dans un canal composé de  $N_b$  biefs, le modèle à états et entrées retardés peut s'exprimer comme suit ([10]) :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{N_b} A_i x(t - \tau_i) + B_i u(t - \tau_i) + \overline{B}_i \overline{H}(t - \tau_i) \\ H(t) = x(t) \end{cases} \quad (1.4)$$

où  $x = (H_1, \dots, H_{N_b})^\top \in \mathbb{R}^{N_b}$  et  $u = (u_1, \dots, u_{N_b})^\top \in \mathbb{R}^{N_b}$  est le vecteur de commande.  $\overline{H}$  désigne le vecteur des sorties mesurées et  $\overline{H}$  le vecteur des entrées mesurées en aval du bief.  $A_i$  et  $B_i$  sont des matrices de dimensions convenables.  $\tau_i$  désigne le retard au niveau du bief  $i$ .

Il convient de noter que dans certains travaux (voir par exemple [6]), des bruits blancs ont été ajoutés aux équations d'état et de mesure pour intégrer les éventuels défauts actionneurs et capteurs.

### 1.2.2.2 Modélisation des réseaux sous pression

#### A. Volume d'eau pompé

Le volume d'eau pompé par une station de pompage est généralement mesuré par des appareils de comptage tels que les débitmètres. Dans les cas de l'absence ou de dysfonctionnement d'un débitmètre, une estimation du volume pompé peut être envisagée. Par exemple, dans le cas de l'exploitation des pompes à débit constant, la valeur nominale et le temps de fonctionnement peuvent être utilisés pour estimer la quantité d'eau pompée de la façon suivante :

$$\widehat{V}^p = \sum_{P=1}^{N_P} Q_P t_P \quad (1.5)$$

où  $N_P$  est le nombre de pompes,  $Q_P$  les valeurs nominales du débit et  $t_P$  les valeurs du temps de fonctionnement.

En outre, et dans le cas où le temps de fonctionnement n'est pas disponible, une solution consisterait d'estimer d'abord ce temps sur la base de l'énergie consommée ( $E_C$ ) et la puissance nominale ( $P_n$ ) de la pompe sous réserve d'un fonctionnement dans des conditions nominales.

Le volume d'eau pompé par la pompe  $P$  peut s'exprimer comme suit :

$$\widehat{V}_P^p = Q_P \frac{E_C}{P_n} \quad (1.6)$$

#### B. Pression et pertes de charge

La pression de l'eau diminue tout au long de la conduite du fait des pertes de charge linéaires et singulières. Ces pertes dépendent directement de la vitesse d'écoulement ( $v_E$ ) et s'expriment comme suit :

$$\Delta p = \left( \frac{\Lambda_1 L_I}{d} + \Lambda_2 \right) \frac{1}{2} \rho (v_E)^2 \quad (1.7)$$

où  $\Lambda_1$  et  $\Lambda_2$  désignent respectivement le coefficient de Colebrook et le coefficient des pertes de charge singulières.  $L_I$  et  $d$  désignent respectivement la longueur et le diamètre interne de la conduite.  $\rho$  est la masse volumique de l'eau ( $kg m^{-3}$ ).

La vitesse d'écoulement d'eau dans une conduite cylindrique s'exprime en fonction du diamètre interne de la conduite ( $d$ ) et le débit d'écoulement ( $Q_E$ ) :

$$v_E = \frac{4 Q_E}{\Pi d^2} \quad (1.8)$$

Il est à noter que plus les pertes de charge sont importantes, plus la pression aux points de livraison est faible, plus la consommation électrique est importante pour maintenir la pression dans la plage de fonctionnement imposée. Il est

donc nécessaire de baisser la vitesse d'écoulement pour réduire ces pertes de charge. Donc, il serait judicieux de déterminer le diamètre interne de la conduite de façon optimale afin que la vitesse d'écoulement ne dépasse pas les limites recommandées. Dans les conduites de refoulement, la vitesse d'écoulement ne devrait pas dépasser un certain seuil<sup>5</sup>.

### C. Dimensionnement des stations de pompage

Le dimensionnement d'une station de pompage consiste à déterminer la puissance nécessaire et suffisante pour monter un débit  $Q$  à une altitude  $z$ . La puissance totale ( $P^T$ ), nécessaire au groupe motopompe, s'exprime comme suit ([14]) :

$$P^T = HMT Q \rho g \frac{10^6}{\eta_1 \eta_2 \eta_3} \quad (1.9)$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'eau ( $kg\ m^{-3}$ ) et  $g$  l'accélération de la pesanteur ( $m\ s^{-2}$ ). Les rendements de la pompe, de la transmission et du moteur sont désignés respectivement par  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ . La HMT tient compte de l'altitude ( $z$ ), des pertes de charges ( $\Delta p$ ) et de la pression désirée au point de livraison.

### 1.2.3 Méthodes de supervision

La supervision désigne toute technique de suivi ou de contrôle d'un processus industriel. Elle assure le contrôle à distance d'installations techniques géographiquement réparties. Elle concerne l'acquisition de données telles que les mesures, les alarmes et le retour d'état de fonctionnement des équipements. De nombreux bénéfices sont attendus d'un système de supervision. Dans le cas des réseaux d'irrigation, ce système permet de réaliser des économies d'eau et d'énergie et d'assurer la sécurité des installations et du personnel.

Traditionnellement, la régulation des canaux, pour les réseaux à ciel ouvert, consiste à maintenir un niveau d'eau constant à l'aval de chaque bief. La modernisation de ces réseaux par une automatisation des ouvrages a modifié cette régulation afin d'améliorer la gestion d'eau. Ainsi, la commande d'un canal repose sur l'ouverture et la fermeture automatique des vannes en suivant les consignes issues des instruments de mesures installés sur le canal. Néanmoins, ces mesures sont souvent entachées d'erreurs, de là l'intérêt porté à l'implémentation d'un système de supervision afin de détecter les défauts actionneurs ou capteurs.

Dans le cadre des réseaux d'irrigation sous pression, le système de télégestion est généralement installé à l'intérieur d'une station de pompage. Plus précisément, il est implanté à proximité des équipements à contrôler dans un poste local de télégestion. Il permet de transmettre à distance les informations liées au

---

5. Information de l'Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux, 1986.

réseau à un poste central de télégestion et au personnel d'astreinte. L'acheminement des informations contrôlées s'effectue à travers des outils de communication. L'archivage et l'extraction de données à travers des logiciels d'exploitation tels que PCWin offrent une base de données riche sur le réseau. Le processus de la supervision est décrit par la Figure 1.11.

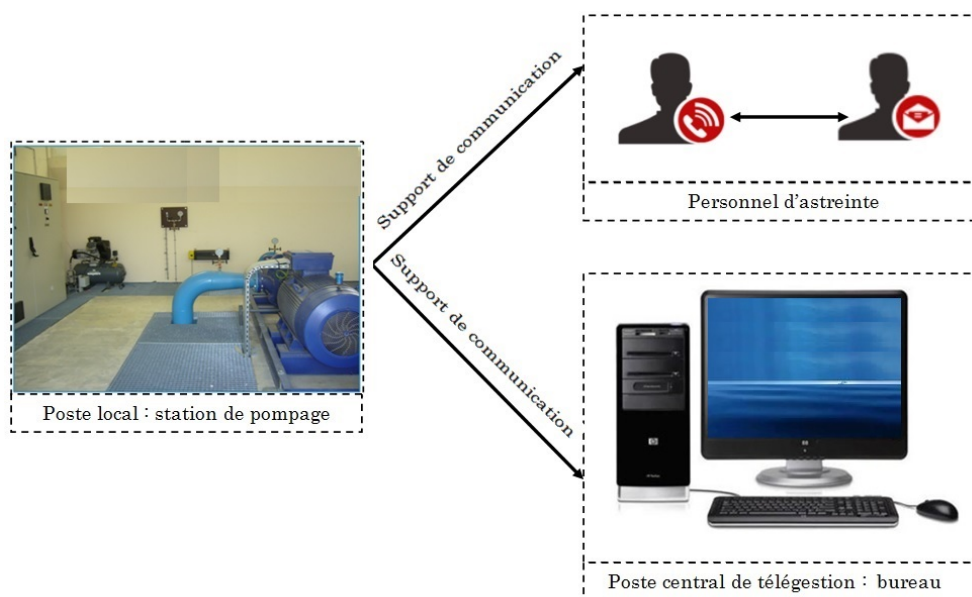


Figure 1.11 – Processus de supervision

Le système de la télégestion surveille en permanence le réseau et contrôle son fonctionnement. Il pilote le cycle de marche/arrêt des pompes selon les indications reçues depuis le bassin ou la station de pompage. Il permet d'optimiser le remplissage des bassins et le temps de fonctionnement des pompes en fonction des périodes de tarification électriques les plus économiques. En outre, il assure le contrôle du niveau d'eau dans un bassin de stockage ou d'un canal. De façon plus précise, dans le cas d'augmentation inhabituelle du niveau d'eau ou dans le cas d'un niveau d'eau insuffisant dans le bassin, un signal d'alarme est déclenché. Par ailleurs, la pression de refoulement d'une station de pompage et les heures de fonctionnement de chaque pompe sont surveillées. Dans le cas d'un fonctionnement sans arrêt durant une longue période, des alarmes d'un fonctionnement anormal ou inhabituel seraient envoyées. Plus précisément, dans le cas d'un fonctionnement en dehors des conditions nominales, des alarmes d'un fonctionnement dégradé seraient envoyées. Par ailleurs, des systèmes d'alarmes ont été mis en place pour détecter les défauts tels que les coupures d'électricité et les disjonctions.

L'importance du système de supervision réside dans la possibilité d'établir un diagnostic voire un pronostic du système. Ainsi, l'exploitant du réseau pourrait collecter, traiter et analyser les données en vue de détecter et de localiser les défauts. En cas de panne, l'origine de l'incident pourrait être déterminée. L'agent de maintenance interviendrait donc sur les équipements problématiques en prévoyant le matériel adéquat. Par ailleurs, il serait possible de reconstruire certaines données manquantes telles que les valeurs de la pression de refoulement d'une station de pompage ou les valeurs du niveau d'eau dans un bassin de stockage. Ces données pourraient être déterminées à partir de l'historique de fonctionnement des pompes.

Les méthodes de supervision les plus adaptées aux réseaux d'irrigation sont les méthodes analytiques basées sur la génération des résidus ([10]). Plus précisément, il s'agit de comparer le comportement du système réel avec celui du modèle. L'hypothèse de base consiste à assumer que les résidus devront être proches du zéro lorsqu'il n'y a pas de défaillance ([15]).

De nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature pour générer les résidus : les méthodes basées sur la redondance analytique, les méthodes basées sur l'estimation des paramètres et celles basées sur l'estimation d'état.

Les techniques à base de l'estimation d'état sont fondées sur la réconciliation des données et les observateurs. Plus précisément, si un modèle décrivant le fonctionnement normal du système à surveiller est disponible, la génération et l'évaluation des résidus sont les principales étapes de l'opération de diagnostic. La génération des résidus permet de déterminer l'écart par rapport aux conditions normales de fonctionnement. Donc, l'erreur d'estimation sera utilisée comme résidu (voir Figure 1.12). L'évaluation des résidus consiste à décider si un défaut est occurred ou pas. Il convient de noter que les méthodes de l'estimation d'état ont été utilisées dans plusieurs canaux d'irrigation à ciel ouvert, par exemple, le canal de Provence ([6]) et le canal de Gignac ([10]).

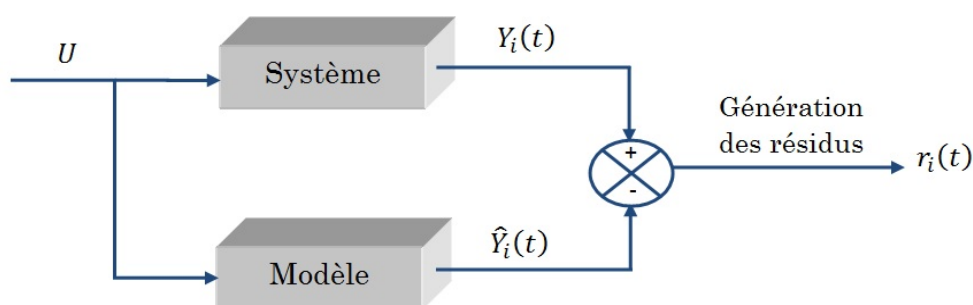


Figure 1.12 – Génération des résidus

## 1.2.4 Méthodes de détection des fuites

Les fuites se manifestent sur les différents organes du réseau, principalement aux joints entre conduites et au niveau des branchements (voir Figure 1.13). Elles peuvent également s'observer sur les corps de conduites et les accessoires du réseau. Elles apparaissent sous différentes formes allant d'une simple infiltration à un jaillissement.



Figure 1.13 – Fuites d'eau

Une fuite peut être caractérisée quantitativement par un débit. Ce débit pourrait être supposé constant sur une courte période sans perturbation importante du réseau ([16]). Il convient de noter, et contrairement au débit de fuites, le débit de consommation garde un caractère incertain du fait des ouvertures et fermetures aléatoires des robinets. Dans un réseau fuyard, le débit de fuite représente le débit minimal sortant de la conduite. En outre, lorsqu'une fuite se produit, elle provoque une chute de pression dans la conduite. Il est primordial de classer les fuites selon leur débit afin de mettre en place les moyens d'intervention adéquats pour limiter leur impact. Dans ce contexte, il existe trois types de fuites qui peuvent être distinguées par débit de fuite croissant mais aussi par leur visibilité sur le sol ([16] [17]). Le premier type concerne les fuites diffuses qui sont invisibles, indétectables et non localisables avec les techniques courantes à cause de leur faible débit. Le deuxième type concerne les fuites détectables, invisibles et qui nécessitent une campagne de recherche de fuites. Le dernier type de fuites concerne les casses manifestes qui sont détectables visuellement sur la surface. Généralement, chaque fuite passe successivement par ces trois états ([17]). Il convient de noter que le niveau de fuite dépend des caractéristiques de la conduite, des conditions de pose, de la densité des abonnés et de la pression de service ([5] [18]).

Afin d'analyser l'évolution des fuites, des auteurs (voir par exemple [11] [19]) ont proposé des relations entre le débit de fuite ( $Q_F$ ) et la pression ( $p$ ) :

$$\frac{Q_F(t_1)}{Q_F(t_0)} = \left( \frac{p(t_1)}{p(t_0)} \right)^n \quad (1.10)$$

où  $t_0$  et  $t_1$  représentent deux instants différents et  $n \in [0.5, 2.5]$  désigne un paramètre dépendant de plusieurs aspects et notamment la forme du trou et les caractéristiques de la conduite, à savoir l'âge et le type matériau.

Pour réduire les fuites, trois grands axes pourraient être envisagés. Le premier axe concerne la gestion de la pression de service. En effet, la réduction de la pression permet de réduire le débit de fuites ainsi que leur taux d'apparition ([11]). Le deuxième axe concerne le renouvellement des conduites. Cependant, cela peut se révéler très coûteux à mettre en œuvre. Le troisième axe concerne la détection, la localisation et la réparation de fuites ([5]).

De nombreuses techniques et approches ont été développées pour détecter et localiser les fuites. Les méthodes de diagnostic reposent sur l'analyse de données hydrauliques à savoir, l'analyse de la circulation d'eau, le débit minimum nocturne, la chute de pression de service, etc. Par ailleurs, il existe d'autres méthodes basées sur le traitement des signaux (onde de pression, bruit de fuites, etc.) : la méthode de Gradient ([20]) et la méthode de la corrélation acoustique ([21]) dite dans certains travaux, "Negative Pressure Wave Method" ([22] [23]). Il convient de noter que le bilan d'eau et la sectorisation du réseau donnent une vision macroscopique sur l'ampleur des pertes. Plus précisément, dans un réseau intégralement instrumenté, l'analyse basée sur le bilan d'eau donne une quantification précise de la quantité d'eau perdue. En outre, la sectorisation permet de cerner les secteurs en présence de fuites. Ensuite, la localisation précise de la fuite peut être effectuée sur la base de techniques dédiées qui sont la thermographie, le géoradar, les appareils acoustiques et le gaz traceur ([16] [17]).

Il convient de noter que les points de stockage d'eau dans les réseaux d'irrigation agricole sont généralement des bassins à ciel ouvert. Étant donné que l'eau est stockée dans une surface en contact direct avec l'atmosphère, une quantité d'eau se perd naturellement sous forme de vapeur et une autre quantité retrouve sa direction vers le bassin sous forme de précipitations. Dans les sites très ensoleillés et touchés par les épisodes de sécheresse tels que le sud de la France, le phénomène d'évaporation peut impacter le bilan d'eau. Ce dernier consiste à calculer la différence entre le volume d'eau pompé et celui consommé pendant une certaine période. Par ailleurs, il existe des pertes inévitables dans la structure d'acheminement même si le réseau est exploité dans des meilleures conditions. Il est donc nécessaire de tenir compte de ces phénomènes dans l'analyse de la circulation d'eau.



## **1.2.5 Spécificités des réseaux d'irrigation**

### **1.2.5.1 Instrumentation et déficit d'information**

Le but de cette sous-section est de décrire certaines spécificités des réseaux d'irrigation au regard par exemple des réseaux d'eau potable. Le manque de l'information est une spécificité particulière dans la majorité des réseaux d'irrigation. Ce manque est dû à une instrumentation minimale, à savoir les capteurs de pression, les compteurs d'eau et surtout les débitmètres au niveau des stations de pompage. Ce manque d'instrumentation peut être justifié par le coût très élevé de certains équipements. Ce déficit d'information représente une difficulté majeure pour la surveillance du réseau et la gestion des ressources en eau.

Le manque d'instrumentation peut être constaté à tous les niveaux du réseau. Par exemple, les clients ne sont pas forcément tous dotés d'un compteur pour quantifier leurs consommations. Ainsi, dans le cas d'absence de compteur, le gestionnaire peut procéder par une facturation forfaitaire par rapport à une surface souscrite. Par ailleurs, il convient de préciser que le coût du mètre cube d'eau est généralement calculé en fonction de la position géographique de l'utilisateur et donc de l'altitude par rapport à la source initiale de l'eau. Il s'agit de tenir compte du coût de pompage relatif au nombre de stations transitées.

La consommation d'eau dans un réseau d'irrigation dépend de plusieurs facteurs tels que la nature des cultures irriguées, le changement des techniques d'irrigation, les conditions climatiques, le type de sol, le mode de facturation, etc. L'aspect aléatoire de la consommation rend la tâche de gestion de ces réseaux ainsi que la prévision des consommations futures très difficile.

### **1.2.5.2 Aspects retard et d'incertitude d'information**

Le retard et l'incertitude d'information représentent des facteurs de difficulté d'analyse de la circulation globale d'eau dans un réseau d'irrigation.

L'instrumentation qui pourrait être utilisée (à savoir, les débitmètres, les compteurs d'eau, les capteurs de pression, etc.) est généralement entachées d'une incertitude induisant des écarts importants dans l'analyse. En particulier, l'incertitude des débitmètres, exploités pour la mesure de l'eau pompée, varie de 1 à 2 % et celle d'un compteur, installé chez un usager, est autour de 3 % et varie selon l'état et la qualité du type utilisé ([17]). Il s'agit de pourcentages importants vu les quantités globales d'eau qui pourraient être en circulation.

Le deuxième facteur de difficulté est l'aspect inhérent du retard. Tout d'abord, un retard est induit naturellement de part les distances entre les points considérés pour l'analyse (voir par exemple l'équation (1.4)). Aussi, lorsqu'une comparaison est effectuée entre une information recueillie dans une station de pompage et celle d'un lieu de consommation, la notion de retard est introduite. Ensuite, un

retard peut résulter du système de gestion. En effet, certaines consommations, par exemple, peuvent être comptabilisées en différé.

## 1.2.6 Usagers

Dans les réseaux d'irrigation, on distingue plusieurs types d'usager. Les particuliers et les agriculteurs représentent les deux catégories de base. Les agriculteurs cultivent des terrains agricoles d'une superficie plus au moins importante. Alors que, les particuliers exploitent de petites surfaces généralement des jardins. L'eau brute des réseaux d'irrigation est utilisée pour l'arrosage mais peut aussi être exploitée pour l'élevage.

Habituellement, les usagers cultivent des cultures particulières qui s'adaptent au mieux avec le climat et le sol de leurs régions. À titre d'exemple, la majorité de la production française du raisin de table et du maïs se fait respectivement dans le Sud-Est et le Sud-Ouest du pays. Chaque culture a un besoin en eau bien précis ([2]). Il faudrait annuellement, par exemple, 500 litres d'eau pour produire 1 kg de maïs, 100 litres pour produire 1 kg de tomates et 25 litres pour produire 1 kg de salades<sup>6</sup>.

Il est à noter que plus de 780 millions de personnes dans le monde, n'ont toujours pas accès à des sources d'eau potable ([24]). À titre d'exemple, en Éthiopie, seulement 22 % de la population ont accès à l'eau potable. Ainsi, la majorité de la population utilise l'eau brute pour satisfaire les besoins domestiques (c'est-à-dire, linge, vaisselle, douche, etc.).

Certaines collectivités territoriales et sociétés d'aménagement ou d'intérêt général utilisent l'eau brute pour produire de l'électricité à travers des centrales hydrauliques. Dans ce contexte, on peut citer la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) et la Société du Canal de Provence (SCP). Par ailleurs, l'eau brute est utilisée aussi par les sapeurs-pompiers pour lutter contre les incendies.

## 1.2.7 Réseaux d'irrigation et enjeu énergétique

De nos jours, le monde fait face à une croissance très forte du coût de l'énergie ([25]). Les réseaux d'irrigation sous pression, et de part les besoins importants de pompage, peuvent être considérés comme des gros consommateurs de l'énergie électrique. Les superficies irriguées et les besoins en eau sont en constante augmentation. Ainsi, entre 1988 et 1995, la surface totale irriguée en France est passée de 1,15 à 1,62 million d'hectares, soit une augmentation moyenne de 5 % par an<sup>7</sup>. Par conséquent, le coût de pompage représente un impact financier important sur les dépenses en gestion des réseaux d'irrigation.

---

6. Information de l'Agence de l'eau Seine-Normandie, 2009.

7. Information de l'Institut National de la Recherche Agronomique, 1998.

À titre d'exemple, la consommation électrique estivale du réseau hydraulique régional du Languedoc Roussillon a été en 2014 de 70 GWh correspondant à une facture proche de 5 M€ ([26]). Il convient donc d'analyser les mécanismes de l'accroissement de la facture énergétique, dans le cadre des réseaux d'irrigation sous pression, afin d'optimiser son coût.

Un premier facteur d'augmentation de la facture d'électricité est dû à la hausse globale des tarifs pratiqués par les fournisseurs d'électricité et les taxes imposées par les pouvoirs publics. Un deuxième facteur est l'accroissement général des consommations. Par exemple, la consommation d'énergie en Espagne a été multipliée par sept entre 1970 et 2007, en passant de 206 à 1560 de KWh par hectare ([27]). Cet accroissement résulte essentiellement de l'extension des réseaux pour répondre à une demande de plus en plus importante et qui atteint des altitudes très élevées. Un troisième facteur découle de planifications de fonctionnement non toujours bien optimisées. On désigne par planification l'organisation du fonctionnement des pompes et elle concerne deux points principaux. D'une part, il convient de privilégier le fonctionnement des pompes lors de périodes de tarification électriques les plus avantageuses ([28–30]). D'autre part, il est essentiel de définir une stratégie optimale de fonctionnement : nombre de pompes en marche simultanée, type adapté de maillage, etc. En outre, la structure du réseau doit être ajustée aux besoins d'un fonctionnement optimal (c'est-à-dire, justesse de la canalisation, présence suffisante de bassins, etc.). Un dernier facteur, d'accroissement de la facture d'électricité est l'inadéquation des contrats souscrits auprès des fournisseurs et les besoins énergétiques réels des réseaux d'irrigation. Il serait donc judicieux de définir précisément les besoins, par exemple, en se basant sur l'historique des consommations. Ensuite, il s'agit de négocier un contrat fondé sur des besoins bien quantifiés et précis.

## 1.3 Canal de Carpentras

### 1.3.1 Historique

L' Association Syndicale du Canal de Carpentras (ASACC) est un établissement public créé en 1853. Son inauguration a eu lieu en présence de son fondateur Louis Giraud et de l'impératrice Eugénie le 12 juillet 1857. C'est un ouvrage hydraulique servant à la distribution d'eau brute pour l'irrigation agricole et l'arrosage des jardins. L'eau s'écoule depuis sa prise principale en Durance à Mérindol, puis elle arrive par gravité sur le territoire desservi par le canal de Carpentras. Il convient de noter que pendant plus d'un siècle, seules les terres dites "au-dessous du canal" bénéficiaient du réseau gravitaire du canal de Carpentras dont la facturation est établie à la surface souscrite. À partir de 1975, le canal se modernise peu à peu par une mise sous pression. Ainsi, l'irrigation gravitaire cède progressivement la place à l'aspersion et au goutte à goutte pour rendre fertiles les terres de Vaucluse dites "au-dessus du canal". Aujourd'hui, le périmètre du réseau d'irrigation touche 39 communes du département de Vaucluse dans le Sud-Est de la France. Ce périmètre est principalement entre le Mont Ventoux au nord, le Rhône à l'ouest, la Durance au sud et enfin les Monts de Vaucluse et le Lubéron à l'est. Depuis la fusion avec l'ASA de Piolenc-Uchaux en 2011, le canal de Carpentras gère également une prise d'eau sur le Rhône. Une particularité principale du réseau est l'aspect ensoleillé de la zone (voir Figure 1.14).

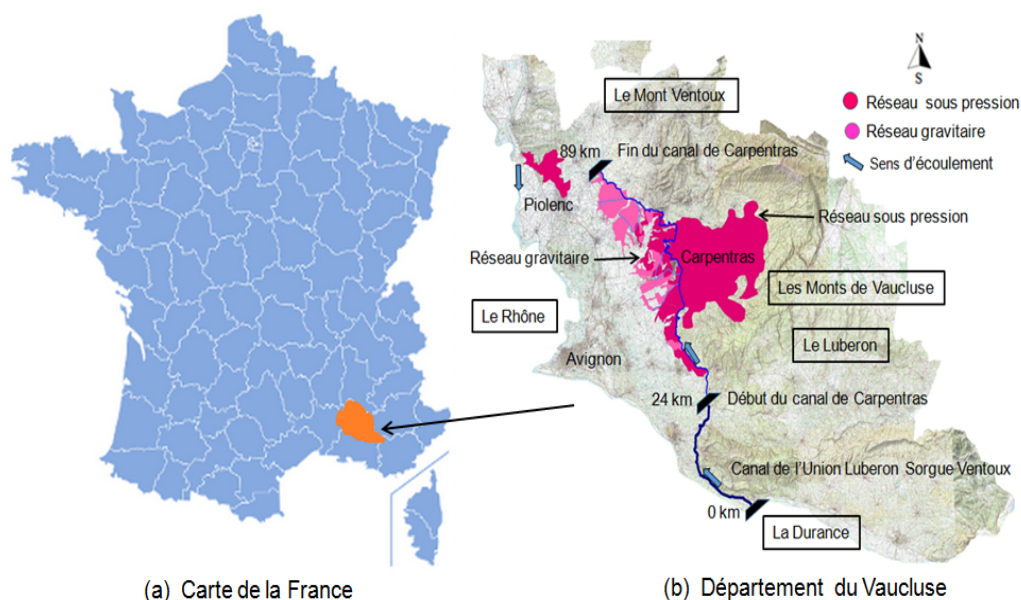


Figure 1.14 – Réseau d'irrigation de Carpentras

### 1.3.2 Chiffres clés

Le canal de Carpentras est un canal principal de 65 km de pente très faible. L'eau s'écoule depuis la Durance, puis elle parcourt 24 km dans le canal de l'Union Luberon Sorgue Ventoux avant d'arriver gravitairement au canal de Carpentras. Aujourd'hui, le canal de Carpentras dessert 15000 adhérents, soit un territoire agricole de 12000 hectares situés entre les côtes altimétriques 87 et 570 m NGF. Il convient de préciser que 35 % du périmètre est irrigué gravitairement et 65 % par le réseau sous pression. Ce dernier est composé de 35 stations de pompage, 24 bassins de stockage totalisant environ 90000 m<sup>3</sup> et 1000 km de canalisations enterrées. Le réseau gravitaire est constitué de plus de 35 km de canaux secondaires et 335 km de petits canaux. En moyenne, plus de 69 millions de m<sup>3</sup> sont prélevés en Durance chaque année pour desservir les adhérents. Ainsi, le droit d'eau du canal de Carpentras s'élève à 6000 l s<sup>-1</sup> sur la Durance et 1400 l s<sup>-1</sup> sur le Rhône.

### 1.3.3 Description du canal

Le réseau sous pression du canal est constitué de deux grandes chaînes de pompage en cascade et des stations de pompage éparpillées et non connectées les unes avec les autres. Il convient de préciser que le canal de Carpentras est un site représentatif des canaux français et ceci est dû à son immense structure.

La première chaîne de pompage est dite "Les Terrasses du Ventoux" (voir Figure 1.15). Elle dessert un terrain agricole situé entre les côtes altimétriques 87 et 460 m NGF. Celle-ci comprend deux branches parallèles composées chacune de 4 étages d'altitudes différentes. Les deux branches du sous-réseau sont maillées et chacune possède un point de prélèvement propre sur le canal de Carpentras. Cette chaîne de pompage alimente un sous-réseau à très forte dominante agricole. Seuls quelques quartiers ont une vocation périurbaine. Sur le premier étage des deux branches, les cultures sont variées : maraîchage de serres ou de pleins champs, vignes, truffes, etc. Les principales cultures irriguées sur les autres étages sont le raisin de table et la cerise.

La deuxième chaîne de pompage est dite "Les Coteaux de la Nesque". Elle dessert un terrain agricole situé entre les côtes altimétriques 90 et 435 m NGF. On distingue deux branches maillées sur ce réseau. Cependant, ce maillage reste fermé pendant la période de plein arrosage. De même, chaque branche possède un point de prélèvement propre sur le canal de Carpentras. Ce sous-réseau est caractérisé par une très forte dominante agricole dont le raisin de table et la cerise sont les deux principales cultures irriguées.

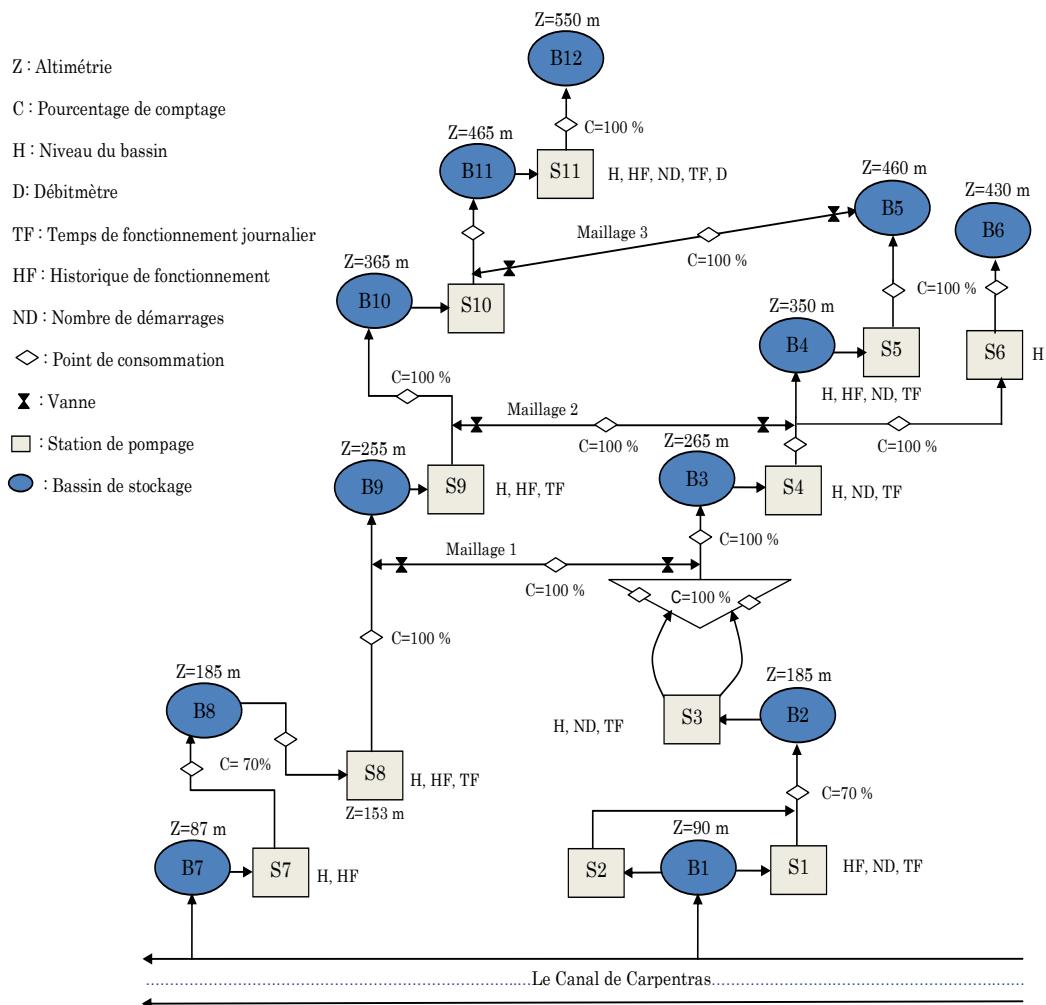


Figure 1.15 – Partie du réseau de Carpentras

### 1.3.4 Instrumentation et information disponible

Les capteurs et les informations disponibles au sein du réseau du canal de Carpentras sont détaillés dans l'Annexe 1.

#### 1.3.4.1 Instrumentation et informations disponibles

L'instrumentation disponible au sein du canal de Carpentras est composée de capteurs de pression et de niveau d'eau, les débitmètres, les compteurs d'eau et d'électricité.

Les informations disponibles, au sein du canal, sur le fonctionnement des pompes concernent essentiellement, les périodes de marche et d'arrêt, les pressions de refoulement et les courbes de charge (voir Figure 1.16).

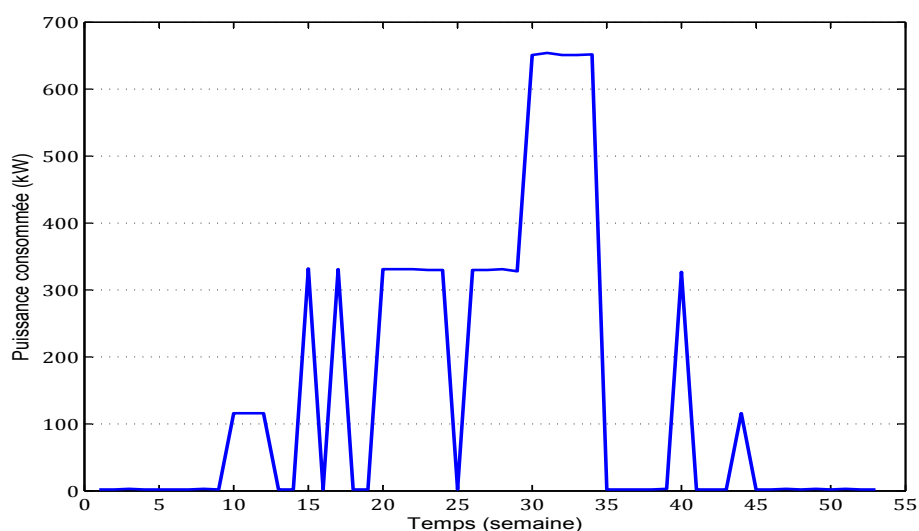


Figure 1.16 – Exemple de la consommation annuelle d'une station (2015)

Cependant, il convient de préciser que ces informations ne sont pas disponibles systématiquement et pour toutes les stations (voir Annexe 1).

Par ailleurs, on dispose, à travers des débitmètres disponibles, des quantités d'eau pompées. En outre, il est possible d'estimer une partie des quantités d'eau consommées à partir des factures archivées.

Enfin, des informations sur les surfaces irrigables, sur le nombre d'adhérents, sur le nombre de bornes d'arrosage peuvent être exploitées pour réaliser une étude de l'évolution de la demande au sein du réseau.

#### 1.3.4.2 Logiciels spécifiques

Des logiciels spécifiquement conçus pour la gestion des réseaux de distribution d'eau sont disponibles. Certains logiciels sont destinés à l'acquisition et le traitement de données transmises à distance depuis la station de pompage. Par exemple, on peut citer le logiciel PCWin. Ce dernier fournit des informations sur l'état de l'ensemble des points de mesure et permet d'exploiter les données en vue de superviser le réseau. D'autres logiciels sont conçus pour collecter et représenter les données spatiales et géographiques du réseau sur une vue cartographique. Ces logiciels permettent de réaliser des cartes sous formes de plans cadastraux informatisés afin de faciliter l'accès aux différents secteurs du réseau. Ils permettent également d'apporter une aide à la programmation des

travaux de modernisation ou de renouvellement. À titre d'exemple, on peut citer le logiciel SIG (Système d'Information Géographique) ou GeoConcept. Par ailleurs, il existe des logiciels conçus pour enregistrer et mettre à jour les informations du réseau et celles des adhérents, par exemple, Asarole. Ces informations concernent la superficie des différentes parcelles agricoles, les bornes d'arrosage installées, la facturation de l'eau consommée, l'édition des comptes des adhérents, etc.



Figure 1.17 – Outils pour la gestion du réseau

### 1.3.5 Usagers

Au sein du réseau d'irrigation du canal de Carpentras, on distingue deux types principaux d'usagers : les particuliers et les agriculteurs. Les agriculteurs utilisent l'eau brute pour irriguer les grandes cultures, les arbres fruités, le maraîchage de serres ou de pleins champs, etc. Par ailleurs, les particuliers utilisent l'eau brute pour l'arrosage des jardins, l'usage sanitaire et le lavage d'objets.

Par ailleurs, l'eau du canal peut être exploitée pour d'autres usages. En période estivale, le risque d'incendie augmente de façon importante. Le climat chaud et sec de la région méditerranéenne en fait des zones plus sujettes aux feux. Dans ce contexte, des bornes d'incendie dans le périmètre desservi par le canal de Carpentras ont été mises à la disposition des sapeurs-pompiers pour lutter contre les incendies.



### 1.3.6 Évolution de la demande

La demande en eau dans le secteur agricole a connu un accroissement rapide. À l'échelle nationale, les surfaces irriguées en France ont pratiquement quadruplé entre 1970 et 1997<sup>8</sup>. Au canal de Carpentras, la superficie irrigable et le nombre de bornes d'arrosage sont en constante augmentation. En outre, les demandes de raccordement au réseau ne cessent d'augmenter d'une année sur l'autre. Pour faire face à cette forte demande, 5 stations de pompage ont été ajoutées entre 2008 et 2010.

Les Figures 1.18, 1.19 et 1.20 présentent respectivement l'évolution du nombre d'adhérents, du nombre de bornes d'arrosage et de la surface irrigable en hectare au sein du réseau considéré.

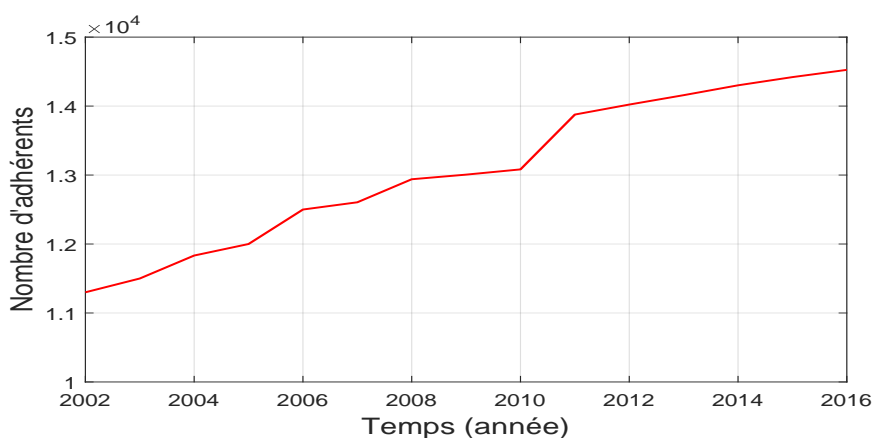


Figure 1.18 – Évolution du nombre d'adhérents

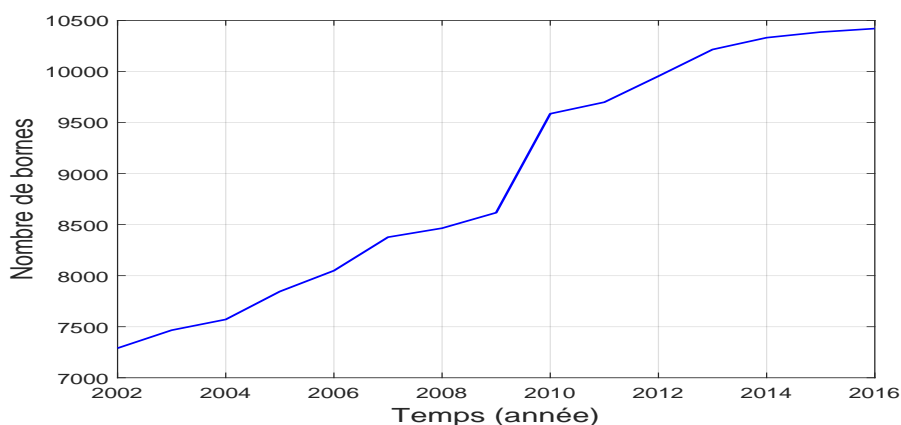


Figure 1.19 – Évolution du nombre de bornes

8. CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique), 2009.

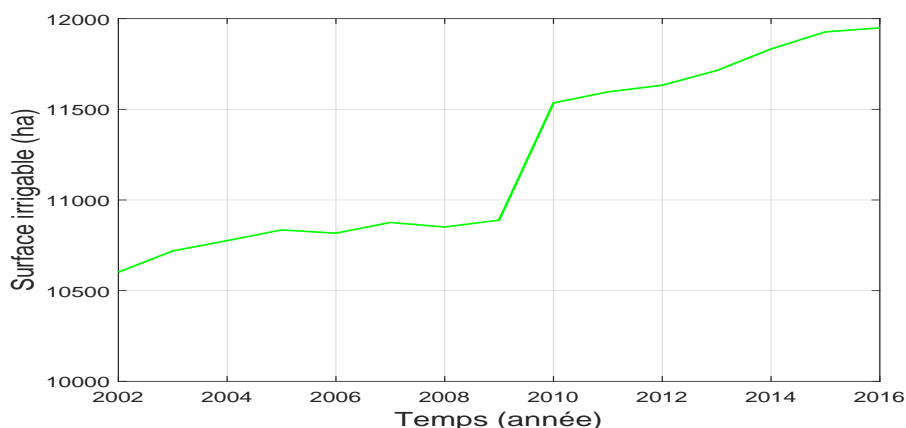


Figure 1.20 – Évolution de la surface irrigable

Le Tableau 1.1 donne la moyenne annuelle de l'évolution de la demande.

Variable	Moyenne annuelle
Nombre d'adhérents	230
Nombre de bornes	220
Surface	95

Table 1.1 – Moyenne annuelle de l'évolution de la demande

### 1.3.7 Pertes en eau

L'eau pompée et perdue par la suite constitue un prélèvement supplémentaire sur la ressource. Elle engendre des dépenses énergétiques et financières inutiles. La Figure 1.21 montre l'évolution de la demande en eau au cours de la dernière décennie dans le secteur "Grande Bastide" du réseau de Carpentras. Elle montre aussi l'écart entre le volume d'eau pompé et celui facturé. En moyenne annuelle, un tiers du volume d'eau pompé est perdu sans être facturé. Cette étude a été étendue à d'autres secteurs du réseau considéré et le même phénomène a été remarqué. À titre d'exemple, dans le secteur "les Brotteaux", les pertes ont atteint un niveau alarmant. Cependant, dans d'autres secteurs tels que "Sainte Colombe", les pertes en eau sont négligeables (voir Tableau 1.2).

Secteur	Taux de pertes (%)
"Les Brotteaux"	45
"Sainte Colombe"	5

Table 1.2 – Taux de pertes

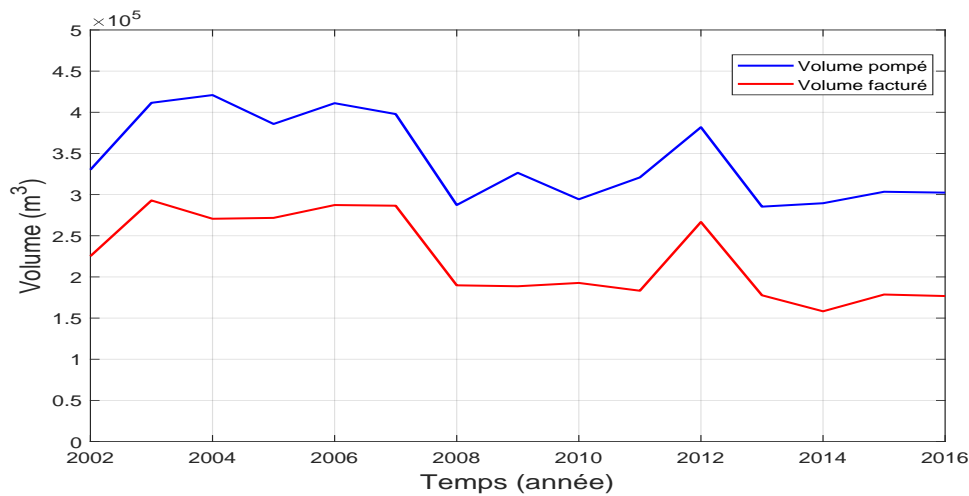


Figure 1.21 – Évolution des pertes en eau (secteur "Grande Bastide")

### 1.3.8 Évolution de la facture énergétique

Dans un contexte européen et national d'augmentation du coût de l'électricité, le canal de Carpentras avec ses 35 stations de pompage n'a pas échappé à la hausse des tarifs pratiqués par les fournisseurs d'électricité. Aujourd'hui, le réseau considéré représente un coût important en termes de dépenses énergétiques. La Figure 1.22 présente l'évolution de la facture énergétique tandis que la Figure 1.23 donne l'évolution de la consommation électrique du réseau entre 2002 et 2016.

On constate qu'à partir de l'année 2008, la facture énergétique croît d'une manière extrêmement importante. Entre 2002 et 2008, l'énergie consommée et la facture énergétique varient de façon quasi proportionnelle, contrairement à la période entre 2008 et 2016. L'année 2003 fut exceptionnellement chaude et sèche avec une canicule très forte. De ce fait, la consommation énergétique a été la plus haute. En revanche, en 2008 et 2013, la consommation a été la plus basse du fait des précipitations qui ont été supérieures à la normale.

Le Tableau 1.3 donne quelques statistiques sur la consommation électrique du réseau entre 2002 et 2016.

Consommation	Valeur (kWh)
Minimale	5 10 <sup>6</sup>
Maximale	9 10 <sup>6</sup>
Moyenne	7 10 <sup>6</sup>

Table 1.3 – Statistiques sur la consommation électrique

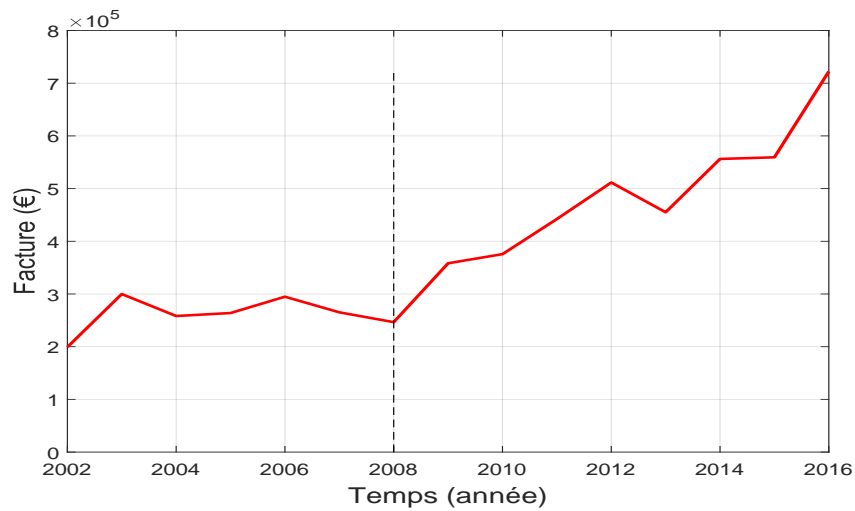


Figure 1.22 – Évolution de la facture énergétique du canal de Carpentras

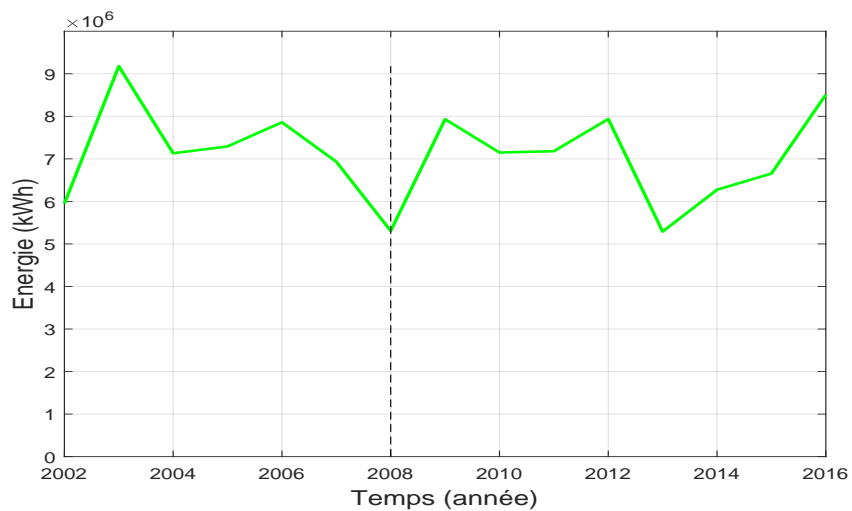


Figure 1.23 – Évolution de la consommation électrique du canal de Carpentras

## 1.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des systèmes de distribution d'eau et les ouvrages qui les composent. Une partie du chapitre a été dédiée à la présentation des systèmes d'irrigation agricole de façon générale et les réseaux sous pression de façon particulière. L'objectif est de donner une présentation générale sur les réseaux de distribution d'eau et les enjeux énergétiques. Ce chapitre est consacré aussi à la compréhension des notions fondamentales de

la mécanique de fluide utilisées dans les réseaux hydrauliques. En outre, nous avons présenté les objectifs qui ont motivé cette étude réalisée en collaboration avec l'Association Syndicale Autorisée du Canal de Carpentras.

Finalement, l'étude des réseaux d'irrigation agricole représente un défi scientifique qui consiste à effectuer le contrôle/commande dans un environnement incertain. Le déficit d'information et le retard représentent les problèmes majeurs rencontrés dans l'analyse et le diagnostic de ces réseaux.

# 2 Optimisation des contrats d'électricité

## 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la problématique d'optimisation des contrats souscrits auprès des fournisseurs d'électricité, d'un point de vue administratif. Il s'agit d'un levier important pour réduire la facture énergétique des gros clients. En effet, une bonne adaptation des contrats d'électricité avec les besoins énergétiques réels permet d'éviter des redevances inutiles telles qu'une souscription importante ou une pénalité de dépassement. Cette problématique a suscité l'intérêt de plusieurs gros consommateurs dans le monde : France ([26]), Espagne ([31–35]), Taïwan ([36–41]), États-Unis d'Amérique ([42] [43]), Australie ([28]), Algérie ([44]), etc. Ces consommateurs peuvent être des réseaux d'irrigation ([27]), des hôpitaux ([31]), des centres commerciaux ([34]), des universités ([36]), des entreprises industrielles ([40] [45]) ou autres. Ces travaux visent le développement de méthodologies pour l'optimisation du coût des contrats en fonction des protocoles adoptés par les différents fournisseurs d'énergie. Actuellement, les protocoles nationaux peuvent être similaires, par exemple, ceux adoptés en France et en Espagne où éloignés et c'est le cas de Taïwan et la Tunisie.

L'optimisation du contrat consiste à explorer un équilibre entre la puissance réellement atteinte par les installations électriques et la puissance souscrite par le client durant la période concernée. Il convient de noter que l'adaptation des contrats s'avère complexe. En effet, une puissance souscrite élevée est soumise à des redevances inutiles et une puissance souscrite basse engendre des pénalités de dépassement. Ainsi, il convient de trouver le meilleur compromis.

Dans ce travail, nous proposons une méthodologie permettant d'optimiser la facture d'électricité en agissant sur des éléments au choix du client. Pour ce faire, nous proposons d'abord un formalisme décrivant le problème d'optimisation. Puis, en se basant sur l'historique des consommations, nous donnons une solution optimale par le choix de la puissance à souscrire.

Ce chapitre est organisé de la façon suivante. La première partie est consacrée à l'élaboration d'un formalisme et à la position du problème d'optimisation. La deuxième partie du chapitre est dédiée à la stratégie adoptée pour résoudre le problème d'optimisation sous contraintes. Plus précisément, nous proposons deux solutions différentes. La première solution est fondée sur l'utilisation des algorithmes informatiques à base de l'intelligence artificielle ou d'une recherche exhaustive de l'ensemble des solutions candidates. La deuxième solution est

basée sur une résolution analytique du problème par utilisation des méthodes mathématiques. Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. Une étude de cas au sein du canal de Carpentras est présentée pour illustrer l'intérêt des outils proposés. Puis, les résultats obtenus sont présentés et discutés. Finalement, nous concluons notre chapitre.

## 2.2 Formulation mathématique du problème d'optimisation

### 2.2.1 Position du problème

D'une façon générale, la facture d'électricité dépend de l'énergie consommée, de la version tarifaire et des puissances souscrites lors de la contractualisation (voir Figure 2.1).

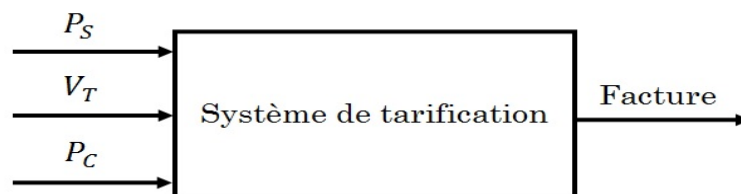


Figure 2.1 – Structure de la facture d'électricité

Plus précisément, la facture totale est établie de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Facture} = & \text{Souscription}(V_T, P_S) \oplus \text{Pénalités}(V_T, P_S, P_C) \\
 & \oplus \text{Consommation}(V_T, P_C) \oplus \text{Taxes}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Ainsi, pour optimiser la facture énergétique, il convient de choisir d'une façon optimale la version tarifaire et les puissances souscrites. Il convient de préciser qu'une planification de la consommation est un levier important pour optimiser la facture en réduisant substantiellement la partie consommation. Cependant, dans ce travail, nous focaliserons sur la partie constituée de la souscription et les pénalités en considérant que la tâche d'optimisation des consommations est réalisée séparément et en amont.

Tout au long de cette analyse, il est supposé que le choix des puissances souscrites s'effectue sous des contraintes imposées par le fournisseur d'électricité. À titre d'exemple, actuellement, nous avons les contraintes suivantes :

1) En Espagne :  $P_S^i \leq P_S^{i+1}$

2) En France :  $P_S^i = P_S^{i+1}$  ou  $P_S^{i+1} \geq \text{Max}(P_S^i + 20, 1.05 P_S^i)$

L'objectif de ce travail est de développer une stratégie qui permet de définir  $(V_T^\circ, P_S^\circ)$  la version tarifaire et les puissances souscrites qui permettent de minimiser la facture totale à partir d'un profil d'utilisation tout en respectant les règles sur la capacité de la charge imposées par le fournisseur d'électricité. Il s'agit donc de résoudre un problème de la forme suivante :

$$\begin{cases} \text{Min}(Souscription(V_T, P_S) \oplus Pénalités(V_T, P_S, P_C)) \\ \text{Contraintes}(V_T, P_S) \end{cases} \quad (2.2)$$

## 2.2.2 Définitions

Tout au long de ce travail, on désignera par période tarifaire, un intervalle de temps durant lequel sont appliqués les mêmes tarifs. Et, sur une période d'analyse (une année, par exemple), il y a plusieurs périodes tarifaires. Pour chaque période, des règles de facturation sont établies en fonction de la politique du fournisseur.

En outre, une période tarifaire peut être considérée comme étant composée de sous-périodes. L'intérêt serait de tenir compte de certains modes de facturations plus complexes. Dans ce cas, l'analyse pourrait être assimilée à un cas multi-dimensionnel et ne sera pas considérée dans ce travail.

Chaque période tarifaire est caractérisée par une série de valeurs indiquant les données de la consommation (voir Figure 2.2). Ces données peuvent être des valeurs d'échantillonnage, des maximums locaux ou autres.

On utilisera  $I$  pour désigner le nombre des périodes tarifaires. Pour  $i \in \llbracket 1, I \rrbracket$ , on utilisera  $J^i$  pour indiquer le nombre de données, supposées être ordonnées, de la période  $i$ .

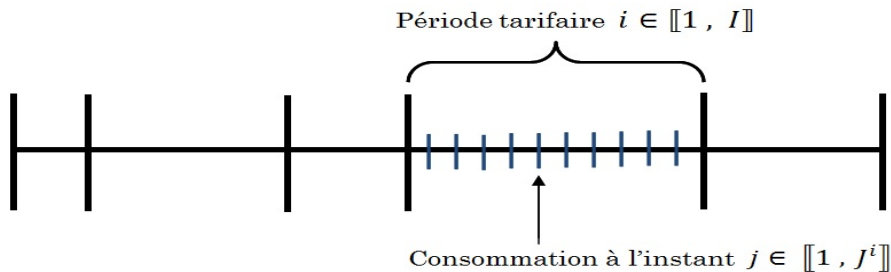


Figure 2.2 – Décomposition temporelle de la période d'analyse



## 2.2.3 Souscription

Tout au long de ce travail, il est supposé que le choix des puissances souscrites génère un coût de nature linéaire et qui est dépendant de la version tarifaire :

$$\text{Souscription}(V_T, P_S) = \sum_{i=1}^I \alpha_i(V_T) P_S^i \quad (2.3)$$

où  $\alpha_i$  sont des constantes dépendantes des versions tarifaires.

## 2.2.4 Pénalités

Les pénalités sont établies à partir des éventuels dépassements constatés lors des consommations électriques. La définition des dépassements et la valeur des pénalités varient selon les fournisseurs d'électricité (voir par exemple [33]).

D'une façon générale, les pénalités sont calculées comme un cumul en fonction des dépassements constatés sur chaque période tarifaire et peuvent donc être exprimées de la façon suivante :

$$\text{Pénalités}(V_T, P_S, P_C) = \sum_{i=1}^I D^i(V_T, P_S, P_C) \quad (2.4)$$

où les fonctions  $D^i(i \in \llbracket 1, I \rrbracket)$  expriment le coût des dépassements.

Le calcul de dépassement varie selon les fournisseurs d'électricité. Il peut être formulé plus au moins d'une façon complexe notamment si le protocole de facturation repose sur des sous-périodes tarifaires.

Sur une période tarifaire  $i \in \llbracket 1, I \rrbracket$ , et pour une consommation  $P_C^j$ , effectuée à l'instant  $j \in \llbracket 1, J^i \rrbracket$ , on suppose que le dépassement est exprimé en fonction des  $K_i$  seuils définis par des coefficients  $\beta_k(k \in \llbracket 1, K_i \rrbracket)$ . Ainsi, la valeur de dépassement à l'instant  $j$  est donnée par :

$$D_j^i(V_T, P_S, P_C) = \sum_{k=1}^{K_i} \Gamma_{\Theta_k(V_T)}^{n_k} (P_C^j - \beta_k P_S^i) \quad (2.5)$$

où  $\Theta_k(V_T)$  désignent des constantes dépendantes de la version tarifaire  $V_T$  pour  $k \in \llbracket 1, K_i \rrbracket$  et  $n_k \in \mathbb{N}^*$ .  $\Gamma_{\Theta_k(V_T)}^{n_k}$  est définie par :

$$\Gamma_{\Theta_k(V_T)}^{n_k}(X) = \begin{cases} X^{n_k} & \text{si } X > 0 \\ 0 & \text{si } X \leq 0 \end{cases}$$

Finalement, dans ce travail, les fonctions utilisées pour exprimer les dépassements sont assumées être définies par :

$$\begin{aligned}
 D^i(V_T, P_S, P_C) &= \gamma \left[ \sum_{j=1}^{J_i} D_j^i(V_T, P_S, P_C) \right] \\
 &= \gamma \left[ \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_i} \Gamma_{\Theta_k(V_T)}^{n_k} (P_C^j - \beta_k P_S^i) \right]
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

où  $K_i (i \in \llbracket 1, I \rrbracket)$  et  $n_k (k \in \llbracket 1, K_i \rrbracket)$  désignent des constantes.  $\beta_k (k \in \llbracket 1, K_i \rrbracket)$  sont des coefficients pour indiquer des seuils.  $\gamma$  est une fonction de normalisation qui peut éventuellement être réduite à l'identité.

À titre d'exemple, dans le cas de la France, ces paramètres sont définis de la façon suivante :  $K_i = \beta_k = n_k = 1$  et  $\gamma(x) = \alpha(V_T)\sqrt{x}$  pour  $x \geq 0$  où  $\alpha(V_T)$  désigne une constante associée à une tarification.

## 2.2.5 Contraintes

Généralement, le choix des puissances souscrites est soumis à une contrainte d'évolution globale en crescendo :

$$(C1) \quad P_S^i = P_S^{i+1}$$

ou

$$(C2) \quad \sigma(P_S^i) = \text{Max}(\delta_l + \beta_l P_S^i) \leq P_S^{i+1}, \quad l \in \llbracket 1, L_i \rrbracket$$

avec  $i \in \llbracket 1, I - 1 \rrbracket$ ,  $L \in \mathbb{N}^*$ ,  $\delta_l$  et  $\beta_l \in \mathbb{R}_+$  ( $l \in \llbracket 1, L \rrbracket$ ).

À titre d'exemples, la condition (C2) peut être réduite à  $L_i = 1$ ,  $\delta_1 = 0$  et  $\beta_1 = 1$ . Ce qui signifie, dans ce cas, que  $P_S^i \leq P_S^{i+1}$  pour  $i \in \llbracket 1, I - 1 \rrbracket$ . Par ailleurs, dans le cas de la France, actuellement, on a  $L = 2$  avec  $(\delta_1, \beta_1) = (20, 1)$  et  $(\delta_2, \beta_2) = (0, 1.05)$ . La Figure 2.3 illustre la contrainte (C2) dans le cas de la France.

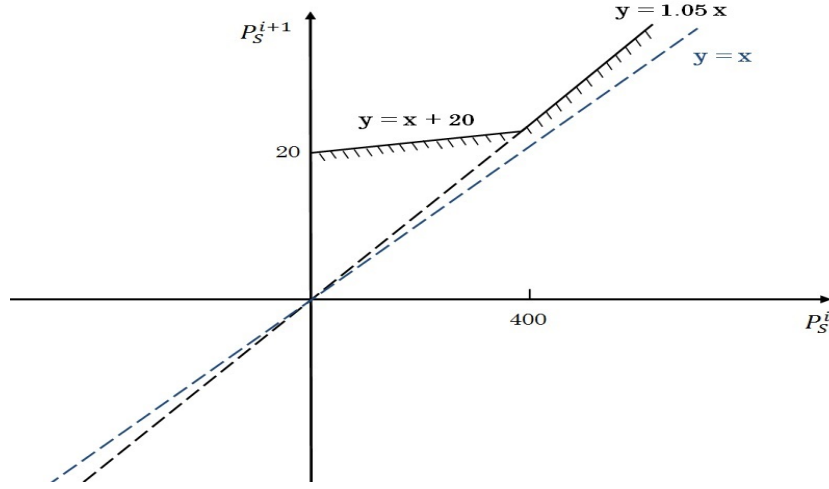


Figure 2.3 – Contrainte (C2) dans le cas de la France

## 2.2.6 Problème d'optimisation

Les contraintes (C1) et (C2) peuvent être reformulées de la façon suivante :

$$(C) \quad \begin{cases} (P_S^i - P_S^{i+1})^2 (\delta_l + \beta_l P_S^i - P_S^{i+1}) \leq 0 \\ i \in \llbracket 1, I-1 \rrbracket, \quad l \in \llbracket 1, L \rrbracket \end{cases} \quad (2.7)$$

Ainsi, et en utilisant les équations (2.3) et (2.6), le problème d'optimisation (2.2) peut être énoncé de la façon suivante :

$$(\mathcal{P}_1) \quad \begin{cases} \text{Min} \left( \sum_{i=1}^I \alpha_i(V_T) P_S^i + \gamma \left[ \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{k=1}^{K_i} \Gamma_{\Theta_k(V_T)}^{n_k} (P_C^{i,j} - \beta_k P_S^i) \right] \right) \\ \begin{cases} (P_S^i - P_S^{i+1})^2 (\delta_l + \beta_l P_S^i - P_S^{i+1}) \leq 0 \\ i \in \llbracket 1, I-1 \rrbracket, \quad l \in \llbracket 1, L \rrbracket \end{cases} \end{cases}$$

Sans perte de généralité, et afin d'alléger les notations, on focalisera sur le cas d'une seule version tarifaire. En effet, dans le cas de plusieurs versions tarifaires, il suffit d'effectuer la démarche pour chacune des versions, puis, de choisir la solution optimale à travers une recherche exhaustive.

Par ailleurs, le choix des valeurs de souscription  $P_S^i (i \in \llbracket 1, I \rrbracket)$  est supposé être fait sur un ensemble  $[P_S^{min}, P_S^{max}]$  et le pas d'échantillonnage est désigné par  $\Delta P_S$ . Ainsi, la complexité du problème est dépendante du nombre défini par :

$$N_P = \left\lfloor \frac{P_S^{max} - P_S^{min}}{\Delta P_S} \right\rfloor$$

où  $\lfloor . \rfloor$  désigne la partie entière.

Si le nombre  $N_P$  est de valeur "raisonnable", alors une solution fondée sur une recherche directe et exhaustive de toutes les possibilités peut être envisagée. Dans le cas contraire, c'est-à-dire que  $N_P$  est d'une très grande valeur, deux approches peuvent être explorées. La première approche est celle de l'utilisation des algorithmes à base de l'intelligence artificielle en vue de limiter les cas explorés. La deuxième approche est une résolution analytique du problème par utilisation des méthodes mathématiques.

On peut observer que les fonctions "objectif" sont continues mais non dérivables. Cet aspect ne poserait pas de problème pour une résolution fondée sur des outils informatiques. Cependant, l'exploration des méthodes mathématiques peut mener à des difficultés techniques.

## 2.3 Solution optimale à base des outils informatiques

### 2.3.1 Position du problème

Dans cette partie, la stratégie consiste à explorer des solutions fondées sur des outils de l'informatique. Ainsi, il s'agira d'une recherche dans un espace discret et à cardinal fini.

Contrairement à une résolution analytique, cette approche ne représente pas de difficulté mathématique et l'établissement de l'algorithme de recherche ne pose pas de problème particulier. Cependant, le parcours de l'ensemble des possibilités peut devenir très "coûteux" d'un point de vue temps de calcul. Ainsi, la problématique considérée dans cette partie consiste à définir des stratégies de recherche qui permettraient de répondre au dilemme entre le temps de calcul et la précision de la solution.

### 2.3.2 Ensemble de réalisabilité

Cette section est dédiée à la définition de  $R$  l'ensemble de réalisabilité. Il s'agit du domaine dans lequel sera explorée la solution optimale  $\hat{P}_s$ .

Dans ce qui suit, et comme adopté précédemment, la charge sur la période d'analyse sera désignée par  $(P_C^{i,j})_{\substack{i \in [1, I] \\ j \in [1, J^i]}}$  et il sera assumé que les bornes

$P_C^{min}$  et  $P_C^{max}$  sont prédéfinies.

Soit  $\Delta P_S$  un pas d'échantillonnage considéré. Nous définissons l'ensemble suivant :

$$R_0 = \llbracket 0, N_{\Delta P_S} \rrbracket \quad \text{avec} \quad N_{\Delta P_S} = \left\lfloor \frac{P_C^{max} - P_C^{min}}{\Delta P_S} \right\rfloor$$

où  $\lfloor \cdot \rfloor$  désigne la partie entière. Dans ce cadre  $R_0$  désigne l'ensemble de toutes les valeurs des puissances souscrites possibles.

Par ailleurs, nous utilisons  $\mathcal{C}$  pour désigner l'ensemble de  $\mathbb{R}_+^I$  défini par :

$$\mathcal{C} = \left\{ P_S \in \mathbb{R}_+^I / g(P_S^i, P_S^{i+1}) \leq 0 \quad \text{pour} \quad i \in \llbracket 1, I-1 \rrbracket \right\}$$

où  $g$  est définie dans  $(\mathcal{P}_2)$ . Il s'agit de l'ensemble des puissances souscrites vérifiant les contraintes du fournisseur et donc autorisées.

Ainsi, une première approche consiste à explorer la solution sur l'ensemble  $R$  défini par :

$$R = R_0^I \cap \mathcal{C} \quad (2.8)$$

## 2.3.3 Principe de résolution

### 2.3.3.1 Algorithme de résolution

Le principe de résolution consiste à tester le coût financier généré par le choix de chaque élément de  $R$ , puis de retenir l'élément qui réalise l'optimum (voir Algorithme 1).

---

**Algorithme 1** Recherche de la solution optimale

---

$PasFin \leftarrow Vrai$

$P_S \leftarrow Premier(R)$

$Coût_M \leftarrow Evaluer(P_S)$

$\hat{P}_S \leftarrow P_S$

**Tantque**  $PasFin$  **Faire**

$P_S \leftarrow Element\_Suivant(R, P_S, PasFin)$

**Si**  $PasFin$  **Alors**  $Coût \leftarrow Evaluer(P_S)$

**Si**  $(Coût < Coût_M)$  **Alors**

$\hat{P}_S \leftarrow P_S$

$Coût_M \leftarrow Coût(P_S)$

**Finsi**

**Finsi**

Retourner  $(\hat{P}_S)$

**Refaire**

---

Le coût en terme de temps global d'exécution de l' Algorithme <sup>1</sup> 1 peut être estimé de la façon suivante :

$$C_{global}^{N_{\Delta P_S}} = |R| C_{Evaluer} \quad (2.9)$$

où  $|R|$  désigne le cardinal de l'ensemble  $R$  et  $C_{Evaluer}$  est le coût en terme de temps généré par la fonction "Evaluer".

Il est à noter que  $|R|$  dépend de  $|R_0|$  et donc de la période d'échantillonnage. Ainsi, le temps de calcul peut devenir très important pour des petites périodes d'échantillonnage.

### 2.3.3.2 Estimation du temps d'exécution

Afin d'évaluer le temps de calcul nécessaire lors de l'exécution de l' Algorithme 1, nous allons estimer d'abord le cardinal de l'ensemble  $R$  en fonction de  $N_{\Delta P_S}$ . Dans ce qui suit, nous allons assumer que  $N_{\Delta P_S} \geq 400$ . L'estimation sera effectuée en deux étapes. Dans la première étape, on considère le cas de deux périodes tarifaires (c'est-à-dire  $I = 2$ ). Ensuite, on généralise au cas  $I > 2$ .

Soient,  $R_1$  et  $R_2$  les deux ensembles définis par  $R_1 = \llbracket 0, 400 \rrbracket$  et  $R_2 = \llbracket 400, N_{\Delta P_S} \rrbracket$ . Clairement, nous avons  $R_0 = R_1 \cup R_2$ . Soit aussi  $(\hat{P}_S^1, \hat{P}_S^2) \in R_0^2 \cap \mathcal{C}$  un couple désignant deux puissances souscrites. Nous avons

$$\begin{cases} \hat{P}_S^1 + 20 \geq 1.05 \hat{P}_S^1 & \text{pour } \hat{P}_S^1 \in R_1 \\ \hat{P}_S^1 + 20 \leq 1.05 \hat{P}_S^1 & \text{pour } \hat{P}_S^1 \in R_2 \end{cases}$$

Le cardinal de  $R$  est estimé en considérant les deux cas  $\hat{P}_S^1 \in R_1$  et  $\hat{P}_S^1 \in R_2$ . En effet, un raisonnement direct montre que :

$$\left| \left\{ (\hat{P}_S^1, \hat{P}_S^2) \in R_0 / \hat{P}_S^1 \in R_1 \right\} \cap \mathcal{C} \right| = \frac{N_{\Delta P_S}}{2} \left( \frac{3 N_{\Delta P_S}}{4} + \frac{37}{2} \right)$$

et

$$\left| \left\{ (\hat{P}_S^1, \hat{P}_S^2) \in R_0 / \hat{P}_S^1 \in R_2 \right\} \cap \mathcal{C} \right| \geq \frac{N_{\Delta P_S}}{2} \left( 0.2125 N_{\Delta P_S} - 1.575 \right)$$

---

1. La fonction "*Element\_Suivant*" permet de retourner l'élément suivant de l'ensemble  $R$ , supposé ordonné dans un sens de parcours prédéfini. Il est à noter que la valeur de la variable "*PasFin*" est "*Vrai*" et quand la fin de l'ensemble  $R$  est atteinte alors la variable "*PasFin*" reçoit la valeur "*Faux*". La fonction "*Evaluer*" est conçue pour effectuer le calcul du coût de la fonction "objectif". Plus précisément, à partir d'une valeur donnée de la puissance souscrite, elle permet de calculer le coût financier généré pour le profil de charge considérée.

Nous pouvons alors déduire que :

$$|R_0^2 \cap \mathcal{C}| \geq N_{\Delta P_S} \left( 0.48125 N_{\Delta P_S} + 8.4625 \right) \quad (2.10)$$

En vertu de la relation (2.10) et en adoptant un raisonnement similaire, il est possible de démontrer que pour  $I > 2$ , nous avons

$$|R_0^I \cap \mathcal{C}| \geq N_{\Delta P_S} \left( 0.48125 N_{\Delta P_S} + 8.4625 \right)^{I-1}.$$

Ainsi, d'après (2.9), nous concluons que le coût de l'exécution de l'Algorithme 5 peut être approximé par :

$$C_{global}^{N_{\Delta P_S}} \simeq N_{\Delta P_S} \left( 0.48125 N_{\Delta P_S} + 8.4625 \right)^{I-1} C_{Evaluer} \quad (2.11)$$

### 2.3.3.3 Application numérique

Le but de cette partie est de donner une quantification précise du temps de calcul nécessaire pour une recherche exhaustive.

Le matériel utilisé est un ordinateur<sup>2</sup> standard et où l'algorithme implanté sous Matlab<sup>3</sup>. Les données exploitées sont celles de l'utilisation, constatée dans une station<sup>4</sup> de pompage. Les valeurs numériques utilisées sont détaillées dans le Tableau 2.1.

Constante	Valeur
$P_C^{min}$	0
$P_C^{max}$	710
$\Delta P_S$	1
$N_{\Delta P_S}$	710
$I$	5

Table 2.1 – Valeurs numériques liées au cas pratique-Station "Oasis"

Pour estimer le temps de calcul de la fonction "Evaluer", nous avons d'abord réalisé une série de tests pour des valeurs différentes de  $N_{\Delta P_S} \in \llbracket 1, 40 \rrbracket$ . Les Figures 2.4 et 2.5 donnent les résultats obtenus. Plus précisément, la Figure 2.4 donne une évaluation du temps global d'exécution par rapport aux valeurs de  $N_{\Delta P_S}$  et la Figure 2.5 précise la valeur moyenne du coût de calcul de la fonction "Evaluer". Une analyse statistique élémentaire montre qu'une valeur approximative du coût moyen est :

- 
2. Caractéristiques : Processeur Intel(R) Core(TM) i7, Capacité RAM 16 Go.
  3. Version Matlab : R2014a (8.3.0.532).
  4. Il s'agit de la plus puissante station du réseau considéré, dite "Oasis".

$$C_{\text{Evaluer}} \simeq 0.001 \text{ s} \quad (2.12)$$

Ainsi, et en vertu de (2.11) et (2.12), une approximation du coût global pour  $N_{\Delta P_S} = 710$  est donnée par :

$$C_{\text{global}}^{710} \simeq 710 \left( 0.48125 \cdot 710 + 8.4625 \right)^4 0.001 \text{ s}$$

ou encore

$$C_{\text{global}}^{710} \simeq 338.43 \text{ années.}$$

Il s'agit d'un coût colossal! Même si on considère l'évolution de la technologie avec le constat que les capacités des ordinateurs doublent tous les trois ans. Un calcul direct montre qu'il faudra attendre 50 ans avant de pouvoir réaliser les calculs en moins d'une journée. Finalement, l'approche fondée sur la recherche exhaustive est irréalisable pour répondre à la problématique considérée.

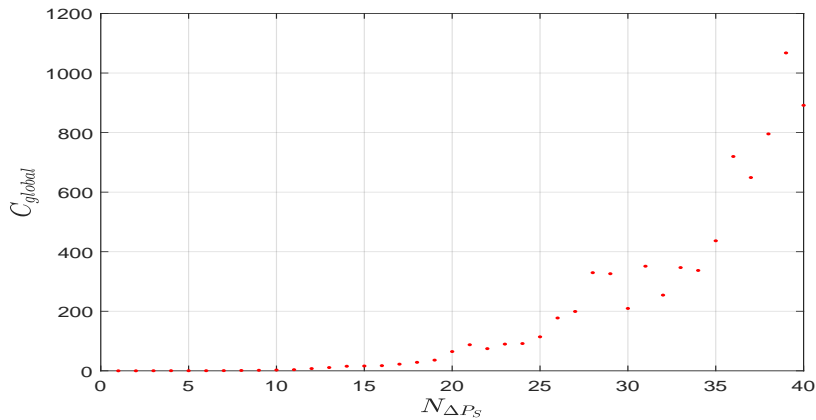


Figure 2.4 – Estimation du temps de calcul

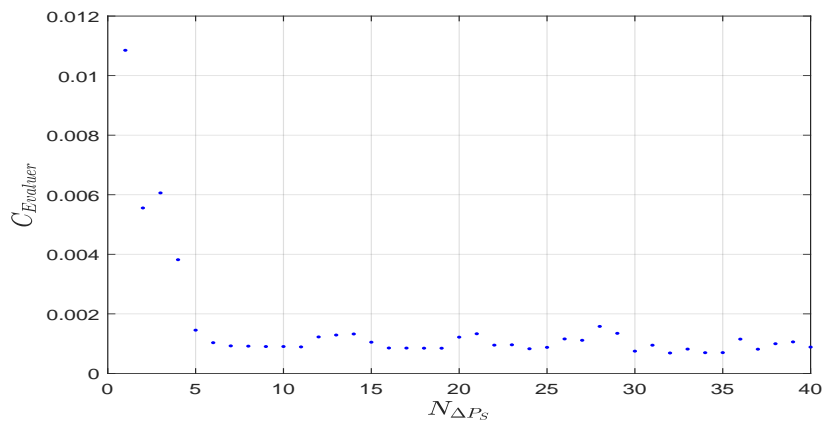


Figure 2.5 – Valeur moyenne du temps de calcul



Dans ce qui suit, nous allons explorer des méthodes afin de réduire le temps de recherche.

## 2.3.4 Réduction du temps de calcul

Pour remédier au problème de temps de calcul et rendre ainsi la démarche, à base d'outils informatiques, viable pour la recherche des solutions, deux approches peuvent être explorées.

La première approche sera fondée sur une réduction importante de l'ensemble de réalisabilité en excluant une partie jugée inutile au vu des considérations constatées sur l'utilisation effective des stations de pompage et donc du retour d'expérience.

Dans la deuxième approche, la stratégie consiste à effectuer une recherche basée sur un parcours "intelligent", réduit et non exhaustif de l'ensemble de réalisabilité.

### 2.3.4.1 Première approche

#### A. Présentation de la méthode

La première approche consiste à tenir compte de certaines informations du terrain sur l'exploitation effective des stations. Deux informations semblent être importantes pour réduire l'espace d'exploitation des solutions, c'est-à-dire, l'ensemble de réalisabilité. Les informations sont désignées par un ensemble supplémentaire de contraintes  $\mathcal{C}_1$ . Ceci nous mène à un nouveau ensemble de recherche de solution :

$$\bar{R} = R_0^I \cap \mathcal{C} \cap \mathcal{C}_1$$

Ainsi, le coût global peut être estimé par :

$$\begin{aligned} \bar{C}_{global} &= |\bar{R}| C_{Evaluer} \\ &= \eta C_{global} \end{aligned}$$

avec  $\eta \in ]0, 1[$  un coefficient qui représente le rapport entre les deux cardinaux.

Tout d'abord, une analyse des coûts des dépassements et du transport d'électricité montre qu'il serait probablement judicieux de choisir  $\hat{P}_S$ , la valeur de la puissance sous-crite, dans un intervalle  $[\theta P_C^{max}, P_C^{max}]$  où  $\theta \in [0, 1]$  une valeur à déterminer à partir des consommations constatées (voir Figure 2.6).

En outre, l'exploitation réelle des stations n'est effective qu'à partir de la deuxième période tarifaire. Finalement, sur la première période, une valeur optimale peut être définie afin d'éviter les dépassements et de permettre de répondre à la charge minimum hors période estivale. Par ailleurs, l'historique du fonctionnement montre que les puissances mises en jeu ne sont pas similaires sur toutes les périodes de l'année. En effet, sur la

période hivernale, il y a en général moins de pompes en fonctionnement. Ainsi, nous allons considérer deux puissances maximales différentes ; notées  $P_C^{max,H}$  et  $P_C^{max,E}$ , attribuées respectivement aux deux périodes hivernale et estivale.

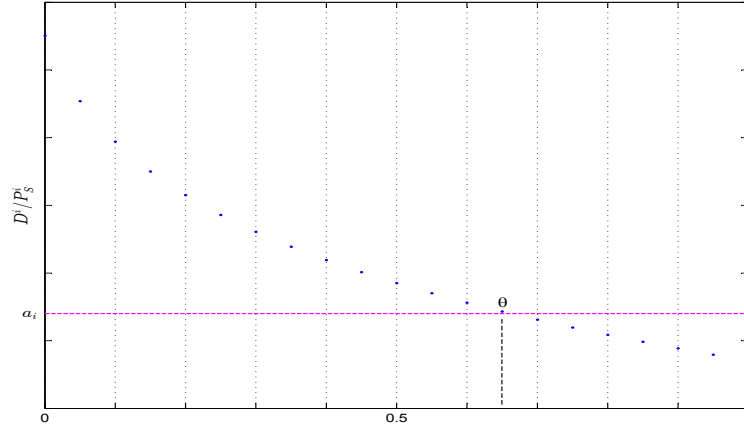


Figure 2.6 – Détermination de la valeur de  $\theta$

Soit  $R_1$  l'ensemble de réalisabilité respectant les nouvelles contraintes définies ci-dessus. Nous avons la relation suivante :

$$| R_1 | = (1 - \theta)^{I-1} \prod_{j=1}^2 (N_{\Delta P_S}^j)^{I^j} \quad (2.13)$$

avec  $I^1 + I^2 = I - 1$ .

Alors, il vient que

$$| R_1 | = (1 - \theta)^{I-1} \frac{\prod_{j=1}^2 (N_{\Delta P_S}^j)^{I^j}}{(N_{\Delta P_S})^I} | R_0 |.$$

Finalement, et dans le cadre d'une recherche exhaustive, le temps de calcul sera réduit par un coefficient équivalent à

$$C = \left[ \frac{(N_{\Delta P_S})^I}{(1 - \theta)^{I-1} \prod_{j=1}^2 (N_{\Delta P_S}^j)^{I^j}} \right].$$

Dans ce cas, le temps de calcul sera réduit avec un facteur de  $C = 180423 \cdot 10^5$ . Soit, un temps de calcul estimé à 0.6 seconde.

## B. Application numérique

On considère le cas de la station "Oasis". Les valeurs numériques utilisées sont détaillées dans le Tableau 2.2. Les puissances souscrites, obtenues à travers l'approche développée ci-dessus, sont données par le Tableau 2.3.

Constante	Valeur
$\theta$	0.8
$P_C^{min, H}$	98
$P_C^{max, H}$	123
$P_C^{min, E}$	561
$P_C^{max, E}$	661
$N_{\Delta P_S}^1$	25
$N_{\Delta P_S}^2$	100
$I^1$	2
$I^2$	2

Table 2.2 – Valeurs numériques liées au cas pratique-Station "Oasis"

Période tarifaire	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
Puissances optimales	4	117	117	652	652

Table 2.3 – Puissances souscrites optimales-Station "Oasis"

Il convient de noter que cette solution optimale permet de réduire le coût de la facture de 17 % par rapport au choix adopté actuellement au canal de Carpentras.

### 2.3.4.2 Deuxième approche

La deuxième approche consiste à utiliser les techniques de l'intelligence artificielle. Plus précisément, il s'agit de parcourir l'ensemble de réalisabilité en adoptant une stratégie qui permet de chercher la solution optimale sans parcourir complètement l'espace de réalisabilité.

#### A. Présentation de la méthode

Les techniques d'optimisation par utilisation de l'intelligence artificielle sont nombreuses (voir par exemple [46–51]). Parmi ces techniques, les approches de type bio-inspiré sont en plein essor. Une technique qui a fait ses preuves est la méthode d'Optimisation par Essaim Particulaire (OEP), voir par exemple [52]. Par exemple, cette méthode a été utilisée (voir [38] [41]) dans le problème d'optimisation de la facture d'électricité adopté au cas des fournisseurs en Taïwan.

Plus précisément, la méthode OEP est fondée sur le comportement social et dynamique des animaux se déplaçant en groupes compacts, par exemple, le vol d'oiseaux migrateurs ou les bancs de poissons. En fait, la communication entre les individus du groupe permet d'atteindre une solution optimale en s'appuyant sur leur expérience collective.

Cette approche présente l'avantage de parcourir un nombre restreint de solutions possibles. Ainsi, le temps de calcul est tout à fait raisonnable. Cependant, la méthode ne garantit pas l'obtention de la solution globale exacte.

Le principe de l'approche (voir Algorithme 2) consiste, tout d'abord, à initialiser la valeur de la puissance souscrite  $P_S$  à une valeur  $P_S(0)$ . Ensuite, il s'agit d'effectuer un parcours dans l'espace de réalisabilité constitué de  $N_{pas}$  pas ou jusqu'à la réalisation d'un critère d'arrêt. À chaque étape du parcours, la valeur de  $P_S$  (notée  $P_S(k)$  où  $k \in K$ ) est améliorée en tenant compte de la meilleure valeur rencontrée  $P_{S,M}$  et celle du voisinage proche de la "position"  $P_S$  en cours  $P_{S,V}$ . Il s'agit d'un principe fondé sur la mémorisation et la prise en compte du voisinage. Ainsi, le déplacement, lors du parcours, est régi par une "vitesse" déduite des meilleures valeurs mémorisées et du voisinage.

L'Algorithme 2 décrit la recherche de la solution optimale à partir de l'approche OEP. Le parcours est assumé être effectué un nombre de  $N_{pas}$  pas choisi initialement par l'utilisateur. Par ailleurs, la fonction "*Choisir\_aléatoire*" est supposée disponible pour choisir d'une façon aléatoire  $b(k)$  et  $c(k)$  en respectant des critères discutés dans la littérature (voir par exemple [51] [52]).  $F$  désigne la fonction "objectif" définie dans  $(\mathcal{P}_1)$ .

---

### Algorithme 2 Méthode OEP

---

#### **Début**

Lire  $(N_{pas}, A, B)$

Initialiser  $(P_S(0), \dot{P}_S(0), P_{S,M}(0), P_{S,V}(0))$

**Pour**  $k = 1$  **jusqu'à**  $N_{pas}$  **Faire**

*Choisir\_aléatoire*  $(b(k), c(k))$

$\dot{P}_S(k) \leftarrow A \dot{P}_S(k-1) + B \left[ b(k) (P_{S,M}(k-1) - P_S(k-1)) + c(k) (P_{S,V}(k-1) - P_S(k-1)) \right]$

$P_S(k) \leftarrow P_S(k-1) + \dot{P}_S(k)$

**Si**  $F(P_S(k)) < F(P_{S,M}(k-1))$

**Alors**  $P_{S,M}(k) \leftarrow P_S(k)$

**Sinon**  $P_{S,M}(k) \leftarrow P_{S,M}(k-1)$

**Finsi**

**Si**  $F(P_{S,M}(k)) < F(P_{S,V}(k-1))$

**Alors**  $P_{S,V}(k) \leftarrow P_{S,M}(k)$

**Sinon**  $P_{S,V}(k) \leftarrow P_{S,V}(k-1)$

**Finsi**

**Fin Pour**

Retourner  $(\hat{P}_S = P_S(N_{pas}))$

**Fin**

---

## B. Application numérique

Dans le cadre de la station "Oasis", nous avons implémenté l' Algorithme 2 en utilisant les paramètres donnés par le Tableau 2.4 (voir [51] [52]).  $b(k)$  et  $c(k)$  sont deux nombres choisis au hasard dans l'intervalle  $[0, 1]$  où  $k \in \llbracket 1, N_{pas} \rrbracket$ .

Paramètre	Valeur
A	0.7298
B	1.4962
$N_{pas}$	1000

Table 2.4 – Paramètres utilisés dans l'approche OEP

Les valeurs des puissances souscrites optimales calculées à partir de l' Algorithme 2 sont données par le Tableau 2.5. Cette solution permet de réduire la facture de 15 % par rapport au choix adopté actuellement au canal de Carpentras.

Période tarifaire	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
Puissances optimales	4	117	117	652	685

Table 2.5 – Puissances souscrites optimales trouvées par l'approche OEP

On constate que les valeurs de souscription trouvées par les deux méthodes informatiques sont assez proches.

## 2.4 Résolution analytique du problème d'optimisation

### 2.4.1 Position du problème

Dans le cas de la tarification en France, le problème  $(\mathcal{P}_1)$  devient :

$$(\mathcal{P}_2) \left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \left( \sum_{i=1}^I a_i P_S^i + b_i \sqrt{\sum_{j=1}^{J_i} \Gamma_1^2(P_C^{i,j} - P_S^i)} \right) \\ \left\{ \begin{array}{l} P_S^i \in [P_S^{\min}, P_S^{\max}] \quad , \quad i \in \llbracket 1, I \rrbracket \\ P_S^i = P_S^{i+1} \\ \text{ou} \\ g(P_S^i, P_S^{i+1}) = \sigma(P_S^i) - P_S^{i+1} \leq 0 \\ i \in \llbracket 1, I - 1 \rrbracket \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$\Gamma_1^2$  est définie par :

$$\Gamma_1^2(X) = \begin{cases} X^2 & \text{si } X > 0 \\ 0 & \text{si } X \leq 0 \end{cases}$$

Les contraintes du problème ( $\mathcal{P}_2$ ) peuvent être réécrites sous une forme classique d'un problème d'optimisation de la façon suivante :

$$(C1) \quad \begin{cases} (P_S^i - P_S^{i+1})^2 g(P_S^i, P_S^{i+1}) \leq 0 & , \quad i \in \llbracket 1, I-1 \rrbracket \\ P_S^{min} - P_S^i \leq 0 \\ P_S^i - P_S^{max} \leq 0 & , \quad i \in \llbracket 1, I \rrbracket \end{cases}$$

En outre, et afin de simplifier les expressions des contraintes (C1), la résolution du problème ( $\mathcal{P}_2$ ) peut être ramenée à la détermination de solutions de problèmes similaires de dimensions inférieures, puis, de choisir celle qui présente la valeur optimale.

Pour ce faire, on considère des vecteurs  $l \in \{0, 1\}^{I-1}$  qui sont définis, pour  $i \in \llbracket 1, I-1 \rrbracket$ , de la façon suivante :

$$l_i = \begin{cases} 1 & \text{si } P_S^i = P_S^{i+1} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

et on établit la procédure "*Suivant*( $l, Existe$ )" qui associe à un vecteur  $l$  son successeur dans l'ordre binaire et qui attribut à la variable "*Existe*" la valeur "*Faux*" si  $l$  est le dernier de la liste.

---

**Algorithme 3** Successeur d'un nombre en binaire

---

*Fonction Suivant* ( $l$  : Tableau  $\llbracket 1 \dots I-1 \rrbracket$ , *Existe* : Booléen)

**Début**

$i \leftarrow I - 1$

*Existe*  $\leftarrow$  *Vrai*

**Si**  $l[i] = 0$  **Alors**  $l[i] \leftarrow 1$

**Sinon**

**Tant que**  $l[i] = 1$  **Faire**

$i \leftarrow i - 1$

$l[i] \leftarrow 0$

**Fin Tant que**

**Si**  $i = 0$  **Alors** *Existe*  $\leftarrow$  *Faux*

**Sinon**  $l[i] \leftarrow 1$

**Finsi**

**Finsi**

**Fin** *Suivant*

---

Dans ce qui suit, on utilisera  $\Pi : \{0, 1\}^{I-1} \rightarrow \{0, \dots, I-1\}$  pour désigner la fonction qui associe à un élément de  $\{0, 1\}^{I-1}$  le nombre de "1" dont il est constitué. Ainsi, pour chacune  $l \in \{0, 1\}^{I-1}$  est associé  $P_{S,l} \in \mathbb{R}_+^{I_l}$  avec  $I_l = I - \Pi(l)$  désignant le nombre des puissances souscrites de différentes valeurs. Ainsi, la fonction "objectif" définie précédemment peut être exprimée avec des variables  $P_{S,l}$  de la façon suivante :

$$\sum_{i \in \llbracket 1, I_l \rrbracket} \left( \bar{a}_i P_{S,l}^i + \sum_{k \in \llbracket 0, k_i \rrbracket} b_i^k \sqrt{\sum_{j=1}^{J_i^k} \Gamma_1^2(P_{C,k}^{i,j} - P_{S,l}^i)} \right)$$

où  $\bar{a}_i, k_i, b_i^k, J_i^k$  et  $P_{C,k}^{i,j}$  sont des constantes déduites de  $a_i, b_i, J_i$  et  $P_C^{i,j}$ .

Finalement, le problème  $(\mathcal{P}_2)$  peut être résolu à partir de la détermination des solutions de problèmes similaires de dimensions inférieures de la forme :

$$(\mathcal{P}_3) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \sum_{i \in \llbracket 1, I_l \rrbracket} \left( a_i P_{S,l}^i + \sum_{k \in \llbracket 0, k_i \rrbracket} b_i^k \sqrt{\sum_{j=1}^{J_i^k} \Gamma_1^2(P_{C,k}^{i,j} - P_{S,l}^i)} \right) \\ \left\{ \begin{array}{l} P_{S,l}^{\min} - P_{S,l}^i \leq 0 \\ P_{S,l}^i - P_{S,l}^{\max} \leq 0 \\ \sigma(P_{S,l}^i) - P_{S,l}^{i+1} \leq 0, \quad i \in \llbracket 1, I_l \rrbracket \end{array} \right. \end{array} \right.$$

et en adoptant la démarche globale décrite par l' Algorithme 4.

---

**Algorithme 4** Résolution globale du problème d'optimisation

---

**Pour**  $i = 1$  **jusqu'à**  $I - 1$  **Faire**

$l[i] \leftarrow 0$

**Fin Pour**

$Min \leftarrow \text{Résoudre}(l); \quad Temp \leftarrow Min$

$l^0 \leftarrow l$

$p \leftarrow 1$

**Tant que** *Existe* **Faire**

**Si**  $p = 0$  **Alors**  $Temp \leftarrow \text{Résoudre}(l)$

**Sinon**  $p \leftarrow 0$

**Finsi**

**Si**  $Temp < Min$  **Alors**  $Min \leftarrow Temp$

$l^0 \leftarrow l$

**Finsi**

*Suivant*  $(l, \text{Existe})$

**Fin Tant que**

---

La fonction "Résoudre" est fondée sur la résolution explicite du problème ( $\mathcal{P}_3$ ), elle reçoit en argument  $l \in \{0, 1\}^{I-1}$  et retourne la valeur du minimum associé au cas décrit par  $l$ .

La suite de ce paragraphe est consacrée à la résolution du problème ( $\mathcal{P}_3$ ) et donc à la définition de la fonction "Résoudre".

Tout d'abord, on procède par une simplification, et sans perte de généralité, du problème posé. Plus précisément, on suppose que pour  $i \in \llbracket 1, I_l \rrbracket$ , nous avons  $k_i = 0$ . Ainsi, le problème d'optimisation peut se réduire à résoudre :

$$(\mathcal{P}_4) \quad \begin{cases} \text{Min} \sum_{i=1}^{I_l} f_i(P_S^i) \\ g(P_S^i, P_S^{i+1}) \leq 0 \\ i \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket \end{cases}$$

où  $f_i(x) = a_i x + b_i \sqrt{\sum_{j=1}^{J_i} \Gamma_1^2(c_j^i - x)}$ ,  $i \in \llbracket 1, I_l \rrbracket$ ,  $c_j^i = P_{C,k}^{i,j}$  et  $g : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$  est définie par :

$$g(y, z) = \begin{pmatrix} P_{S,l}^{\min} - y \\ y - P_{S,l}^{\max} \\ \sigma(y) - z \end{pmatrix}$$

## 2.4.2 Analyse de la fonction "objectif"

Sans perte de généralité, nous supposons que  $c_l^i < c_k^i$  pour  $0 < l < k \leq J^i$  et on pose  $c_0^i = 0$ . Ainsi, la fonction  $f_i$  peut être réécrite de la façon suivante :

$$f_i(x) = \begin{cases} a_i x + b_i \sqrt{\sum_{j=j_0+1}^{J^i} (x - c_j^i)^2} & \text{pour } x \in [c_{j_0}^i, c_{j_0+1}^i] \text{ où } j_0 \in \llbracket 0, J^i - 1 \rrbracket \\ a_i x & \text{pour } x > c_{J^i}^i \end{cases}$$

Nous avons

$$f'_i(x) = \begin{cases} a_i + b_i \varphi(x) & \text{si } x \in [0, c_{J^i}^i] \\ a_i & \text{si } x \geq c_{J^i}^i \end{cases} \quad (2.14)$$

où  $\varphi$  est la fonction définie par morceau de la façon suivante :



$\varphi(x) = \varphi_{j_0}(x)$  pour  $x \in [c_{j_0}^i, c_{j_0+1}^i]$  où  $j_0 \in \llbracket 0, J^i - 1 \rrbracket$  avec

$$\varphi_{j_0}(x) = \frac{(J^i - j_0)x - \bar{c}_{j_0}^i}{\left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (x - c_j^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

et  $\bar{c}_{j_0}^i = \sum_{j=j_0+1}^{J^i} c_j^i$ .

Les fonctions  $\varphi_{j_0}$  ( $j_0 \in \llbracket 0, J^i - 1 \rrbracket$ ) sont continues dans leurs domaines de définition. En outre, nous avons :

$$\begin{aligned} \varphi_{j_0}(c_{j_0+1}^i) &= \frac{(J^i - j_0) c_{j_0+1}^i - \bar{c}_{j_0}^i}{\left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (c_{j_0+1}^i - c_j^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{(J^i - j_0 - 1) c_{j_0+1}^i - c_{j_0+1}^i - \bar{c}_{j_0}^i}{\left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (c_{j_0+1}^i - c_j^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{(J^i - (j_0 + 1)) c_{j_0+1}^i - \bar{c}_{j_0+1}^i}{\left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (c_{j_0+1}^i - c_j^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ &= \varphi_{j_0+1}(c_{j_0+1}^i) \end{aligned}$$

Finalement, nous pouvons conclure que  $\varphi$  est une fonction continue.

Dans ce qui suit, nous allons analyser le comportement de la fonction  $\varphi$ , puis, nous déduirons l'évolution de  $f'_i$ .

Tout d'abord, il est à noter que, pour  $j_0 = J^i - 1$ , nous avons :

$$\varphi_{J^i-1}(x) = \frac{x - c_{J^i}^i}{\left[ (x - c_{J^i}^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} = -1 \quad \text{pour tout } x \in [c_{J^i-1}^i, c_{J^i}^i[.$$

Donc,  $\varphi'(x) \equiv 0$  sur  $[c_{J^i-1}^i, c_{J^i}^i[$ .

Maintenant, pour  $j_0 \in \llbracket 0, J^i - 2 \rrbracket$ , des calculs directs montrent que :

$$\varphi'_{j_0}(x) = \frac{(J^i - j_0) \left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (x - c_j^i)^2 \right] - [(J^i - j_0)x - \bar{c}_{j_0}^i]^2}{\left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (x - c_j^i)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

Ainsi, le signe de  $\varphi'_{j_0}$  est ce lui du numérateur :

$$N(x) = (J^i - j_0) \left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (x - c_j^i)^2 \right] - [(J^i - j_0)x - \bar{c}_{j_0}^i]^2 \quad (2.15)$$

En développant l'expression de  $N$ , nous obtenons :

$$\begin{aligned} N(x) &= (J^i - j_0) \left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} x^2 + \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (c_j^i)^2 - 2x \sum_{j=j_0+1}^{J^i} c_j^i \right] \\ &\quad - \left[ (J^i - j_0)^2 x^2 + (\bar{c}_{j_0}^i)^2 - 2(J^i - j_0)x \bar{c}_{j_0}^i \right] \\ &= (J^i - j_0)^2 x^2 + (J^i - j_0) \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (c_j^i)^2 - 2x(J^i - j_0) \bar{c}_{j_0}^i \\ &\quad - (J^i - j_0)^2 x^2 - (\bar{c}_{j_0}^i)^2 + 2x(J^i - j_0) \bar{c}_{j_0}^i \\ &= (J^i - j_0) \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (c_j^i)^2 - \left( \sum_{j=j_0+1}^{J^i} c_j^i \right)^2 > 0 \quad \text{pour } j_0 \in \llbracket 0, J^i - 2 \rrbracket \end{aligned}$$

Nous déduisons alors que :

$$\varphi_{j_0}(x) = \frac{(J^i - j_0)x - \bar{c}_{j_0}^i}{\left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (x - c_j^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} < 0 \quad \text{et} \quad \varphi'_{j_0}(x) \geq 0$$

pour  $x \in [c_{j_0}^i, c_{j_0+1}^i[$  où  $j_0 \in \llbracket 0, J^i - 1 \rrbracket$ .

Finalement,  $\varphi$  est une fonction négative et croissante sur  $[0, c_{j_i}^i]$ . Elle varie de

$$\varphi(0) = \varphi_0(0) = -\frac{\bar{c}_0^i}{\left( \sum_{j=1}^{J^i} (c_j^i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} < -1$$

à

$$\varphi(c_{J^i}^i) = \varphi_{J^i}(c_{J^i}^i) = -1.$$

Afin d'étudier l'évolution de  $f$ , nous considérons trois cas selon les valeurs de  $a_i$ ,  $b_i$  et  $c_j^i$  ( $j \in \llbracket 0, J^i \rrbracket$ ).

Tout d'abord, supposons que :

$$a_i \left( \sum_{j=1}^{J^i} (c_j^i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \geq b_i \sum_{j=1}^{J^i} c_j^i \quad (2.16)$$

Il vient que :

$$a_i + b_i \varphi(x) \geq a_i + b_i \varphi(0) \geq 0 \quad \text{pour tout } x \in [0, c_{J^i}^i].$$

Alors, nous concluons que

$$f'_i(x) = a_i + b_i \varphi(x) \geq 0 \quad \text{pour } x \in [0, c_{J^i}^i].$$

Donc,  $f'_i$  est une fonction croissante sur tout l'intervalle de définition (voir Figure 2.7 (a)) et l'extremum est atteint en  $x^i = 0$ .

Supposons maintenant que :

$$a_i > b_i \quad \text{et} \quad a_i \left( \sum_{j=1}^{J^i} (c_j^i)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \leq b_i \sum_{j=1}^{J^i} c_j^i \quad (2.17)$$

Dans ce cas, nous avons :

$$\left\{ \begin{array}{l} f'_i(0) = a_i - b_i \frac{c_{j_0}^i}{\sum_{j=1}^{J^i} (c_j^i)^2} < 0 \\ \text{et} \\ f'_i(c_{J^i}^i) = a_i - b_i > 0 \end{array} \right.$$

Alors, il existe  $x^i \in [0, c_{J^i}^i]$  tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_i + b_i \varphi(x) \leq 0 \quad \text{pour } x \in [0, x^i] \\ \text{et} \\ a_i + b_i \varphi(x) \geq 0 \quad \text{pour } x \in [x^i, c_{J^i}^i] \end{array} \right.$$

Ainsi  $x^i$  est un extremum pour  $f_i$ . Plus précisément,  $x^i$  est une solution de l'équation :

$$\begin{aligned} a_i + b_i \varphi(x^i) &= a_i + b_i \frac{(J^i - j_0)x^i - \bar{c}_{j_0}^i}{\left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (x^i - c_j^i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \\ &= 0 \end{aligned}$$

Il s'agit donc de résoudre l'équation suivante :

$$\left[ \frac{a_i}{b_i} \right]^2 \left[ \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (x^i - c_j^i)^2 \right] = (J^i - j_0)^2 (x^i)^2 + (\bar{c}_{j_0}^i)^2 - 2x^i (J^i - j_0) \bar{c}_{j_0}^i$$

En développant l'équation ci-dessus, il vient que :

$$\begin{aligned} \left[ \frac{a_i}{b_i} \right]^2 \left[ (J^i - j_0)(x^i)^2 - 2x^i \bar{c}_{j_0}^i + \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (c_j^i)^2 \right] \\ = (J^i - j_0)^2 (x^i)^2 + (\bar{c}_{j_0}^i)^2 - 2x^i (J^i - j_0) \bar{c}_{j_0}^i \end{aligned}$$

ou encore

$$\alpha_{j_0}^i (x^i)^2 - 2x^i \beta_{j_0}^i + \gamma_{j_0}^i = 0 \quad (2.18)$$

avec

$$\begin{cases} \alpha_{j_0}^i = (J^i - j_0) \left[ \left( \frac{a_i}{b_i} \right)^2 - J^i + j_0 \right] \\ \beta_{j_0}^i = \bar{c}_{j_0}^i \left[ \left( \frac{a_i}{b_i} \right)^2 - J^i + j_0 \right] \\ \gamma_{j_0}^i = \left( \frac{a_i}{b_i} \right)^2 \sum_{j=j_0+1}^{J^i} (c_j^i)^2 - (\bar{c}_{j_0}^i)^2 \end{cases}$$

Comme  $\varphi$  est une fonction monotone, alors il existe un unique  $j_0$  pour lequel, l'équation (2.18) admet une solution  $x \in ]0, c_{j_0}^i[$ . Cette solution peut être déterminée par exemple en utilisant l' Algorithme 5 (voir Figure 2.7(b)).

---

**Algorithme 5** Recherche extremum pour  $f_i$ 

---

**Début** $S \leftarrow 0; \quad P \leftarrow 0; \quad PasTrouvé \leftarrow Vrai$ **Pour**  $k = 1$  **jusqu'à**  $J^i$  **Faire** $S \leftarrow S + c_k^i$  $P \leftarrow P + (c_k^i)^2$ **Fin Pour** $k \leftarrow 0$ **Tant que**  $PasTrouvé$  **Faire** $A \leftarrow (J^i - k) \left[ \left( \frac{a_i}{b_i} \right)^2 - J^i + k \right]$  $B \leftarrow S \left[ \left( \frac{a_i}{b_i} \right)^2 - J^i + k \right]$  $D \leftarrow \left( \frac{a_i}{b_i} \right)^2 P - S^2$ **Si**  $(B * B - AD \geq 0)$  **Alors** $X_1 \leftarrow (B + \sqrt{B^2 - AD}) / A; \quad X_2 \leftarrow (B - \sqrt{B^2 - AD}) / A$ **Si**  $\left( (X_1 \geq c_k^i \text{ Et } X_1 \leq c_{k+1}^i) \text{ Ou } (X_2 \geq c_k^i \text{ Et } X_2 \leq c_{k+1}^i) \right)$ **Alors** $PasTrouvé \leftarrow Faux$ **Si**  $(X_1 \geq c_k^i \text{ Et } X_1 \leq c_{k+1}^i)$  **Alors**  $X \leftarrow X_1$ **Sinon**  $X \leftarrow X_2$ **Finsi****Finsi****Finsi** $k \leftarrow k + 1; \quad S \leftarrow S - c_k^i; \quad P \leftarrow P - (c_k^i)^2$ **Fin Tant que**Retourner  $(X)$ **Fin**

---

Le troisième et dernier cas concerne la situation où  $a_i \leq b_i$ . Dans ce cas, pour tout  $x^i \in [0, c_{J^i}^i]$ , nous avons :

$$f_i'(x) = a_i + \varphi(x) b_i < 0$$

Par conséquent,  $f_i(x)$  est décroissante et atteint son minimum au point  $x^i = c_{J^i}^i$  (voir Figure 2.7 (c)).

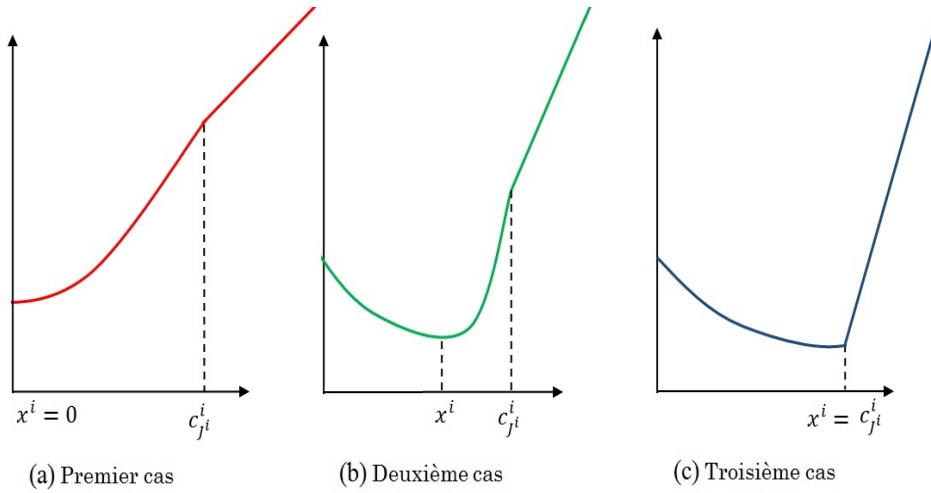


Figure 2.7 – Comportement de la fonction  $f_i$

Finalement, la connaissance de  $a_i$ ,  $b_i$  et  $c_k^i (k \in \llbracket 0, J^i \rrbracket)$  permet de définir explicitement l'extremum. Il convient de rappeler que ces constantes représentent des paramètres du protocole contractuel et des valeurs des consommations.

### 2.4.3 Résolution du problème d'optimisation

Dans cette partie, nous proposons la stratégie adoptée pour résoudre le problème d'optimisation  $(\mathcal{P}_4)$ . D'après l'analyse de la fonction  $f_i (i \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket)$  faite dans le sous-paragraphe précédent, le problème sans contrainte, à savoir

$$(\mathcal{P}_5) \quad \text{Min} \sum_{i=1}^{I_l} f_i(P_S^i)$$

admet un extremum au point  $\bar{P}_S = (x^1, x^2, \dots, x^{I_l})^\top$ .

Tout d'abord, il est à noter que si la solution  $\bar{P}_S$  du problème  $(\mathcal{P}_5)$  vérifie les contraintes :

$$\begin{cases} g(\bar{P}_S^i, \bar{P}_S^{i+1}) \leq 0 \\ i \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket \end{cases} \quad (2.19)$$

Alors, elle représente aussi la solution du problème  $(\mathcal{P}_4)$ . Cependant, il convient de préciser que les solutions respectives des problèmes  $(\mathcal{P}_4)$  et  $(\mathcal{P}_5)$  ne coïncident pas nécessairement.

Ainsi, et afin d'éviter la complexité du cas général, une première approche consiste à résoudre le problème  $(\mathcal{P}_5)$  en utilisant l'Algorithme 5, puis, de tester les contraintes (2.19).

Dans le sous-paragraphe suivant, une application numérique, dans le cas du canal de Carpentras est proposée pour illustrer cette remarque.

Pour résoudre le problème  $(P_4)$ , dans le cas général, l'approche adoptée se fonde sur la technique des multiplicateurs de Lagrange. Il est à noter que les fonctions définissant le coût à minimiser ; à savoir  $f_i (i \in \llbracket 1, I_l \rrbracket)$  ne sont pas dérivables sur  $\mathbb{R}_+$ . Cependant, l'irrégularité est localisée au point  $c_{J^i}^i$ .

Une stratégie consisterait à procéder par approximation autour de ce point. Ensuite, comparer le résultat obtenu avec celui réalisé en ce point par la fonction non régulière.

Dans ce qui suit, on utilisera  $h_k, k \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket$  pour désigner les fonctions définies par :

$$\bar{h}_k(P_S) = \bar{\sigma}(P_S^k) - P_S^{k+1}$$

Ainsi, le problème d'optimisation sous contraintes peut être écrit sous la forme suivante :

$$(P_6) \quad \begin{cases} \text{Min} \sum_{i=1}^{I_l} \bar{f}_i(P_S^i) \\ \bar{h}_k(P_S) \leq 0 \quad , \quad k \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket \end{cases}$$

où  $\bar{h}_k$  sont des fonctions régularisées de  $h_k$ .

Par ailleurs, nous posons  $F = (\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_{I_l})$  et nous utilisons  $\hat{P}_s$  pour désigner l'extremum pour le problème  $(P_6)$ .

Nous avons :

$$\nabla F(P_S) = \begin{pmatrix} \bar{f}'_1(P_S^1) \\ \bar{f}'_2(P_S^2) \\ \vdots \\ \bar{f}'_{I_l}(P_S^{I_l}) \end{pmatrix}$$

et

$$\nabla \bar{h}_1(P_S) = \begin{pmatrix} \bar{\sigma}'(P_S^1) \\ -1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \nabla \bar{h}_2(P_S) = \begin{pmatrix} 0 \\ \bar{\sigma}'(P_S^2) \\ -1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, \nabla \bar{h}_{I_l}(P_S) = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Tout d'abord, nous allons montrer que les vecteurs  $\nabla \bar{h}_k (k \in \llbracket 1, I_l \rrbracket)$  sont indépendants.

La fonction  $\bar{\sigma}$  est strictement monotone, alors  $\bar{\sigma}'$  est non nulle en tout point. En outre, la première composante des vecteurs  $\nabla \bar{h}_k (k \in \llbracket 2, I_l \rrbracket)$  et la dernière de  $\nabla \bar{h}_k (k \in \llbracket 1, I_l \rrbracket)$  sont nulles. Alors, les vecteurs  $\nabla \bar{h}_1$  et  $\nabla \bar{h}_{I_l}$  sont indépendants et appartiennent à  $Span^\perp \{ \nabla h_k, k \in \llbracket 2, I_l - 1 \rrbracket \}$ . Soit  $k \in \llbracket 2, I_l - 1 \rrbracket$ . Clairement, nous avons :

$$\nabla h_k \in Span^\perp \left\{ \nabla h_k, k \in \llbracket 1, k^0 - 2 \rrbracket \cup \llbracket k^0 + 2, I_l - 1 \rrbracket \right\}.$$

Maintenant, un raisonnement simple montre que  $\nabla h_{k^0-1}, \nabla h_{k^0}, \nabla h_{k^0+1}$  sont indépendants. Finalement, nous déduisons que  $\nabla \bar{h}_k (k \in \llbracket 1, I_l \rrbracket)$  sont indépendants. Ainsi, et d'après la méthode des multiplicateurs de Lagrange, ils existent  $\lambda_k (k \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket)$  tels que :

$$\nabla F(\hat{P}_S) + \sum_{k=1}^{I_l-1} \lambda_k \nabla \bar{h}_k(\hat{P}_S) = 0 \quad (2.20)$$

Des calculs directs montrent que l'expression (2.20) est équivalente au système d'équations :

$$\begin{cases} \bar{f}'_1(\hat{P}_S^1) + \lambda_1 \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1) = 0 \\ \bar{f}'_2(\hat{P}_S^2) - \lambda_1 + \lambda_2 \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^2) = 0 \\ \vdots \\ \bar{f}'_{I_l-1}(\hat{P}_S^{I_l-1}) - \lambda_{I_l-2} + \lambda_{I_l-1} \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-1}) = 0 \\ \bar{f}'_{I_l}(\hat{P}_S^{I_l}) - \lambda_{I_l-1} = 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

Il convient de noter que la fonction  $\bar{\sigma}$  est strictement croissante, alors  $\bar{\sigma}'$  est non nulle en tout point. Ainsi, le système d'équation (2.21) peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \lambda_1 = -\frac{\bar{f}'_1(\hat{P}_S^1)}{\bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1)} \\ \lambda_2 = \frac{\lambda_1 - \bar{f}'_2(\hat{P}_S^2)}{\bar{\sigma}'(\hat{P}_S^2)} = -\frac{\bar{f}'_1(\hat{P}_S^1) + \bar{f}'_2(\hat{P}_S^2) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1)}{\bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^2)} \\ \vdots \\ \lambda_{I_l-2} = \frac{\lambda_{I_l-3} - \bar{f}'_{I_l-2}(\hat{P}_S^{I_l-2})}{\bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-2})} \\ \lambda_{I_l-1} = \bar{f}'_{I_l-1}(\hat{P}_S^{I_l-1}) + \bar{f}'_{I_l}(\hat{P}_S^{I_l}) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-1}) \end{cases} \quad (2.22)$$

En utilisant les deux dernières équations, nous en déduisons le système :

$$\begin{cases} \lambda_2 = -\frac{\bar{f}'_1(\hat{P}_S^1) + \bar{f}'_2(\hat{P}_S^2) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1)}{\bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^2)} \\ \lambda_3 = \frac{\lambda_2 - \bar{f}'_3(\hat{P}_S^3)}{\bar{\sigma}'(\hat{P}_S^3)} \\ \vdots \\ \lambda_{I_l-3} = \bar{f}'_{I_l-2}(\hat{P}_S^{I_l-2}) + \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-2}) (\bar{f}'_{I_l-1}(\hat{P}_S^{I_l-1}) + \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-1}) \bar{f}'_{I_l}(\hat{P}_S^{I_l})) \end{cases} \quad (2.23)$$



En procédant d'une façon similaire, nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_2 = -\frac{\bar{f}'_1(\hat{P}_S^1) + \bar{f}'_2(\hat{P}_S^2) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1)}{\bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^2)} \\ \lambda_3 = \frac{\lambda_2 - \bar{f}'_3(\hat{P}_S^3)}{\bar{\sigma}'(\hat{P}_S^3)} \\ = \sum_{m=0}^{I_l-4} \bar{f}'_{I_l-m}(\hat{P}_S^{I_l-m}) \prod_{n=m+1}^{I_l-4} \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-n}) \end{array} \right. \quad (2.24)$$

D'après la dernière égalité, nous avons :

$$\lambda_2 - \bar{f}'_3(\hat{P}_S^3) = \sum_{m=0}^{I_l-5} \bar{f}'_{I_l-m}(\hat{P}_S^{I_l-m}) \prod_{n=m+1}^{I_l-3} \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-n})$$

ou encore

$$\begin{aligned} & -\bar{f}'_1(\hat{P}_S^1) - \bar{f}'_2(\hat{P}_S^2) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1) - \bar{f}'_3(\hat{P}_S^3) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^1) \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^2) \\ & = \sum_{m=0}^{I_l-1} \bar{f}'_{I_l-m}(\hat{P}_S^{I_l-m}) \prod_{n=m+1}^{I_l-1} \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-n}) \end{aligned}$$

Nous déduisons alors la relation suivante :

$$\sum_{m=0}^{I_l-1} \bar{f}'_{I_l-m}(\hat{P}_S^{I_l-m}) \prod_{n=m+1}^{I_l-1} \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-n}) = 0 \quad (2.25)$$

En outre, un raisonnement direct montre que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_k = \sum_{m=0}^{I_l-(k+1)} \bar{f}'_{I_l-m}(\hat{P}_S^{I_l-m}) \prod_{n=m+1}^{I_l-(k+1)} \bar{\sigma}'(\hat{P}_S^{I_l-n}) \\ k \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Maintenant, et en vertu de la théorie des multiplicateurs de Lagrange, nous avons les relations suivantes :

$$\lambda_k \bar{h}_k(\hat{P}_S) = 0 \quad \text{pour } k \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket \quad (2.27)$$

D'après (2.25)-(2.27), nous déduisons que  $\hat{P}_S$  est une solution du système :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \bar{\sigma} (\hat{P}_S^k) - \hat{P}_S^{k+1} \right] \left[ \sum_{m=0}^{I_l-(k+1)} \bar{f}'_{I_l-m} (\hat{P}_S^{I_l-m}) \prod_{n=m+1}^{I_l-(k+1)} \bar{\sigma}' (\hat{P}_S^{I_l-n}) \right] = 0 \\ \text{pour } k \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket \\ \sum_{m=0}^{I_l-1} \bar{f}'_{I_l-m} (\hat{P}_S^{I_l-m}) \prod_{n=m+1}^{I_l-1} \bar{\sigma}' (\hat{P}_S^{I_l-n}) = 0 \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Ainsi, la résolution du problème (2.28) permet de trouver explicitement la valeur de  $\hat{P}_S$ . D'après (2.26), un raisonnement direct montre que :

$$\lambda_{k-1} = f' (\hat{P}_S^k) + \sigma' (\hat{P}_S^k) \lambda_k \quad \text{pour } k \in \llbracket 2, I_l \rrbracket \quad (2.29)$$

En outre, et en vertu de l'équation (2.27), nous avons :

$$\lambda_k = 0 \quad \text{ou} \quad \bar{\sigma} (\hat{P}_S^k) = \hat{P}_S^{k+1} \quad \text{pour } k \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket \quad (2.30)$$

On associe à chaque  $\lambda_k (k \in \llbracket 1, I_l - 1 \rrbracket)$  un attribut  $\bar{\lambda}_k \in \{0, 1\}$  selon qu'il soit nul ou différent de zéro. Ainsi, et d'après (2.30), si  $\bar{\lambda}_k = 1$ , alors  $\hat{P}_S^{k+1} = \bar{\sigma} (\hat{P}_S^k)$ .

L'Algorithme 6 résume la procédure de résolution du problème d'optimisation ( $\mathcal{P}_6$ ). Trois fonctions sont utilisées. La première fonction est "Suivant" définie précédemment et qui permet de définir le suivant dans l'ensemble  $\{0, 1\}^{I_l-1}$ . La deuxième fonction est "Résoudre\_Eq(f)", f est une fonction de x qui permet de retourner la solution de l'équation de la forme "f(x) = 0". Si une solution positive n'existe pas, alors elle retourne "-1". Finalement, la troisième fonction, intitulée "Définir\_Eq", permet de définir par récurrence une nouvelle équation à partir d'une déjà établie à une étape ultérieure.

---

**Algorithme 6**      Solution optimale

---

**Début****Pour**  $k = 1$  **jusqu'à**  $I_l$       **Faire** $\lambda_k \leftarrow 0$ **Fin Pour** $E_{I_l} \leftarrow \bar{f}'_{I_l}; \quad k \leftarrow I_l - 1; \quad Min \leftarrow -1; \quad Existe \leftarrow Vrai$ **Tant que**  $k \geq 0$       **ET**       $Existe$       **Faire****Si**  $\lambda_k = 0$       **Alors**       $\hat{P}_S^{k+1} \leftarrow Résoudre\_Eq(E_{k+1})$ **Si**  $\hat{P}_S^k \neq -1$       **Alors**       $l \leftarrow 2$ **Tant que**  $\lambda_{k+2} \neq 0$       **ET**       $k + l \leq I_l$       **Faire** $\hat{P}_S^{k+l} \leftarrow \sigma(\hat{P}_S^{k+l-1})$  $l \leftarrow l + 1$ **Refaire****Si**  $k = 0$       **Alors**       $M \leftarrow \sum_{i=1}^{I_l} \bar{f}'_i(\hat{P}_S^i)$ **Si**  $((M < Min) \text{ ou } (Min = -1))$       **Alors** $Min \leftarrow M$  $\bar{P}_S \leftarrow \hat{P}_S$  $k \leftarrow I_l - 1$  $Suivant(\lambda, Existe)$ **Finsi****Finsi****Sinon** $k \leftarrow I_l - 1$  $Suivant(\lambda, Existe)$ **Finsi****Sinon** $E_k \leftarrow Définir\_Eq(\bar{f}'_k + \bar{\sigma}'(E_{k+1} \circ \bar{\sigma}))$ **Finsi** $k \leftarrow k - 1$ **Refaire**Retourner  $(\bar{P}_S)$ **Fin**

---

## 2.5 Application numérique

Comme application numérique des résultats obtenus, nous traitons un cas du réseau de Carpentras.

Actuellement, le choix des puissances souscrites s'effectue de la façon en respectant le principe suivant. Sur les périodes à très faible consommation, on minimise le coût du transport et sur les périodes à moyenne ou forte consommation, on privilégie le transport et on évite les dépassements.

Généralement, les pompes fonctionnent avec un régime "Tout ou Rien". Chaque station est constituée de plusieurs pompes. Ainsi, la puissance souscrite, lors d'une période, est choisie en fonction du nombre de pompes mises en marche. Le nombre est dépendant de la charge et donc de la période d'exploitation.

Le Tableau 2.6 donne le nombre de pompes exploitées ainsi que les puissances nominales dans le cadre de la station "Oasis". Ainsi, les puissances souscrites sont précisées.

Période tarifaire	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
Nombre de pompes	0	1	1	2	2
Puissances nominales	0	132	132	710	710
Puissances souscrites choisies	2	132	132	800	800

Table 2.6 – Données de la station "Oasis"

Le Tableau 2.7 présente les valeurs des paramètres associés à chaque période tarifaire. Ces paramètres sont obtenus à partir de données du protocole de tarification du fournisseur ainsi que des développements sur l'optimisation sans contraintes (voir [53]). Ainsi, le tableau donne aussi des valeurs des puissances optimales  $\bar{P}_S^i$  obtenues à partir de l'approche proposée.

Période tarifaire	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
$a_i$	0.7392	3.4188	1.3860	2.5872	1.1088
$b_i$	1.3860	1.2751	0.7623	0.5544	0.1663
$J^i$	1872	10512	9360	17664	13152
$\sum_{j=1}^{J^i} c_j^i$	3569	75263	95104	1.313 $10^6$	1.833 $10^6$
$\left(\sum_{j=1}^{J^i} (c_j^i)^2\right)^{\frac{1}{2}}$	83.7675	2539	3009	24270	28280
$c_{J^i}^i$	4	123	123	661	661
$\bar{P}_S^i$	4	117	117	652	652

Table 2.7 – Données de la facturation-Station "Oasis"

Un raisonnement simple montre que cette solution vérifie les contraintes imposées. Finalement, il s'agit de la solution optimale du problème global.

Pour conclure, des calculs directs montrent que cette solution optimale permet de réduire le coût de la facture de 17 %.

En appliquant cette stratégie dans le cas d'autres stations de pompage du canal de Carpentras, nous obtenons des résultats d'optimisation significatifs (voir Tableau 2.8 et Tableau 2.9) avec un taux moyen de réduction supérieur à 20 %.

Nom de la station	Périodes tarifaires				
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5
"Grands Fonts"	1	305	305	305	305
"Sainte Hilaire"	2	2	2	340	340
"Saint Philippe HS"	1	102	102	380	380
"Les Conils"	2	200	200	400	400
"Les Brotteaux"	5	100	100	370	370
"Hautes Briguières"	1	185	185	307	307
"N.D.des Anges"	1	175	175	486	486

Table 2.8 – Puissances souscrites actuelles

Nom de la station	Périodes tarifaires					Taux de réduction (%)
	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	
"Grands Fonts"	2	2	2	287	287	59
"Sainte Hilaire"	2	2	2	177	177	47
"Saint Philippe HS"	1	96	96	276	276	21
"Les Conils"	2	161	161	316	316	17
"Les Brotteaux"	8	8	66	358	358	12
"Hautes Briguières"	2	159	159	294	294	8
"N.D.des Anges"	3	168	168	463	463	6

Table 2.9 – Puissances souscrites optimales

## 2.6 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'optimisation des contrats d'électricité des gros clients. Nous avons proposé une méthodologie permettant de minimiser la facture énergétique à travers un choix optimal des différentes puissances souscrites. Une partie du chapitre a été dédiée à la présentation du protocole de facturation d'électricité et à la position du problème d'optimisation. Dans le reste du chapitre, nous avons présenté la stratégie adoptée pour résoudre le problème d'optimisation sous contraintes. Cette résolution a été basée sur des approches informatiques ainsi qu'une méthode mathématique. Néanmoins, il existe d'autres volets d'optimisation de la facture d'électricité tels que la réduction des pertes en eau dans le réseau d'irrigation. Plus précisément, un diagnostic des différents secteurs, en détectant et localisant les fuites, permet d'éviter le pompage inutile de l'eau.

# 3 Détection et localisation de fuites

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la problématique du diagnostic des fuites dans le réseau d'irrigation. Il s'agit d'une des trois approches explorées en vue de réduire la facture énergétique. En effet, un fonctionnement sans fuites permettrait d'éviter un coût inutile de pompage d'eau perdue. Dans ce cadre, l'établissement d'une stratégie de diagnostic pour la surveillance du réseau peut s'avérer très utile.

Actuellement, dans la littérature le problème de diagnostic pour les réseaux de distribution d'eau potable ou plus généralement, le transport du pétrole a suscité l'intérêt de plusieurs auteurs (voir par exemple [54–62]). Ainsi, plusieurs approches ont été prospectées ; à savoir : le placement des capteurs, le bilan de circulation d'eau, l'analyse de la variation des pressions et/ou débits, etc. Cependant, à notre connaissance, seuls peu de travaux ont été consacrés au problème du diagnostic des fuites dans les réseaux d'irrigation. En outre, le cas du réseau d'irrigation se caractérise par des spécificités particulières. Le manque d'information, dû en particulier à une instrumentation minimale et non adaptée à la problématique de diagnostic, représente une difficulté principale pour la mise en œuvre d'une stratégie de surveillance.

Dans ce travail, nous traitons le problème de la détection et la localisation de fuites. Plus précisément, la démarche adaptée est celle de l'analyse du bilan d'eau et elle est fondée sur l'information disponible dans le cas d'étude ; à savoir, le canal de Carpentras. La première étape consiste d'abord à quantifier l'information existante, puis, d'étudier la possibilité de diagnostiquer (c'est-à-dire, la "diagnostabilité") une présence éventuelle de pertes d'eau dans le réseau. Cette information peut être obtenue à travers les différents capteurs du réseau ou elle peut être constituée de renseignements du terrain et des protocoles de fonctionnement, par exemple, la gestion des consommations sans compteurs.

La démarche peut s'effectuer à trois niveaux d'analyse. Le premier niveau concerne l'ensemble du réseau. Une analyse approfondie sur la circulation globale de l'eau et des différents enregistrements aux stations de pompage permettrait d'effectuer un bilan global. Ce bilan peut mettre en évidence un déséquilibre entre les volumes d'eau en entrée du réseau et ceux délivrés aux utilisateurs synonymes de présence des pertes. Le deuxième niveau d'analyse concerne un secteur alimenté par une station. À ce niveau d'analyse, l'étude de l'historique du fonctionnement de la station peut représenter une base de détection de présence de pertes anormales d'eau. Lors de la détection d'une anomalie, une stratégie de décomposition en sous-secteurs permettrait une localisation dans le secteur. Finalement, le troisième niveau d'analyse est constitué de la localisation précise d'une fuite et il est fondé sur l'exploitation de matériels dédiés.

Dans ces travaux de thèse, nous nous sommes intéressés au deuxième niveau ; à savoir, le cas d'un secteur alimenté par une station de pompage. Le but est d'analyser le fonctionnement des pompes sur une période donnée en vue de détecter des éventuelles

perdes d'eau dans le secteur. Pour ce faire, des hypothèses de travail, liées directement à une réalité de terrain, sont assumées. Il convient de préciser que les secteurs considérés peuvent être dotés d'un bassin de stockage d'eau et dans ce cas, l'analyse en dépend.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La deuxième section est dédiée à l'analyse de la circulation d'eau. Dans la troisième section, la stratégie de diagnostic et les résultats obtenus sont présentés. La dernière section est une conclusion.

## 3.2 Modélisation et analyse du bilan d'eau

Cette section est consacrée à la modélisation et à l'analyse de la circulation d'eau en vue d'établir la stratégie du diagnostic. Elle est constituée de trois parties. Dans la première partie, le bilan d'eau est présenté et les expressions des volumes en circulation sont données. Les deux autres parties sont conçues pour décrire des pertes d'eau inévitables et non liées à des éventuelles fuites. Le but est de quantifier ces quantités afin de les discerner des éventuelles fuites. Il s'agit, d'une part, des pertes dues à la structure du réseau et, d'autre part, des pertes dues à l'évaporation des bassins de stockage. Les pertes dues à la structure ont été considérées et quantifiées dans de différents travaux de la littérature et ceci indépendamment des réseaux d'irrigation (voir par exemple [16] [17] [63]). Ainsi, il nous a semblé pertinent de tenir compte de ce type de pertes. Concernant les pertes dues à l'évaporation, leur prise en compte paraît importante vu la situation géographique (voir Figure 1.14) du réseau considéré comme cas d'étude et donc l'aspect naturel de ces pertes.

### 3.2.1 Description de la circulation d'eau

Dans ce travail, le principe du diagnostic est basé sur l'analyse de la circulation d'eau (voir Figure 3.1). Ainsi, nous définissons d'abord les différentes expressions des volumes d'eau. Deux relations principales sont à mentionner.

La première concerne le bilan d'eau du réseau (ou d'un sous-réseau) qui peut-être définie par :

$$V^p = V_C + V_t^r + V_N^r + V_F^r + V_O^r \quad (3.1)$$

Cette relation exprime que l'eau pompée ( $V^p$ ) est soit consommée ( $V_C$ ), soit perdue sous plusieurs formes : pertes dues à la structure ( $V_t^r$ ), phénomènes naturels ( $V_N^r$ ), fuites ( $V_F^r$ ) ou autres pertes ( $V_O^r$ ). Il est à noter que l'eau de vidange annuelle des bassins est une quantité supposée être contenue dans  $V_O^r$ .

La deuxième relation exprime les différentes consommations :

$$V_C = V_C^m + V_C^e + V_C^a \quad (3.2)$$

Cette relation indique que le volume d'eau consommé ( $V_C$ ) par les usagers est composé d'une partie mesurée ( $V_C^m$ ) à travers des compteurs et d'une deuxième partie non quantifiée et représente des consommations forfaitaires ( $V_C^e$ ) et d'autres sans cadre précis ( $V_C^a$ ). Une première approximation  $\hat{V}_C^e$  du volume d'eau  $V_C^e$ , concernant les usagers

sans compteur d'eau disponible peut être exprimée par la moyenne des consommations des clients dotés de compteurs du même secteur.

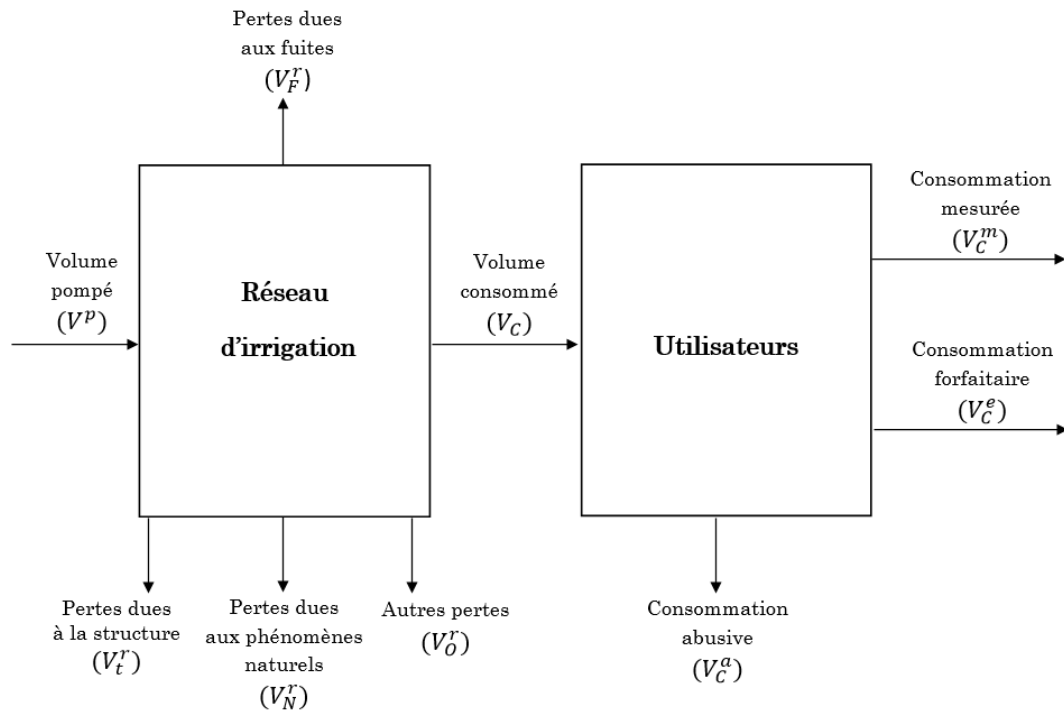


Figure 3.1 – Circulation globale de l'eau

Dans la suite de ce travail, la valeur de l'eau pompée est supposée être mesurable et le phénomène de retard est négligé dans cette analyse. Cependant, l'aspect du retard est très important et devrait être pris en compte pour obtenir des résultats plus précis.

L'objectif principal de ce travail est d'estimer le volume d'eau perdu en raison d'une éventuelle fuite  $V_F^r$ . Dans cette première étude et par souci de simplicité, nous considérons l'analyse avec :

**(H1)** 
$$V_C^a = V_C^e = V_O^r = 0$$

Cela signifie que tous les utilisateurs sont dotés d'un compteur d'eau et que les volumes dus aux vidanges sont déduits au préalable de l'analyse. Ainsi, sur la base de cette hypothèse, et en utilisant les équations (3.1) et (3.2), on obtient :

$$V^p - V_C = V_t^r + V_N^r + V_F^r \quad (3.3)$$

Ainsi, une étape principale de notre démarche consiste à déterminer  $\widehat{V}_t^r$  et  $\widehat{V}_N^r$  deux estimations respectivement pour les variables  $V_t^r$  et  $V_N^r$ . Le but est d'identifier un volume d'eau susceptible de révéler la présence de fuites en utilisant l'expression :

$$\widehat{V}_F^r = V^p - V_C - (\widehat{V}_t^r + \widehat{V}_N^r) \quad (3.4)$$



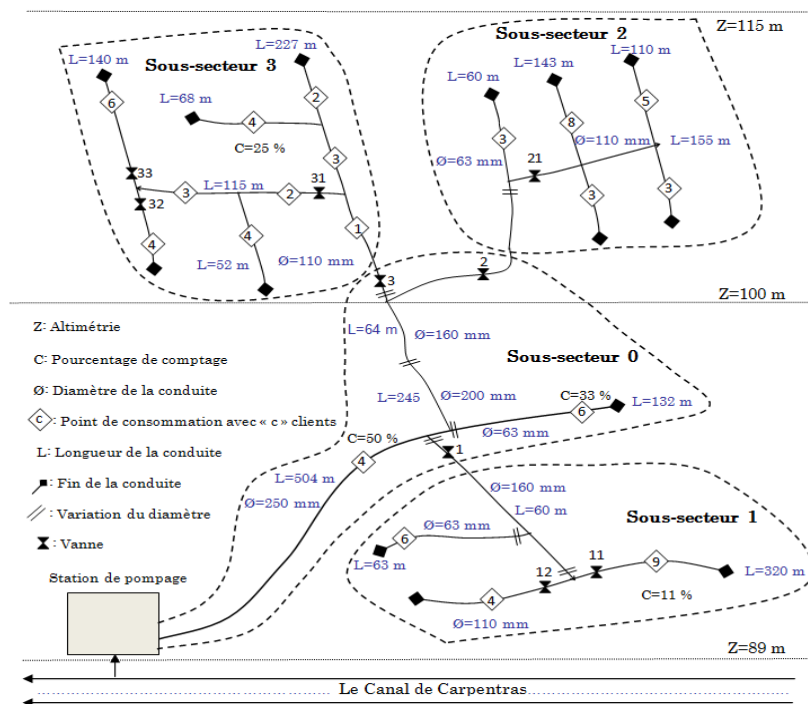
## 3.2.2 Modélisation des pertes dues à la structure

### 3.2.2.1 Formulation du problème

Dans ce travail, nous assumons la présence des pertes dues à la structure du réseau d'irrigation (voir par exemple [16] [17] [63]). Il est à noter que ces pertes sont supposées dépendre directement des paramètres spécifiques de la structure (voir par exemple la Figure 3.2). Plus précisément, comme le réseau d'irrigation est composé essentiellement de conduites et de branchements, nous supposons que les pertes peuvent être exprimées en fonction du nombre d'utilisateurs ( $N_U$ ), de la longueur des conduites ( $L_I$ ) et du nombre de jonctions ( $N_J$ ). Il est à noter, et afin de tenir compte des différences des diamètres dans les canalisations, la longueur totale ( $L_I$ ) sera ajustée de la façon suivante :

$$L_I = \sum_{j=1}^N L_j \frac{d_j}{d^{min}} \quad (3.5)$$

où  $N$  est le nombre des conduites du secteur et  $d^{min}$  le diamètre minimal utilisé dans le réseau.  $L_j$  et  $d_j$  désignent respectivement la longueur réelle et le diamètre interne de chaque conduite " $j$ " du sous-réseau. Par ailleurs, les pertes dépendent également de la pression de l'eau ( $p$ ) exercée par un volume d'eau utile ( $V_u$ ) et d'un taux de sollicitation ( $\lambda$ ) du réseau. Il convient de préciser que le taux de sollicitation est introduit pour adapter l'analyse à la période considérée. Par conséquent, ce paramètre peut éventuellement être omis dans certaines situations où il serait supposé égal à un.



Dans ce qui suit, le but est de présenter des relations entre la pression de service  $p$ , le volume d'eau en jeu  $V$  et le débit volumique constaté  $Q$  (voir Figure 3.3). Les liens entre ces variables seront exploités afin d'établir des modèles de comportement du sous-réseau considéré en vue de définir une stratégie pour la détection des éventuelles fuites.

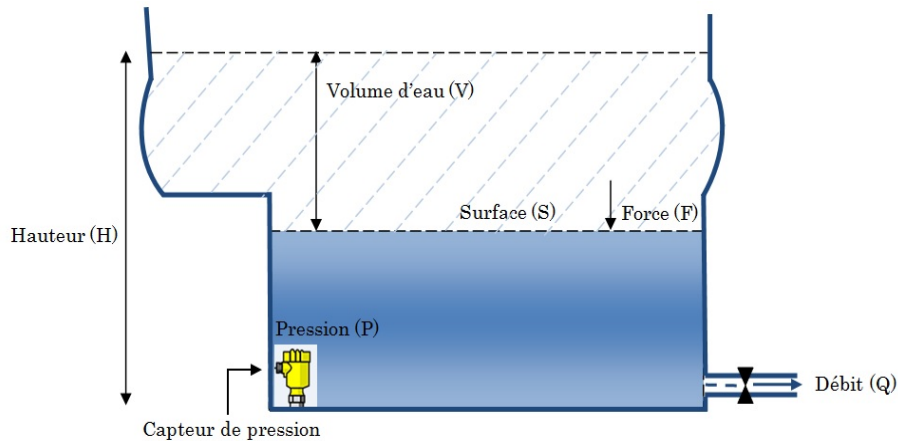


Figure 3.3 – Présentation schématique d'un sous-réseau

Dans ce travail, le débit  $Q$  représente le cumul de trois quantités que sont les consommations, les déperditions dues à la structure et les éventuelles fuites. La pression de service considérée est celle à la sortie de la station de pompage (voir Figure 3.4).

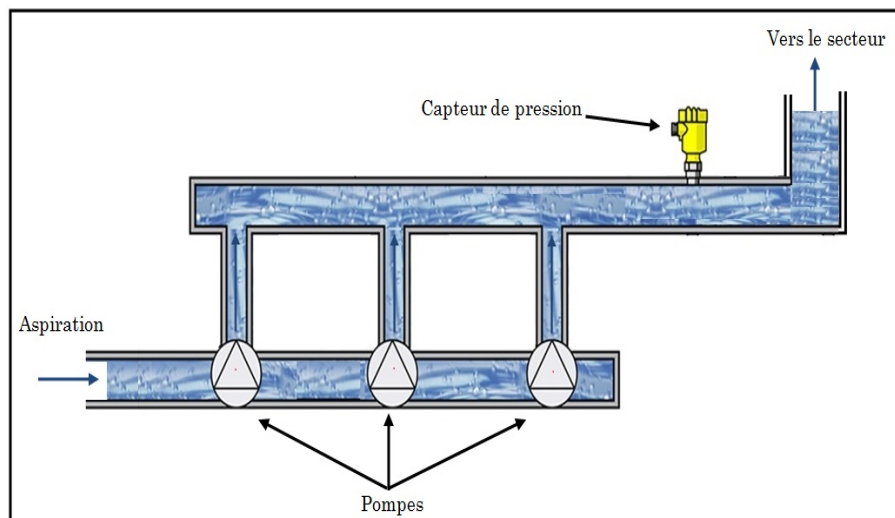


Figure 3.4 – Position du capteur de pression dans une station

Le volume d'eau utile correspond à la quantité d'eau maximale disponible à la consommation. Ce volume d'eau peut être calculé si la station de pompage est dotée d'un débitmètre ou, dans le cas de présence d'un bassin de stockage, par utilisation de considérations géométriques.

Le fonctionnement des pompes est régi par le principe qui consiste à assurer le maintien d'une grandeur physique ; à savoir : la pression de service ou le niveau d'eau d'un bassin de stockage. Le fonctionnement garantit la disponibilité de l'eau à la consommation. Techniquement, ce protocole peut être défini par une zone de fonctionnement exprimée par :

$$\Phi \in [\Phi^{min}, \Phi^{max}]$$

où  $\Phi \in \{p, H\}$ ,  $\Phi^{min}$  et  $\Phi^{max}$  désignent respectivement la valeur minimale et la valeur maximale de la plage de marche souhaitée.  $H$  désigne la hauteur du bassin de stockage quand il est disponible. Dans ce travail, il est assumé que l'information disponible réside dans un échantillonnage de la grandeur  $\Phi$ .

Sur une période  $[0, \mathcal{T}]$ , avec  $\mathcal{T} \in \mathbb{R}_+^*$ , sous le débit volumique  $Q$ , nous avons la relation générale suivante :

$$V(0) - V(\mathcal{T}) = \int_0^{\mathcal{T}} -Q(\tau) d\tau \quad (3.6)$$

Par ailleurs, la pression relative exercée sur la surface  $S$  peut être définie de la façon suivante :

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m g}{S} = \frac{\rho V g}{S} \quad (3.7)$$

où  $F$  désigne le poids de l'eau,  $m$  la masse totale de l'eau,  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $\rho$  la masse volumique de l'eau.

La dérivée par rapport au temps de la relation (3.7) donne :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\rho g}{S} \frac{dV}{dt} \quad (3.8)$$

Il est à noter que si une relation  $V(H)$  est disponible pour décrire l'évolution du volume d'eau en fonction de la hauteur  $H$  alors, et d'après (3.8), il vient que :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\rho g}{S} \frac{dV}{dH} \frac{dH}{dt} \quad (3.9)$$

où  $\frac{dV}{dH}$  est dépendante de la structure considérée (voir Figure 3.3).

À titre d'exemple, si on considère le cas décrit par la Figure 3.5, alors, nous avons la relation  $V(H) = S H$ . On en déduit, d'après (3.9), que :

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\rho g}{S} \frac{dH}{dt} \quad (3.10)$$

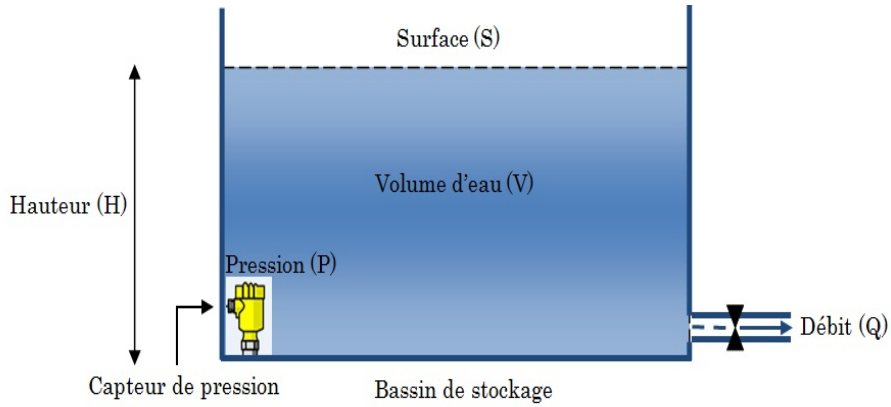


Figure 3.5 – Schéma simplifié d'un bassin de forme régulière

Par ailleurs, et en vertu des équations (3.6) et (3.9), il vient que :

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\rho g}{S} Q \quad (3.11)$$

Sur une période  $[0, \mathcal{T}]$ , on déduit que :

$$p(0) - p(\mathcal{T}) = -\frac{\rho g}{S} \int_0^{\mathcal{T}} Q(\tau) d\tau \quad (3.12)$$

ou encore, et concernant le cas (3.10),

$$H(0) - H(\mathcal{T}) = -\frac{1}{S} \int_0^{\mathcal{T}} Q(\tau) d\tau \quad (3.13)$$

Dans un contexte sain sans fuites et en l'absence de consommations, le débit perdu  $Q$  est dû alors à la structure et sera noté  $Q_{t,\Phi}^r$  ( $\Phi \in \{p, H\}$ ) et on a la relation :

$$\dot{\Phi}(t) = -Q_{t,\Phi}^r(t) \quad (3.14)$$

Tout au long de ce travail, le débit est assumé dépendre, d'une part, de la grandeur considérée  $\Phi$  et, d'autre part, des paramètres du réseau ; à savoir : la longueur des conduites et le nombre des jonctions du sous-réseau analysé.

Une première approximation, pour modéliser les pertes dues à la structure, consiste à supposer que le débit d'eau perdu est exprimé comme le produit de deux fonctions. La première fonction est dépendante des paramètres géométriques du réseau et la deuxième de la pression du réseau et du taux de sollicitation de la façon suivante :

$$Q_{t,\Phi}^r(t) = f(\alpha^\Phi(\Theta)) g(\Phi(t)) \lambda \quad (3.15)$$

où  $f$  et  $g$  sont des fonctions appropriées à définir et  $\Theta$  est un paramètre à identifier.

Dans ce travail, nous supposons que la fonction  $f$  est linéaire et nous explorons pour  $g$  une structure de la forme  $g(\Phi) = \Phi^n, n \in \mathbb{R}_+^*$ . Ainsi, l'expression de  $Q_t^r$  peut être exprimée comme suit :

$$Q_{t,\Phi}^r(t) = \alpha^\Phi(\Theta) \Phi^n(t) \quad (3.16)$$

et on admettra que la fonction  $\alpha^\Phi$  est une fonction linéaire par rapport au paramètre  $\Theta^\Phi$  et est de la forme :

$$\alpha^\Phi(\Theta) = \theta_1^\Phi L_I + \theta_2^\Phi N_U \quad (3.17)$$

Le but sera alors d'identifier les paramètres  $n$  et  $\Theta$  afin de se servir du modèle (3.14) (3.15) pour la détection des éventuelles fuites. Plus précisément, la stratégie consistera à analyser le comportement de la variable  $\Phi$  en se basant sur l'historique du fonctionnement de la station de pompage.

En intégrant l'équation (3.14) (3.15), nous avons :

$$\Phi(\mathcal{T}) - \Phi(0) = \alpha^\Phi(\Theta) \int_0^{\mathcal{T}} \Phi^n(\tau) d\tau \quad (3.18)$$

En outre, une relation entre le volume d'eau utile  $V_u$  et la grandeur  $\Phi$  peut être établie. Ainsi, dans le cas où  $\Phi$  est la pression de service nous avons, et d'après (3.8), la relation suivante :

$$V_u(p) = \frac{S}{\rho g} (p - p^{min}) \quad , \forall p \in [p^{min}, p^{max}] \quad (3.19)$$

ou encore, dans le cas de présence d'un bassin de la forme décrite par la Figure 3.5,

$$V_u(H) = S (H - H^{min}) \quad , \forall H \in [H^{min}, H^{max}] \quad (3.20)$$

Il convient de préciser que le volume d'eau utile global peut être calculé de la façon suivante. Dans le cas où  $\Phi = H$ , ce volume peut être déduit à travers des considérations géométriques du bassin de stockage. Et, dans le cas où  $\Phi = p$ , l'utilisation d'un débitmètre installé en aval de la station peut permettre d'évaluer ce volume.

### 3.2.2.2 Perte de charge : analyse de l'évolution de la pression

La dynamique de la pression lors d'une perte de charge, due uniquement à la structure, est assumée être sous la forme suivante :

$$\dot{p} = -\alpha^p(\Theta) p^n \quad (3.21)$$

Pour décrire le comportement temporel de  $p$ , on procède de la façon suivante. Deux cas sont à distinguer selon la valeur de  $n$ . Tout d'abord, supposons que  $n = 1$ . Dans ce cas, la solution générale de (3.21) est donnée par :

$$p(t) = p(0) e^{-\alpha^p(\Theta) t} \quad , \forall t \geq 0 \quad (3.22)$$

Sur une période de pause  $[0, \mathcal{T}]$ , nous déduisons de (3.22) la relation suivante :

$$\alpha^p(\Theta) = \frac{1}{\mathcal{T}} \ln \left( \frac{p^{max}}{p^{min}} \right) \quad (3.23)$$

Maintenant, supposons que  $n \in \mathbb{R}_+^* - \{1\}$ . En utilisant la technique de séparation des variables, nous obtenons l'équation :

$$p^{-n} dp = -\alpha^p(\Theta) dt$$

L'intégration sur une période de pause de durée  $\mathcal{T}$  mène à :

$$\int_{p^{max}}^{p^{min}} p^{-n} dp = -\mathcal{T} \alpha^p(\Theta)$$

ou encore

$$\left[ \frac{1}{1-n} p^{1-n} \right]_{p^{max}}^{p^{min}} = -\mathcal{T} \alpha^p(\Theta)$$

Finalement, nous aboutissons à :

$$\alpha^p(\Theta) = \frac{1}{(n-1)\mathcal{T}} \left( (p^{min})^{1-n} - (p^{max})^{1-n} \right) \quad (3.24)$$

On définit  $\Pi$  une fonction de  $n$  et de  $\Lambda = \begin{pmatrix} \mathcal{T} \\ p^{min} \\ p^{max} \end{pmatrix}$  de la façon suivante :

$$\Pi(n, \Lambda) = \begin{cases} \frac{1}{\mathcal{T}} \ln\left(\frac{p^{max}}{p^{min}}\right) & \text{si } n = 1 \\ \frac{1}{(n-1)\mathcal{T}} \left( (p^{min})^{1-n} - (p^{max})^{1-n} \right) & \text{sinon} \end{cases}$$

Il convient de noter qu'un raisonnement direct montre que la fonction  $\Pi$  est continue sur  $\mathbb{R}_+^*$ .

Dans ce qui suit, l'objectif est d'estimer les valeurs de  $\Theta$  et  $n$  en fonction des données du terrain. En effet, ces paramètres sont directement liés aux installations du réseau.

Supposons qu'on dispose de  $\mathcal{N}_S$  sous-secteurs (ou secteurs) jugés ayant un fonctionnement sain ; c'est-à-dire, sans fuites. Pour chacun de ces sous-secteurs, nous désignerons par  $\mathcal{T}^i$  ( $i \in \{1 \dots \mathcal{N}_S\}$ ) le plus long temps de pause constaté sur l'historique du fonctionnement du secteur " $i$ ". Ces périodes de pause sont assumées être sans consommations. En outre, on associe à chaque sous-secteur les valeurs  $p^{min, i}$  et  $p^{max, i}$ , les pressions définissant la plage de fonctionnement du sous-secteur.

Dans ce travail, l'approche considérée pour identifier les paramètres de  $\Theta$  et  $n$  est fondée sur la méthode des moindres carrés. Ainsi, nous cherchons à minimiser le critère :

$$J_{\Pi}(\Theta, n) = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} \left( \theta_1 L_I^i + \theta_2 N_U^i - \Pi(n, \Lambda^i) \right)^2 \quad (3.25)$$

Pour ce faire, on procède en deux étapes. Dans une première étape, on cherche les valeurs optimales de  $\theta_1$  et  $\theta_2$  en fonction de  $n$ . Dans une deuxième étape, on minimise le coût par rapport à  $n$ .

Nous avons :

$$\begin{cases} \frac{\partial J_{\Pi}(\Theta, n)}{\partial \theta_1} = 2 \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} L_I^i (\theta_1 L_I^i + \theta_2 N_U^i - \Pi(n, \Lambda^i)) \\ \frac{\partial J_{\Pi}(\Theta, n)}{\partial \theta_2} = 2 \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} N_U^i (\theta_1 L_I^i + \theta_2 N_U^i - \Pi(n, \Lambda^i)) \end{cases}$$

ou encore

$$\begin{cases} \frac{\partial J_{\Pi}(\Theta, n)}{\partial \theta_1} = 2 \left( \theta_1 \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} (L_I^i)^2 + \theta_2 \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} L_I^i N_U^i - \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} L_I^i \Pi(n, \Lambda^i) \right) \\ \frac{\partial J_{\Pi}(\Theta, n)}{\partial \theta_2} = 2 \left( \theta_1 \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} L_I^i N_U^i + \theta_2 \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} (N_U^i)^2 - \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} N_U^i \Pi(n, \Lambda^i) \right) \end{cases}$$

On pose :

$$C_{L^2} = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} (L_I^i)^2, \quad C_{LN} = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} L_I^i N_U^i \quad \text{et} \quad C_{N^2} = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} (N_U^i)^2.$$

Puis, on définit  $\Pi^L$  et  $\Pi^N$  deux fonctions de  $n$  de la façon suivante :

$$\Pi^L(n) = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} L_I^i \Pi(n, \Lambda^i) \quad \text{et} \quad \Pi^N(n) = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} N_U^i \Pi(n, \Lambda^i).$$

L'extremum pour le coût (3.25), défini par rapport au paramètre  $n$ , est la solution du système suivant :

$$\begin{cases} C_{L^2} \theta_1 + C_{LN} \theta_2 = \Pi^L(n) \\ C_{LN} \theta_1 + C_{N^2} \theta_2 = \Pi^N(n) \end{cases} \quad (3.26)$$

Un raisonnement direct montre que  $\hat{\theta}_1$  et  $\hat{\theta}_2$ , les solutions de (3.26), sont données en fonction de  $n$  par :

$$\begin{cases} \hat{\theta}_1(n) = \frac{C_{N^2} \Pi^L(n) - C_{LN} \Pi^N(n)}{C_{L^2} C_{N^2} - (C_{LN})^2} \\ \hat{\theta}_2(n) = \frac{C_{L^2} \Pi^N(n) - C_{LN} \Pi^L(n)}{C_{L^2} C_{N^2} - (C_{LN})^2} \end{cases} \quad (3.27)$$

Ce qui termine la première étape de la stratégie, d'estimation des paramètres, adoptée. Maintenant, on introduit la fonction  $\hat{J}$  définie pour tout  $n$  par :

$$\widehat{J}_{\Pi}(n) = J_{\Pi}(\Theta(n), n) = \sum_{i=1}^{N_S} \left( \widehat{\theta}_1(n) L_I^i + \widehat{\theta}_2(n) N_U^i - \Pi(n, \Lambda^i) \right)^2 \quad (3.28)$$

Il s'agit d'une fonction scalaire qui ne dépend que du paramètre  $n$ . En outre, cette fonction est continue et positive sur  $\mathbb{R}^*$ , donc elle possède un minimum. Cet extremum est défini par :

$$\widehat{n} = \arg \min_{\mathbb{R}^*} \widehat{J}(n) \quad (3.29)$$

peut être estimé par utilisation des méthodes numériques, par exemple. Ensuite, l'utilisation des relations données par (3.27) permet d'en déduire les valeurs de  $\widehat{\theta}_1$  et  $\widehat{\theta}_2$ . Ce qui termine la démarche pour l'identification des paramètres.

La procédure présente la particularité que seuls le temps de pause et les bornes de la plage de fonctionnement de la pression qui sont considérés. La connaissance explicite des valeurs de pressions n'est pas nécessaire.

Ainsi, cette procédure peut très aisément être adaptée aux situations où les stations sont régies par le niveau du bassin de stockage. En effet, dans ce cas aussi l'historique des temps de pause peut être enregistré sans un accès à la valeur explicite de la pression.

Par ailleurs, la procédure décrite ci-dessus est adaptée au cas spécial d'une dynamique de la pression sous la forme (3.21).

Maintenant, dans le cas général d'une dynamique sous la forme :

$$\dot{p} = -\alpha^p(\Theta) g(p, n) \quad (3.30)$$

où  $g$  possède une structure quelconque et donc non nécessairement polynomiale. La procédure d'identification peut être adaptée de la façon suivante.

Soit  $(p(i \Delta_p t))_{i \in \{1 \dots N_T\}}$ , où  $N_T = \lfloor \frac{T}{\Delta_p t} \rfloor$ , l'historique de fonctionnement de la pression sur un temps de pause choisi d'une façon pertinente.

En utilisant la technique de séparation des variables, il vient que :

$$p^{min} - p^{max} = -\alpha^p(\Theta) \int_0^T g(p(\tau), n) d\tau \quad (3.31)$$

La structure de  $g$  n'ayant pas une forme particulière prédéfinie, il est très difficile, voir impossible, de déterminer explicitement la quantité  $\int_0^T g(p(\tau), n) d\tau$ . Ainsi, la démarche consiste à procéder par des approximations. Plus précisément, une approximation du premier ordre est donnée par :

$$G\left((p(j \Delta_p t))_{j \in \{1 \dots N_T\}}, n\right) = \int_0^T g(p(\tau), n) d\tau = \Delta_p t \sum_{j=1}^{N_T} g(p(j \Delta_p t), n).$$



Par la suite, nous utilisons  $\chi^i (i \in \{1 \dots \mathcal{N}_S\})$  pour désigner la quantité définie par :

$$\chi^i \left( (p^i(j \Delta_{pt}))_{j \in \{1 \dots N_{Ti}\}}, n \right) = \frac{p^{max, i} - p^{min, i}}{G \left( (p^i(j \Delta_{pt}))_{j \in \{1 \dots N_{Ti}\}}, n \right)}$$

En utilisant la méthode des moindres carrés, et d'une façon similaire qu'au cas précédent, le problème d'identification des paramètres revient à minimiser le critère :

$$J_\chi(\Theta, n) = \sum_{i=1}^{\mathcal{N}_S} \left( \theta_1 L_I^i + \theta_2 N_U^i - \chi^i \left( (p^i(j \Delta_{pt}))_{j \in \{1 \dots N_{Ti}\}}, n \right) \right)^2 \quad (3.32)$$

Pour résoudre le problème de minimisation du critère  $J_\chi$  défini par (3.32), on peut procéder d'une façon analogue à celle utilisée précédemment pour le cas du critère  $J_{II}$  donné par (3.25). Ainsi, une solution du type (3.27) (3.28) peut être obtenue pour l'estimation des paramètres  $\Theta$  et  $n$ .

### 3.2.3 Modélisation des pertes dues à l'évaporation

Dans ce travail, et concernant les pertes naturelles, nous nous focalisons sur les phénomènes d'évaporation des bassins de stockage d'eau. Ce choix est motivé par le cas d'étude considéré. En effet, le réseau de Carpentras est situé dans une zone très ensoleillée et il est donc opportun de tenir compte de ce phénomène naturel comme source de pertes inévitables.

#### 3.2.3.1 Débit d'évaporation

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été consacrés aux phénomènes d'évaporation et diverses formulations ont été proposées en fonction de la précision souhaitée et le cas d'étude considéré (voir par exemple [64] [65]). Le volume d'eau évaporé sur une période  $[0, \mathcal{T}]$  est généralement exprimé en fonction du débit d'évaporation, de la surface d'eau et la durée considérée par ([65]) :

$$V_N^r([0, \mathcal{T}]) = S \int_0^{\mathcal{T}} Q(\tau) d\tau \quad (3.33)$$

où  $S$  est la surface du bassin et  $Q$  est le débit d'évaporation.

La valeur du débit peut être exprimée comme le produit de deux quantités. La première quantité dépend de la vitesse du vent ( $v$ ) et la deuxième est déduite de la variation de la pression de saturation de l'air et celle de l'eau. Ainsi, une expression classique (voir [64] [65]) est donnée par :

$$Q = \frac{1}{\mu} (A_1 + A_2 v^{n_1}) (p_E(T_E) - \phi p_A(T_A))^{n_2} \quad (3.34)$$

où  $A_1, A_2, n_1$  et  $n_2$  sont des constantes positives.  $\mu$  désigne la chaleur latente de l'évaporation.  $\phi$  est l'humidité relative de l'air.  $T_A$  et  $T_E$  désignent respectivement les tem-

pératures de l'air et de l'eau. Il est à noter que le choix des paramètres est directement dépendant de l'application considérée ([65]). Ainsi, les paramètres adaptés pour un bassin d'eau sont donnés dans le Tableau 3.2. De plus, et par souci de simplicité, on peut considérer le cas  $n_1 = n_2 = 1$ . Cependant, et pour une analyse approfondie, il convient d'explorer des valeurs plus précises pour ces paramètres afin d'obtenir la meilleure approximation. En outre, les pressions considérées dans l'expression (3.34) sont obtenues à partir de la valeur de la température  $T$  associée, en utilisant la relation suivante ([64]) :

$$p(T) = \delta_1 \exp(\delta_2 + \delta_3 \sqrt{T + \delta_4}) \quad , \quad \forall T \in [0^\circ C, 65^\circ C] \quad (3.35)$$

où  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  et  $\delta_4$  sont des constantes positives.

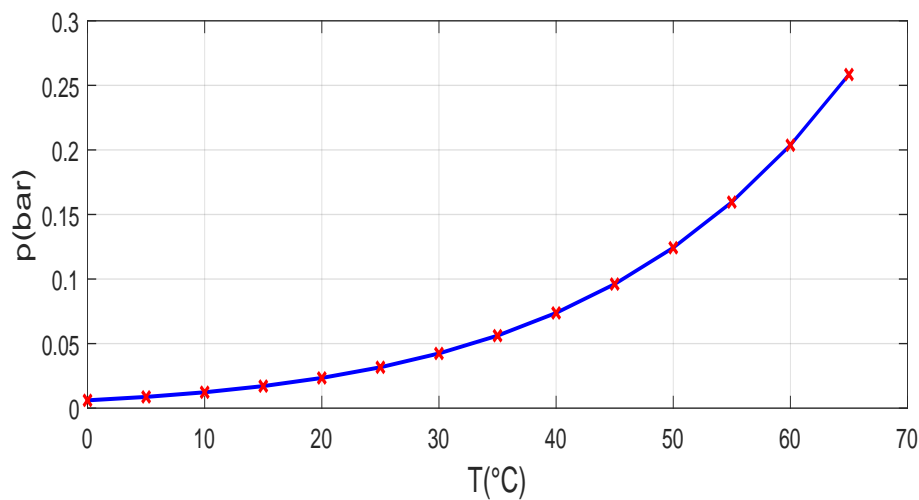


Figure 3.6 – Évolution de la pression de saturation  $p(T)$

Finalement, le calcul du débit à travers l'équation (3.34) nécessite la connaissance de grandeurs physiques que sont la vitesse du vent ( $v$ ), l'humidité de l'air ( $\phi$ ) et les températures de l'air ( $T_A$ ) et de l'eau ( $T_E$ ). Il est à noter que l'humidité et la température de l'air représentent des quantités disponibles dans des bases de données standards et accessibles. Cependant, la température de l'eau et la vitesse du vent au niveau du bassin représentent des valeurs dépendantes du site considéré et doivent être récoltées. Un système d'acquisition de données peut être mis en œuvre pour accéder à cette information nécessaire pour l'approche explorée. Cependant, ce système peut s'avérer être coûteux. Pour s'affranchir d'un système d'acquisition directe des données, un objectif de ces travaux de thèse est d'établir une stratégie pour la reconstruction de l'information manquante. Cette stratégie concerne les deux grandeurs physiques manquantes ; à savoir, la température de l'eau du bassin et la vitesse du vent au sol.

### 3.2.3.2 Expression de la vitesse du vent

Pour exprimer la vitesse du vent à une altitude différente de celle enregistrée par des capteurs, des formulations ont été proposées dans la littérature (voir [66]). Parmi les expressions, on peut citer la formulation suivante ([66] [67]) :

$$v(z_1) = v(z_2) \left( \frac{\ln\left(\frac{z_1}{r}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{r}\right)} \right) \quad (3.36)$$

où  $z_1$  et  $z_2$  désignent deux altitudes données,  $v(z)$  ( $z \in \{z_1, z_2\}$ ) représente la vitesse du vent à l'altitude  $z$  et  $r$  est un paramètre lié à l'environnement considéré.

Des valeurs de ce paramètre ont été identifiées selon le milieu considéré (voir [67]). L'expression présentée ci-dessus n'a pas été jugée suffisamment précise pour être exploitée dans le cadre de nos travaux de thèse.

Dans ce travail, nous avons exploré plusieurs relations (voir Tableau 3.1) et nous avons adopté l'expression suivante :

$$v(z_1) = v(z_2) \left( \frac{\ln(a z_1 + b)}{\ln(a z_2 + b)} \right)^n \quad (3.37)$$

où  $n$  est une valeur constante à identifier. En fait, il s'agit d'un degré de liberté introduit pour adapter la formulation à l'environnement considéré. Il est à noter que ce paramètre est similaire au paramètre  $r$  de l'équation (3.36). Cependant, l'expression (3.37) s'est avérée plus adaptée que (3.36) au vu des données expérimentales considérées. La démarche consiste alors, et à partir d'au moins deux jeux de données, d'identifier le paramètre. Ensuite, il s'agit d'exploiter l'équation (3.37) pour obtenir la vitesse du vent au sol.

Relation	Paramètres	Erreur moyenne quadratique
$v(z_1) = v(z_2) \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^n$	$n=0.6885$	0.54029390 88
$v(z_1) = v(z_2) \left( \frac{\ln\left(\frac{z_1}{r}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{r}\right)} \right)$	$r=0.9045$	0.54029390 55
$v(z_1) = v(z_2) \left( \frac{\ln(a z_1 + b)}{\ln(a z_2 + b)} \right)^n$	$a = 1.0467$ , $b = 1.1215$ $n = 0.8503$	0.54029390 19

Table 3.1 – Étude comparative des relations

### 3.2.3.3 Évolution de la température d'eau

L'évolution de la température de la surface d'eau, en contact avec l'air, est dépendante directement de la profondeur du bassin et de sa différence par rapport à la température d'équilibre. Pour décrire son comportement dynamique, une équation du premier ordre peut être considérée ([68] [69]) :

$$\frac{dT_E}{dt} = \frac{\gamma}{R}(T_Q - T_E) \quad (3.38)$$

où  $\gamma$  est une constante positive et  $R$  est la profondeur du bassin.  $T_Q$  désigne la température d'équilibre qui exprime le seuil de l'échange thermique.

L'équation (3.38) exprime que la température de la surface d'eau croît (resp. décroît) lorsqu'elle est inférieure (resp. supérieure) à la température d'équilibre. Par ailleurs, l'évolution de la température de la surface d'eau est aussi influée directement par la profondeur du bassin. L'utilisation de l'équation (3.38) nécessite la connaissance explicite de l'évolution temporelle de  $T_Q$ . Dans ce cadre, des travaux ont été dédiés à l'identification de son évolution en fonction de l'environnement considéré ([68] [70]). Plus précisément, la température d'équilibre peut s'exprimer comme une forme linéaire par rapport à la température de l'air ([71][72]). Donc, l'équation (3.38) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{dT_E}{dt} = \frac{\gamma}{R}(\alpha T_A + \beta - T_E) \quad (3.39)$$

où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des constantes positives et  $T_A$  désigne la température de l'air assumée être accessible à travers les bases de données standards. Cependant, l'exploitation de l'équation (3.39) nécessite la connaissance de la température initiale que nous supposons accessible à travers un relevé ponctuel au début de l'analyse.

Des calculs directs montrent que la solution générale de l'équation (3.39) est donnée, pour tout  $t \geq 0$ , par :

$$T_E(t) = \exp\left(-\frac{\gamma}{R}t\right) \left[ T_E(0) + \int_0^t \frac{\gamma}{R}(\alpha T_A(\tau) + \beta) \exp\left(\frac{\gamma}{R}\tau\right) d\tau \right] \quad (3.40)$$

Ainsi, une approximation de la quantité

$$\int_0^t \frac{\gamma}{R}(\alpha T_A(\tau) + \beta) \exp\left(\frac{\gamma}{R}\tau\right) d\tau$$

conduit à une valeur approximée de  $T_E(t)$ .

Dans ce qui suit, on se propose de déterminer une première approximation de la quantité qui peut être utilisée par la suite pour déterminer des valeurs exploitables aux instants d'échantillonnage.

Tout au long de ce travail, on utilisera  $\Delta_T t$  pour désigner la période d'échantillonnage et  $N_{\Delta_T t}$  le nombre d'échantillons sur la période d'analyse. Ainsi, pour  $n \in \{1, \dots, N_{\Delta_T t}\}$ ,  $T_A(n \Delta_T t)$  et  $T_E(n \Delta_T t)$  désigneront les valeurs des températures à l'instant d'échantillonnage.

En considérant une approximation du premier ordre, nous avons, pour  $t = n \Delta_T t$ ,

$$\begin{aligned}
& \int_0^{n \Delta_T t} \frac{\gamma}{R} (\alpha T_A(\tau) + \beta) \exp\left(\frac{\gamma}{R} \tau\right) d\tau \\
&= \sum_{k=0}^{n-1} \int_{k \Delta_T t}^{(k+1) \Delta_T t} \frac{\gamma}{R} (\alpha T_A(\tau) + \beta) \exp\left(\frac{\gamma}{R} \tau\right) d\tau \\
&= \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\gamma}{R} (\alpha T_A(k \Delta_T t) + \beta) \int_{k \Delta_T t}^{(k+1) \Delta_T t} \exp\left(\frac{\gamma}{R} \tau\right) d\tau \\
&= \sum_{k=0}^{n-1} (\alpha T_A(k \Delta_T t) + \beta) \delta_k^{\frac{\gamma}{R}, \Delta_T t}
\end{aligned}$$

avec

$$\delta_k^{\frac{\gamma}{R}, \Delta_T t} = \exp\left(\frac{\gamma}{R} (k+1) \Delta_T t\right) - \exp\left(\frac{\gamma}{R} k \Delta_T t\right)$$

Finalement, on en déduit l'approximation du premier ordre pour la valeur de la température de la surface d'eau, à un instant d'échantillonnage  $t = n \Delta_T t$ , suivante :

$$T_E(n \Delta_T t) = \exp\left(-\frac{\gamma}{R} n \Delta_T t\right) \left[ T_E(0) + \sum_{k=0}^{n-1} (\alpha T_A(k \Delta_T t) + \beta) \delta_k^{\frac{\gamma}{R}, \Delta_T t} \right] \quad (3.41)$$

L'expression (3.41) peut être aussi exprimée comme une équation aux différences de la façon suivante :

$$T_E(n \Delta_T t) = \bar{\alpha}_{\Delta_T t} T_E((n-1) \Delta_T t) + \bar{\beta}_{\Delta_T t} \quad \forall n \in \mathbb{N}^* \quad (3.42)$$

avec

$$\bar{\alpha}_{\Delta_T t} = \alpha + (1 - \alpha) \exp\left(-\frac{\gamma}{R} \Delta_T t\right) \quad \text{et} \quad \bar{\beta}_{\Delta_T t} = \beta (1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{R} \Delta_T t\right)).$$

Finalement, l'expression (3.41) (ou encore (3.42)) permettrait d'obtenir la valeur de la température de la surface d'eau aux moments de l'échantillonnage en fonction de la température de l'air et de la condition initiale.

### 3.3 Stratégie de diagnostic

Le réseau d'irrigation est composé de sources d'eau, de secteurs, de stations de pompage et de branchements vers les utilisateurs (voir Figure 1.15). Par rapport au réseau d'eau potable ou aux conduites de transport du pétrole, les réseaux d'irrigation se caractérisent généralement par une absence d'information due notamment à la faible instrumentation disponible. Ainsi, le défi consiste à développer une stratégie de détection des fuites malgré ce manque d'information. Pour ce faire, plusieurs approches ont

été explorées ([16] [17] [18] [59]). Ici, l'objectif principal consiste à établir une stratégie de surveillance pragmatique et qui soit fondée sur l'information disponible, ou accessible à moindre coût, dans le réseau d'irrigation considéré pour le cas d'étude.

### 3.3.1 Information disponible

Dans ce travail, nous supposons que l'information disponible est décrite principalement par le temps de fonctionnement des différentes pompes de la station ; à savoir, l'évolution de la pression de service et les temps de démarrage et d'arrêt des pompes. Il est à noter que pour toutes les pompes, le fonctionnement est contrôlé par les valeurs de pression de refoulement ou il est basé sur le niveau du bassin lorsqu'il y en a un disponible pour le stockage (voir Figure 3.7).

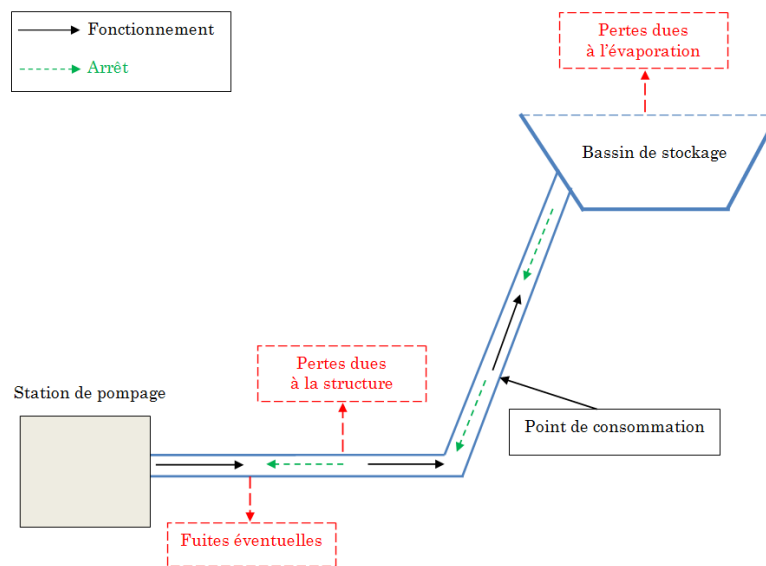


Figure 3.7 – Fonctionnement en présence d'un bassin de stockage

Tout au long de ce travail, nous adopterons les notations comme suit. L'échantillonnage temporel sera désigné par  $(t_i)_{i \in I}$  avec  $I = \{0, \dots, N_I\}$  où  $N_I$  représente le nombre global des valeurs de pression enregistrées. Les valeurs de pression disponibles sont définies par :

$$(p(t_i))_{i \in I} \in [p^{min}, p^{max}].$$

Le démarrage de la pompe s'effectuerait lorsque la pression ( $p$ ) atteint le seuil bas de fonctionnement ( $p^{min}$ ). La pompe se mettrait en arrêt lorsque la pression ( $p$ ) atteint le seuil haut de fonctionnement ( $p^{max}$ ).

Lorsqu'un bassin est disponible pour le stockage, un fonctionnement similaire à celui de la plage de pression est prévu en fonction du niveau du bassin. Plus précisément, le fonctionnement des pompes est régi par les seuils limites : niveau bas et niveau haut.

$$(H_B(t_i))_{i \in I} \in [H_B^{min}, H_B^{max}]$$

Les périodes de fonctionnement de la station sont définies par deux séries de  $(t_k^1)_{k \in K}$  et  $(t_k^2)_{k \in K}$  indiquant respectivement les heures de démarrages et d'arrêts de la pompe, où  $(t_0^1)$  représente le temps initial pour l'analyse et  $K = \{0, \dots, N_K\}$  où  $N_K$  est un entier désignant le nombre global de périodes de fonctionnement contenues dans la période d'analyse.

Dans la suite de ce travail, on utilisera  $(D_k)_{k \in K}$  pour désigner les durées de pause des pompes définies explicitement par :

$$D_k = t_{k+1}^1 - t_k^2, \quad \forall k \in K \quad (3.43)$$

Ainsi, on définit les durées de marche par :

$$\bar{D}_k = t_k^2 - t_k^1, \quad \forall k \in K \quad (3.44)$$

En outre, nous subdivisons l'ensemble  $\Delta = \{\delta_k = (t_k^2, t_k^1), \quad \forall k \in K\}$  en deux sous-ensembles. Le premier sous-ensemble, noté  $\Delta_1$ , est constitué des longues périodes de pause et le second ensemble représente son complémentaire. À titre d'exemple, la Figure 3.8 donne l'évolution de la pression durant les plus longues durées d'arrêt pour trois sous-secteurs.

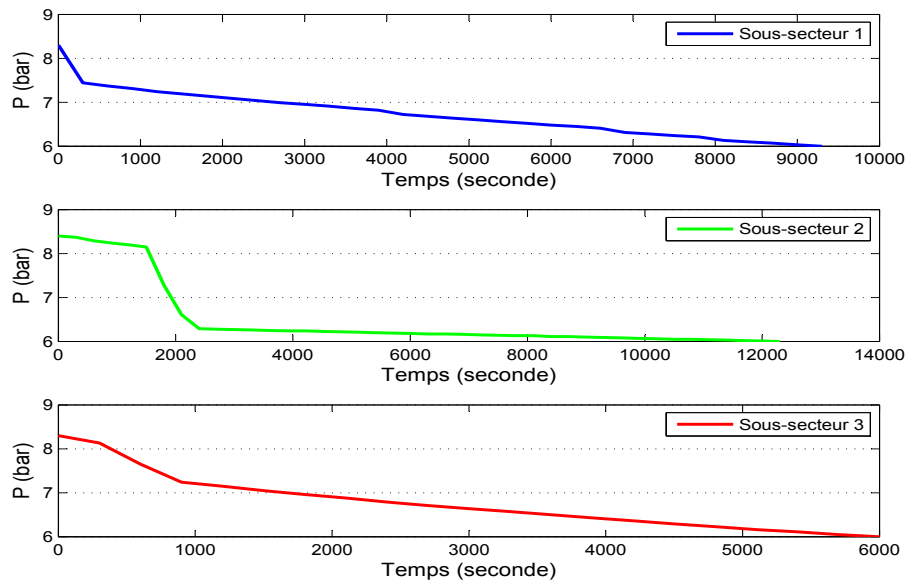


Figure 3.8 – Exemple d'évolution lente de pression (secteur "Les Saffras")

Pour tout  $\delta \in \Delta_1$ , nous définissons  $M(\delta)$  par :

$$M(\delta) = \text{Min}\{|p'(t)|, t \in \delta\}.$$

où  $p'$  désigne la dérivée par rapport au temps et  $|\cdot|$  représente la valeur absolue. Puis, on pose :

$$M = \text{Min}\{M(\delta), \delta \in \Delta_1\}.$$

Il convient de préciser que l'introduction de l'ensemble  $\Delta_1$  est effectuée pour des raisons techniques. Elle permet de sélectionner les périodes de consommation minimale et focaliser ainsi sur l'analyse des pertes dues à la structure.

Par ailleurs, il est à noter qu'une approximation pour  $p'(t)$  peut être obtenue à partir des valeurs  $(p(t_i))_{i \in I}$  en utilisant les méthodologies classiques de la reconstruction du signal. À titre d'exemple, la dérivée peut être approximée aux instants d'échantillonnage par :

$$p'(n \Delta_p t) \approx \frac{p((n+1) \Delta_p t) - p(n \Delta_p t)}{\Delta_p t}, \forall n \in N \quad (3.45)$$

La Figure 3.9 montre l'évolution de la dérivée de pression dans un secteur du réseau considéré.

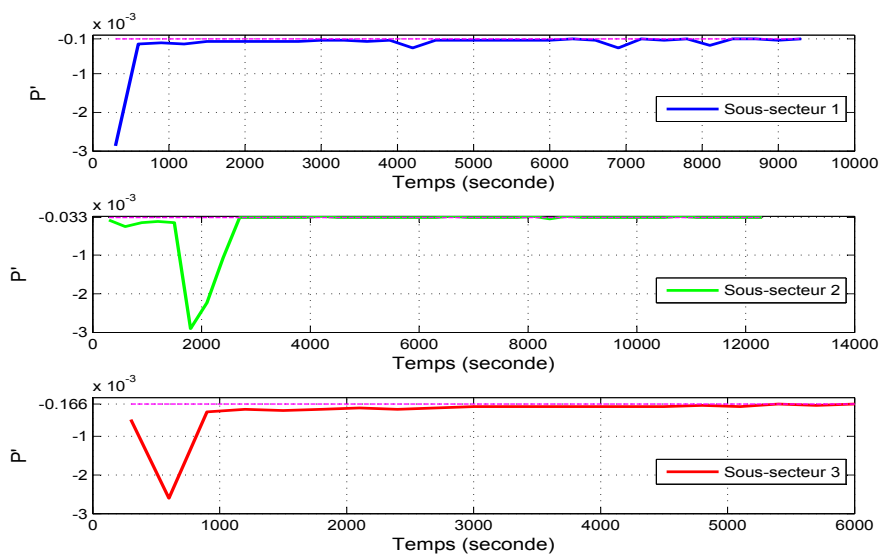


Figure 3.9 – Exemple d'évolution de la dérivée de pression (secteur "Les Saffras")

Le deuxième type d'information est lié à la structure du réseau. Par exemple, la Figure 3.2 représente des informations concernant un secteur particulier du réseau de Carpentras, considéré comme cas d'étude dans ce travail.

En outre, les données météorologiques standards sont supposées être disponibles (voir par exemple la Figure 3.11) et peuvent être exploitées dans l'analyse.

### 3.3.2 Description de la démarche

La stratégie de diagnostic est basée sur l'analyse de la circulation d'eau au sein du réseau. Un premier objectif principal consiste à trouver  $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3$  des estimations respectivement pour  $\theta_1, \theta_2$  et  $\theta_3$ . Le but est d'établir une estimation du volume d'eau perdu dû à la structure  $\hat{V}_t^r$ . L'estimation est réalisée en tenant compte des valeurs de pression,



des paramètres de la structure et des données météorologiques relatives au site. En outre, une estimation du volume d'eau évaporé du bassin  $\widehat{V}_N^r$  est obtenue.

L'Algorithme 7 donne une description globale de la stratégie de diagnostic.

---

**Algorithme 7** Stratégie globale de détection

---

**Étape 1** : Choisir une partie du réseau pour l'analyse. Lire les paramètres.

**Étape 2** : Choisir un secteur approprié pour l'identification.

**Étape 3** : Déterminer les périodes à consommation minimale.

**Étape 4** : Identifier les paramètres  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$ .

**Étape 5** : Obtenir les estimations de  $\widehat{V}_t^r$  et  $\widehat{V}_N^r$ .

**Étape 6** : Comparer et décider /\* Utiliser (3.3) \*/.

---

Tout d'abord, une partie du réseau est sélectionnée pour l'analyse. Puis, les paramètres relatifs à la structure et aux conditions météorologiques sont récoltés. La première étape consiste à choisir le secteur approprié pour l'identification. Il s'agit d'un secteur reconnu sans fuites.

Pour étudier un secteur du réseau, on procède par une sectorisation ([16]). Plus précisément, il s'agit d'isoler les sous-secteurs (voir Figure 3.10) pour analyser leurs fonctionnements spécifiques.

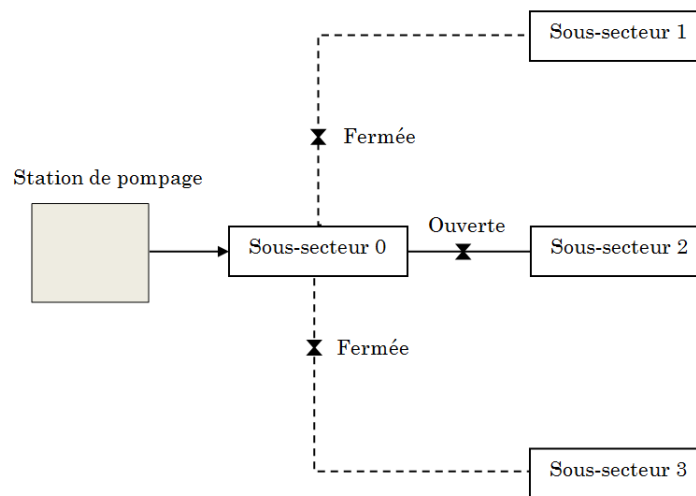


Figure 3.10 – Exemple de sectorisation

Après avoir estimé les paramètres  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ , l'étape 5 est dédiée à l'estimation de  $\widehat{V}_t^r$  et  $\widehat{V}_N^r$ .

Le calcul de l'estimation  $\widehat{V}_N^r$  est détaillé par l'Algorithme 8.

---

**Algorithme 8** Estimation de l'eau évaporée d'un bassin

---

Lire ( $\Delta t$ ) /\* Période d'échantillonnage \*/Lire ( $N_{\Delta_T t}$ ) /\* Nombre d'échantillons sur la période \*/Lire ( $S, R$ ) /\* Caractéristiques géométriques du bassin \*/ $\widehat{V}_N^r \leftarrow 0$  /\* Initialisation \*/**Pour**  $i = 1$  jusqu'à  $N_P$  **Faire**Lire ( $T_A[i]$ ) /\* Température de l'air du site \*/Lire ( $v[i]$ ) /\* Vitesse du vent disponible au site \*/Calculer ( $v^0[i]$ ) /\* Conversion pour adaptation à la vitesse au sol-utiliser (3.37) \*/Calculer ( $T_E[i]$ ) /\* Utiliser (3.42) \*/Calculer ( $p_E[i]$ ), Calculer ( $p_A[i]$ ) /\* Utiliser (3.35) \*/Calculer ( $Q[i]$ ) /\* Utiliser (3.34) \*/ $\widehat{V}_N^r \leftarrow \widehat{V}_N^r + Q[i] S \Delta t$ **Fin Pour**Retourner ( $\widehat{V}_N^r$ )

---

Finalement, la dernière étape consiste à décider de la présence ou non d'une fuite. Pour ce faire, un seuil d'acceptabilité est défini en amont.

## 3.4 Étude de cas

### 3.4.1 Données numériques

Le Tableau 3.2 donne les valeurs numériques utilisées dans les équations (3.34), (3.35), (3.38) et (3.39). Elles seront employées pour évaluer la quantité d'eau évaporée.

Paramètres	Valeurs numériques	Unités
$A_1$	0.06741	$s m^{-1}$
$A_2$	0.05150	Sans unité
$\alpha$	0.91000	Sans unité
$\beta$	0.45000	$^{\circ}C$
$\gamma$	0.56000	$s^{-1}$
$\mu$	$6.45 \cdot 10^6$	$J kg^{-1}$
$\delta_1$	3385.50	Sans unité
$\delta_2$	-8.09290	Sans unité
$\delta_3$	0.97608	Sans unité
$\delta_4$	42.6070	Sans unité

Table 3.2 – Valeurs numériques

### 3.4.1.1 Informations climatiques

Dans le cadre de la surveillance du réseau, les informations climatiques sont importantes en vue d'estimer les volumes d'eau perdus naturellement et donc de les discriminer des éventuelles fuites. Elles sont de deux types. Le premier type représente une information générale aisément accessible à travers des bases de données standards, par exemple, la température moyenne de l'air d'un site.

Les Figures 3.11, 3.12 et 3.13 présentent respectivement l'évolution de la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité relative du site considéré durant la période d'étude.

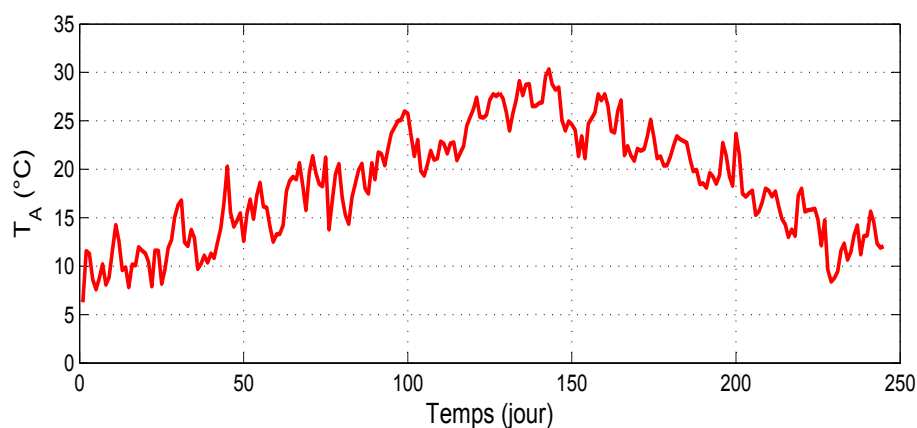


Figure 3.11 – Température de l'air (période du 01/03/2015 au 31/10/2015)

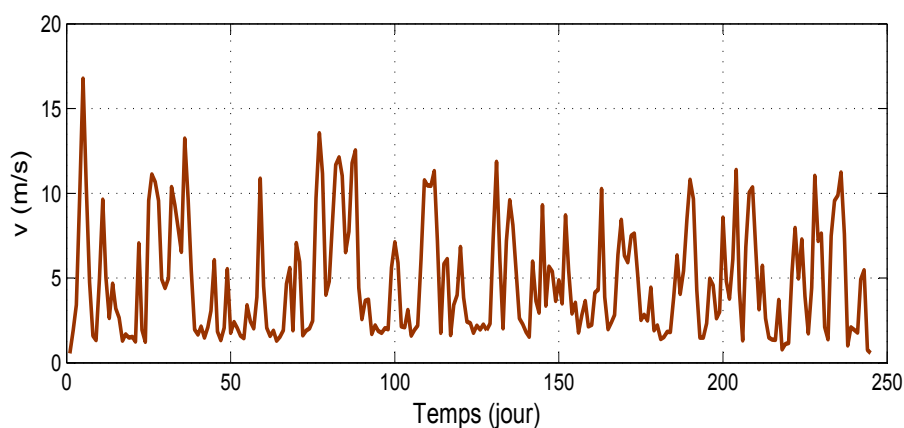


Figure 3.12 – Vitesse du vent (période du 01/03/2015 au 31/10/2015)

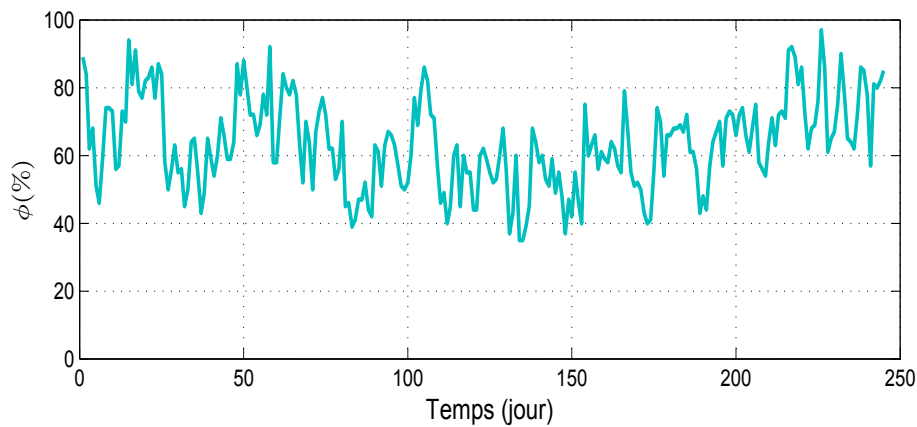


Figure 3.13 – Humidité relative (période du 01/03/2015 au 31/10/2015)

Le deuxième type, plus spécifique et nécessite des systèmes d'acquisition qui peuvent être coûteux, par exemple, l'évolution de la température de la surface d'eau d'un bassin particulier. Ces informations particulières nécessitent une analyse spécifique et sera le sujet du sous-paragraphe suivant.

### 3.4.1.2 Données liées à la structure du réseau d'irrigation

Les données de la structure utilisées pour l'identification des paramètres  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont celles des sous-secteurs jugés être en fonctionnement sain. Dans le cas d'étude considéré, ces données sont présentées par le Tableau 3.3. Par ailleurs, les informations sur la structure utilisées pour la validation du modèle de détection de fuites sont données dans le Tableau 3.4.

Secteur	Sous-secteur	$L_I$ (km)	$N_U$	$\mathcal{T}$ (seconde)
"Les Saffras"	Sous-secteur 2	1.520	28	17 126
"Sainte Colombe"	Sous-secteur 1	32.03	53	1 095 554

Table 3.3 – Sous-secteurs en fonctionnement sain - Données d'identification

Secteur	Sous-secteur	$L_I$ (km)	$N_U$	$\mathcal{T}$ (seconde)
"Les Saffras"	Sous-secteur 1	1.524	29	11 966
"Les Saffras"	Sous-secteur 3	2.070	28	6 089
"Marianne"	Sous-secteur 1	3.372	8	51
"Marianne"	Sous-secteur 2	68.21	128	111
"Marianne"	Sous-secteur 3	9.056	17	155
"Marianne"	Sous-secteur 4	19.99	42	129

Table 3.4 – Données de certains sous-secteurs du réseau

Les données relatives aux bassins de stockage, exploitées pour l'estimation de la quantité d'eau évaporée sont présentées par le Tableau 3.5. Plus précisément, ces données sont utilisées, d'une part, pour calculer les capacités en eau respectives des bassins et, d'autre part, sont nécessaires pour estimer l'évolution de la température de la surface de l'eau, une grandeur dont la connaissance est nécessaire pour quantifier l'eau évaporée. Il est à noter, et vu que les formes géométriques des bassins peuvent être complexes, un outil en ligne<sup>1</sup> a été utilisé pour estimer les surfaces des bassins de façon précise.

Bassin	Surface (m <sup>2</sup> )	Profondeur (m)
"Bédoin"	1 750	3.50
"Chinardon"	1 480	3.20
"Sainte Hippolyte"	1 590	3.20
"Flassan"	1 000	3.10
"Malemort"	1 570	3.00
"Hautes Briguières"	2 275	3.00
"Saint Philippe HS"	1 800	2.75
"Valérie"	1 250	2.00
"Oasis"	4 250	1.20
"Saint André"	3 000	1.20

Table 3.5 – Données des bassins de stockage

### 3.4.2 Résultats et discussions

Le but de cette partie est de présenter les résultats obtenus, dans le cadre du cas d'étude du canal de Carpentras, sur la quantification des différents paramètres et des différentes grandeurs physiques considérées. Tout d'abord, l'estimation du volume d'eau évaporé est donnée, puis, les pertes dues à la structure sont analysées.

1. Il s'agit d'un portail web "Géoportail" permettant l'accès aux données géographiques de l'ensemble du territoire français.

### 3.4.2.1 Volume d'eau évaporé

Pour estimer l'eau évaporée des bassins, on procède de la manière décrite à travers l'Algorithme 8. Afin d'illustrer l'approche, on considère les données de la saison spécifique du 01/03/2015 au 31/10/2015. Les Figures 3.14 et 3.15 décrivent les évolutions respectives, sur la période considérée, de la température de l'eau et de la pression de saturation associée, pour un bassin du réseau de Carpentras. Puis, la Figure 3.16 donne une estimation du volume d'eau évaporé et correspondant à ce bassin.

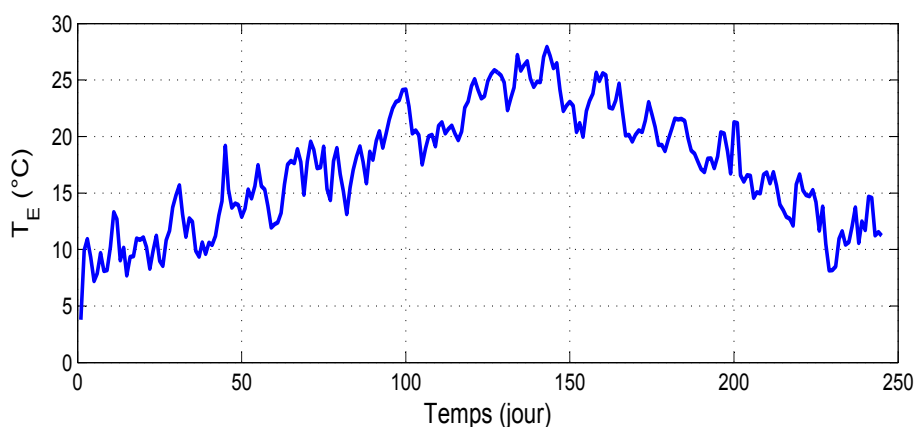


Figure 3.14 – Température de l'eau (Bassin de "Valérie")

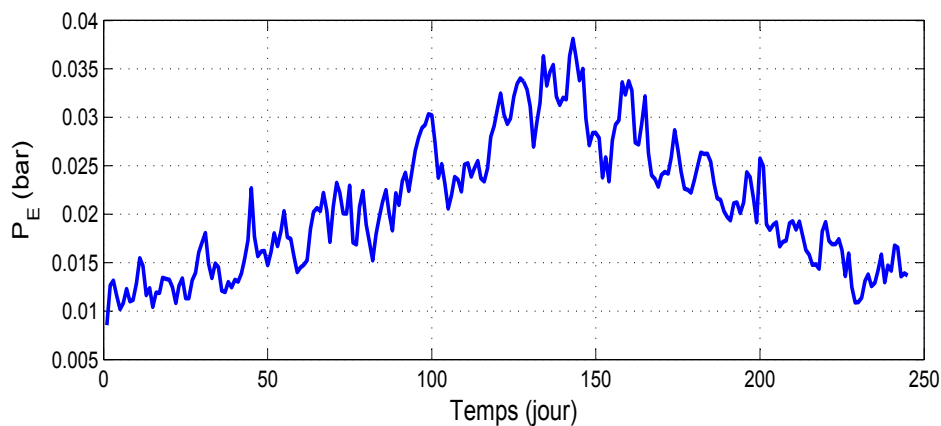


Figure 3.15 – Pression de saturation à la surface (Bassin de "Valérie")

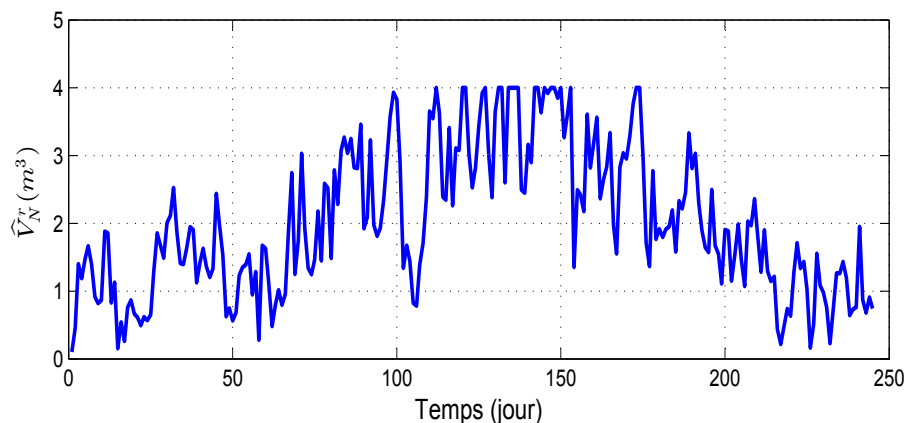


Figure 3.16 – Volume d'eau évaporé (Bassin de "Valérie")

Sur la base de cette approche, le Tableau 3.6 détaille les estimations, d'eaux évaporées, obtenues pour l'ensemble des bassins considérés. On constate que, sur la saison considérée, l'eau évaporée peut atteindre 34 % de la capacité d'un bassin. En tout cas, et en moyenne, l'eau évaporée représente plus de 18 % de la capacité de stockage.

Bassin	Volume évaporé (m <sup>3</sup> )	Volume d'eau (m <sup>3</sup> )	Rapport (%)
"Bédoin"	706	6125	12
"Chinardon"	598	4730	13
"Sainte Hippolyte"	642	5080	13
"Flassan"	404	3100	13
"Malemort"	635	4710	14
"Hautes Brigières"	920	6825	14
"Saint Philippe HS"	729	4950	15
"Valérie"	508	2500	21
"Oasis"	1 737	5100	34
"Saint André"	1 226	3600	34

Table 3.6 – Volumes évaporés

### 3.4.2.2 Volume perdu dû à la structure

#### A. Calcul des volumes d'eau pompés

Afin d'identifier les paramètres caractéristiques de la structure (à savoir  $\Theta$ ), une première tâche consiste à estimer l'eau dissipée sur une période de pause. Pour ce faire, deux approches peuvent être envisagées selon le mode de fonctionnement.

La première approche concerne le fonctionnement par plage de pression. Dans ce cas, pour estimer l'eau dissipée sur une période de pause  $(D_k)_{k \in K}$ , il est assumé que cette quantité est équivalente à l'eau pompée lors de marche qui précède soit  $\bar{D}_k$ . Maintenant, et en tenant compte du mode de fonctionnement actuel des pompes, en tout en rien, une estimation est donnée par :

$$V^p = \bar{D}_k Q_P$$

où  $Q_P$  est le débit nominal des pompes.

Il convient de préciser et dans le cas général d'une pompe à débit variable, qu'une expression équivalente est de la forme

$$V^p = \int_{t_k^1}^{t_k^2} Q_P(\tau) d\tau$$

peut être exploitée pour définir le volume dissipé. Cependant, dans ce cas, l'historique de la variation de débit doit être disponible.

La deuxième approche est adaptée au cas d'un fonctionnement par niveau d'eau du bassin de stockage. Dans ce cas, le volume dissipé peut être estimé à partir des données géométriques du bassin.

Le tableau 3.7 donne explicitement les valeurs des volumes d'eau stockés entre deux niveaux de fonctionnement.

Bassin	Niveau bas (m)	Niveau Haut (m)	Volume d'eau (m <sup>3</sup> )
"Valérie"	1.40	1.70	375
"Grands Fonts"	1.50	2.25	2100
"Les Brotteaux"	1.50	2.50	2500

Table 3.7 – Volume d'eau stocké entre deux niveaux

Le Tableau 3.8 donne les valeurs numériques utilisées dans les équations (3.26) et (3.27). Elles seront employées pour déterminer les valeurs de  $\theta_1$  et  $\theta_2$  en fonction de  $n$ .

Constante	Valeur
$C_{L^2}$	1028.23
$C_{N^2}$	3593
$C_{LN}$	1740.15
$p^{min,1}$	6
$p^{min,2}$	0.975
$p^{max,1}$	8.3
$p^{max,2}$	1.143

Table 3.8 – Valeurs numériques liées à la structure



Finalement, la variation de  $\hat{J}(n)$  est décrite par la Figure 3.17.

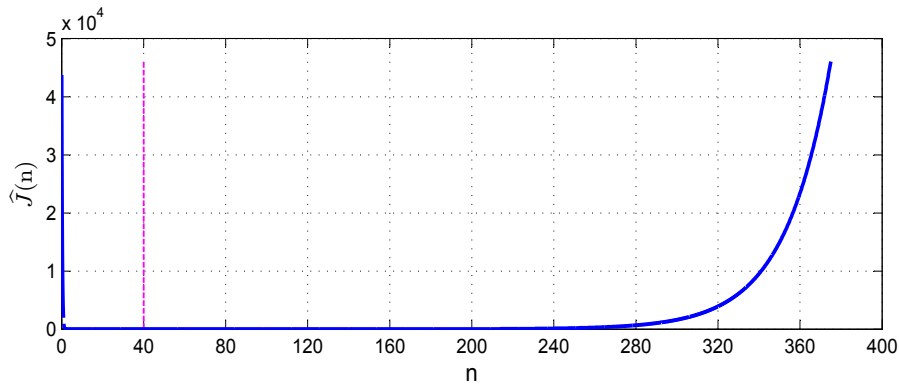


Figure 3.17 – Variation de  $\hat{J}(n)$

### B. Identification des paramètres

Cette sous-section est consacrée à l'identification des paramètres et une étude comparative des différentes approches explorées est proposée. Plus précisément, en utilisant la méthode des moindres carrés, nous identifions les paramètres, puis, nous procédons à une comparaison des différents résultats obtenus.

Le tableau 3.9 donne les différentes valeurs numériques d'identification obtenues.

Paramètre	Valeur
$\hat{\theta}_1$	0.0072
$\hat{\theta}_2$	0.0034
$\hat{n}$	40

Table 3.9 – Paramètres d'identification

La variation de  $\hat{\theta}_1(n)$  et de  $\hat{\theta}_2(n)$  est décrite par la Figure 3.18.

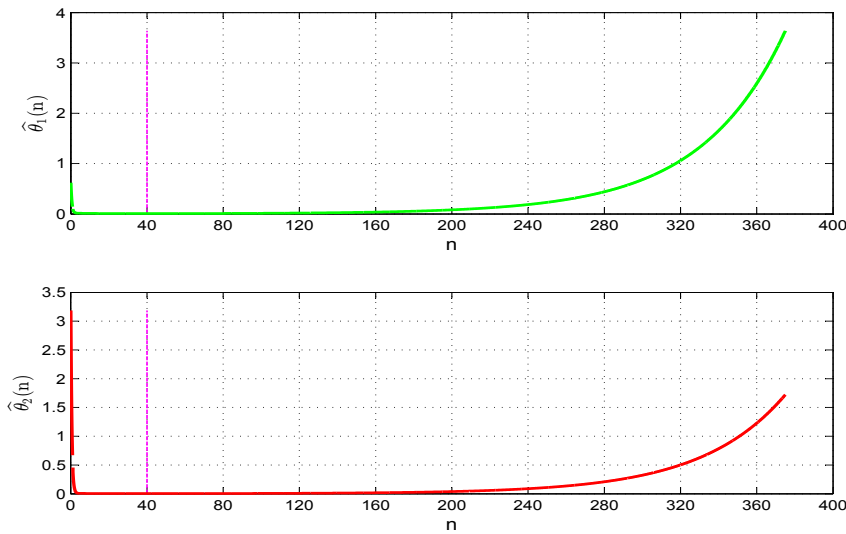


Figure 3.18 – Variation des valeurs d'identification

### 3.4.2.3 Seuil de détection de fuites

Après avoir quantifié les volumes d'eau principaux mis en circulation, la dernière étape consiste à décider de la présence ou non d'une fuite. Pour ce faire, nous définissons un seuil d'acceptabilité qui tient compte de trois aspects liés à la réalité du terrain. Le premier aspect concerne l'incertitude de mesures des équipements à savoir, les débitmètres et les compteurs. Le deuxième aspect est lié au phénomène de précipitations et donc à la quantité d'eau injectée naturellement dans le bassin de stockage. Le troisième aspect consiste à tenir compte des consommations comptabilisées en différé. Nous définissons donc un seuil relatif au volume d'eau pompé et en relation avec ces aspects.

$$Seuil = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) V^p$$

avec  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \in [0, 1]$ , tels que  $0 \leq \alpha = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \leq 1$ , des coefficients relatifs respectivement à l'incertitude de mesures, aux précipitations et au phénomène du retard.

Le principe consiste à admettre la présence de fuites si  $\hat{V}_F^r \geq \alpha V^p$ . Dans le cas d'étude considéré, les paramètres sont donnés par le Tableau 3.10.

Paramètre	Valeur
$\alpha_1$	0.025
$\alpha_2$	0.025
$\alpha_3$	0.010

Table 3.10 – Paramètres relatifs au seuil

Ainsi, dans le cas de cette étude, le coefficient  $\alpha$  est voisin de 5%.

## **3.5 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré au diagnostic des fuites dans les réseaux d'irrigation. Une partie du chapitre a été dédiée à l'analyse de la circulation d'eau. Cette analyse est basée sur le bilan d'eau et la sectorisation du réseau. L'objectif est d'analyser le fonctionnement des pompes sur une période donnée en vue de détecter les éventuelles fuites dans un secteur. Dans ce chapitre, les pertes dues à la structure et celles dues à l'évaporation ont été évaluées. Finalement, la stratégie de diagnostic des fuites et les résultats obtenus sont présentés.

# 4 Système de production locale d'énergie électrique

## 4.1 Introduction

Pour minimiser le coût énergétique du réseau d'irrigation, une voie consiste à concevoir un système de production énergétique locale afin de minimiser l'énergie livrée par le fournisseur d'électricité. Ainsi, l'objectif de cette partie de la thèse est d'étudier la faisabilité d'un système de production fondé sur les sources d'énergies renouvelables et disponibles sur les sites d'exploitation du réseau d'irrigation considéré pour le cas d'étude considéré. Cette étude sera fondée sur une analyse globale, tenant compte de la variabilité énergétique locale, en vue d'une réalisation d'un système de production qui viendrait en complément du réseau national. Pour ce faire, le système de production énergétique sera assumé être de nature hybride et sera constitué de capteurs énergétiques que sont les panneaux photovoltaïques et/ou les éoliennes.

L'objectif est de réaliser une étude de faisabilité d'une installation à production locale d'énergie électrique qui serait profitable sur une  $\mathcal{T}$ , période d'étude considérée, par exemple, d'une durée de vingt ans. Le but est de faire une analyse sur la durée de vie globale estimée d'un système de production. Il s'agit de concevoir un modèle de simulation permettant de fournir des éléments d'aide à la décision (voir Figure 4.1) en vue de réduire la facture énergétique.

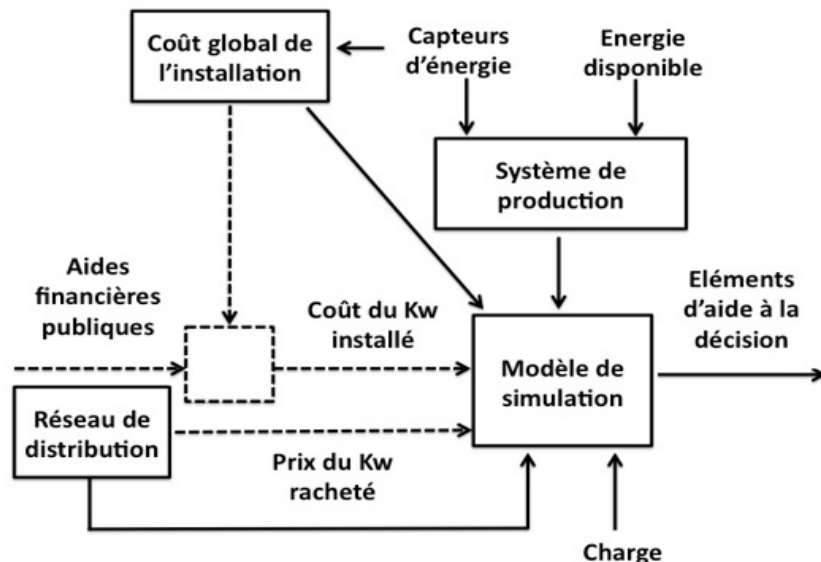


Figure 4.1 – Description générale de la démarche

Ainsi, dans cette partie de la thèse, nous développons une stratégie pour le dimensionnement d'un système hybride de production locale d'énergie électrique. L'approche proposée sera réalisée dans l'objectif de minimisation globale de la facture énergétique. Pour ce faire, l'analyse sera globale sur la période complète  $\mathcal{T}$  en vue de produire localement de l'énergie qui permettrait de diminuer l'énergie livrée par le fournisseur tout en optimisant la puissance souscrite.

Dans ce cadre, le problème de dimensionnement des systèmes de production énergétique a suscité l'intérêt de plusieurs auteurs (voir par exemple [73–77]). Les résultats proposés sont nombreux et dépendent de l'application visée et des approches explorées. À titre d'exemples, dans [78], une étude sur les systèmes à base de pompe à chaleur a été proposée pour une application en France et dans le cas d'un site isolé. Dans [79], une approche pour le dimensionnement d'un système de production du froid à partir de l'énergie solaire a été proposée. Dans [80], l'auteur propose des approches d'analyse technico-économiques pour l'optimisation des systèmes énergétiques.

Le reste du chapitre est composé de sept parties. Dans la première partie, une description de la démarche est donnée. Dans la deuxième partie, des éléments nécessaires à la conception du système sont introduits. La troisième partie est dédiée à la position du problème de dimensionnement. Dans la quatrième partie, une approche pour la résolution du problème est proposée. Le but est de produire des éléments pour l'aide à la décision à travers des résultats de simulations produits sur la base de l'historique des consommations. La cinquième partie est consacrée à une application numérique au sein du canal de Carpentras. Dans la sixième partie, une discussion est présentée. La dernière partie est une conclusion.

## 4.2 Description de la démarche

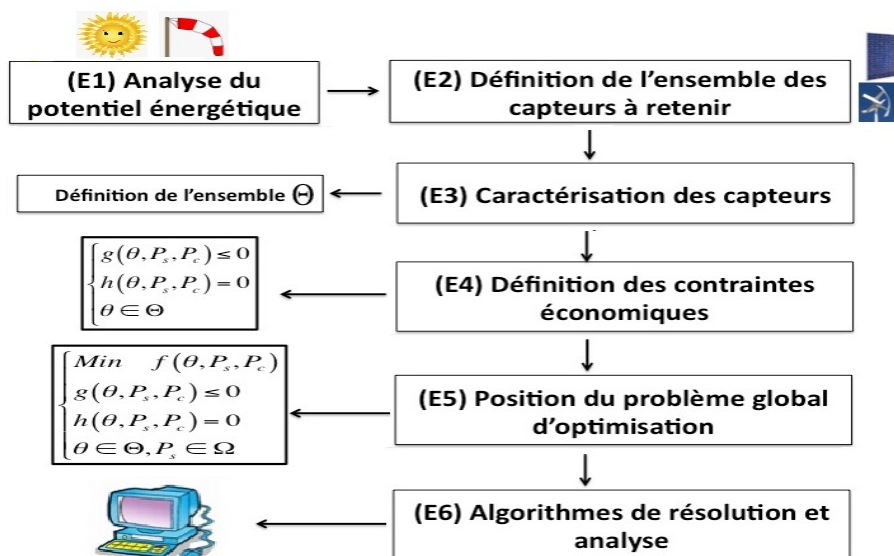


Figure 4.2 – Description des étapes à adopter en vue d'une démarche globale

Le problème de conception de système de production locale peut être abordé sous plusieurs hypothèses et selon le but recherché. D'une façon générale, une étude de faisabilité devrait tenir compte (voir Figure 4.1), d'une part, du prix de vente de l'énergie et du coût du  $kW$  installé et, d'autre part, de l'énergie disponible, de la charge et des contraintes technico-économiques.

Dans ce travail, l'objectif principal est de réduire la facture globale sans aucune recherche de spéculation financière. En fait, une solution spéculative qui viserait un profit financier vis-à-vis du fournisseur, par exemple, à travers un système de gestion, reste assujettie à des décisions politiques incontrôlables. Ainsi, et afin de fournir des éléments d'aide à la décision qui soient fiables, des hypothèses restrictives seront privilégiées tout au long de l'analyse. À titre d'exemple, le prix de rachat du  $kWh$  produit localement par le fournisseur ne sera pas forcément supposé être plus intéressant que de son achat. Nous focaliserons donc sur la constitution de la topologie optimale en fonction de contraintes techniques, de l'énergie disponible et du choix d'une puissance souscrite optimale.

La démarche globale adoptée dans ce travail, décrite à travers la Figure 4.2, est constituée de plusieurs étapes. La première étape est celle de l'analyse du potentiel énergétique et de la définition des capteurs énergétiques pertinents pour sa production. La deuxième étape consiste à caractériser les capteurs énergétiques retenus. Le but est de définir les paramètres représentatifs des capteurs en vue de les intégrer dans la formulation du problème d'optimisation. Ensuite, vient l'étape de la définition des contraintes économiques. Finalement, la problématique de conception du système est formalisée globalement comme un problème mathématique d'optimisation avec contraintes. Ensuite, et afin d'explorer des solutions à la problématique, des algorithmes de résolutions sont établis.

## 4.3 Courbe de charge, potentiel énergétique et capteurs

L'objectif de ce paragraphe est de décrire les aspects techniques qui seront pris en considération afin de concevoir le système de production. Il s'agit de définir la courbe de charge, d'analyser le potentiel énergétique, de caractériser les capteurs et finalement de décrire la structure du système.

### 4.3.1 Courbe de charge

Tout au long de ce travail, la charge, exprimée comme une puissance  $P_C$ , peut être la valeur réelle à considérer, une moyenne statistique de l'historique, une valeur de prédiction, etc. Pour des raisons de simplicité, nous allons assumer que la charge annuelle est identique sur toute la période d'analyse. Nous négligerons ainsi le fait que le réseau d'irrigation peut évoluer durant la période d'étude. Par ailleurs, nous supposons que les éléments météorologiques sont similaires et que la politique d'irrigation est identique durant toute la période d'étude  $\mathcal{T}$ .

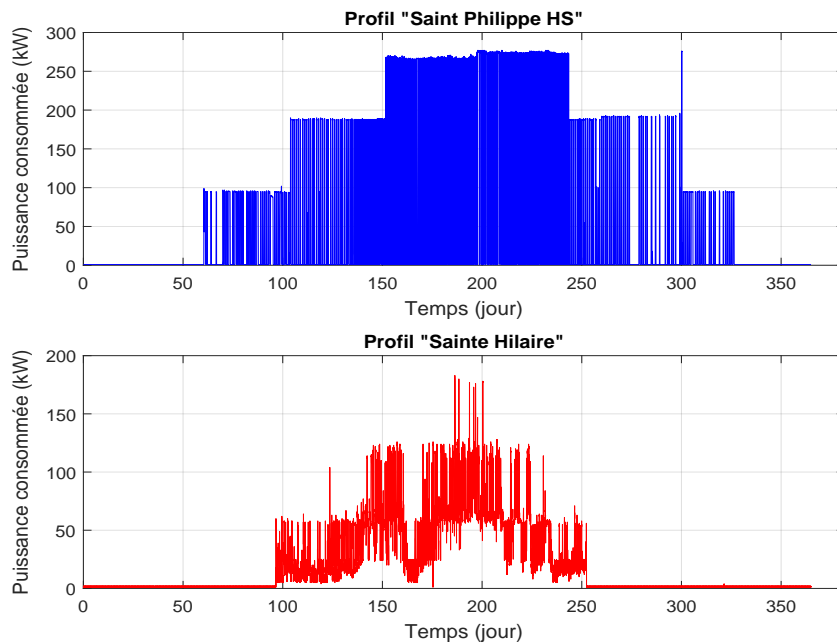


Figure 4.3 – Exemples des courbes de charge

### 4.3.2 Analyse du potentiel énergétique

Le but de cette partie est d'analyser le potentiel énergétique au point géographique de la future installation. L'analyse sera fondée sur les données disponibles. Les courbes présentées par la Figure 4.4, montrent le potentiel énergétique en termes d'ensoleillement et de vitesse du vent annuels. Il s'agit de deux paramètres indispensables pour l'analyse du potentiel énergétique dans le cas considéré.

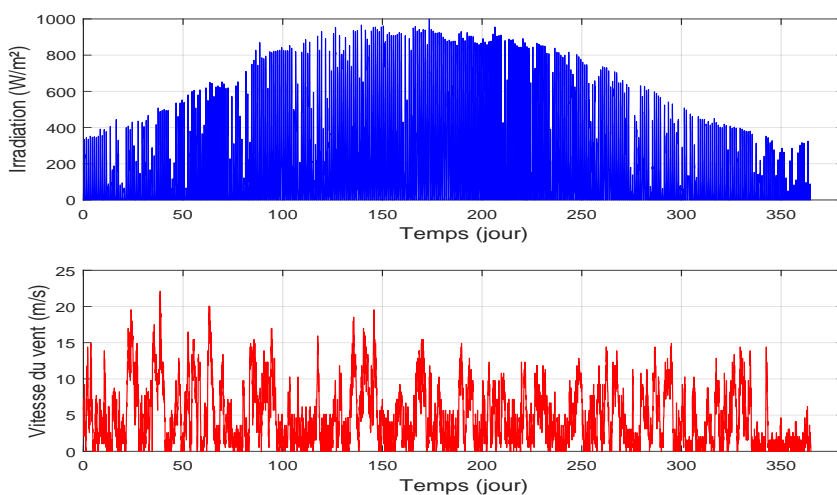


Figure 4.4 – Potentiel énergétique du site considéré

Une première étude sur la viabilité des solutions de production énergétique locale, consiste à analyser le coût énergétique de l'installation. À titre d'exemple, considérons le cas d'une étude pour un réseau de panneaux photovoltaïques. Le but est d'estimer le coût du  $kWh$  installé par rapport aux tarifs de vente et de rachat du fournisseur. Une solution pourrait être estimée réaliste si le coût du  $kWh$  installé, calculé en fonction du potentiel énergétique et du coût du  $kW$  crête, serait supérieur au prix de rachat par le fournisseur. La Figure 4.5 donne une estimation du coût du  $kWh$  installé en fonction du potentiel énergétique du site considéré.

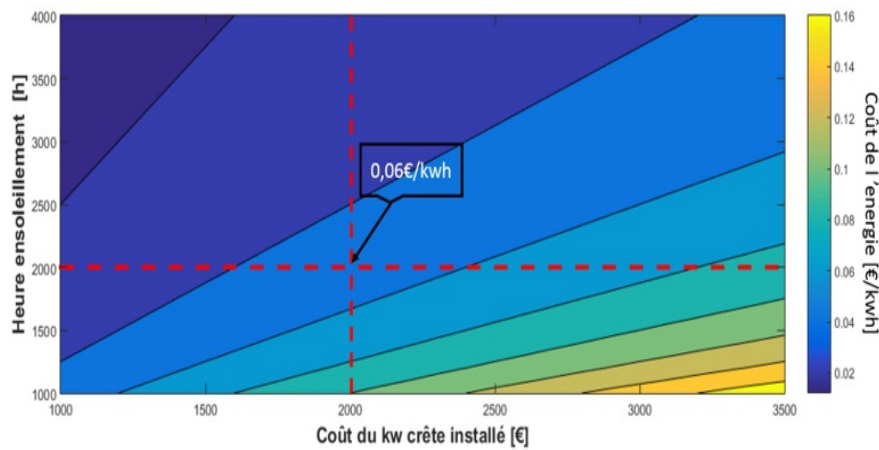


Figure 4.5 – Estimation du coût d'énergie en fonction du potentiel énergétique

### 4.3.3 Modélisation des capteurs énergétiques

Dans cette partie, nous présentons une modélisation des deux capteurs considérés, à savoir les panneaux solaires et les éoliennes. Il s'agit de décrire l'évolution de la puissance produite en fonction de l'énergie disponible.

Tout d'abord, la puissance instantanée, produite par les panneaux photovoltaïques, peut être exprimée par :

$$P_{PV}(N_{PV}, S_{PV}^u, \eta_{PV}, t) = \eta_{PV} N_{PV} S_{PV}^u I_r(t), \quad t \geq 0 \quad (4.1)$$

où  $N_{PV}$ ,  $S_{PV}^u$ ,  $\eta_{PV}$ ,  $I_r$  désignent respectivement le nombre des panneaux utilisés, la surface utile d'un panneau, le rendement et l'irradiation solaire exprimée en  $W m^{-2}$ .

Ensuite, la puissance éolienne peut être estimée à travers l'expression :

$$P_e(N_e, S_e^u, C_p^{max}, t) = \frac{1}{2} \rho C_p^{max} N_e S_e^u v^3(t), \quad t \geq 0 \quad (4.2)$$

où  $\rho$ ,  $C_p^{max}$ ,  $N_e$ ,  $S_e^u$ ,  $v$  représentent respectivement la densité de l'air, le coefficient optimisé d'extraction de puissance, le nombre d'éoliennes, la surface balayée par l'éolienne et la vitesse instantanée du vent exprimée en  $m s^{-1}$ .



La puissance instantanée, produite par le système hybride, est donnée par :

$$P_{SP}(N_{PV}, N_e, \theta, t) = P_{PV}(N_{PV}, S_{PV}^u, \eta_{PV}, t) + P_e(N_e, S_e^u, C_p^{max}, t), \quad t \geq 0 \quad (4.3)$$

L'équation précédente peut être donnée plus explicitement, en fonction du nombre des composants, de leurs caractéristiques et du potentiel énergétique par :

$$P_{SP}(N_{PV}, N_e, \theta, t) = \eta_{PV} N_{PV} S_{PV}^u I_r(t) + \frac{1}{2} \rho C_p^{max} N_e S_e^u v^3(t), \quad t \geq 0 \quad (4.4)$$

Le système de production énergétique sera composé de panneaux photovoltaïques et/ou d'éoliennes. En outre, et dans le cadre d'une première analyse, le système n'est pas supposé être doté de composants pour le stockage électrique. Cependant, un système de stockage accompagné d'une stratégie de gestion peut représenter un outil pertinent pour l'installation (voir Figure 4.6). L'idée, et dans un souci de gain de place, consiste à réaliser un système installé au-dessus du bassin de stockage. Il est à noter que le bassin peut être déjà existant et les dimensions sont figées, une possibilité d'extension pourrait être prise en compte ou la mise en place complète pourrait être envisagée. Dans une formulation plus générale, il serait opportun de prendre en compte les différentes situations dans la position du problème d'optimisation global et d'envisager un système de stockage ainsi qu'une procédure de gestion pertinente de l'énergie.

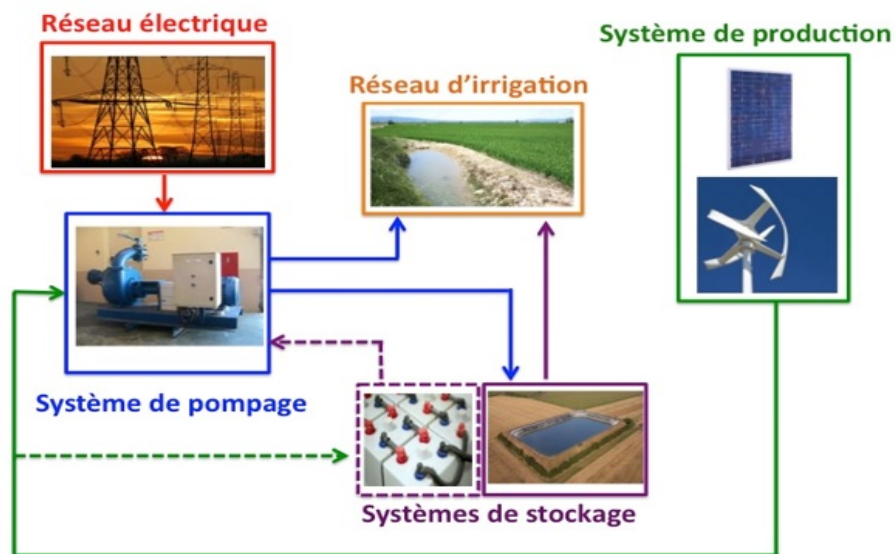


Figure 4.6 – Système de production énergétique

## 4.4 Position du problème d'optimisation

### 4.4.1 Notions préliminaires et hypothèses de travail

Dans ce travail, le coût global de la facture énergétique est étudié sur une période globale  $\mathcal{T}$ . L'analyse est effectuée par rapport à une configuration caractérisée par le paramètre  $\theta$ , une puissance souscrite  $P_S$  et une consommation  $P_C$ . Plus précisément, la facture globale peut être exprimée par :

$$F^T = (P_S, P_C, \theta) = F_p(\theta) + F_f(P_S, P_C) \quad (4.5)$$

où  $F^T$  désigne la facture globale dépendante de la consommation et de la puissance souscrite choisie.  $F_p$  représente le coût de l'installation du système de production locale et sa maintenance sur la période considérée tenant compte des choix des capteurs. Le système est supposé être caractérisé par le paramètre  $\theta$ .

Pour aboutir à une solution précise, plusieurs aspects doivent être pris en compte ; à savoir : l'évolution de la météo sur la période  $\mathcal{T}$ , l'évolution de la consommation durant la période (c'est-à-dire, l'intégration de nouvelles surfaces d'irrigation supplémentaires, le vieillissement des installations, etc.), le choix multiples des puissances souscrites adaptées annuellement (c'est-à-dire, une adaptation annuelle de la valeur souscrite en fonction d'une consommation évolutive) et l'évolution éventuelle de l'installation sur la période (ajout de nouveaux capteurs d'énergie en fonction de l'évolution des prix, adaptation du système de stockage, etc.). Dans ce travail, et par soucis de simplicité, les hypothèses suivantes sont assumées :

**(H1)** Le système de production énergétique est conçu au début de la période et est non évolutif.

**(H2)** La consommation est similaire d'une année à l'autre et elle est représentée par une courbe représentative des besoins.

**(H3)** La valeur de la puissance souscrite recherchée est constante sur toute la période d'étude.

**(H4)** L'analyse ne tient compte que du potentiel énergétique constaté au début de la période à travers l'historique disponible.

Il convient de préciser qu'une définition précise de la courbe de charge peut en soi nécessiter une analyse minutieuse. En effet, le profil considéré doit être assez représentatif de la réalité. Pour ce faire, plusieurs grandeurs peuvent être considérées pour l'analyse : la moyenne ou le maximum calculés à partir des données de l'historique, des valeurs de prédiction déduites de méthodes de régression, etc. Par ailleurs, la problématique de planification de la consommation énergétique, en vue de l'économie énergétique, est une problématique en soi et ne sera pas abordée dans ce travail. En outre et afin de tenir compte des aspects aléatoires, l'analyse peut aussi être de nature stochastique. Ici, et pour des raisons de simplicité, on va considérer que la charge est celle observée par l'historique récent, généralement, la dernière année.

Comme précisé dans le chapitre 2, la facture d'électricité, délivrée par le fournisseur, est composée de quatre parties : la prime fixe (due à l'acheminement de l'électricité), la pénalité de dépassement (calculée à partir d'une puissance souscrite), la consommation effective, et les taxes imposées par le pouvoir public. Le client choisit en fonction de sa consommation une puissance souscrite adaptée à ses besoins sur la base de laquelle porte le calcul de la prime fixe, et s'effectue le calcul des dépassements. On rappelle qu'il s'agit de deux quantités, dépendantes de la puissance souscrite et qui évoluent d'une façon antagoniste.

Par la suite, nous considérons uniquement la partie dépendante de la puissance souscrite et de la consommation. En fait, c'est la partie de la facturation qui est susceptible d'être optimisée. En effet, la partie concernant les taxes n'est pas affectée par le choix du client et sera donc omise. Finalement, dans cette étude, la partie de la facture délivrée par le fournisseur qui sera considérée peut être exprimée par :

$$F_f(P_S, P_C) = F_f^t(P_S) + F_f^d(P_S, P_C) + F_f^c(P_C) \quad (4.6)$$

où  $F_f^t$ ,  $F_f^d$ ,  $F_f^c$  désignent respectivement les coûts du transport d'énergie, le dépassement et la consommation.

## 4.4.2 Position du problème

Cette étude est dédiée à un système hybride constitué de  $N_{PV}$  panneaux photovoltaïques et de  $N_e$  éoliennes. Il s'agit de déterminer la topologie optimale. En d'autres termes, il s'agit de déterminer  $N_{PV}$ ,  $N_e$  qui optimisent le coût global de la facture énergétique.

Une première approche consiste à assumer que la surface de l'installation est pré-définie. Par exemple, on pourrait supposer que le système hybride sera installé sur un bassin de stockage. Le but ici est de rendre le réseau le moins coûteux d'un point de vue surface occupée. Cependant, et techniquement, cette solution doit être étudiée plus en détail pour analyser sa faisabilité et le coût qui lui serait associé. Dans ce cas, une contrainte de surface doit être respectée, à savoir,

$$S_{PV} N_{PV} + S_e N_e \leq S_B \quad (4.7)$$

où  $S_e$  est la surface nécessaire à l'installation d'une éolienne.

Dans ce cas, l'ensemble  $\Theta$  peut être considéré comme un sous ensemble de  $\mathbb{R}^7$  où les éléments  $\theta = (S_{PV}, P_{PV}^C, p_{PV}^U, \eta_{PV}, S_e, C_p^{max}, p_e^U)$  désignent les solutions possibles du marché. Ces solutions sont supposées être caractérisées par la surface du panneau photovoltaïque, sa puissance crête, son prix, son rendement et la surface balayée par l'éolienne, son coefficient d'extraction et son prix unitaire.

Dans cette première analyse, le coût de l'investissement initial et le nombre total des panneaux solaires et des éoliennes sont pris en compte. Dans ce cas, le coût du système de production énergétique peut être estimé par :

$$C_{SH}^T(N_{PV}, N_e, \theta) = \sum_{i=1}^2 p_{X_i}^U N_{X_i} + C_m(N_{X_i}) \quad (4.8)$$

$C_m$  désigne le coût de l'installation et on adoptera la notation  $X_1 = PV$  et  $X_2 = e$ . Il convient de préciser que, et en vertu de la nature de l'installation, l'analyse est dépendante selon que la fonction  $C_m$  est linéaire ou non-linéaire. À titre d'exemple, cette fonction pourrait être une constante pour toute valeur de  $N_{X_i}$  ( $X_i \in \{PV, e\}$ ) ou dépendante par palier si la structure est conçue en fonction du poids de l'ensemble. Dans ce qui suit et pour des raisons de simplicité, on supposera que le coût est linéaire par rapport au nombre de composants. Ainsi, une réécriture convenable de l'équation (4.8), où le prix de l'installation est intégré au prix du composant, peut être effectuée en supposant que  $C_m \equiv 0$ .

Plusieurs approches peuvent être envisagées pour poser le problème d'optimisation. Dans une première approche, on va supposer qu'on dispose d'un seul type de composant sur le marché et que le but est d'étudier la rentabilité d'un système, constitué d'un réseau de composants, et ceci sans tenir compte des coûts d'exploitation ou des aspects économiques autres que l'investissement initial. L'objectif principal est d'analyser la rentabilité possible à moyen ou long termes du système de production par la réduction de la facture du fournisseur d'énergie à travers l'optimisation possible de la puissance souscrite.

La facture totale sur une période de  $N_a$  années, en présence d'un système de production énergétique locale, peut être exprimée par :

$$\bar{F}^T(P_S, P_C, \theta) = C_{SH}^T(N_{PV}, N_e, \theta) + N_a F^T\left(P_S, \left(P_C - P_{SP}(N_{PV}, N_e, \theta)\right)\right) \quad (4.9)$$

Ce coût doit être minimisé sous les deux contraintes (2.7) et (4.7), à savoir la puissance souscrite et la topologie du système de production définie par la paire  $(N_{PV}, N_e)$ . Il s'agit de résoudre le problème :

$$(\mathcal{P}_7) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \left( \sum_{i=1}^2 p_{X_i}^U N_{X_i} + N_a \sum_{i=1}^{I_l} \bar{f}_i(P_S^i, N_{PV}, N_e) \right) \\ \left\{ \begin{array}{l} g(P_S^i, P_S^{i+1}) \leq 0 \\ i \in \llbracket 1, I-1 \rrbracket \\ S_{PV} N_{PV} + S_e N_e \leq S_B \\ N_e \in \llbracket 0, N_e^{max} \rrbracket \\ N_{PV} \in \llbracket 0, N_{PV}^{max} \rrbracket \end{array} \right. \end{array} \right.$$

où

$$\bar{f}_i(X, N_{PV}, N_e) = a_i X + b_i \sqrt{\sum_{j=1}^{J_i} \Gamma_1^2(c_j^i(N_{PV}, N_e) - X)}, \quad i \in \llbracket 1, I_l \rrbracket$$

et

$$c_j^i(N_{PV}, N_e) = P_{C',k}^{i,j} - P_{Ps}(N_{PV}, N_e, \theta, t_k^{i,j})$$

où  $t_k^{i,j}$  est l'instant correspondant à la valeur  $P_{C',k}^{i,j}$ .

## 4.5 Résolution du problème

Un premier travail consiste à déterminer le profil de la puissance produite par le système de production local  $P_{SP}$  en fonction du profil énergétique disponible sur le site de Carpentras. Cette valeur est nécessaire pour le calcul de la facture totale  $F^T$  dans l'équation (4.9) et dans la détermination des fonctions  $\bar{f}_i$ .

Pour analyser la pertinence du système de production énergétique locale, il convient d'étudier l'évolution de la puissance souscrite optimale, de la facture du fournisseur, du retour sur investissement en fonction du nombre d'année  $N_a$ . Par exemple, une problématique pourrait être l'estimation de  $N_a^{min}$  le nombre minimal à partir duquel le système de production est complètement amorti.

La résolution du problème ( $\mathcal{P}_7$ ) peut être explorée de différentes approches. Cependant, il s'agit d'un problème de nature continu-discret. Une résolution mathématique et analytique semble être complexe. Une deuxième approche pourrait être une combinaison hybride qui consiste à explorer toutes les topologies et d'évaluer les puissances souscrites associées afin de déterminer la valeur qui optimiserait le coût énergétique global.

L'exploration de la solution optimale, tant en terme de puissance souscrite que de la topologie la plus adaptée, peut être réalisée à travers des outils informatiques : une recherche exhaustive ou basée sur un principe d'intelligence artificielle ; à savoir la méthode OEP (voir Algorithme 9).

---

**Algorithme 9** Approche basée sur les outils informatiques

---

Lire  $(\Delta P, P_C, N_{PV}^{max}, N_e^{max}, \theta, Mode)$

/\* Indique le mode de recherche ; à savoir, Mode=RE si c'est une recherche exhaustive ou Mode=IA si c'est une recherche fondée sur le principe OEP \*/

**Tant que**  $i \leq I$  **Faire**

$$P_S^i \leftarrow P_S^{min}, \hat{P}_S^i \leftarrow P_S^{min}$$

**Fin Tant que**

$$PasFin \leftarrow Vrai$$

$$\hat{F}^{op} \leftarrow Calcul\_Facture\left(P_S, \left(P_C - P_{SP}(N_{PV}, N_e, \theta)\right)\right)$$

**Tant que**  $N_{PV} \leq N_{PV}^{max}$  **Faire**

**Tant que**  $N_e \leq N_e^{max}$  **Faire**

$$PasFin \leftarrow Vrai$$

**Tant que**  $PasFin$  **Faire**

$$\hat{F} \leftarrow Calcul\_Facture\left(P_S, \left(P_C - P_{SP}(N_{PV}, N_e, \theta)\right)\right)$$

**Si**  $(\hat{F} < \hat{F}^{op})$  **Alors**  $\hat{P}_S \leftarrow P_S$

**Finsi**

**Si**  $(Mode = "RE")$  **Alors**  $Incrémenter(P_S, \Delta P, PasFin)$

**Sinon**  $Suivant(P_S, \Delta P, PasFin)$

**Finsi**

**Fin Tant que**

$$N_e \leftarrow N_e + 1$$

**Fin Tant que**

$$N_{PV} \leftarrow N_{PV} + 1$$

**Fin Tant que**

Retourner  $(\hat{P}_S)$

---

La fonction "*Incrémenter()*" permet de changer la valeur de la puissance souscrite candidate. Cette fonction est considérée lors de l'exploration à travers une recherche exhaustive. Cependant, dans le cas d'une recherche exhaustive, le temps de calcul peut devenir très important. En effet, le temps de calcul nécessaire peut être approximé par :

$$\bar{C}_{global}^{N_{\Delta PS}} = C_{global}^{N_{\Delta PS}} N_{PV}^{max} N_e^{max}$$

où  $C_{global}^{N_{\Delta PS}}$  est défini par une équation similaire à (2.9). Ainsi, le temps d'exécution sera multiplié par  $N_{PV}^{max} N_e^{max}$ . Ce qui pourrait être colossal comme cela a été illustré dans le chapitre 2.

La fonction "*Suivant()*" permet de déterminer l'élément suivant en adoptant une stratégie fondée sur le principe OEP (voir l'Algorithme 2). Dans ce cas, la précision par rapport à la solution optimale est moindre, néanmoins, le temps de calcul peut être réduit d'une façon très significative. En effet, l'ensemble des possibilités n'est pas parcouru complètement et seul un nombre limité est considéré comme cardinal maximal.

La fonction "*Calcul\_Facture()*" permet, pour une valeur donnée de puissance souscrite, de calculer le montant de la facture. Il s'agit d'une fonction déduite de "*Evaluer()*" celle utilisée dans l'Algorithme 1 et où la charge est adaptée au système de production locale, c'est-à-dire aux nombres de panneaux et d'éoliennes le constituant.

La deuxième approche pour établir un dimensionnement adapté pour l'optimisation de la facture énergétique globale consiste à utiliser des solutions analytiques obtenues à partir l'approche mathématique. Le principe est similaire dans le sens où il s'agit d'explorer les solutions en fonction de la constitution du système de production caractérisé par les nombres de panneaux et d'éoliennes considérés. Cependant, et au lieu de parcourir toutes les possibilités de puissances souscrites, il s'agit de procéder à la résolution analytique sur la base de l'Algorithme 6. Dans l'Algorithme 10, qui détaille la procédure, cette fonction est notée "*Résoudre()*". En outre, on suppose que la charge est adaptée pour chaque topologie testée.

---

**Algorithme 10** Approche fondée sur une résolution mathématique

---

Lire  $(\Delta P, P_C, N_{PV}^{max}, N_e^{max}, \theta)$

**Tant que**  $i \leq I$  **Faire**

$$P_S^i \leftarrow P_S^{min}, \hat{P}_S^i \leftarrow P_S^{min}$$

**Fin Tant que**

$$PasFin \leftarrow Vrai$$

$$\hat{F}^{op} \leftarrow Résoudre\left(P_S, (P_C - P_{SP}(N_{PV}, N_e, \theta))\right)$$

**Tant que**  $N_{PV} \leq N_{PV}^{max}$  **Faire**

**Tant que**  $N_e \leq N_e^{max}$  **Faire**

$$PasFin \leftarrow Vrai$$

**Tant que**  $PasFin$  **Faire**

$$\hat{F} \leftarrow Résoudre\left(P_S, (P_C - P_{SP}(N_{PV}, N_e, \theta))\right)$$

**Si**  $(\hat{F} < \hat{F}^{op})$  **Alors**  $\hat{P}_S \leftarrow P_S$

**Finsi**

**Fin Tant que**

$$N_e \leftarrow N_e + 1$$

**Fin Tant que**

$$N_{PV} \leftarrow N_{PV} + 1$$

**Fin Tant que**

Retourner  $(\hat{P}_S)$

---



## 4.6 Application numérique

Dans cette partie applicative, le but est d'explorer des stratégies pour minimiser la facture énergétique sur la base de l'approche théorique proposée dans la section précédente. L'attendu de la production énergétique locale est de réduire la facture globale, constituée du cumul du coût global du système et de la facture due à l'énergie fournie par le réseau électrique. Il s'agit de réduire l'énergie consommée et livrée par le fournisseur tout en optimisant la puissance souscrite. Cette étude de cas concerne le canal de Carpentras et les données sont ceux de la station "Oasis".

Dans une première analyse, nous considérons la charge constatée à partir de l'historique du canal de Carpentras, puis, nous étudierons l'impact d'un système de production locale sur la facture globale. Il convient de préciser que la charge constatée est le fruit d'une politique de gestion existante dont le but est de réduire le coût en procédant par une consommation maximale lors des périodes creuses et/ou par une exploitation d'un système de stockage, etc. Ainsi, dans cette étude, nous considérons deux situations différentes de fonctionnement. La première situation est celle où la politique de gestion prédéfinie est parfaitement respectée. Le but est d'analyser l'apport d'une production locale dans le cadre d'une gestion spécifique. Dans la deuxième situation, on traite le cas où la politique actuelle est remise en question en faveur d'une nouvelle approche tenant compte de la présence d'un système de production locale. Dans ce cas, on procède par un changement de la charge qui tient compte des besoins mais où la consommation est différée en fonction de la disponibilité énergétique du site considéré sans privilégier les périodes à tarifs réduits. En outre, et en vue d'effectuer une étude exhaustive, nous considérons pour chacune des situations une large gamme de produits disponibles voir dont la technologie est en devenir. Seules des limitations physiques admises par les experts sont respectées.

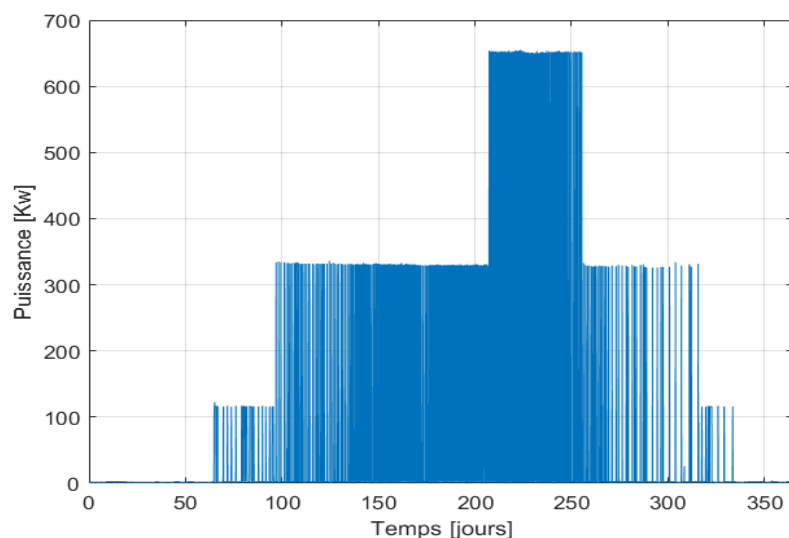


Figure 4.7 – Profil de charge-Station "Oasis"

Afin d'accomplir une étude tenant compte du potentiel énergétique, nous considérons deux systèmes différents et homogènes. Plus précisément, ces systèmes sont constitués de deux types de capteurs d'énergie (à savoir : panneaux photovoltaïques ou éoliennes). En outre, il est à noter que tout au long de cette analyse, le système est supposé fonctionner sans dispositif de stockage ni de stratégie de gestion autre qu'une exploitation maximale de l'énergie disponible en local.

Tout au long de cette partie, les résultats obtenus sont fondés sur la technique d'optimisation à base de l'approche OEP introduite dans le chapitre 2.

Dans une première analyse, et comme précisé ci-dessus, nous traitons le cas où la charge est celle constatée à travers l'historique et sans procéder à aucun changement du profil (voir Figure 4.7 ). Tout d'abord, nous examinons le cas d'un système de production constitué d'un réseau de  $N_{PV}$  panneaux photovoltaïques. Il convient de préciser que l'installation est supposée être réalisée sur un bassin de stockage d'eau. Le but est d'éviter un coup financier supplémentaire dû à un terrain d'installation du système. Ainsi, le nombre maximal de panneaux tient compte de cette contrainte, à savoir : la surface du bassin.

Ici, nous considérons plusieurs scénarios en fonction du coût des panneaux (à savoir, l'achat, l'installation, la maintenance, etc.) et de leurs rendements. Plus précisément, les prix considérés sont ceux du marché français actuel. Toutefois, nous tenons compte d'une évolution à la baisse qui peut atteindre une diminution allant jusqu'à 70 % dans un avenir proche. Par ailleurs, le rendement est supposé évoluer à la hausse et qui pourrait doubler jusqu'à atteindre des limitations physiques.

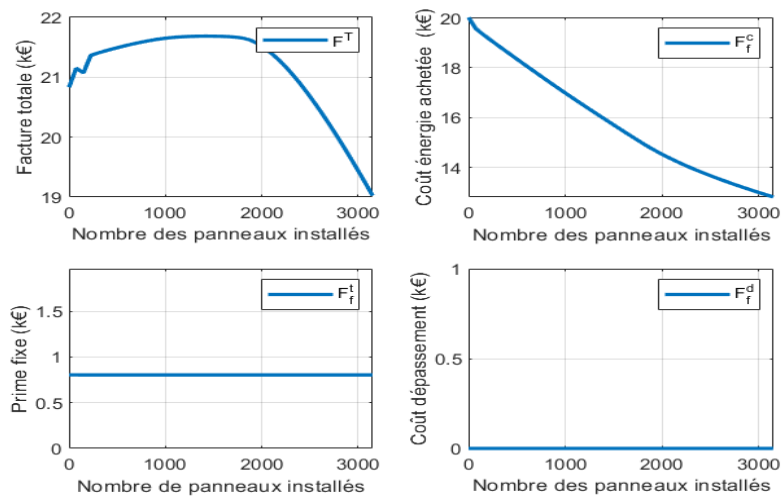


Figure 4.8 – Évolution de la facture–Réseau de panneaux (Rendement : 15 %, Prix : 1000 €)

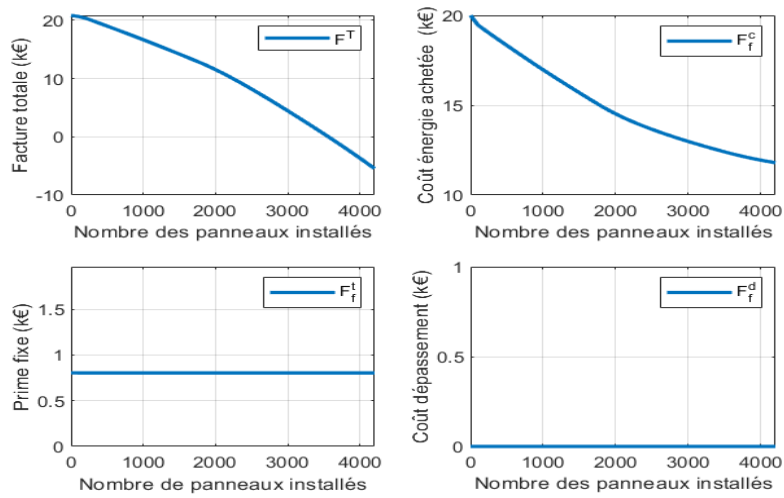


Figure 4.9 – Évolution de la facture–Réseau de panneaux (Rendement : 20 %, Prix : 500 €)

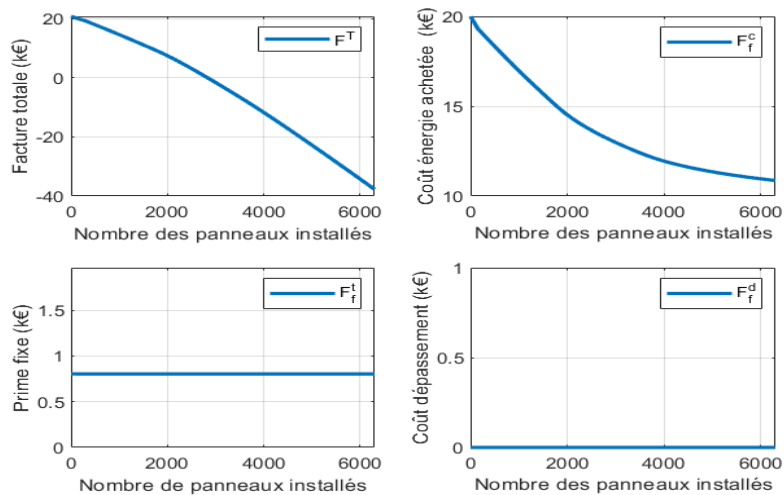


Figure 4.10 – Évolution de la facture–Réseau de panneaux (Rendement : 30 %, Prix : 300 €)

Les Figures 4.8, 4.9 et 4.10 donnent l'évolution des différents éléments qui caractérisent la facture (à savoir : la prime fixe, le dépassement, le coût de l'énergie consommée et la facture globale) en fonction du nombre des panneaux considérés et de l'installation.

Ces figures montrent que l'utilisation d'un système de production, constitué de panneaux photovoltaïques, permet une réduction significative du coût global de la facture sur toute la gamme de prix et de technologie. Cependant, la réduction est due à une baisse de l'énergie livrée par le fournisseur sans aucun changement de la puissance souscrite qui reste constante.

Une étude similaire est réalisée (voir Figures 4.11, 4.12 et 4.13) dans le cas d'un système de production constitué d'éoliennes. On constate des résultats semblables mais moins intéressants que ceux d'un réseau de panneaux photovoltaïques.

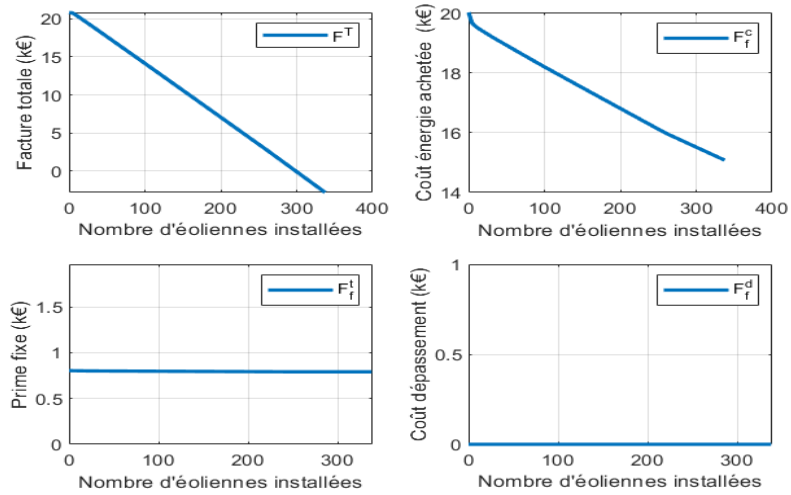


Figure 4.11 – Évolution de la facture–Réseau d'éoliennes (Rendement : 20 %, Prix : 1000 €)

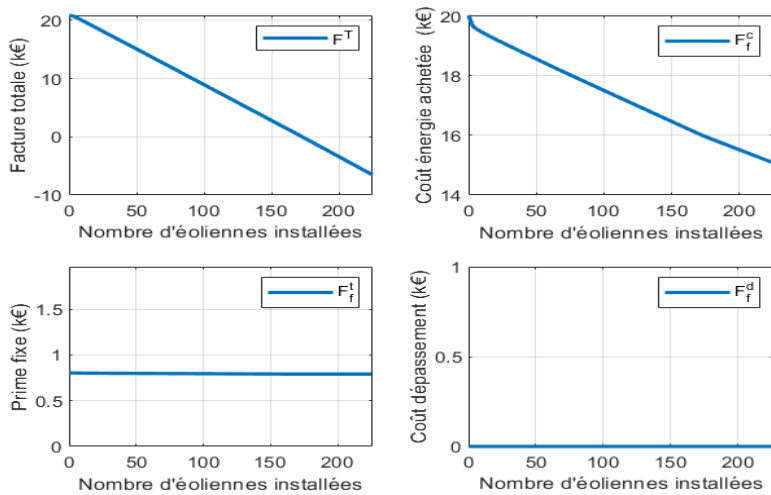


Figure 4.12 – Évolution de la facture–Réseau d'éoliennes (Rendement : 30 %, Prix : 500 €)

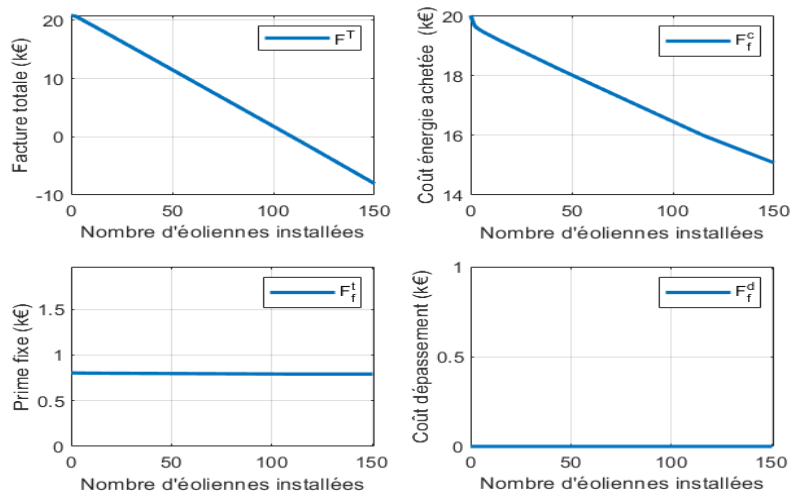


Figure 4.13 – Évolution de la facture–Réseau d'éoliennes (Rendement : 45 %, Prix : 300 €)

Dans le reste de cette partie, nous allons considérer le cas où la charge répond aux besoins mais où la planification de la consommation pourrait être adaptée au potentiel énergétique disponible sur le site considéré. La Figure 4.14 donne la charge réarrangée en fonction de l'énergie disponible. Par exemple, ceci peut être réalisé si la consommation, en vu du remplissage d'un bassin de stockage, s'effectue lors de la disponibilité énergétique et sans respecter la politique d'optimisation de la facture à travers une exploitation des périodes tarifaires, à coût réduit, offerts par le fournisseur. L'analyse montre que les résultats (voir Figures 4.10 - 4.14) peuvent être très intéressants. En effet, dans ce cas, nous observons des réductions significatives tant au niveau de l'énergie consommée qu'au niveau de la puissance souscrite. On note une nette réduction due au changement du profil.

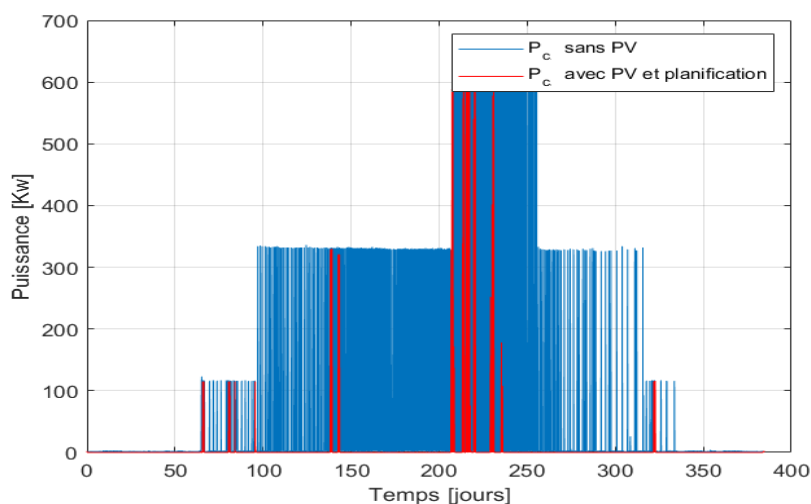


Figure 4.14 – Nouveau profil de charge-Station "Oasis"

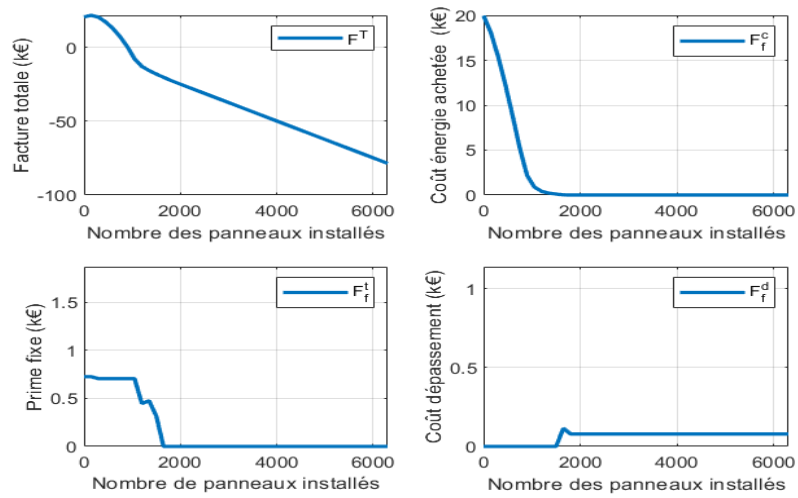


Figure 4.15 – Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau de panneaux (Rendement : 30 %, Prix : 300 €)

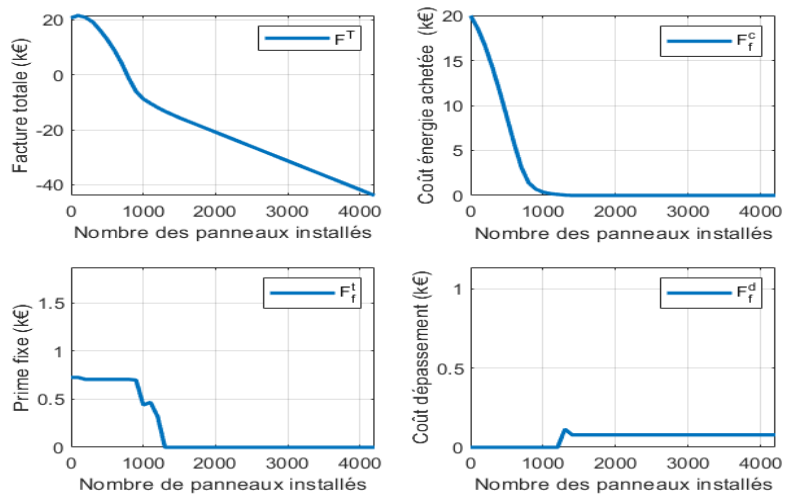


Figure 4.16 – Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau de panneaux (Rendement : 20 %, Prix : 500 €)

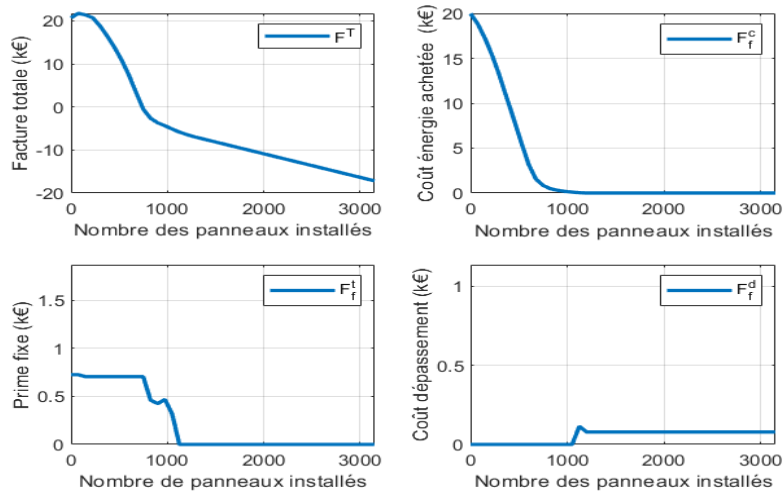


Figure 4.17 – Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau de panneaux (Rendement : 15 %, Prix : 1000 €)

Des performances similaires peuvent être observées (voir Figures 4.18, 4.19 et 4.20) dans le cas d'un réseau d'éoliennes.

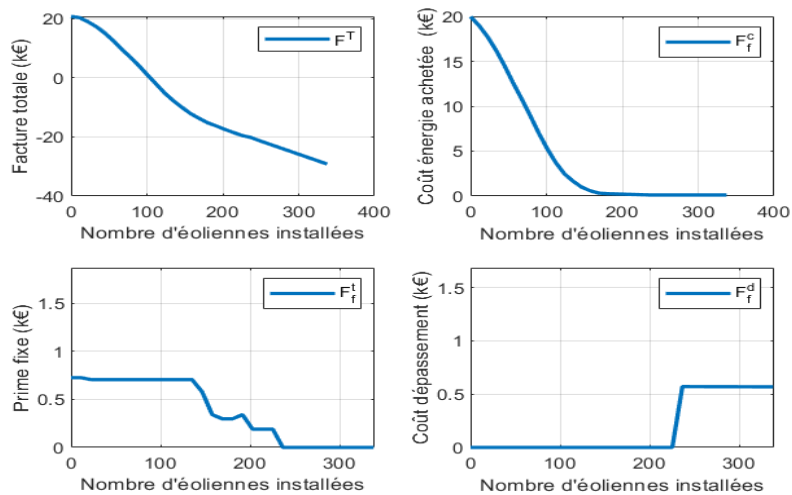


Figure 4.18 – Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau d'éoliennes (Rendement : 20 %, Prix : 1000 €)

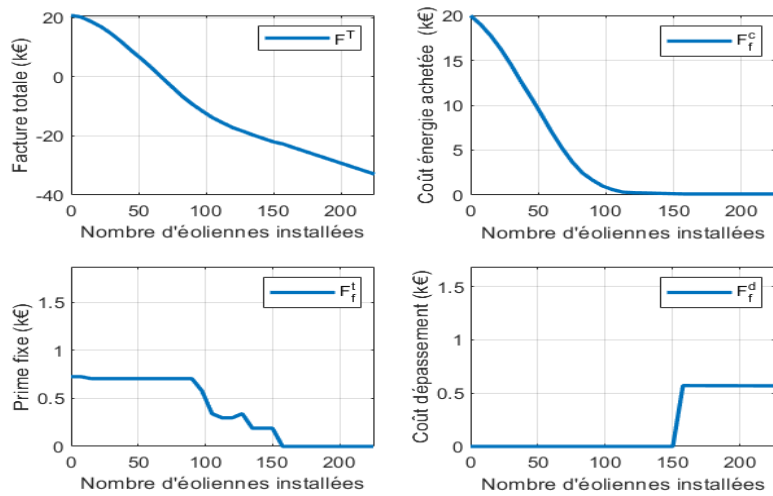


Figure 4.19 – Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau d'éoliennes (Rendement : 30 %, Prix : 500 €)

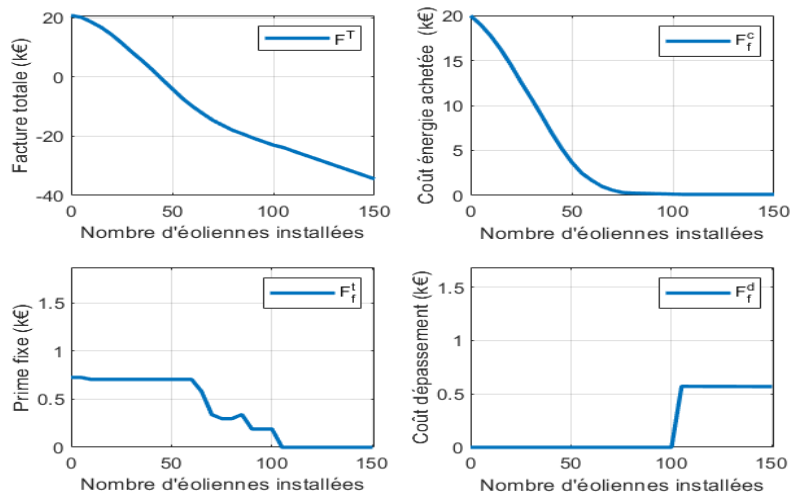


Figure 4.20 – Évolution de la facture–Nouvelle planification–Réseau d'éoliennes (Rendement : 45 %, Prix : 300 €)

En conclusion, ces résultats sont prometteurs et incitent à une analyse plus approfondie sur la planification des consommations. Par ailleurs, et afin d'exploiter d'avantage les ressources disponibles, il conviendrait d'explorer des systèmes hybrides dotés d'un système de stockage et régis par une stratégie de gestion énergétique adéquate.



## 4.7 Discussion

- 1) Dans le cadre du dimensionnement d'un système de production énergétique, l'aspect financier est un point fondamental. La démarche doit être guidée en partie par une analyse financière. Il s'agit de formaliser la problématique afin d'optimiser le coût et rendre le système viable et rentable sur toute la période considérée  $\mathcal{T}$  (voir par exemple [80]). En particulier, il convient de définir des contraintes qui tiennent compte du prix initial, de l'amortissement ainsi que du coût de la maintenance sur toute la période d'étude.
- 2) L'utilisation du système de stockage est fondamentale dans le cadre de la conception d'un système de production énergétique. Dans ce contexte, le stockage pourrait avoir au moins deux formes : le stockage électrique et le stockage dans les bassins d'eau. Par exemple, une première procédure de gestion consisterait à appliquer les règles simples suivantes :

**(R1)** La production énergétique est exploitée en priorité pour assurer le fonctionnement en période à forte tarification.

**(R2)** Le surplus de production est utilisé pour stocker l'eau dans les bassins lors des périodes à faible tarification.

**(R3)** Le reste de la production est stocké sous forme électrique.

## 4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une première analyse en vue de la conception d'un système de production énergétique en vue de diminuer la facture globale. Nous avons établi une stratégie qui permettrait de définir une topologie pour un système constitué de panneaux photovoltaïques et d'éoliennes. Nous avons illustré une adaptation de l'approche établie dans le chapitre 2 dans le cas où une production locale est disponible.

# Conclusion générale

Les travaux effectués dans cette thèse apportent une contribution à la problématique d'optimisation de la facture d'électricité des gros consommateurs. Le cas d'étude choisi pour ces travaux est le canal de Carpentras, un site représentatif des réseaux d'irrigation français. L'objectif est d'apporter des nouvelles solutions pour satisfaire la demande en eau avec un minimum de pertes et à moindre coût. Pour ce faire, nous avons proposé trois grandes pistes d'optimisation de la facture énergétique.

Dans la première partie de ce travail, nous avons donné une description globale des systèmes de distribution d'eau. L'objectif est de présenter d'une façon générale les ouvrages hydrauliques qui les composent et les enjeux énergétiques qui les concernent. En outre, nous avons présenté le canal de Carpentras.

Dans la deuxième partie, nous avons proposé une méthodologie pour optimiser les contrats souscrits auprès des fournisseurs d'électricité. Il s'agit de déterminer les puissances souscrites optimales qui minimisent la facture énergétique sous un certain nombre de contraintes. La résolution du problème d'optimisation sous contraintes a été faite par des outils informatiques et une méthode mathématique.

Dans la troisième partie, nous avons traité la problématique de diagnostic du réseau. L'objectif est de proposer une méthodologie qui permet de détecter et localiser les fuites. Cette méthodologie est basée sur l'analyse de la circulation d'eau dans un secteur donné. La disponibilité des données historiques du secteur, à savoir les volumes d'eau en jeu, est un élément indispensable pour l'analyse.

Dans la dernière partie de ce travail, nous avons abordé le problème de la conception d'un système de production énergétique locale à base d'énergie renouvelable. Il s'agit d'une étude de faisabilité sur l'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes de pompage. Le but est de fournir une aide à la décision sur la pertinence du projet en vue d'optimiser le coût énergétique global.

Ce travail a ouvert des voies d'étude intéressantes pour des recherches futures. Plus précisément, d'autres pistes d'optimisation de la facture énergétique sont envisageables. Parmi ces pistes, on peut citer la planification optimale du fonctionnement des pompes ou le maillage optimisé du réseau.

Il convient de noter que le fonctionnement des pompes peut être planifié durant les périodes tarifaires avantageuses. En outre, il est essentiel de définir une stratégie optimale de fonctionnement des pompes. Il s'agit de déterminer le nombre optimal de pompes en marche simultanée en fonction du temps global de fonctionnement.

Par ailleurs, la structure du réseau doit être ajustée aux besoins d'un fonctionnement optimal. Dans ce contexte, il est nécessaire de déterminer la meilleure trajectoire de la circulation d'eau entre les points de prélèvement et les points de livraison.

# Publications

Les travaux de cette thèse ont donné lieu à deux communications dans des conférences internationales et un article en préparation.

[1] Taher Marzougui, Seifeddine Ben Elghali, Rachid Outbib and Fabrice Doumenc. "An analysis of energetic cost for an irrigation network in France". 26th International Commission on Irrigation and Drainage, Montpellier, France 2015.

[2] Taher Marzougui, Seifeddine Ben Elghali, Rachid Outbib and Fabrice Doumenc. "A note on leakage diagnosis for an irrigation network". 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN), Chisinau, Moldova 2017.

[3] Taher Marzougui and Rachid Outbib. "Strategy of electricity bill optimization based on the power subscribed choice". en préparation.

# Bibliographie

- [1] Gilles GUERASSIMOFF et Nadia MAIZI. *Eau et Énergie : Destins croisés*. Presses des Mines, 2010.
- [2] L COLLET. « Capacité à satisfaire la demande en eau sous contraintes climatique et anthropique sur un bassin versant méditerranéen ». Thèse de doct. Université de Montpellier II, 2013.
- [3] René AMORETTI. « Modélisation et commande optimale d'un réseau de distribution d'eau potable : mise en oeuvre, test et étude des performances sur le réseau de Fium'Orbo ». Thèse de doct. Université Paul Cézanne, 1990.
- [4] Hicham OUARIT. « Réduction des systèmes à paramètres distribués. Application à la commande optimale robuste des canaux d'irrigation ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2004.
- [5] Elodie JAUMOILLÉ. « Contrôle de l'état hydraulique dans un réseau d'eau potable pour limiter les pertes ». Thèse de doct. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2009.
- [6] Yann VIALA. « Intégration d'une commande multivariable pour la régulation des canaux d'irrigation. Application à la branche d'Aix Nord du Canal de Provence ». Thèse de doct. ENGREF (AgroParisTech), 2004.
- [7] Igor BLINDU. « Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques ». Thèse de doct. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne ; Université Jean Monnet, 2004.
- [8] José B MARTINEZ-RODRIGUEZ, Idel MONTALVO, Joaquin IZQUIERDO et Rafael PÉREZ-GARCIA. « Reliability and tolerance comparison in water supply networks ». In : *Water resources management* 25.5 (2011), p. 1437–1448.
- [9] Olivier PILLER. « Modélisation du fonctionnement d'un réseau : analyse hydraulique et choix des mesures pour l'estimation de paramètres ». Thèse de doct. Bordeaux 1, 1995.
- [10] Nadia BEDJAOUÏ. « Supervision dynamique d'un canal d'irrigation ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2006.
- [11] Allan LAMBERT. « What do we know about pressure-leakage relationships in distribution systems ». In : *IWA Conf. n Systems approach to leakage control and water distribution system management*. 2001.
- [12] Jean-François DULHOSTE. « Contribution à la commande non linéaire de systèmes d'irrigation ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2001.
- [13] Xavier LITRICO et Vincent FROMION. « Analytical approximation of open-channel flow for controller design ». In : *Applied Mathematical Modelling* 28.7 (2004), p. 677–695.

- [14] JP LUC, J TARHOUNI, R CALVEZ, M LIMAN et C SABLAYROLLES. « Performances des stations de pompages en irrigation : application aux forages de petits périmètres irrigués de la plaine de Kairouan (Tunisie) et impact des dysfonctionnements sur le prix de l'eau ». In : *Séminaire sur la modernisation de l'agriculture irriguée*. IAV Hassan II. 2004, 18–p.
- [15] Didier MAQUIN et José RAGOT. *Diagnostic des systèmes linéaires*. Hermès science publications, 2000.
- [16] Olivier CHESNEAU. « Un outil d'aide à la maîtrise des pertes dans les réseaux d'eau potable : la modélisation dynamique de différentes composantes du débit de fuite ». Thèse de doct. Université Louis Pasteur Strasbourg 1, 2006.
- [17] Karim CLAUDIO. « Mise en place d'un modèle de fuite multi-états en secteur hydraulique partiellement instrumenté ». Thèse de doct. Université de Bordeaux, 2014.
- [18] Elias FARAH. « Detection of water leakage using innovative smart water system : application to SunRise Smart City demonstrator ». Thèse de doct. Lille 1, 2016.
- [19] JE VAN ZYL et CRI CLAYTON. « The effect of pressure on leakage in water distribution systems ». In : *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*. T. 160. 2. Thomas Telford Ltd. 2007, p. 109–114.
- [20] Pawel OSTAPKOWICZ. « Leak detection in liquid transmission pipelines using simplified pressure analysis techniques employing a minimum of standard and non-standard measuring devices ». In : *Engineering Structures* 113 (2016), p. 194–205.
- [21] MJ BRENNAN, PF JOSEPH, JM MUGGLETON et Y GAO. « Some recent research results on the use of acoustic methods to detect water leaks in buried plastic water pipes ». In : *Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton* (2008), p. 1–7.
- [22] Shantanu DATTA et Shibayan SARKAR. « A review on different pipeline fault detection methods ». In : *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 41 (2016), p. 97–106.
- [23] Sidra RASHID, Saad QAISAR, Husnain SAEED et Emad FELEMBAN. « A method for distributed pipeline burst and leakage detection in wireless sensor networks using transform analysis ». In : *International Journal of Distributed Sensor Networks* 10.7 (2014), p. 939657.
- [24] Bayeh ABERA, Belay BEZABIH et Derese HAILU. « Microbial quality of community drinking water supplies : A ten year (2004–2014) analyses in west Amhara, Ethiopia ». In : *Sustainability of Water Quality and Ecology* (2016).
- [25] Yael THIAUX. « Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides-Evaluation de la technologie Li-ion ». Thèse de doct. École normale supérieure de Cachan-ENSC, 2010.
- [26] Franck MARUEJOLS et Gaëtan DEFFONTAINES. « Optimisation énergétique du réseau hydraulique régional du Languedoc Roussillon ». In : *CIID 2015*. Oct. 2015.

- [27] Talel STAMBOULI, JM FACI et N ZAPATA. « Water and energy management in an automated irrigation district ». In : *Agricultural Water Management* 142 (2014), p. 66–76.
- [28] Adil M BAGIROV, AF BARTON, H MALA-JETMAROVA, A AL NUAIMAT, ST AHMED, Napsu SULTANOVA et John YEARWOOD. « An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling ». In : *Mathematical and Computer Modelling* 57.3 (2013), p. 873–886.
- [29] I Fernández GARCIA, R González PEREA, MA MORENO, P MONTESINOS, E Camacho POYATO et JA Rodríguez DIAZ. « Semi-arranged demand as an energy saving measure for pressurized irrigation networks ». In : *Agricultural Water Management* 193 (2017), p. 22–29.
- [30] MA MORENO, P PLANELLS, JI CORCOLES, JM TARJUELO et PA CARRION. « Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations ». In : *Biosystems Engineering* 102.1 (2009), p. 95–105.
- [31] MA FERNANDEZ, AL ZORITA, LA GARCÍA-ESCUADERO, O DUQUE, D MORÎNIGO, M RIESCO et M MUNOZ. « Cost optimization of electrical contracted capacity for large customers ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 46 (2013), p. 123–131.
- [32] JM YUSTA, IJ RAMIREZ-ROSADO, JA DOMINGUEZ-NAVARRO et JM PEREZ-VIDAL. « Optimal electricity price calculation model for retailers in a deregulated market ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 27.5-6 (2005), p. 437–447.
- [33] I AYMERICH, L RIEGER, R SOBHANI, D ROSSO et LI COROMINAS. « The difference between energy consumption and energy cost : modelling energy tariff structures for water resource recovery facilities ». In : *water research* 81 (2015), p. 113–123.
- [34] Ferran TORRENT-FONTBONA et B LOPEZ. « Power re-allocation for reducing contracted electric power costs ». In : *Energy and Buildings* 89 (2015), p. 112–122.
- [35] F CARRIÓN, JM TARJUELO, P CARRIÓN et MA MORENO. « Low-cost microirrigation system supplied by groundwater : An application to pepper and vineyard crops in Spain ». In : *Agricultural water management* 127 (2013), p. 107–118.
- [36] Chiung-Yao CHEN et Ching-Jong LIAO. « A linear programming approach to the electricity contract capacity problem ». In : *Applied Mathematical Modelling* 35.8 (2011), p. 4077–4082.
- [37] MT TSAY, WM LIN et JL LEE. « Optimal contracts decision of industrial customers ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 23.8 (2001), p. 795–803.
- [38] Tsung-Ying LEE et Chun-Lung CHEN. « Iteration particle swarm optimization for contract capacities selection of time-of-use rates industrial customers ». In : *Energy conversion and management* 48.4 (2007), p. 1120–1131.

- [39] Hong-Tzer YANG et Pai-Chun PENG. « Comparison of Optimization Algorithms for Contracted Capacity of Power Consumer with Self-Owned Generating Units ». In : *International Journal of Energy and Power* 1.2 (2012), p. 49–58.
- [40] Hong-Tzer YANG, Pai-Chun PENG et Chung-His HUANG. « Improved taguchi method based contracted capacity optimization for power consumer with self-owned generating units ». In : *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering*. Citeseer. 2007, p. 27–29.
- [41] Hong-Tzer YANG et Pai-Chun PENG. « Improved Taguchi method based contract capacity optimization for industrial consumer with self-owned generating units ». In : *Energy conversion and management* 53.1 (2012), p. 282–290.
- [42] Qi ZHANG, Arul SUNDARAMOORTHY, Ignacio E GROSSMANN et Jose M PINTO. « A discrete-time scheduling model for continuous power-intensive process networks with various power contracts ». In : *Computers & Chemical Engineering* 84 (2016), p. 382–393.
- [43] Angela PICCIARIELLO, Claudio VERGARA, Javier RENESES, Pablo FRIAS et Lennart SÖDER. « Electricity distribution tariffs and distributed generation : Quantifying cross-subsidies from consumers to prosumers ». In : *Utilities Policy* 37 (2015), p. 23–33.
- [44] KARA MOHAMED. « Optimisation de la consommation de l'énergie électrique dans les éléments du système d'alimentation des entreprises industriels. » Thèse de doct. Université Badji Mokhtar de Annaba.
- [45] Emilio GÓMEZ-VILLALVA et Andrés RAMOS. « Optimal energy management of an industrial consumer in liberalized markets ». In : *IEEE Transactions on Power Systems* 18.2 (2003), p. 716–723.
- [46] Boris BOUTOUX. « Techniques hybrides de recherche exacte et approchée : application à des problèmes de transport ». In : Avignon. 2008.
- [47] Laila DJEROU. « Apprentissage et adaptation dans les Systèmes bio-inspirés ». Thèse de doct. Université Mohamed Khider Biskra, 2010.
- [48] Ying LIU, Haibo DONG, Niels LOHSE et Sanja PETROVIC. « A multi-objective genetic algorithm for optimisation of energy consumption and shop floor production performance ». In : *International Journal of Production Economics* 179 (2016), p. 259–272.
- [49] Peio LOUBIERE. « Amélioration des métaheuristiques d'optimisation à l'aide de l'analyse de sensibilité ». Thèse de doct. Paris Est, 2016.
- [50] Mohamed Amin BENATIA. « Optimisation multi-objectives d'une infrastructure réseau dédiée aux bâtiments intelligents ». Thèse de doct. Rouen, INSA, 2016.
- [51] Abbas EL DOR. « Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique ». Thèse de doct. Université Paris-Est, 2012.
- [52] Yann COOREN. « Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par essaim particulaire : application en génie médical et en électronique ». Thèse de doct. Université Paris-Est, 2008.

- [53] Jean-Baptiste HIRIART-URRUTY. *Optimisation et analyse convexe*. EDP sciences, 2012.
- [54] Myrna V CASILLAS, Vicenç PUIG, Luis E GARZA-CASTANON et Albert ROSICH. « Optimal sensor placement for leak location in water distribution networks using genetic algorithms ». In : *Sensors* 13.11 (2013), p. 14984–15005.
- [55] Ramon PEREZ, Gerard SANZ, Vicenç PUIG, Joseba QUEVEDO, Miquel Angel Cuguero ESCOFET, Fatiha NEJJARI, Jordi MESEGUER, Gabriela CEMBRANO, Josep M Mirats TUR et Ramon SARRATE. « Leak localization in water networks : a model-based methodology using pressure sensors applied to a real network in Barcelona [applications of control] ». In : *IEEE Control Systems* 34.4 (2014), p. 24–36.
- [56] Ranko S PUDAR et James A LIGGETT. « Leaks in pipe networks ». In : *Journal of Hydraulic Engineering* 118.7 (1992), p. 1031–1046.
- [57] Marco FERRANTE et Bruno BRUNONE. « Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 1. Harmonic analysis ». In : *Advances in Water Resources* 26.1 (2003), p. 95–105.
- [58] R PÉREZ, V PUIG, J PASCUAL, A PERALTA, E LANDEROS et Ll JORDANAS. « Pressure sensor distribution for leak detection in Barcelona water distribution network ». In : *Water science and technology : water supply* 9.6 (2009), p. 715–721.
- [59] Andrew F COLOMBO, Pedro LEE et Bryan W KARNEY. « A selective literature review of transient-based leak detection methods ». In : *Journal of Hydro-environment Research* 2.4 (2009), p. 212–227.
- [60] Nadia BEDJAOUI et Erik WEYER. « Algorithms for leak detection, estimation, isolation and localization in open water channels ». In : *Control Engineering Practice* 19.6 (2011), p. 564–573.
- [61] José RAGOT et Didier MAQUIN. « Fault measurement detection in an urban water supply network ». In : *Journal of Process Control* 16.9 (2006), p. 887–902.
- [62] Elias FARAH et Isam SHAHROUR. « Leakage Detection Using Smart Water System : Combination of Water Balance and Automated Minimum Night Flow ». In : *Water Resources Management* (2017), p. 1–13.
- [63] M FANTOZZI et A LAMBERT. « Legitimate night use component of minimum night flows initiative ». In : *IWA Water Loss Conference* (2010).
- [64] Ernani SARTORI. « A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces ». In : *Solar energy* 68.1 (2000), p. 77–89.
- [65] Runsheng TANG et Y ETZION. « Comparative studies on the water evaporation rate from a wetted surface and that from a free water surface ». In : *Building and Environment* 39.1 (2004), p. 77–86.
- [66] Mathew SATHYAJITH et Pandey KP. « Analysis of wind regimes for energy estimation ». In : *Renewable energy* 25.3 (2002), p. 381–399.
- [67] Mathew SATHYAJITH. « Fundamentals, Resource Analysis and Economics ». In : *Wind Energy* (2006).



- [68] Cindie HÉBERT, Daniel CAISSIE, Mysore G SATISH et Nassir EL-JABI. « Predicting hourly stream temperatures using the equilibrium temperature model ». In : *Journal of Water Resource and Protection* 7.04 (2015), p. 322.
- [69] Daniel CAISSIE, Mysore G SATISH et Nassir EL-JABI. « Predicting water temperatures using a deterministic model : Application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada) ». In : *Journal of Hydrology* 336.3-4 (2007), p. 303–315.
- [70] O MOHSENI et HG STEFAN. « Stream temperature/air temperature relationship : a physical interpretation ». In : *Journal of hydrology* 218.3-4 (1999), p. 128–141.
- [71] Daniel CAISSIE, Mysore G SATISH et Nassir EL-JABI. « Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada) ». In : *Hydrological Processes : An International Journal* 19.11 (2005), p. 2137–2159.
- [72] Kévin LARNIER, Hélène ROUX, Denis DARTUS et Olivier CROZE. « Water temperature modeling in the Garonne River (France) ». In : *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems* 398 (2010), p. 04.
- [73] Farah KOJOK, Farouk FARDOUN, Rafic YOUNES et Rachid OUTBIB. « Hybrid cooling systems : A review and an optimized selection scheme ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65 (2016), p. 57–80.
- [74] Seifeddine BEN ELGHALI, Rachid OUTBIB et Mohamed BENBOUZID. « Selecting and optimal sizing of hybridized energy storage systems for tidal energy integration into power grid ». In : *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* (), p. 1–10.
- [75] Héloïse DUTRIEUX. « Méthodes pour la planification pluriannuelle des réseaux de distribution. Application à l'analyse technico-économique des solutions d'intégration des énergies renouvelables intermittentes ». Thèse de doct. Ecole Centrale de Lille, 2015.
- [76] Madeleine MCPHERSON et Samiha TAHSEEN. « Deploying storage assets to facilitate variable renewable energy integration : the impacts of grid flexibility, renewable penetration, and market structure ». In : *Energy* (2018).
- [77] Xiaoyang PENG et Jean WILD. « Innovative Microgrid Solution for Renewable Energy Integration within the REIDS Initiative ». In : *Energy Procedia* 143 (2017), p. 599–604.
- [78] P POULET et R OUTBIB. « Energy production for dwellings by using hybrid systems based on heat pump variable input power ». In : *Applied Energy* 147 (2015), p. 413–429.
- [79] Farah KOJOK, Rachid OUTBIB, Rafic YOUNES et Farouk FARDOUN. « Optimal sizing of hybrid cooling system ». In : *IMACCA*. 2017.
- [80] David TSUANYO. « Approches technico-économiques d'optimisation des systèmes énergétiques décentralisés ». Thèse de doct. Perpignan, 2015.

# Annexe 1

N° Station	Nom de stations	Mode de Fonctionnement	Capteurs disponibles						Fonctionnement des pompes				Volume d'eau	
			Pression (bar)		Niveau du bassin(m)		Débit (l/s)		HF	TF (h)	ND	CC	VP (m³)	VF (m³)
			Année	T	Année	T	Année	T	Année	Année	Année	Année	Année	Année
<i>Partie 1 du réseau : les Terrasses du Ventoux</i>														
S1	Sainte André 1	H	-	-	-	-	-	-	3	3	3	1	-	15
S2	Sainte André 2	H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15
S3	La Masque	H	-	-	3	20	-	-	3	3	3	1	-	15
S4	N.D. des Anges	H	-	-	3	NR	-	-	3	3	3	1	-	15
S5	Htes Briguières	H	-	-	3	NR	-	-	3	3	3	1	-	15
S6	Swan	H	-	-	5	20	-	-	-	-	-	-	-	-
S7	Oasis	H	-	-	5	60	-	-	5	-	-	3	-	15
S8	L'Euze	H	-	-	5	60	-	-	5	5	-	1	-	15
S9	Les Conils	H	-	-	3	15	-	-	3	3	-	1	-	10
S10	Bedoin	H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S11	Sainte Colombe	H	-	-	6	NR	-	-	6	6	6	-	2	7
<i>Partie 2 du réseau : les Coteaux de la Nesque</i>														
S12	St Philippe BS	H	-	-	-	-	-	-	3	3	3	-	-	15
S13	St Philippe HS	H	-	-	3	20	-	-	3	3	3	1	-	15
S14	Malepompe	H	-	-	2	20	-	-	3	3	3	1	-	15
S15	Le Gres	H	-	-	2	20	-	-	3	3	3	1	-	15
S16	Le Vas	H	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S17	Les Ferrailles	P	6	NR	-	-	6	20	-	6	6	-	6	9
S18	Grands Fonts	H	-	-	5	20	-	-	5	-	-	2	-	15
<i>Partie 3 du réseau : le reste (stations éparpillées)</i>														
S19	Saumane	H	-	-	14	-	-	-	14	-	-	1	-	15
S20	Jonguiers	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S21	Saurel	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S22	Grande Bastide	H	-	-	5	20	-	-	5	-	-	-	-	15
S23	Le Lac	P	5	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12
S24	Soumille	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S25	Les Arènes	P	1	1	-	-	1	1	-	-	5	-	-	5
S26	Sarrians	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S27	Sainte Hilaire	P	-	-	-	-	1	60	-	1	1	2	-	15
S28	Sudre	P	-	-	-	-	2	NR	-	3	3	-	-	-
S29	Candice	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S30	Catherine	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S31	Sainte Famille	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S32	Les Saffras	P	2	5	-	-	1	15	2	5	2	-	2	-
S33	Marianne	P	1	NR	-	-	2	15	2	2	2	1	-	15
S34	Bernard . L	P	1	NR	-	-	1	15	1	1	1	-	-	1
S35	Les Brotteaux	H	-	-	5	20	-	-	3	-	3	2	3	15

Table 1 – Informations disponibles par station

Abréviations	Significations
H	Niveau du bassin
P	Plage de pression
T	Période d'échantillonnage en minutes
VP	Volume journalier pompé en mètre cube
VF	Volume annuel facturé en mètre cube
HF	Historique de fonctionnement (marche/arrêt)
TF	Temps de fonctionnement journalier
ND	Nombre de démarrages journaliers
NR	Non régulier : le capteur enregistre un point lorsque la variation de la grandeur à suivre atteint un seuil prédéfini indépendamment du temps
-	Information manquante

Table 2 – Liste des abréviations