

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'hydraulique

Laboratoire de recherche en sciences de l'eau

Thèse de Doctorat en Science

Etude de la vulnérabilité des réseaux d'alimentation en eau potable –surconsommation énergétique des stations de pompage

Ahcene BOUACH

Sous la direction de Mme Saadia BENMAMAR Professeur à l'ENP

Présentée et soutenue publiquement le 28/02/2019

Composition du jury

Président	Mr. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
Promotrice	Mme. Saadia BENMAMAR	Professeur	ENP
Examinatrice	Mme. Douja SOUAG	Professeur	USTHB
Examinateur	Mr. Ali BERREKSI	MCA	Univ. de Bejaïa
Examinateur	Mr. Abdelwahab LEFKIR	MCA	ENSTP
Invité	Mr. Salah Eddine TACHI	MCB	ENP
Invité	Mr. Abdelkrim BOUKHARI	Ingénieur	SEAAL

ENP : 2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'hydraulique

Laboratoire de recherche en sciences de l'eau

Thèse de doctorat en

Etude de la vulnérabilité des réseaux d'alimentation en eau potable –surconsommation énergétique des stations de pompage

Ahcene BOUACH

Sous la direction de Mme Saadia BENMAMAR Professeur à l'ENP

Présentée et soutenue publiquement le 28/02/2019

Composition du jury

Président	Mr. Abdelmalek BERMAD	Professeur	ENP
Promotrice	Mme. Saadia BENMAMAR	Professeur	ENP
Examinatrice	Mme. Douja SOUAG	Professeur	USTHB
Examineur	Mr. Ali BERREKSI	MCA	Univ. de Bejaïa
Examineur	Mr. Abdelwahab LEFKIR	MCA	ENSTP
Invité	Mr. Salah Eddine TACHI	MCB	ENP
Invité	Mr. Abdelkrim BOUKHARI	Ingénieur	SEAAL

ENP : 2019

DEDICACES

À ma famille, à mes amis

REMERCIEMENT

En premier lieu je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à ma directrice de thèse BENMAMAR Saadia professeur à l'école nationale polytechnique pour son apport inconditionnel sur tous les plans, pour avoir accepté de m'encadrer malgré la difficulté de la tâche et ses nombreuses charges. Pour ses conseils, ses encouragements et sa patience tout au long du parcours ayant mené au stade final de la thèse. J'ai eu la chance de travailler avec elle et je suis reconnaissant pour tout ce qu'elle m'apprit.

J'exprime ma profonde gratitude également au professeur BERMAD Abdelmalek pour son aide inestimable en tant que chef du département d'hydraulique de l'école nationale polytechnique, et également pour m'avoir fait l'immense honneur d'accepter de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens à remercier chaleureusement également, Mme SOUAG Douja professeur à l'université de Sciences et Technologies Houari Boumediene, M. BERREKSI Ali enseignant à l'université de Bejaïa, et M. LEFKIR Abdelwahab enseignant à l'école nationale supérieure des travaux publics, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury. Je leurs exprimes toute ma reconnaissance pour l'intérêt porté à ce travail.

Un grand merci à M. TACHI Salah Eddine enseignant à l'école nationale et Mr. BOUKHARI Abdelkrim ingénieur à La SEAAL pour avoir accepté de débattre ma soutenance en tant qu'invités.

Je remercie également tous les membres du corps professoral et administratif de l'école nationale polytechnique, du département d'hydraulique et du laboratoire LRS eau pour leur sympathie et leur convivialité.

Mes remerciements s'adressent également à tout le personnel de l'unité SEAAL Dar El Beida et particulièrement à M. RICHA Boualem directeur de l'unité de m'avoir accueilli dans un cadre aussi agréable et chaleureux.

En fin, je présente mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص : يمثل الاستهلاك المفرط للطاقة لمحطات الضخ مشكلة رئيسية من أجل تسيير فعال و مستدام لشبكات إمدادات مياه الشرب، حيث يمكن أن تؤدي عواقب مثل هذه الحالة إلى مشاكل فنية واقتصادية لمسيري هذه المحطات. للتعامل مع هذه المشكلة، قمنا خلال هذه الدراسة بتطوير نموذج ترشيدي (RNAG) يعتمد على الخوارزميات الجينية. كما يقترن نموذج الترشيدي (AG) بنموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) للتنبؤ بكمية الطلب على الماء اللازم لحساب قيود الترشيدي. لإثبات صحة نموذج الترشيدي، قمنا بمقارنته بثلاث سيناريوهات ضخ أخرى. حيث أنه، إلى جانب التخطيط الذي المستخدم من طرف مسيري قطاع المياه، لدينا مخططان آخران تم إنشاؤهما عن طريق نموذجين للتحكم في التدفق قمنا بتطويرهما. تم إجراء تحليل وتفسير النتائج من خلال قائمة مؤشرات أداء الطاقة التي قمنا أيضا بتطويرها. هذه المؤشرات تجعل من الممكن تقييم استهلاك الطاقة وإجراء عملية تشخيص للطاقة للكشف عن مصدر العطل.

الكلمات الدالة : محطات الضخ، تحسين الطاقة، التنبؤ بالطلب على المياه، مؤشرات أداء الطاقة.

ABSTRACT : The overconsumption of energy from pumping stations is a major problem for the effective and sustainable management of drinking water systems, and the consequences of such a situation can lead to technical and economic problems for the managers of these stations. To cope with this problem, we have developed through this study an optimization model (NNGA) based on genetic algorithms (GA). The optimization model is coupled to an Artificial Neural Network (ANN) model used to predict the water demand needed to calculate optimization constraints. To validate the optimization model, we compared it to three other pumping scenarios. In fact, besides the planning used by the water services, we have two other schedules generated by two flow control models that we have developed. The analysis and interpretation of the results were performed by a list of energy performance indicators that we have developed. These indicators make it possible to evaluate energy consumption and conduct an energy diagnostic process to detect the source of malfunction.

Key words : pumping stations, energy optimization, water demand forecasting, energy performance

Résumé : La surconsommation énergétique des stations de pompage représente un problème majeur pour une gestion efficace et durable des réseaux d'alimentation en eau potable, où les conséquences d'une telle situation peuvent engendrer des problèmes techniques et économiques pour les gestionnaires de ces stations. Pour faire face à cette problématique, nous avons développé à travers cette étude un modèle d'optimisation (RNAG) basé sur un modèle d'algorithmes génétiques (AG) couplé à un modèle de réseaux de neurones artificiels (RNA). Le modèle RNA est utilisé pour la prévision de la demande en eau nécessaire pour le calcul des contraintes d'optimisation. Pour valider le modèle d'optimisation, nous l'avons comparé à trois scénarii de pompage. En effet, outre le planning employé par les services de l'eau, nous avons deux autres plannings générés par deux modèles de régulation de débit que nous avons élaboré. L'analyse et l'interprétation des résultats ont été effectuées par une liste d'indicateurs de performance énergétiques que nous avons développée. Ces indicateurs permettent d'évaluer la consommation énergétique et de mener un processus de diagnostic énergétique afin de détecter la source de dysfonctionnement.

Mots clés : stations de pompage, optimisation énergétique, prévision de la demande en eau, indicateurs de performance énergétique.

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des notations	
Introduction	16
1 Méthodes de régulation des stations de pompage.....	20
1.1 Description générale d'une station de pompage.....	20
1.1.1 Courbe de pression d'une pompe centrifuge	21
1.1.2 Courbe de rendement.....	22
1.1.3 Courbe caractéristique d'une conduite	22
1.2 Consommation énergétique d'une station de pompage.....	23
1.3 Paramètres déterminants de la consommation énergétique.....	24
1.3.1 Paramètres de conception.....	24
1.3.2 Paramètres de fonctionnement	26
1.4 Méthodes de réduction de l'énergie de pompage	28
1.4.1 Méthodes d'optimisation du planning de pompage.....	29
1.4.2 Redimensionnement de l'installation	29
1.4.3 Méthode de régulation du débit de pompage.....	31
1.5 Types des données d'entrées d'une méthode de régulation	36
1.5.1 Niveau d'eau dans le réservoir	36
1.5.2 Pression de refoulement	36
1.5.3 Débit de consommation.....	37
1.6 Modélisation de la régulation du pompage par délestage.....	37
1.6.1 Modèle de régulation multi-volumes de commande RV.....	38
1.6.2 Modèle de régulation progressif RVP	40
2 Modèles d'optimisation d'un planning de pompage	45
2.1 Etat d'art sur les travaux d'optimisation des systèmes de pompage	46
2.2 Description du problème d'optimisation.....	47
2.3 Caractéristiques du modèle d'optimisation	48
2.3.1 Horizon et pas de temps d'optimisation	48
2.3.2 Variables d'optimisation	48
2.3.3 Contraintes d'optimisation	49
2.3.4 Fonction objectif.....	50
2.4 Types de modèle d'optimisation	51
2.4.1 Modèle à long terme.....	51
2.4.2 Modèle à court terme.....	52
2.5 Notion de complexité	52
2.6 Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation	53

2.6.1	Méthodes exactes	53
2.6.2	Approches heuristiques	57
2.6.3	Méta-heuristique.....	59
3	Optimisation par la méthode des algorithmes génétiques	67
3.1	Optimisation par les AG dans le domaine d'eau potable	67
3.2	Description d'un algorithme génétique	68
3.3	Principe d'un algorithme génétique.....	70
3.4	Codage et représentation des variables d'un algorithme génétique.....	71
3.4.1	Codage binaire.....	72
3.4.2	Codage gray.....	73
3.4.3	Codage réel.....	74
3.4.4	Codage entier.....	75
3.5	Gestion des contraintes d'optimisation	76
3.6	Etapas de calcul d'algorithme génétique.....	77
3.6.1	Génération de la population initiale	77
3.6.2	Evaluation des individus (Fonction Fitness)	78
3.6.3	Sélection des individus	78
3.6.4	Opérateurs génétiques	81
3.6.5	Remplacement	84
3.6.6	Critère d'arrêt	84
4	Prévision de la demande en eau potable.....	87
4.1	Types de consommation d'eau potable	87
4.1.1	Consommation domestique	88
4.1.2	Consommation agricole.....	89
4.1.3	Consommation industrielle.....	90
4.2	Variation temporelle de la demande en eau	90
4.2.1	Variation annuelle de la demande en eau	91
4.2.2	Variation mensuelle de la demande en eau	91
4.2.3	Variation journalière de la demande en eau	91
4.2.4	Variation horaire de la demande en eau	92
4.3	Facteurs déterminants de la demande en eau potable.....	93
4.3.1	Prix de l'eau.....	93
4.3.2	Facteurs climatiques	93
4.3.3	Facteurs socio-économiques.....	94
4.3.4	Caractéristiques de l'habitat	94
4.4	Prévision de la demande en eau.....	95
4.4.1	Applications de la prévision de la demande en eau.....	95
4.4.2	Horizon de prévision de la demande en eau	96

4.4.3	Méthodes de prévision de la demande en eau	97
5	Prévision de la demande en eau par les réseaux de neurones artificiels.....	104
5.1	Etat d'art de la prévision de la demande en eau par Les RNA.....	104
5.2	Description d'un réseau de neurones artificiel	106
5.2.1	Historique des RNA	106
5.2.2	Définition d'un réseau de neurones artificiels.....	107
5.2.3	Neurone biologique	107
5.2.4	Neurone formel.....	108
5.2.5	Fonction d'activation.....	108
5.2.6	Connexions entre les neurones	109
5.3	Structure des réseaux de neurones artificiels.....	110
5.3.1	Réseaux de neurones non bouclés	110
5.3.2	Réseaux de neurones bouclés	111
5.4	Paramètres des réseaux de neurones à couches.....	111
5.4.1	Choix de la fonction d'activation	111
5.4.2	Nombre de neurones d'entrée.....	112
5.4.3	Nombre de couches cachées	112
5.4.4	Nombre de neurones dans chaque couche cachée	112
5.4.5	Nombre de réseaux de neurones.....	113
5.5	Variables d'entrée.....	113
5.6	Apprentissage des RNA	114
5.6.1	Apprentissage supervisé	114
5.6.2	Apprentissage non supervisé	117
5.6.3	Problème de sur-apprentissage et sous-apprentissage	117
5.7	Evaluation de la qualité de prévision.....	118
5.7.1	Erreur absolue moyenne MAE	118
5.7.2	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE	119
5.7.3	Coefficient de corrélation R	119
5.7.4	Moyenne des erreurs absolues en pourcentage MAPE	120
6	Indicateurs de performance énergétique d'un système de pompage.....	123
6.1	Définition d'un indicateur de performance	123
6.1.1	Critères d'élaboration des indicateurs de performance	124
6.1.2	Limites des indicateurs de performance	124
6.2	Indicateurs de performance existants	124
6.2.1	Indicateur d'énergie volumique.....	124
6.2.2	Indicateur d'énergie manométrique.....	125
6.3	Détermination des valeurs de référence	125
6.3.1	Valeurs de référence des paramètres de fonctionnement	126

6.3.2	Valeurs de référence des paramètres de conception	127
6.3.3	Valeurs de référence globale	131
6.4	Indicateurs de conception énergétique du système de pompage	131
6.4.1	Evaluation de la hauteur géométrique du système	132
6.4.2	Evaluation des paramètres des pertes de charge du système.....	133
6.4.3	Evaluation globale de conception.....	135
6.5	Indicateurs de fonctionnement énergétique du système de pompage.....	136
6.5.1	Evaluation détaillée des paramètres de fonctionnement.....	137
6.5.2	Evaluation globale du fonctionnement énergétique du système	138
6.6	Evaluation énergétique globale	139
6.6.1	Indicateurs global d'énergie IGE.....	140
6.6.2	Pertes énergétiques globales.....	140
6.6.3	Taux des pertes énergétiques globales	140
6.7	Représentation arborescente des indicateurs de performance énergétique.....	141
7	Application de l'outil développé à la station de pompage de Rassauta	145
7.1	Description de la zone d'étude	145
7.1.1	Description de la station de pompage.....	146
7.1.2	Réseau de distribution de Rassauta	148
7.1.3	Château d'eau d'El Hamiz.....	148
7.1.4	Caractéristiques de la demande en eau	149
7.2	Présentation de l'outil de gestion RNAG.....	150
7.2.1	Modèle de prévision de la demande en eau RNA	150
7.2.2	Modèle d'optimisation énergétique AG	154
7.3	Résultats des scénarii de pompage	159
7.3.1	Prévision de la demande en eau.....	159
7.3.2	Evolution de la réserve d'eau des différents plannings	159
7.3.3	Consommation énergétique des différents plannings.....	162
7.3.4	Indicateurs de performances énergétiques IPE.....	163
7.3.5	Représentation arborescente.....	169
	Conclusion générale	173
	Perspectives.....	175
	Bibliographie.....	177

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1.1</i> : pompes en service et de secours en fonction de débit	32
<i>Tableau 1.2</i> : optimisation d'énergie par combinaison des pompes en parallèle	33
<i>Tableau 3.1</i> : vocabulaire des algorithmes génétiques.....	70
<i>Tableau 3.2</i> : codage binaire et gray sur 4 bits.....	74
<i>Tableau 4.1</i> : consommation d'eau par les différents secteurs en Algérie.....	88
<i>Tableau 4.2</i> : consommation d'eau moyenne par type de culture.....	89
<i>Tableau 4.3</i> : consommation moyenne d'eau par type d'industrie.....	90
<i>Tableau 4.4</i> : tarif de base d'eau potable en Algérie	93
<i>Tableau 4.5</i> : modèles de prévision et leurs horizons.....	96
<i>Tableau 5.1</i> : types de fonction d'activation.....	109
<i>Tableau 6.1</i> : différentes formules de calcul de diamètre optimal.....	128
<i>Tableau 6.2</i> : indicateurs de performance énergétique de conception.....	132
<i>Tableau 6.3</i> : indicateurs de performance énergétique de fonctionnement.....	136
<i>Tableau 6.4</i> : indicateurs de performance énergétique global.....	139
<i>Tableau 6.5</i> : panel d'indicateurs de performance énergétique.....	141
<i>Tableau 7.1</i> : caractéristique du point le plus défavorable (Château d'eau d'El Hamiz).....	149
<i>Tableau 7.2</i> : critères d'évaluation durant la phase d'apprentissage.....	152
<i>Tableau 7.3</i> : critères d'évaluation durant la phase de validation.....	152
<i>Tableau 7.4</i> : indicateurs de performance énergétique globale.....	163
<i>Tableau 7.5</i> : évaluation globale de la conception.....	164
<i>Tableau 7.6</i> : évaluation de la hauteur géométrique.....	164
<i>Tableau 7.7</i> : évaluation de la résistance hydraulique.....	165
<i>Tableau 7.8</i> : indicateurs de performance énergétique de fonctionnement.....	165

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1-1</i> : courbes caractéristiques d'un système de pompage.....	21
<i>Figure 1-2</i> : différentes formes de la courbe caractéristique en fonction du type de la roue	22
<i>Figure 1-3</i> : modification de la courbe du système par vannes de régulation.....	23
<i>Figure 1.4</i> : paramètres de conception et de fonctionnement d'une station de pompage.....	26
<i>Figure 1-5</i> : différents débits d'un système de pompage.....	27
<i>Figure 1-6</i> : régulation par vannes	33
<i>Figure 1-7</i> : régulation par variation de vitesse.....	34
<i>Figure 1-8</i> : régulation de débit par variation de vitesse.....	35
<i>Figures 1-9</i> : paramètres d'évaluation de la demande en eau.....	36
<i>Figure 1-10</i> : volumes de commande du modèle RV.....	38
<i>Figure 1-11</i> : principe du modèle de régulation progressif RVP.....	40
<i>Figure 2-1</i> : description du modèle d'optimisation.....	48
<i>Figure 2-2</i> : variables d'optimisation du modèle.....	49
<i>Figure 2-3</i> : détermination graphique des valeurs de variables d'optimisation.....	49
<i>Figure 2-4</i> : influence des contraintes d'optimisation sur la fonction objectif.....	50
<i>Figure 2-5</i> : optimum local et global d'une fonction.....	53
<i>Figure 2-6</i> : comportement des fourmis pour la recherche du chemin optimal.....	64
<i>Figure 3-1</i> : structure générale d'un algorithme génétique	69
<i>Figure 3-2</i> : principe de fonctionnement d'un algorithme génétique.....	71
<i>Figure 3-3</i> : différents types de codage.....	72
<i>Figure 3-4</i> : codage d'une solution sous forme de chromosome.....	75
<i>Figure 3-5</i> : exemple d'un codage entier.....	75
<i>Figure 3-6</i> : croisement entre deux chromosomes.....	81
<i>Figure 3-7</i> : types de croisement	81
<i>Figure 3-8</i> : opérateur de mutation classique et adaptative.....	83
<i>Figure 4-1</i> : usages domestiques de l'eau potable.....	88
<i>Figure 4-2</i> : consommation journalière moyenne par abonné de la ville de Biskra.....	92
<i>Figure 4-3</i> : étapes de prévision par la méthode des séries temporelles.....	100
<i>Figure 5-1</i> : neurone biologique	108
<i>Figure 5-2</i> : architecture d'un neurone formel	108
<i>Figure 5-3</i> : structure d'un réseau de neurone à couches	111
<i>Figure 5-4</i> : courbe de la fonction d'erreur.....	117
<i>Figure 5-5</i> : présentation graphique du phénomène de sur-apprentissage.....	118
<i>Figure 6-1</i> : distances caractéristiques d'un système d'alimentation en eau potable.....	128
<i>Figure 6-2</i> : hauteurs caractéristiques du système de pompage.....	130
<i>Figure 6-3</i> : diagramme de la détermination de la source du dysfonctionnement énergétique.....	141
<i>Figure 6-4</i> : représentation arborescente des indicateurs de performance énergétique.....	142
<i>Figure 7-1</i> : système d'alimentation de Bordj El Kiffan Est	146
<i>Figure 7-2</i> : station de pompage de Rassauta.....	146
<i>Figure 7-3</i> : paramètres de conception du système de pompage de Rassauta.....	147
<i>Figure 7-4</i> : courbes caractéristiques du système de pompage de Rassauta.....	147
<i>Figure 7-5</i> : réseau de distribution de Rassauta	148
<i>Figure 7-6</i> : schéma du château d'eau d'El-Hamiz.....	149
<i>Figure 7-7</i> : courbe de modulation du réseau de distribution de Bordj El Kiffan Est.....	150
<i>Figure 7-8</i> : structure du réseau de neurones adopté.....	151

Figure 7-9 : structure du générateur des individus valides.....	155
Figure 7-10 : organigramme du modèle d'optimisation par les algorithmes génétiques.....	158
Figure 7-11 : demande en eau réelle et prévue par le modèle RNA.....	159
Figure 7-12 : plannings de pompe des différents scénarii étudiés.....	160
Figure 7-13 : évolution de la réserve d'eau dans le château d'eau.....	161
Figure 7-14 : consommation énergétique des différents plannings de pompage.....	162
Figure 7-15 : volumes d'eau pompée des différents plannings.....	166
Figure 7-16 : évolution de la pression de pompage.....	167
Figure 7-17 : évolution du rendement de pompage pour chaque planning.....	168
Figure 7-18 : représentation arborescente des IPE du planning SEAAL.....	170
Figure 7-19 : représentation arborescente des IPE du planning RNAG1.....	170
Figure 7-20 : représentation arborescente des IPE du planning RNAG2.....	171
Figure 7-21 : représentation arborescente des IPE du planning RV.....	171
Figure 7-22 : représentation arborescente des IPE du planning RVP.....	172

LISTE DES NOTATIONS

Ces notations sont utilisées dans l'ensemble de la thèse sauf indication contraire.

AG	Algorithme génétique	[-]
C	Fonction coût	[-]
C_{pd}	Côte du point défavorable	m
C_{tp}	Côte du trop-plein du château d'eau	m
C_r	Côte du radier du château d'eau	m
D	Diamètre de la conduite	m
D_a	Diamètre de conduite d'aspiration	m
$D_{d,opt}$	Diamètre de distribution optimal	m
D_r	Diamètre de conduite refoulement	m
D_{opt}	Diamètre de conduites optimal	m
DS	distance directe de pompage	m
DS_d	Distance directe de distribution	m
E	Energie consommée	KWh
$E_{f,opt}$	Energie de fonctionnement optimale	KWh
E_{opt}	Energie optimal	KWh
f	Fréquence du courant électrique	Hz
f_a	Fonction de transfert ou d'activation	[-]
F	Fonction objectif	[-]
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
G	Génération d'un algorithme génétique	[-]
H	Hauteur manométrique	mCE
H_c	Hauteur manométrique de conception	mCE
$H_{f,opt}$	Hauteur de fonctionnement optimale	mCE
H_g	Hauteur géométrique de l'installation	m
$H_{g,opt}$	Hauteur géométrique optimale	m
H_{opt}	Hauteur manométrique optimale	mCE
H_{pd}	Hauteur du point défavorable du réseau de distribution	m
$H_{pd,min}$	Hauteur minimale au point défavorable	m
IDA	Indicateur de diamètre d'aspiration	[-]
IDR	Indicateur de diamètre de refoulement	[-]
IEM	Indicateur d'énergie manométrique	kWh/m
IEV	Indicateur d'énergie volumique	KWh/m^3
IFA	Indicateur de frottement d'aspiration	[-]
IFR	Indicateur de frottement de refoulement	[-]
IGC	Indicateur global de conception	[-]
IGF	Indicateur global de fonctionnement	[-]
IGE	Indicateur global d'énergie	[-]
IH	Indicateur de pression de pompage	[-]
IHG	Indicateur de hauteur géométrique	[-]
IHH_i	Indicateur de pression de pompage horaire	[-]

ILA	Indicateur de longueur d'aspiration	[-]
ILR	Indicateur de longueur de refoulement	[-]
IPS	Indicateur des pertes singulières	[-]
IR	Indicateur de rendement de pompage	[-]
IRH	Indicateur de résistance hydraulique	[-]
IRH _i	Indicateur de rendement de pompage horaire	[-]
IV	Indicateur de volume de pompage	[-]
IVH _i	Indicateur de volume de pompage horaire	[-]
J _i	liste des sommets visités	[-]
l	Longueur totale du chromosome	[-]
l _{xi}	Longueur minimale de chaîne binaire	[-]
L	Longueur des conduites	m
L _a	Longueur de conduite d'aspiration	m
L _{d,opt}	longueur de distribution optimale	m
L ^k	Longueur totale de tournée	[-]
L _{opt}	Longueur optimale des conduites	m
L _r	Longueur de conduite refoulement	m
m _{max}	Nombre d'individus d'un AG	[-]
MAE	Erreur absolue moyenne	[-]
MAPE	Moyenne des erreurs absolues en pourcentage	[-]
n	Nombre de pompes en marche	[-]
N _{new}	Nouvelle solution du problème	[-]
n _p	Nombre de pompes de la station de pompage	[-]
N	vecteur de décisions	[-]
O	Complexité	[-]
p	Nombre de paire de pôle du rotor	tr/s
P	Probabilité de sélection d'un AG	[-]
P _b	Probabilité de Boltzmann	[-]
PE	Taux des pertes énergétiques	[-]
PEC	Taux des pertes énergétiques de conception	[-]
PEF	Taux des pertes énergétiques de fonctionnement	[-]
P _{ij}	Probabilité entre i et j	[-]
P _n	Nouvelle probabilité de sélection d'un AG	[-]
Q	Débit de pompage	m ³ /h
Q _c	Débit de consommation	m ³ /h
Q _{c,hmax}	Débit de consommation horaire maximale	m ³ /h
Q _{c,hmin}	Débit de consommation horaire minimale	m ³ /h
Q _{hm}	Consommation horaire moyenne	m ³ /h
Q _{jmax}	Consommation journalière maximale	m ³ /j
Q _n	Débit nominal d'une pompe	m ³ /s
Q _{opt}	Débit de pompage optimal.	m ³ /h
Q _p	Débit de pompage	m ³ /h

Q_{pr}	Demande en eau prévue à l'instant (n).	m^3/h
Q_u	Débit unitaire des pompes	m^3/h
r	Nombre de composantes insérées	
r_h	Résistance hydraulique	h^2/m^5
$r_{h,opt}$	Résistance hydraulique optimale	h^2/m^5
rpm	Vitesse de rotation d'une pompe	tr/mn
R	Coefficient de corrélation	[-]
R_1	Rayon d'entrée de la roue d'une pompe	m
Re	Nombre de Reynolds	[-]
RNA	Réseaux de neurones artificiels	[-]
RMSE	Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne	[-]
RV	Modèle de régulation multi-volumes	[-]
RVP	Modèle de régulation progressif	[-]
S_t	Composante saisonnière	[-]
t_f	Temps de fonctionnement	Heures
THG	Taux de hauteur géométrique	[-]
T^k	Trajet effectué par la fourmi k	[-]
T_k	Température actuelle	°C
TPC	Taux de pertes de charge	[-]
T_{opt}	Temps d'optimisation	Heures
v_{min}	Vitesse d'écoulement minimale	m/s
V	Volume d'eau dans le réservoir	m^3
V_{arr}	Volume d'arrêt	m^3
V_c	Volume de commande	m^3
V_d	Volume d'eau demandé	m^3
V_{dem}	Volume de démarrage	m^3
$V_{h,opt}$	Le volume horaire optimal	m^3
V_i	Volume d'eau initial dans le réservoir	m^3
V_{max}	Volume admissible maximal	m^3
V_{min}	Volume admissible minimal	m^3
V_{opt}	Volume de pompage optimal	m^3
$V_z(X,t)$	Voisinage de la solution X à l'instant t	[-]
w_{ij}	Poids synaptique entre i et j	[-]
x	Variable réelle	[-]
X_t	Ensemble des variables admissibles	[-]
X'_i, Z'_i	Vecteur des facteurs de la demande en eau	[-]
Y_i	Consommation moyenne par abonné	[-]
Y_t	Valeur prévue d'un modèle de prévision	[-]
Z_t	Tendance	[-]
α_s	Coefficient des pertes de charges singulières	[-]
γ	Viscosité cinématique de l'eau	m^2/s

Δ	Erreur de prévision	[-]
ΔE	Pertes énergétiques globales	KWh
ΔE_c	Pertes énergétiques de conception	[-]
ΔE_f	Pertes énergétique de fonctionnement	KWh
ΔH	Pertes de charge	mCE
$\Delta H_{d,opt}$	Pertes de charge de distribution optimale	mCE
$\Delta H_{f,opt}$	Pertes de charge de fonctionnement optimal	mCE
Δt	pas de temps	heures
ε	Rugosité absolue de la conduite	m
η	Rendement de pompage	[-]
η_{ij}	Visibilité entre i et j	[-]
η_{max}	Rendement maximal de la pompe	[-]
η_{opt}	Rendement de pompage optimal	[-]
λ	Coefficient des pertes de charge linéaires	[-]
λ_a	Coefficient de frottement d'aspiration	[-]
λ_{opt}	Coefficient de frottement optimal	[-]
λ_r	Coefficient de frottement de refoulement	[-]
τ_{ij}	Valeurs de phéromone entre i et j	[-]
ω	Vitesse de rotation d'une pompe	[-]

INTRODUCTION

L'enjeu actuel des services de gestion des systèmes d'alimentation en eau potable est l'amélioration de la performance du système sur tous les plans, (énergie, service, qualité d'eau,...etc). La majorité des travaux de recherche s'est focalisée sur la partie distribution, en développant des modèles de renouvellement et de gestion des réseaux de distribution. Par contre, la partie adduction a été marginalisée en dépit de la grande importance de cette dernière dans le fonctionnement de l'ensemble du système d'alimentation. Parmi les grandes problématiques des systèmes d'adduction par refoulement, la surconsommation énergétique des stations de pompage, qui représente un défi financier et environnemental pour les gestionnaires des services de l'eau.

L'énergie consommée par les systèmes de pompage représente environ 20% de l'énergie consommée à l'échelle mondiale (*Batchabani*, 2014). Une quantité considérable de cette énergie est perdue à cause du mauvais dimensionnement dans la phase étude et de la mauvaise gestion dans la phase exploitation. L'optimisation énergétique des systèmes de pompage d'eau potable est actuellement une étape primordiale, car une optimisation efficace permet de réduire considérablement l'énergie consommée, outre les conséquences positives directes et indirectes de cette action sur différents plans (économique, technique et environnemental). En effet, la consommation énergétique qui présente à la fois un défi de valorisation, engendré par la baisse des énergies fossiles qui représentent la principale source d'énergie ce qui nécessite des actions de préservation des ressources énergétiques, également elle présente un défi économique et financier, où toute surconsommation énergétique augmente automatiquement la tarification énergétique, créant un déséquilibre budgétaire pour les entreprises d'exploitation. Un autre défi important pour la gestion énergétique des stations de pompage c'est l'aspect environnemental de la consommation énergétique à travers le dégagement des gaz brûlés augmentant ainsi le taux de CO₂ dans l'atmosphère ce qui participe au problème d'effet de serre qui est un sujet d'actualité pour la préservation de l'environnement (*Ghimire*, 2008).

Dans notre travail, nous avons élaboré un outil de gestion des systèmes de pompage qui permet de réduire efficacement l'énergie consommée par les pompes tout en respectant le bon fonctionnement du système hydraulique (les conditions aux limites dans le réservoir). L'outil est baptisé RNAG est le résultat d'un couplage entre la technique des réseaux de neurones artificiels (RNA) et les algorithmes génétiques (AG). En effet, l'outil comporte deux modèles : un modèle de prévision et un modèle d'optimisation. Le modèle de prévision est basé sur les réseaux de neurones artificiels (RNA) pour prévoir la demande horaire en eau sur l'horizon d'optimisation. Le modèle d'optimisation utilise l'approche des algorithmes génétiques (AG) pour déterminer le planning de fonctionnement optimal tout en respectant les contraintes d'optimisation.

Pour enrichir notre étude et valider la fiabilité de l'outil de gestion RNAG, nous avons comparé les résultats obtenus par le modèle RNAG avec trois autres scénarii de pompage. En effet, outre le planning de pompage employé par les services de l'eau, nous avons utilisé deux autres scénarii de pompage générés par les deux modèles de régulation par délestage que

nous avons élaboré et qui sont basés sur le volume d'eau dans le château d'eau. Ces modèles sont le modèle de régulation multi-volumes (RV) et le modèle de régulation progressif (RVP).

Nous avons également élaboré une liste d'Indicateurs de Performance Energétique (IPE). Ces derniers servent à faire :

- Une évaluation de la consommation énergétique à l'aide de l'indicateur global d'énergie (IGE) ;
- Un diagnostic énergétique à travers les indicateurs énergétiques des différents paramètres du système de pompage ;
- Une comparaison énergétique entre plusieurs stations de pompage ou plusieurs plannings de pompage.

La thèse est présentée en sept chapitres :

Dans le premier chapitre, est décrit brièvement une station de pompage et sa consommation énergétique. Puis, sont détaillés les paramètres déterminants de la consommation d'énergie des systèmes de pompage. Ensuite, sont exposées les méthodes utilisées pour la réduction de l'énergie consommée par les stations de pompage. Enfin, sont donnés deux modèles mathématiques des méthodes de régulation par délestage basés sur le volume d'eau dans le réservoir.

Le deuxième chapitre concerne les modèles d'optimisation énergétique des systèmes de pompage. Un état d'art des approches d'optimisation énergétique des systèmes de pompage est présenté. Les caractéristiques du modèle d'optimisation sont décrites : l'horizon, le pas et les variables d'optimisation. La formulation de base du modèle d'optimisation qui regroupe la fonction objectif et les contraintes d'optimisation qui garantissent le bon fonctionnement du système est présentée dans ce chapitre. Et enfin, sont citées les principales méthodes utilisées pour la résolution du problème d'optimisation, classées en trois approches essentielles : approches exactes, approches heuristiques et approches méta-heuristiques.

Le troisième chapitre est consacré à l'optimisation par les algorithmes génétiques, où en premier lieu un état d'art des travaux d'optimisation par les AG dans le domaine d'eau potable est présenté, suivie d'une description de l'approche des algorithmes génétiques. Le principe de l'approche est détaillé en exposant les différents codages des variables du problème d'optimisation, et montrant aussi les différentes techniques de gestion des contraintes d'optimisation. Enfin, nous présentons les étapes de calcul d'un AG.

Le quatrième chapitre concerne l'étude de la demande en eau potable. Les types de consommation d'eau potable dans un réseau de distribution urbain sont exposés, et est expliquée la variation temporelle de la demande en eau à l'aide des facteurs déterminants de cette dernière. Ensuite, la prévision de la demande est étudiée, où une illustration des applications de la prévision dans le domaine d'alimentation en eau potable est décrite selon les différents horizons de prévision. Puis, sont présentées les méthodes de prévision, de méthodes simples jusqu'aux méthodes complexes.

Le cinquième chapitre concerne la prévision de la demande en eau par les RNA. Un état d'art de la prévision de la demande en eau par les RNA dans le secteur de l'eau est présenté. Puis, sont décrits les réseaux de neurones artificiels, leurs caractéristiques et les étapes à suivre pour

élaborer un RNA. Ensuite, sont présentées les techniques d'apprentissage des RNA. Enfin, sont exposés certains critères qui permettent d'évaluer la qualité de prévision.

Le sixième chapitre, sont décrits les indicateurs de performance tout en présentant leurs définitions et les critères nécessaires pour leurs élaboration. Puis, sont présentés les indicateurs existants utilisés dans l'évaluation. Ensuite, sont données les indicateurs de performance énergétique développés, qui sont regroupés en trois catégories, la première catégorie concerne l'évaluation global du système, une deuxième catégorie pour l'évaluation des paramètres de conception et la troisième catégorie pour les paramètres de fonctionnement du système.

Dans le septième chapitre, est présentée la zone d'étude et l'outil de gestion RNAG adopté, tout en détaillant les deux modèles qui le constituent. Ensuite, sont présentés les résultats des différents plannings de pompages étudiés : la consommation énergétique et l'évolution de la réserve d'eau,...etc. Enfin, sont utilisés les indicateurs de performance énergétique élaborés pour évaluer, diagnostiquer et comparer les scénarii de pompage.

Chapitre 1

1 Méthodes de régulation des stations de pompage

Introduction

L'adduction d'eau est définie comme étant le transfert de l'eau potable de la source naturelle ou de la station de traitement au réservoir de distribution. Cette opération s'effectue à l'aide des canaux ouverts (aqueduc à surface libres), ou à l'aide de conduites en charge. On distingue deux types d'adduction : adduction gravitaire, et adduction par pompage (par refoulement). Le caractère topographique de la région joue un rôle décisif dans le choix du type de l'adduction.

L'adduction gravitaire est caractérisée par un écoulement d'eau qui se fait sous l'action de la pesanteur. Dans ce cas le point de captage se trouve à une altitude supérieure à celle du réservoir de stockage (*Blindu*, 2004). En pratique, souvent le réservoir de distribution se trouve à une altitude plus élevée à celle de la ressource, ce qui nécessite l'utilisation d'une station de pompage pour élever l'eau. La majorité des stations de pompage d'eau potable utilise l'énergie électrique comme énergie d'entraînement des pompes, Dans certains pays développés la consommation énergétique atteint les 20% de l'électricité totale utilisée par les différents services publics (*Batchabani*, 2014). L'énergie consommée par les pompes est fonction de plusieurs paramètres interdépendants entre eux. Le fonctionnement énergétique nécessite que ces paramètres soient bien adaptés pour éviter toute sorte de surconsommation énergétique

Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'atténuer cette surconsommation énergétique. Elles sont classées en trois groupes :

- Méthodes d'optimisation du planning de pompage
- Méthodes de redimensionnement de l'installation
- Méthodes de régulation du débit de pompage

La méthode de régulation du débit de pompage est actuellement la méthode la plus utilisée dans la gestion des stations de pompage. Nous avons développé deux modèles issus de cette méthode, il s'agit d'un modèle de régulation multi-volumes (RV), et un modèle de régulation progressif (RVP).

1.1 Description générale d'une station de pompage

L'objectif principal d'une station de pompage est l'acheminement de l'eau d'un niveau bas qui est souvent le réservoir d'aspiration à un niveau haut qui est le réservoir de distribution ou le château d'eau (*figure 1-1a*). L'acheminement de l'eau se fait à l'aide de pompes centrifuges.

Chaque station de pompage comporte plusieurs pompes centrifuges installées en parallèle. Les principales caractéristiques d'une pompe sont sa courbe de pression (*figure I-1b*), et sa courbe de rendement (*figure I-1c*).

Les pompes refoulent l'eau vers un réservoir de distribution. La présence du réservoir n'est pas obligatoire mais souvent recommandée voir indispensable dans certains cas. Il est imposé par la différence entre le débit de captage (généralement constant) et le débit de consommation (variable dans le temps), son rôle principal est de satisfaire la demande en eau à tout moment en pression et en débit (*Blindu, 2004*).

La connexion entre les pompes et les réservoirs est garantie par les conduites d'aspiration et de refoulement. La conduite du système est représentée par sa courbe caractéristique (*figure I-1b*). L'intersection entre la courbe caractéristique de la pompe et celle de la conduite donne le point de fonctionnement du système. Ce point de fonctionnement permet de définir le débit, la pression et le rendement de pompage.

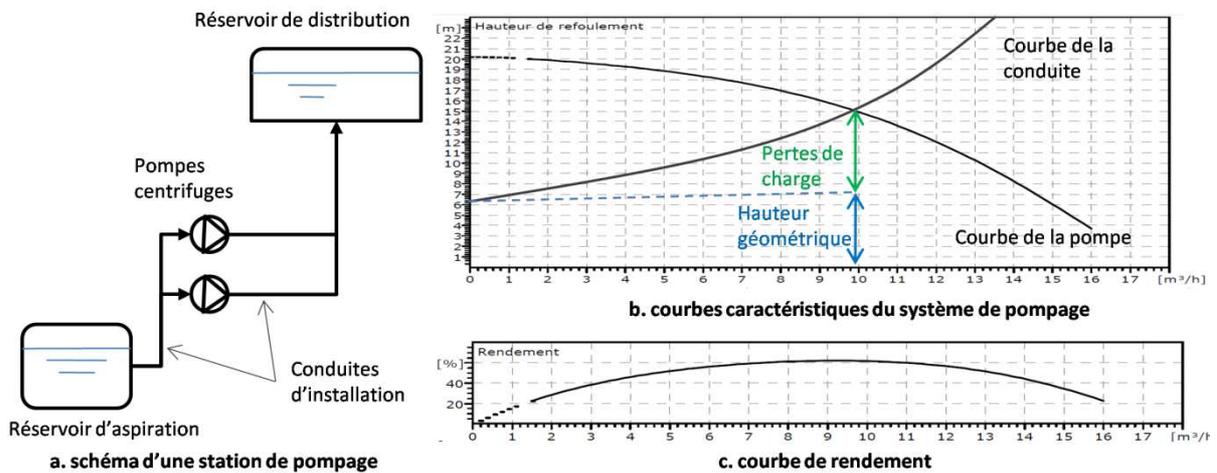


Figure 1-1 : courbes caractéristiques d'un système de pompage

1.1.1 Courbe de pression d'une pompe centrifuge

La courbe caractéristique de la pompe (*figure I-1b*), représente la variation de la hauteur manométrique totale (HMT) en fonction du débit fourni. La hauteur manométrique totale d'une pompe est l'énergie totale par unité de poids nécessaire pour faire circuler l'eau dans les conduites. Le constructeur fournit la courbe caractéristique de la pompe pour une vitesse de rotation fixe (*Marchesse, 2011*).

En cas de changement de l'énergie du réseau (modification de l'ouverture d'une vanne par exemple), la pompe réagit en modifiant le point de fonctionnement. Théoriquement la connaissance du HMT à un instant donné permet de connaître le débit pompé et le rendement de la pompe (*Luc et col., 2004*). La courbe caractéristique peut prendre plusieurs allures en fonction de type de la pompe, de son rôle, de ses spécifications. Les fabricants de pompes adaptent la caractéristique de la pompe aux exigences de l'utilisateur en travaillant sur les formes de la roue, le nombre et l'inclinaison des aubages, et la volute. En pratique, la forme la plus utilisée est la courbe en cloche (*figure I-2*), (*IFP, 2005*).

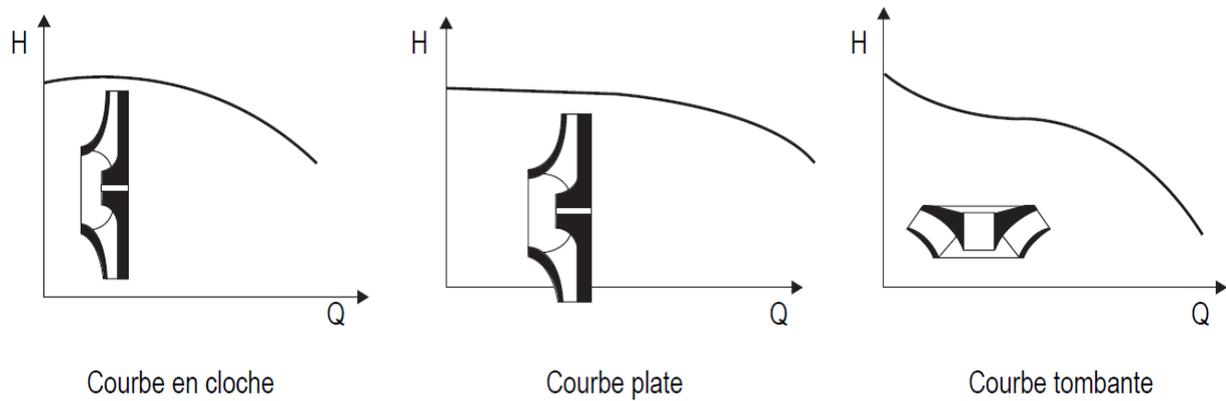


Figure 1-2 : différentes formes de la courbe caractéristique en fonction du type de la roue (*IFP, 2005*).

1.1.2 Courbe de rendement

Les courbes de rendement des pompes centrifuges sont données par leurs constructeurs. Lorsque le débit est nul, c'est-à-dire la vanne de l'installation est fermée, le rendement est nul. Le rendement augmente avec le débit pour atteindre sa valeur maximale, qui correspond au fonctionnement optimal, puis plus le débit augmente plus le rendement diminue. Le rendement maximal se trouve le plus souvent au centre de la courbe. A cause des pertes internes de la pompe, le rendement est toujours inférieur à 100%.

Le rendement des pompes dépend des différentes pertes internes de la pompe, qui sont fonction de plusieurs paramètres tels que le type de la roue, la forme des aubes, le mécanisme d'étanchéité...etc. Il est constaté aussi que les pompes de faible puissance ont généralement un rendement inférieur au rendement des pompes similaires de grande puissance (*Fraenkel, 1994*).

Le rendement maximal de la pompe détermine le débit, la pression et la puissance nominale de la pompe. Les rendements maximaux sont de l'ordre de (*IFP, 2005*) :

- 70% pour les pompes à 3000 rpm,
- 80% pour les pompes à 1500 rpm,
- 80% pour les pompes de forte puissance,
- 50 à 60% pour les petites pompes.

1.1.3 Courbe caractéristique d'une conduite

La courbe caractéristique d'une conduite illustre la relation entre le débit et la hauteur manométrique totale. Cette courbe peut être établie en calculant la hauteur manométrique totale pour divers valeurs de débit. Pour un débit nul la hauteur manométrique totale correspond à la hauteur géométrique du système, plus le débit augmente, une hauteur supplémentaire est nécessaire pour surmonter la résistance à l'écoulement. Cette résistance est généralement proportionnelle au carré du rapport des débits (*Hydro-Québec, 1993*). La

courbe caractéristique d'une conduite est exprimée de façon générale par la relation suivante (Marchesse, 2011) :

$$H_c = H_g + \lambda \frac{L}{16,2 \cdot 10^5 \cdot \pi^2 g D^5} Q_p^2 \quad (I.1)$$

Deux paramètres influencent la courbe caractéristique d'une conduite : La hauteur géométrique et les vannes de régulation. En effet, une variation de la hauteur géométrique déplace la courbe du système, cette variation peut être engendrée par une variation du niveau d'eau dans les réservoirs à l'aspiration ou au refoulement (*figure 1-3a*). Même chose pour les vannes de régulation, où une variation de l'ouverture de ces dernières modifie la forme de la courbe caractéristique du système (*figure 1-3b*).

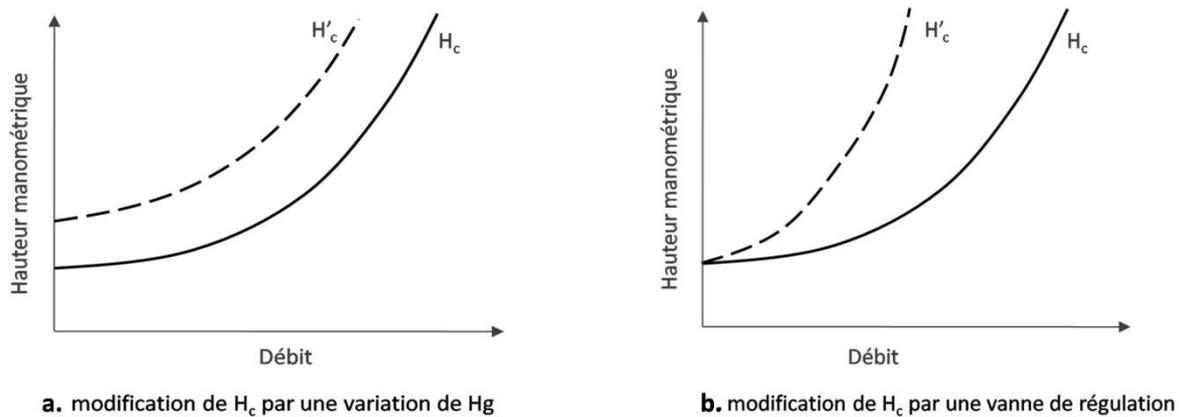


Figure 1-3 : modification de la courbe du système par vannes de régulation

1.2 Consommation énergétique d'une station de pompage

Dans un système de pompage, les pompes ont besoin de l'énergie pour le fonctionnement des moteurs d'entraînement. Et d'une façon générale, on peut classer les sources d'énergie en trois catégories principales : énergie électrique, énergie thermique, et énergie renouvelable. Dans notre travail, nous allons nous limiter à l'énergie électrique qui est souvent la plus utilisée comme source d'énergie pour l'entraînement des électropompes à moteur asynchrone.

Vue la performance et la fiabilité des moteurs électriques, les stations de pompage sont généralement alimentées en courant triphasé qui convient le mieux aux moteurs de grandes puissances.

Dans une station de pompage comportant n_p pompes centrifuges identiques installées en parallèles, sa consommation énergétique sur un horizon de 24 heures est donnée par la relation (1.2).

$$E = \frac{\rho g H Q_p}{36000 \cdot \eta} t_f \quad (1.2)$$

H : hauteur manométrique [mCE] ; Q_p : débit de pompage [m^3/h] ; g : accélération de la pesanteur [m/s^2] et η : rendement de pompage [%].

Au point de fonctionnement, on a ($H = H_c$), en remplaçant H par l'expression de H_c (équation 1.1) dans la relation (1.2), l'équation de l'énergie devient :

$$E = \frac{\rho}{36000 \cdot \eta} \left(g H_g Q_p + \lambda \frac{\rho L}{16,2 \cdot 10^5 \pi^2 D^5} Q_p^3 \right) t_f \quad (1.3)$$

E : énergie consommée [KWh], t_f : temps de fonctionnement [heures] et Q_p : débit de pompage [m^3/h].

1.3 Paramètres déterminants de la consommation énergétique

Les relations (1.2) et (1.3) montrent que la consommation énergétique dépend des paramètres de conception tels que la longueur et le diamètre de la conduite, et des paramètres de fonctionnement tels que le débit et la pression.

1.3.1 Paramètres de conception

Ces paramètres concernent le dimensionnement des différents ouvrages de la station. Leur dimensionnement devrait être optimal afin de minimiser la consommation énergétique. La correction du dysfonctionnement énergétique engendré par un paramètre de conception nécessite le remplacement ou la modification de l'équipement concerné (*figure 1-4a*).

1.3.1.1 Hauteur géométrique

La hauteur géométrique d'un système de pompage est un facteur important dans la consommation énergétique des pompes. En effet, elle rentre directement dans le calcul de la pression que doit fournir la pompe. Il est clair que plus elle est grande plus l'énergie consommée par la pompe est importante. Un changement de la hauteur géométrique par une modification de l'installation hydraulique du système, ou par une variation de niveau d'eau entraîne une modification de la courbe caractéristique de l'installation ce qui déplace le point de fonctionnement du système et donc influence directement la consommation énergétique. Durant la phase de conception du projet, il faut bien choisir l'endroit où implanter le réservoir afin de minimiser la hauteur géométrique du système.

La hauteur du réservoir est déterminée en fonction des pressions demandées par le réseau de distribution, les pertes de charge et les altitudes des différents consommateurs. Ces différents facteurs déterminent la hauteur et les niveaux d'eau dans le réservoir (niveau maximal, et le niveau minimal), de telle sorte que le réservoir doit garantir aux consommateurs les plus élevés une pression qui ne doit pas être inférieure à la pression admissible minimale. Cette condition doit être vérifiée en un niveau d'eau minimal dans le réservoir. Pour les consommateurs en basse altitude, le réservoir doit fournir une pression qui ne doit pas dépasser la pression maximale admissible. Cette condition doit être vérifiée en un niveau d'eau maximal dans le réservoir (*Batchabani, 2014*).

1.3.1.2 Diamètre des conduites

L'énergie consommée est inversement proportionnelle au diamètre des conduites. En effet, plus le diamètre est grand, moins les pompes consomment d'énergie, mais le coût d'investissement augmente. Physiquement le diamètre intervient au niveau des pertes de charge, car plus le diamètre est grand plus les pertes de charge sont minimales, ce qui réduit d'une façon très efficace la pression nécessaire pour faire circuler l'eau. Pour l'aspiration, la conduite doit avoir au moins le même diamètre nominal que la bride de la pompe, ou un diamètre nominal plus grand si c'est possible. Alors que pour le diamètre de refoulement, il est conseillé qu'il soit plus petit que le diamètre d'aspiration. Lors du dimensionnement du diamètre de refoulement, il faut tenir compte de trois (03) points :

- Pertes de charge : plus le diamètre est petit plus les pertes sont importantes.
- Vitesse d'écoulement : plus le diamètre est petit plus la vitesse est grande, il y a risque d'érosion et de bruit, si le diamètre est trop grand la vitesse sera petite, il faut respecter une vitesse minimale pour éviter le risque de décantation.
- Outre les facteurs techniques, nous avons un facteur économique qui est le coût d'investissement, et qui dépend directement du diamètre de la conduite, plus le diamètre est grand plus le coût est grand.

Il faut donc trouver un compromis entre ces facteurs pour faire un bon choix de diamètre tenant compte de l'aspect technique et économique. Pour déterminer le diamètre technico-économique, on utilise une méthode graphique, qui consiste à tracer, une courbe croissante des frais d'investissement en fonction du diamètre, et une seconde courbe décroissante des frais d'exploitation en fonction du diamètre, l'intersection des deux courbes donne le diamètre technico-économique.

1.3.1.3 Longueur des conduites

La longueur des conduites a un effet directe sur l'énergie consommée par les pompes, mais à un degré beaucoup moins élevé par rapport à l'influence du diamètre. En effet, l'énergie consommée est proportionnelle à la somme des longueurs des conduites d'aspiration et de refoulement, plus la longueur des conduites est grande plus les pertes de charge dans l'installation sont importantes, ce qui contribue à l'augmentation de l'énergie consommée par pertes de charge linéaires. Une optimisation des longueurs de conduites dans la phase conception du projet a un effet positif sur le coût d'investissement et sur l'énergie consommée par les pompes. Pour cette raison, l'acheminement de l'eau depuis le point d'aspiration jusqu'au point de refoulement doit suivre le plus court chemin possible. Sachant que dans certaines situations les conditions topographiques ou d'autres facteurs imposent le parcours des conduites à suivre, ce qui réduit le choix d'un parcours optimal.

1.3.2 Paramètres de fonctionnement

Les paramètres de fonctionnement concernent uniquement la partie gestion opérationnelle des pompes. Ces paramètres sont : le débit, la pression et le rendement de pompage. Tout fonctionnement des pompes en dehors des conditions optimales entraîne une surconsommation énergétique (*figure 1-4a*).

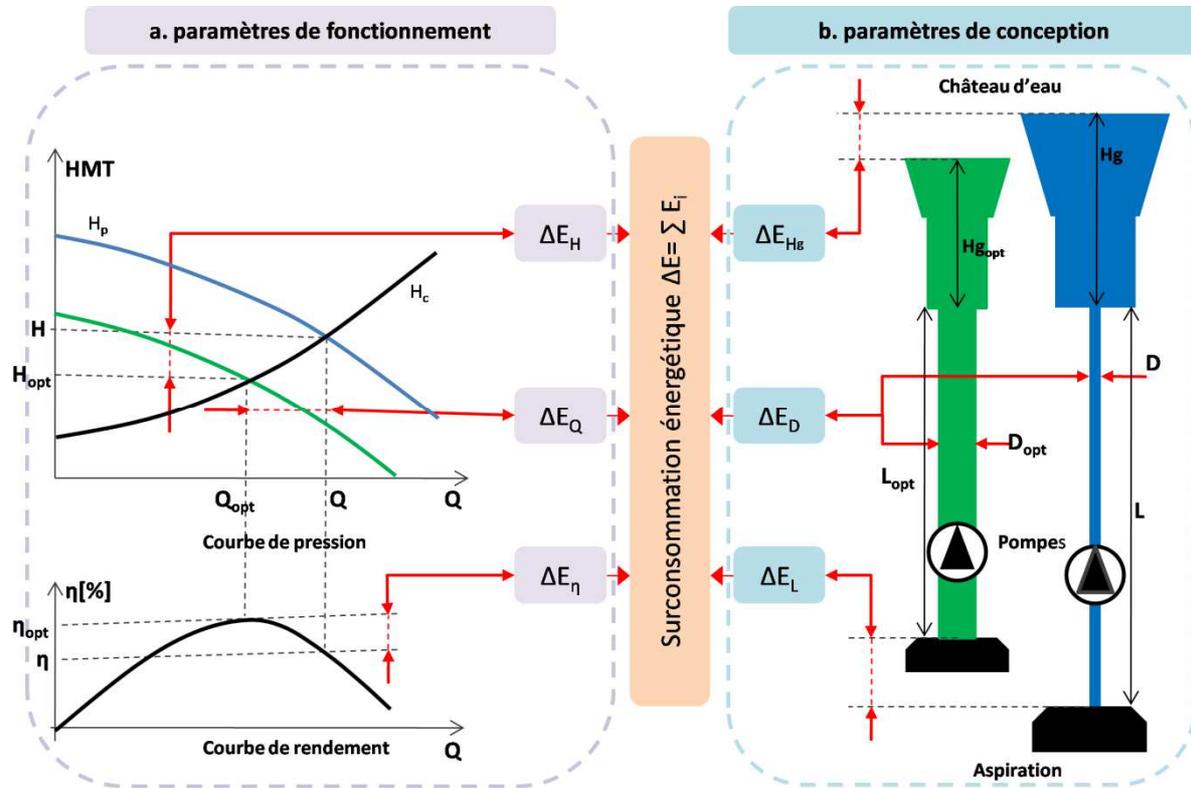


Figure 1-4 : paramètres de conception et de fonctionnement d'une station de pompage

1.3.2.1 Débit de pompage

L'influence du débit de pompage sur la consommation énergétique des pompes est considérable, où l'énergie consommée est proportionnelle au cube de débit. Pour réduire la surconsommation énergétique due à un excès de débit de fonctionnement, on peut procéder à une régulation de débit.

Cette régulation du débit peut se faire en ajustant soit le fonctionnement des pompes par leur nombre en marche (délestage) ou par leur vitesse de rotation (variation de vitesse), soit par une modification de la courbe caractéristique de la conduite du système à l'aide des vannes de réglage (vannage).

Dans une station de pompage, on peut distinguer trois types de débit : débit demandé Q_d , débit de fonctionnement Q_f et le débit nominal Q_n (*figure 1-5*).

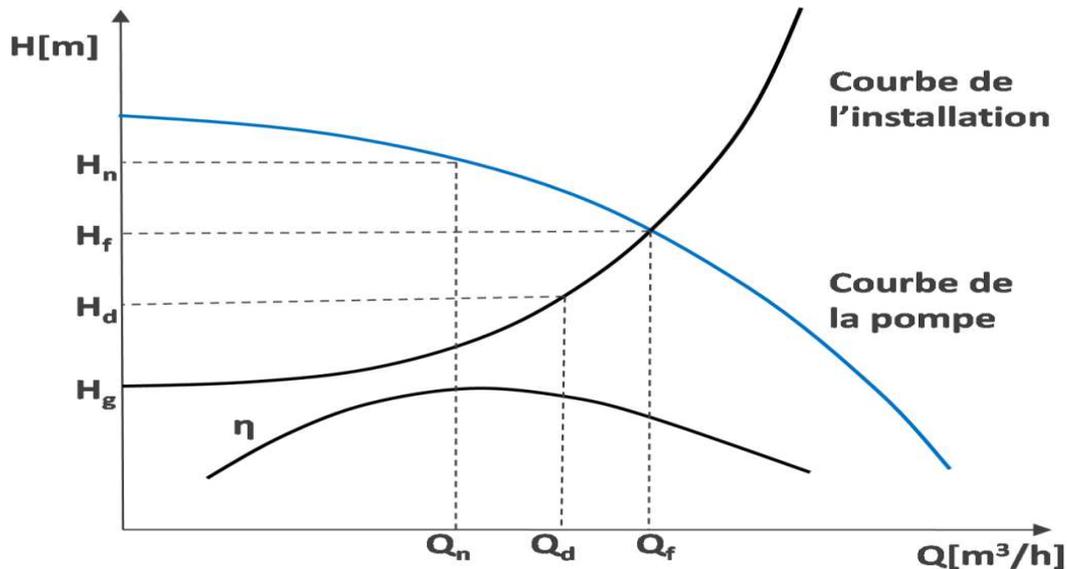


Figure 1-5 : différents débits d'un système de pompage

i. Débit demandé

Le débit demandé est le débit nécessaire pour satisfaire les besoins ou la demande en eau, il est calculé de différentes manières selon les conditions amont et aval de la station de pompage, sa valeur est calculée lors du dimensionnement du réseau. Dans certains systèmes de pompage, le débit demandé comprend trois valeurs : débit minimal, débit normal et débit maximal (*hydro Québec*, 1994).

ii. Débit de fonctionnement

Le débit de fonctionnement est le débit réel du système de pompage, il correspond à l'intersection entre la courbe caractéristique de l'installation et celle de la pompe ou du groupe de pompes. Il dépend des caractéristiques de l'installation et des pompes à la fois. Ce débit est mesuré à l'aide d'un appareil de mesure calibré (débitmètre) installé sur la conduite de refoulement. Le débit du pompage est imposé à la pompe en fonction des courbes caractéristiques des pompes et de la conduite du système.

iii. Débit nominal

Le débit nominal ou optimal d'une pompe dépend uniquement des caractéristiques intrinsèques de la pompe, il correspond au rendement maximal de la pompe. Ce débit est appelé aussi le débit d'adaptation, il est obtenu quand l'angle du fluide à l'entrée β_1 est égal à l'angle d'aubage à l'entrée β_{1a} . Son expression est donnée en fonction des caractéristiques de la pompe par la formule suivante :

$$Q_n = \frac{2\pi\omega R_1^2 b_1}{\tan \beta_{1a}} \quad (1.4)$$

où, R_1 : rayon de la roue, β_1 : angle d'entrée du fluide, β_{1a} : angle d'entrée des aubes et b_1 : épaisseur d'aubes à l'entrée de la pompe et ω : vitesse de rotation de la roue.

1.3.2.2 Pression de pompage

L'énergie consommée est proportionnelle à la pression de pompage. À cet effet, on doit veiller à ce que la pression fournie par la pompe correspond à la pression demandée afin d'éviter toute surconsommation énergétique. L'augmentation de la pression de fonctionnement peut être causée par, une variation de la demande, une modification des caractéristiques du réseau, ou une sous-estimation de la pression demandée dans la phase conception du projet. La marge de la variation de pression doit être prise en considération dans le calcul des éléments de projet dans la phase conception. A cet effet, les pompes dont la courbe caractéristique est plate sont efficaces pour réduire cette variation de pression. Une autre cause de l'augmentation de pression c'est le surdimensionnement des pompes en prévision des besoins futurs. Selon les statistiques ceci provoque jusqu'à 20 % de pertes énergétiques (*Beniaiche*, 2012).

Outre la surconsommation énergétique, l'augmentation de la pression peut entraîner plusieurs problèmes techniques, telle que : la surcharge du moteur, la cavitation, les bruits et les vibrations.

1.3.2.3 Rendement de pompage

Le rendement de pompage dépend essentiellement des conditions de fonctionnement et de l'état des pompes. En effet, toute déviation par rapport aux conditions optimales de fonctionnement entraîne des surcoûts énergétiques importants (*Luc et col*, 2004). Cette déviation peut avoir lieu dans deux cas, premièrement lorsque le point de fonctionnement du système ne correspond pas au rendement maximal de la pompe, et deuxièmement lorsque l'état de la pompe se dégrade au fil du temps ce qui augmente les pertes énergétique interne de la machine réduisant ainsi son rendement.

Une diminution du rendement optimal par rapport à sa valeur initiale, à cause d'une détérioration de l'état de la machine, entraîne une surconsommation énergétique, mais ce paramètre ne peut pas être considéré réellement comme paramètre d'exploitation, car il est incontrôlable, et il dépend de l'état physique de la pompe. Par contre, l'influence du rendement qui est considéré réellement comme paramètre d'exploitation est celui qui est due à un fonctionnement des pompes hors conditions optimales. Car le point de fonctionnement du système peut être contrôlé à l'aide des équipements de régulation ce qui permet de faire fonctionner le système dans des conditions optimales.

1.4 Méthodes de réduction de l'énergie de pompage

A partir d'une analyse des informations énergétiques du système de pompage, on peut établir un plan de rationalisation énergétique. Avant de choisir la méthode de réduction énergétique pour un système de pompage, on doit d'abord évaluer les coûts-avantages à partir soit d'une analyse de recouvrement de l'investissement ou d'une analyse détaillée basée sur la valeur présente nette et la durée de vie de l'équipement acheté (*BID*, 2011). Il existe plusieurs méthodes pour réduire l'énergie de pompage. Pratiquement, on peut les regrouper dans les trois grandes familles suivantes:

- Méthode d'optimisation du planning de pompage,
- Méthode de redimensionnement de l'installation,
- Méthode de régulation du débit de pompage.

Dans le chapitre 6, nous avons établi une liste d'indicateurs de performance énergétique permettant l'évaluation et le diagnostic énergétique de la station. Il est souhaitable de mener une analyse avec ces indicateurs pour détecter d'abord la source du dysfonctionnement avant de choisir la méthode adoptée.

1.4.1 Méthodes d'optimisation du planning de pompage

Ces méthodes s'appliquent souvent sur un horizon d'optimisation, où elles reposent sur un modèle d'optimisation (programmation dynamique, algorithmes évolutionnaires,...etc). Le calcul d'optimisation se fait souvent sous contraintes d'optimisation. Pour cette raison, ces méthodes utilisent soit un modèle normalisé soit un modèle de prévision pour estimer la demande. Dans le chapitre 3, nous allons étudier ces approches.

1.4.2 Redimensionnement de l'installation

Dans certaines stations de pompage, les équipements peuvent être mal dimensionnés, créant ainsi une surconsommation énergétique, à cause des pertes de charge supplémentaires engendrées par leur mauvais dimensionnement. Théoriquement, pour les réadapter on peut procéder à un redimensionnement de l'installation. Mais ceci est tributaire d'une étude technico-commerciale.

Ci-après quelques opérations qu'on peut mener pour réduire la consommation énergétique.

1.4.2.1 Redimensionnement des vannes de régulation

Pour réduire les pertes de charge dans les vannes de régulation, il faut éviter les vannes trop petites, les vannes trop fermées, et les types inappropriés de vannes. Généralement les vannes de régulation sont dimensionnées à une ouverture de 50% à 70%. Or, une ouverture supérieure des vannes réduit les pertes de charge (*Hydro Québec*, 1993). Aussi, on peut augmenter le diamètre des vannes de régulation ce qui réduit les pertes de charge.

1.4.2.2 Redimensionnement du diamètre des conduites

Les pertes de charge par frottement peuvent atteindre 30% de la puissance nécessaire au pompage. Ces pertes de charge sont inversement proportionnelles au diamètre des conduites de l'installation. En effet, plus le diamètre est petit plus la vitesse d'écoulement est grande ce qui augmente la perte d'énergie par frottement, étant donné que la vitesse recommandée dans une conduite doit être inférieure à 2 m/s, si elle est supérieure à cette valeur, des mesures doivent être prises pour réduire les pertes. Ces différentes mesures sont résumées comme suit (*BID*, 2011) :

- Redimensionnement de la canalisation est recommandé : si le coût d'énergie perdue est supérieur au coût de remplacement d'une nouvelle canalisation à un diamètre

supérieur ; ou au coût d'installation d'une nouvelle canalisation en parallèle à l'existantes.

- Si la conduite est vétuste et en mauvais état, on la remplace par une conduite de diamètre plus grand permettant une vitesse allant de 1,0 à 1,5 m/s.
- Si les pertes de charge sont élevées et la conduite est en bon état, on peut soit installer une conduite en parallèle avec diamètre plus grand générant une vitesse comprise entre 1,0 et 1,5 m/s dans les deux conduites, soit remplacer la conduite existante par une conduite de plus grand diamètre permettant de réduire la vitesse à une valeur de 1,0 à 1,5 m/s.
- Remplacement des conduites si la durée de vie est atteinte ; si la période de recouvrement est atteinte ; si le matériau des conduites est peu coûteux, ou si la vitesse d'écoulement trop élevée.

On rapproche à cette méthode d'économie d'énergie le coût d'investissement élevé, et dans certains cas l'augmentation de l'espace nécessaire.

1.4.2.3 Réduction du diamètre de la roue de la pompe

Plusieurs systèmes de pompage sont équipés de pompes surdimensionnées à cause du facteur de sécurité élevé pris en considération dans la phase conception. Ce qui pousse les pompes à travailler en dehors de leurs conditions de fonctionnement optimales. Une réadaptation de ces pompes aux conditions de fonctionnement par réduction du diamètre de la roue peut entraîner une optimisation d'énergie consommée de 10 à 20 %. L'application de cette technique est très pratique, où elle permet de donner des bons résultats et elle ne nécessite pas beaucoup de moyens financiers et techniques pour leur mise application.

1.4.2.4 Redimensionnement des pompes

Cette méthode d'optimisation d'énergie de pompage nécessite un investissement élevé, c'est pour cette raison que cette méthode ne doit pas être appliquée qu'après avoir envisagé d'autres méthodes d'optimisation moins coûteuses sur le plan investissement (mode de fonctionnement, réduction de diamètre de la roue). Dans le cas d'une pompe à faible rendement maximal, ou fonctionnant à faible rendement, le système de pompage subit donc une perte énergétique à cause de cette pompe mal choisie et mal dimensionnée. Dans ce cas de figure, le remplacement de la pompe existante par une nouvelle présentant un meilleur rendement optimal permet de réaliser une économie d'énergie considérable. Le remplacement de la pompe doit respecter les conditions suivantes (*BID*, 2011) :

- Rendement de fonctionnement nettement inférieur au rendement optimal,
- Potentiel d'économie d'énergie supérieur à 20%,
- Le nouveau rendement doit être augmenté d'au moins 5%.

La nouvelle pompe doit appartenir à une catégorie de haut rendement énergétique, tel que label européen « IE3 » ou label américains « Nema Premium ».

1.4.3 Méthode de régulation du débit de pompage

Dans le passé le pompage se faisait sans régulation, ou basait sur l'observation visuelle pour mener les opérations nécessaires. Cependant, certaines méthodes ont été utilisées tels que le pompage continu et le pompage de nuit. Dans le pompage continu, les pompes fonctionnent durant la journée complète. Par contre, dans le pompage de nuit, comme son nom l'indique, les pompes sont mises en marche pendant la période de nuit (généralement 10 heures) pour profiter de la période de basse facturation énergétique. Le débit de pompage horaire est égal à la consommation journalière maximale divisée par le nombre d'heures de la période de pompage (équation 1.5) :

$$\begin{cases} \text{Pompage continu : } Q = Q_{j\max}/24 = Q_{hm} \\ \text{Pompage de nuit : } Q = Q_{j\max}/10 = 2,4 \cdot Q_{hm} \end{cases} \quad (1.5)$$

Ces deux méthodes ne permettent pas en réalité une régulation du débit de pompage, et elles nécessitent une attention particulière lors du dimensionnement des pompes pour éviter toute surconsommation énergétique et pour garantir la satisfaction de la demande. Malgré que ces méthodes soient dépassées, elles sont encore utilisées dans plusieurs stations.

Par la suite, les méthodes de régulation sont apparues avec la révolution des outils électroniques et automatiques, permettant la transmission de l'information en temps réel, et le contrôle des pompes automatiquement.

L'objectif de la régulation est d'adapter le débit de pompage à la demande, il existe plusieurs méthodes qui reposent sur les deux principes suivants :

- Modification des pertes de charges de l'installation,
- Modification du débit de pompage par variation de vitesse ou nombre de pompe en marche.

Dans ce qui suit, nous allons citer quelque méthode de régulation utilisées actuellement.

1.4.3.1 Régulation avec délestage des pompes

Généralement les stations de pompage comportent plusieurs pompes centrifuges identiques, installées en parallèle et travaillant en cascade, pour adapter le débit pompé en fonction de la demande. On ajuste le débit à l'aide du nombre de pompes en marche, si par exemple la demande est élevée, toutes les pompes fonctionnent en même temps, si la demande diminue une pompe s'arrête, si la demande diminue encore une autre pompe s'arrête, et ainsi de suite le nombre de pompes en fonctionnement se réduit jusqu'à l'arrêt de toutes les pompes.

Le nombre de pompes d'une station est fonction du régime de consommation, si le régime de consommation est uniforme, dans ce cas on peut avoir un nombre réduit de pompes. Par contre, si le régime de consommation est trop variable, le nombre de pompes sera élevé pour faire face à cette irrégularité de la demande permettant ainsi d'économiser l'énergie de pompage.

Dans la littérature, on ne trouve pas assez d'informations permettant la détermination du nombre de pompes d'une station de pompage, à l'exception de quelques consignes données (tableau 1.1) par Krieger & Stewart (2015), ou selon Djoukam (1999) qui a défini le nombre de pompes comme étant l'arrondi du quotient Q_{\max}/Q_{\min} .

Tableau 1.1 : pompes en service et de secours en fonction du débit (*Krieger & Stewart, 2015*)

Débit [m ³ /h]	Nbre de pompes en service	Nbre de pompe de secours
Moins de 230	1	1
230 – 910	2	1
910 – 2270	3	1

Dans le cas d'une station de pompage composée d'une pompe en service et d'une pompe de secours, cette dernière doit être identique à celle en service. La configuration la plus utilisée est deux (02) pompes en fonctionnement et une de secours, mais cette configuration ne convient qu'à des situations standards où les variations de la demande restent dans des plages réduites. Sachant que si le débit pompé est réparti sur plusieurs pompes travaillant en parallèle, cela offre une garantie de fonctionnement dans le cas où une pompe tombe en panne.

Lorsque la demande en eau dans un système de pompage est variable, il est recommandé d'un point de vue technique et énergétique d'installer plusieurs pompes en parallèles gérées par une méthode de régulation ou un outil d'optimisation (chapitre 3), au lieu d'une seule grande pompe. En effet, dans le cas où le système de pompage est équipé d'une seule pompe, en cas de variation de débit, le point de fonctionnement change en poussant la pompe à fonctionner à faible rendement, ce qui va engendrer une perte énergétique.

Le tableau (1.2) montre l'énergie de pompage réalisée par délestage des pompes en parallèles.

Cette méthode offre plusieurs avantages :

- Faible coût d'investissement,
- Réduction du temps de fonctionnement des pompes,
- Réduction de l'usure de chaque pompe.

La méthode est critiquée de ne pouvoir s'appliquer que lorsque les variations de débit sont importantes pour pouvoir régler le démarrage et l'arrêt des pompes.

Actuellement, plusieurs sujets de recherche ont été lancés pour élaborer des méthodes de gestion du fonctionnement des pompes, en se basant sur des approches de prévision de la demande en eau, et sur des approches d'optimisation de la recherche opérationnelle, ce qui permet d'adapter mieux le fonctionnement des pompes en économisant une quantité importante de l'énergie de pompage. Notre thèse s'inscrit dans cet axe de recherche.

Tableau 1.2 : optimisation d'énergie par combinaison des pompes en parallèle (*Hydro Québec*, 1993)

	Système existant			Nouveau système		
	3	3	3	1	2	3
Nombre de pompe en marche	3	3	3	1	2	3
Débit [m ³ /h]	546	955	1187	546	955	1187
Pression [%]	42	40	37	29	33	37
Rendement de la pompe [%]	35	65	73	71	74	73
Puissance totale des pompes [kW]	159	142	145	55	105	145
Temps de fonctionnement [h/an]	5000	2500	500	5000	2500	500
Economie annuelles en énergie [kWh/an]				612.500,00		

1.4.3.2 Régulation avec des vannes

A l'aide d'une vanne de régulation, on peut adapter le débit pompé en fonction de la consommation. En effet, le degré d'ouverture de la vanne sera commandé par la demande en eau. L'utilisation des vannes de régulation sur la conduite de refoulement génère des pertes de charge singulières qui vont modifier la courbe caractéristique de la conduite ce qui permet de régler le débit pompé.

En effet, pour diminuer le débit, on réduit le degré d'ouverture de la vanne de régulation, créant ainsi plus de perte de charge dans la conduite de refoulement, et par conséquent le point de fonctionnement se déplace vers la gauche (*figure 1-6*), ce qui réduit le débit de pompage. Par contre, si on veut augmenter le débit de pompage, on ouvre la vanne de régulation, ce qui diminue les pertes de charge dans la conduite de refoulement, et le point de fonctionnement se déplace cette fois vers la droite ce qui augmente le débit de pompage (*figure 1-6*). Cette méthode malgré l'avantage qu'elle présente avec son faible coût d'investissement a été trop critiquée, en lui rapprochant plusieurs inconvénients, tels que :

- Coût de fonctionnement élevé, car les pompes peuvent fonctionner à faible rendement ce qui augmente la consommation énergétique ;
- Risque d'instabilité de fonctionnement des pompes ;
- Risque d'augmenter la poussée radiale dans les pompes (*SOGREAH*, 1978).

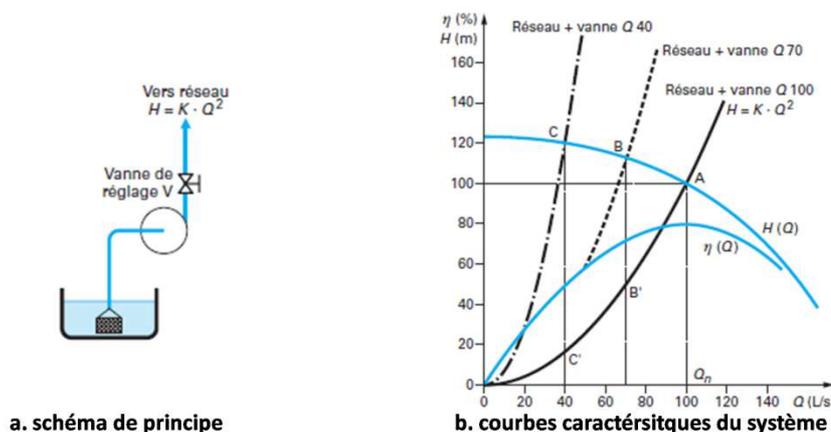


Figure 1-6 : régulation par vannes (*Poulain*, 2004).

1.4.3.3 Régulation avec variation de vitesse

La régulation par variation de vitesse est considérée comme étant la méthode la plus fiable pour la régulation du débit. Elle est basée sur la modification du débit de pompage pour l'adapter à la demande en eau en variant la vitesse de rotation de la pompe (*figure 1-7*). Pour cela, le moteur doit être équipé d'un variateur de fréquence, car la vitesse de rotation est liée directement à la fréquence par la relation suivante :

$$\text{rpm} = \frac{f}{p} \quad (1.6)$$

rpm : nombre de tours [tr/s] ; f : fréquence [Hz] et p : nombre de paire de pôles du rotor

Le principe de fonctionnement est simple, le capteur de pression ou de débit détecte la variation de la demande dans le réseau, il envoie le signal à l'armoire de commandes, en fonction de ce paramètre (débit ou pression), on calcule la fréquence adéquate et donc la vitesse de rotation adéquate, si la demande varie encore la fréquence change pour répondre à cette variation, la fourchette de variation de fréquence varie entre 30 Hz et 50 Hz, où elle ne doit pas descendre en dessous de 30 Hz pour des raisons de ventilation du moteur. Ce type de régulation présente plusieurs avantages : une souplesse d'utilisation, une optimisation efficace de l'énergie, et une stabilité de fonctionnement. Plusieurs systèmes de pompage ne sont pas équipés d'une variation de vitesse, vu le leur coût d'investissement élevé.

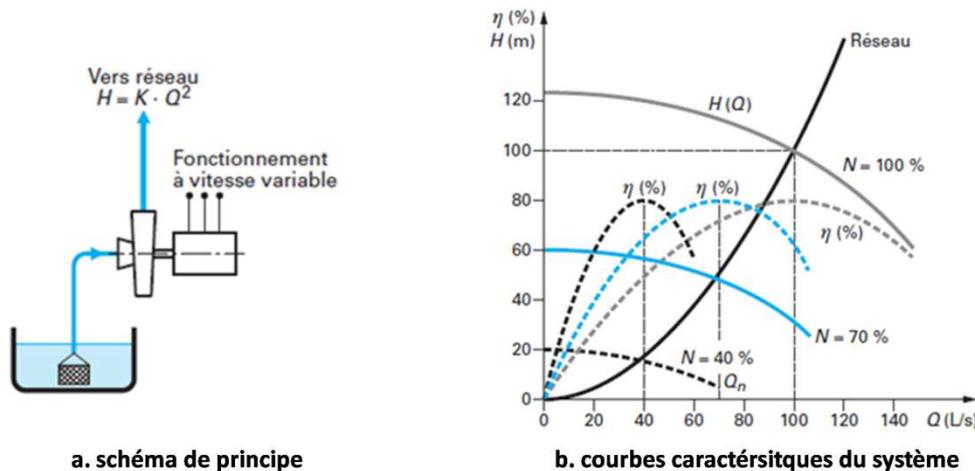


Figure 1-7 : régulation par variation de vitesse (Poulain, 2004).

En pratique, la majorité des pompes fonctionnent en débit variable à l'aide des vannes de réglage installées sur leurs conduites de refoulement (EDF, 2008). Dans ce type de régulation de débit, la pompe à vitesse fixe a une hauteur manométrique totale supérieure à la hauteur demandée par l'installation (*figure 1-8a*), où une partie de l'énergie consommée sera perdue par une dissipation du surplus d'énergie hydraulique de la pompe. L'utilisation d'une pompe à vitesse variable permet d'économiser cette énergie perdue sous forme de hauteur en adaptant la vitesse de rotation de la pompe en fonction de la demande en eau (*figure 1-8b*).

Dans la régulation par variation de vitesse de la pompe, le point de fonctionnement se déplace sur la courbe de l'installation et non sur la courbe de la pompe, d'où la hauteur fournie par la pompe sera égale à la hauteur demandée par le l'installation. Ce qui fait que l'énergie économisée dépend de la différence de hauteur entre la courbe de la pompe à vitesse

constante et la hauteur demandée par l'installation à chaque débit de fonctionnement (*Hydro Québec*, 1993).

Cette méthode d'optimisation d'énergie est très utile pour les systèmes de pompage caractérisés par une grande variation de débit ou de pression de fonctionnement, telle que les stations de surpression qui alimentent directement le réseau de distribution, où elle permet d'économiser des valeurs importante d'énergie de fonctionnement.

Le calcul de l'énergie optimisée par variation de vitesse repose sur la pression de service optimale qui est la pression la plus basse à laquelle le système peut fonctionner et desservir tout point du réseau, sa valeur est obtenue soit par mesure directe ou par un calcul hydraulique. Le calcul nécessite l'enregistrement des données de pompage sur une période de 24 heures, en effet, pour chaque enregistrement on calcule l'économie d'énergie obtenue par variation de vitesse par l'expression suivante pour un pas de temps d'une heure (*BID*, 2011) :

$$\Delta E = \frac{\Delta H \cdot Q \cdot 9,81}{\eta} \quad (1.7)$$

ΔE : énergie électrique optimisée [Wh]; ΔH : diminution de la pression de refoulement [mCE] ; Q : débit [l/s] et η : rendement global de la pompe.

La valeur de la diminution de pression de refoulement est calculée par l'équation suivante (*BID*, 2011) :

$$\text{Si } H_{\text{opt}} > H \rightarrow \Delta H = 0 \quad (1.8)$$

$$\text{Si } H_{\text{opt}} < H \rightarrow \Delta H = H - H_{\text{opt}} \quad (1.9)$$

avec, H_{opt} : pression de service optimale et H : pression de refoulement.

Sur une période de fonctionnement de 24 heures, l'énergie économisée est calculée par l'équation suivante :

$$\Delta E = \sum_{i=1}^{24} \Delta E_i \quad (1.10)$$

ΔE : énergie économisée sur 24 heures et ΔE_i : énergie économisée pendant l'heure i .

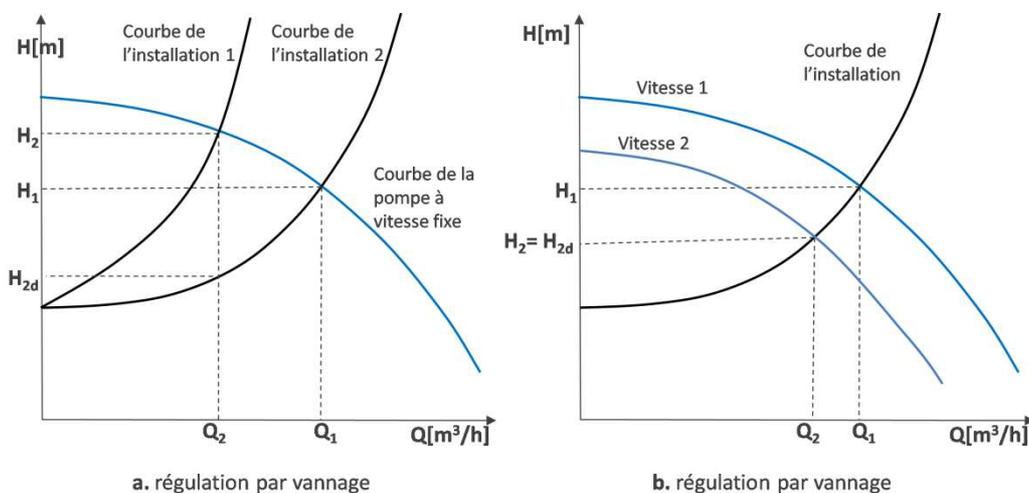
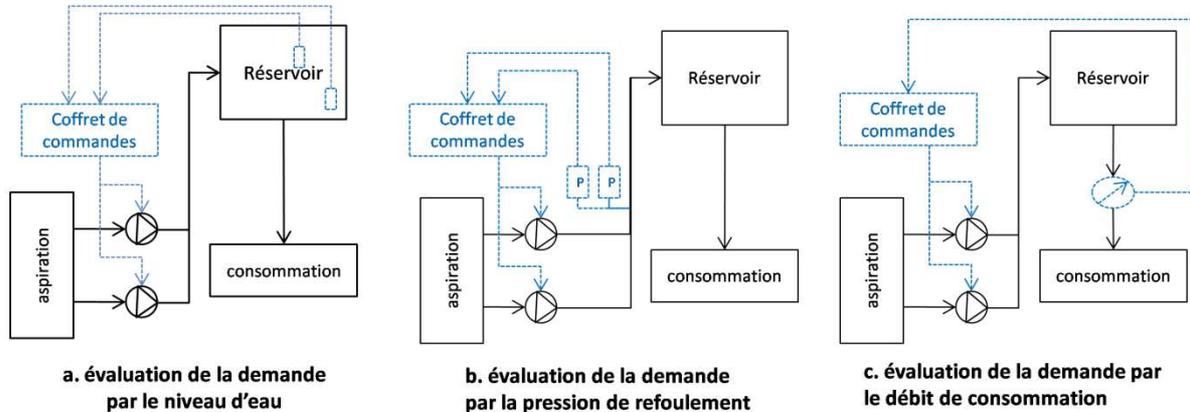


Figure 1-8 : régulation de débit par variation de la vitesse

1.5 Types des données d'entrée d'une méthode de régulation

La méthode de régulation de débit est tributaire de la demande en eau. Pour cela, la méthode a besoin de connaître l'état de cette demande. Pratiquement, on peut utiliser l'un des trois paramètres suivants pour évaluer la demande : le niveau d'eau dans le réservoir, la pression de refoulement, et le débit de consommation (*figure 1-9*).



Figures 1-9 : paramètres d'évaluation de la demande en eau

1.5.1 Niveau d'eau dans le réservoir

Le niveau d'eau dans le réservoir était le paramètre le plus utilisé par les systèmes de régulation des stations de pompage jusqu'aux années soixante-dix. La lecture de ce paramètre peut se faire à l'aide de plusieurs équipements installés dans le réservoir, tels que les sondes de niveau, les flotteurs...etc. Ces équipements sont reliés à la station de pompage par des lignes électriques ou un système radio. Le choix du support dépend des distances de transmission et du nombre d'information à transmettre (*SOGREAH*, 1978).

Dans le cas d'une régulation basée sur le niveau d'eau dans le réservoir, le démarrage et l'arrêt des pompes dépend directement de ce paramètre (*figure 1-9a*).

En effet, les capteurs de niveau installés dans le réservoir détectent le niveau d'eau dans le réservoir, si le niveau d'eau descend au-dessus d'un certain seuil minimum (niveau bas) un signal de démarrage sera envoyé aux pompes. Si le niveau d'eau dépasse le seuil maximum (niveau haut) un signal d'arrêt sera envoyé aux pompes. D'autres niveaux d'eau dits niveaux intermédiaires peuvent être défini pour lesquels un fonctionnement précis du système de pompage (variation de vitesse de rotation, modification du nombre de pompes en marche) sera raccordé.

1.5.2 Pression de refoulement

Dans ce type de régulation, l'enclenchement et le déclenchement des pompes sont contrôlés par des capteurs de pression (pressostats), placés au niveau de la conduite de refoulement (*figure 1-9b*), et permettent la détection de moindre changement de pression dans l'installation, où chaque pompe est commandée par un capteur de pression. Ce système nécessite un contrôleur de pression qui désenclenche la pompe à une pression prédéterminée et un interrupteur qui enclenche la pompe après une période fixée après l'arrêt de la pompe (*Labye & coll.*, 1996). Pour un bon fonctionnement de système, la conduite de refoulement

est pourvue d'un flotteur à l'entrée du réservoir, le principe de fonctionnement est simple, si le réservoir est plein, le clapet flotteur se ferme et la pression dans la conduite de refoulement augmente, en dépassant une valeur prédéterminée le capteur de pression déclenche la pompe, après un certain temps prédéterminé l'interrupteur enclenche la pompe. Si la pression dans la conduite de refoulement est inférieure au seuil de déclenchement, la pompe continue à fonctionner sinon elle s'arrête. Ce type de régulation convient le mieux à des systèmes dont le réservoir est éloigné de la station de pompage.

1.5.3 Débit de consommation

Ce paramètre de régulation intervient dans la régulation dite volumétrique, dont le principe de fonctionnement est identique à la régulation manométrique (basée sur la pression de refoulement). En effet, des capteurs de débit installés sur la conduite de refoulement détectent la variation de débit et transmettent l'information au système de commande (*figure 1-9c*), qui à son tour en fonction de cette variation de débit commande le démarrage ou l'arrêt des pompes. Ce paramètre de régulation offre plusieurs avantages par rapport à son précédent (pression). Parmi ces avantages, on cite les points suivants (*SOGREAH*, 1978) :

- Insensibilité face aux ondes de variation provoquées par certains phénomènes hydrauliques tel que le coup de bélier,
- Résistance contre les eaux chargées et les pressions statiques élevées,
- Bonne adaptation aux débits importants.

1.6 Modélisation de la régulation du pompage par délestage

Dans notre étude, nous avons élaboré deux modèles mathématiques décrivant le fonctionnement de la méthode de délestage en fonction de volume d'eau dans le réservoir. Ces deux modèles sont : un modèle de régulation multi-volumes (RV), et un modèle de régulation progressif (RVP). Le principe de base de ce type de modèles est l'adaptation du débit de pompage à la demande en se basant sur le volume d'eau dans le réservoir tout en respectant les conditions du bon fonctionnement hydrauliques, c'est-à-dire les seuils limites (V_{\min} et V_{\max}). L'adaptation du débit se fait par ajustement du nombre de pompes en marche. Ces modèles fonctionnent en temps réel car ils nécessitent l'information du volume d'eau dans le réservoir au pas de temps précédent, c'est-à-dire $V(t-1)$ pour ensuite transmettre l'ordre de commande au pas de temps présent $n(t)$ aux pompes afin d'optimiser l'énergie consommée par les pompes et respecter les contraintes de fonctionnement hydraulique.

La quasi-totalité des travaux de recherche s'est focalisée sur la technique d'automatisme afin de minimiser le coût de pompage (*Celi et al.*, 2017 ; *Parikh et al.*, 2017), et ils ont utilisé des seuils limites (V_{\min} , V_{\max}) comme volumes de commandes sans calculer exactement ces volumes. Pour cette raison, nous avons développé des formules permettant de calculer les volumes de commandes pour les deux modèles de régulation (RV et RVP). Ces formules sont basées sur la demande en eau et le débit de pompage pour assurer le respect des seuils limites dans le réservoir.

cela, nous avons développé la formule suivante qui permet de définir les volumes de commande :

$$V_c(n) = V_{\min} - (Q_p(n-1) - Q_{c.hmax}) \cdot \Delta t, n \in [1, n_p] \quad (1.12)$$

où, $V_c(n)$: volume de commande n , V_{\min} : volume minimal dans le réservoir, $Q_{c.hmax}$: débit de consommation horaire maximal ce débit est calculé à partir des données historiques de la consommation d'eau potable, et $Q_p(n)$: débit de pompage de n pompes en marche.

Dans le cas où le démarrage des pompes est assez fréquent à cause de volumes de commande élevés, on peut à ce moment là réduire les volumes de commande en réduisant la valeur de la consommation horaire maximale ou en la remplaçant par la consommation horaire moyenne.

1.6.1.2 Démonstration de la formule des volumes de commande

Pour démontrer la formule des volumes de commande que nous avons développée, nous nous sommes basés sur l'équation de continuité dans le réservoir qui s'écrit comme suit :

$$V(t) = V(t-1) + (Q_p(t) - Q_c(t)) \cdot \Delta t \quad (1.13)$$

Supposons qu'au pas du temps $(t-1)$, le niveau d'eau dans le réservoir se trouve dans l'intervalle $[V_c(n-1), V_c(n)]$. Dans ce cas, au pas de temps (t) , nous avons $(n-1)$ pompes en marche, ce qui donne le débit de pompage suivant :

$$Q_p(t) = Q(n-1) \quad (1.14)$$

Nous prenons le cas le plus défavorable à $(t-1)$ afin de respecter la limite minimale dans le réservoir, c'est-à-dire le volume d'eau est égal à la limite inférieur de l'intervalle :

$$V(t-1) = V_c(n) \quad (1.15)$$

En remplaçant les équations (1.14) et (1.15) dans (1.13), l'équation de continuité devient:

$$V(t) = V_c(n) + (Q_p(n-1) - Q_{c.hmax}) \cdot \Delta t \quad (1.16)$$

avec, $Q_{c.hmax}$: consommation horaire maximale.

Le respect du seuil minimal dans le réservoir exige que le volume $V(t)$ soit supérieur à V_{\min} :

$$V(t) \geq V_{\min} \quad (1.17)$$

En remplaçant $V(t)$ par son expression, on a :

$$V_c(n) + (Q_p(n-1) - Q_{c.hmax}) \cdot \Delta t \geq V_{\min} \quad (1.18)$$

Ceci donne :

$$V_c(n) \geq V_{\min} - (Q_p(n-1) - Q_{c.hmax}) \cdot \Delta t \quad (1.19)$$

Nous prenons donc la valeur minimale de V_c à ne pas dépasser pour définir le volume de commande :

$$V_c(n) = V_{\min} - (Q_p(n-1) - Q_{c.hmax}) \cdot \Delta t \quad (1.20)$$

Les volumes de commande peuvent être définis pour respecter le seuil maximal. Mais, pratiquement ceci n'est pas très intéressant, car le réservoir est équipé d'un trop-plein qui

permet d'évacuer le surplus d'eau. Pour cette raison, on préfère définir les volumes de commandes par rapport à la limite minimale pour ne pas rencontrer une situation de manque d'eau.

1.6.2 Modèle de régulation progressif RVP

Le principe du fonctionnement du modèle RVP est similaire au modèle RV. Il tient compte du volume d'eau dans le réservoir au pas précédent $V(t-1)$ pour définir la commande de fonctionnement au pas suivant $n(t)$. Cependant, le modèle RVP se caractérise par la prise en considération du nombre de pompes en fonctionnement au pas de temps précédent $n(t-1)$, outre l'application du principe de démarrage et arrêt progressif des pompes.

Le modèle RVP repose sur deux volumes de commandes (*figure 1-11*) : un volume de démarrage V_{dem} et un volume d'arrêt V_{arr} . En effet, si le volume d'eau $V(t-1)$ est supérieur au volume d'arrêt V_{arr} le modèle ordonne l'arrêt de fonctionnement d'une pompe, et si le volume $V(t-1)$ est inférieur au volume de commande de démarrage V_{dem} , le modèle fait démarrer une pompe. Alors que, si le volume d'eau $V(t-1)$ est compris entre les deux volumes de commandes, le modèle garde le même nombre de pompes en marche au pas de temps précédent. La formulation suivante résume le principe sur lequel repose le modèle RVP.

$$\begin{cases} V(t-1) > V_{arr}: n(t) = \text{Min}[n(t-1) - 1, 0] \\ V_{arr} < V(t-1) < V_{dem}: n(t) = n(t-1) \\ V(t-1) < V_{dem}: n(t) = \text{Max}[n(t-1) + 1, n_p] \end{cases} \quad (1.21)$$

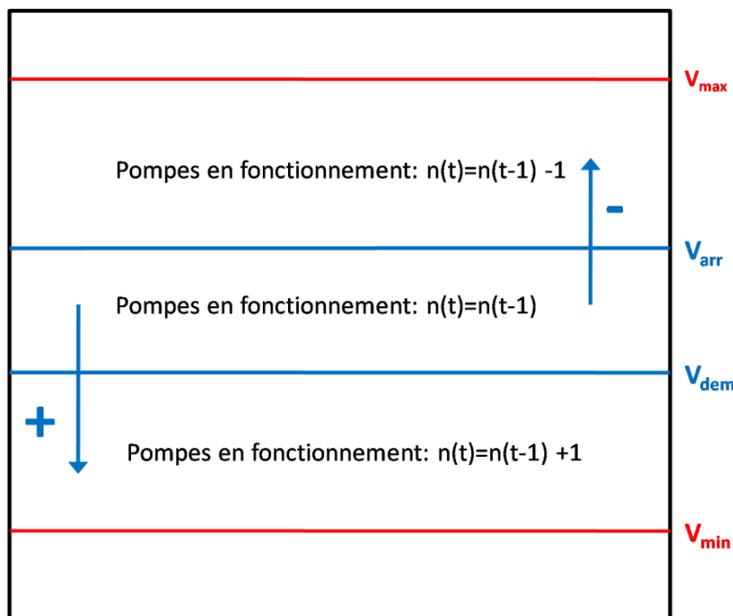


Figure 1-11 : principe du modèle de régulation progressif RVP

1.6.2.1 Volume de démarrage et d'arrêt du modèle RVP

Le modèle de régulation progressif RVP est caractérisé par deux volumes : un volume d'arrêt et un volume de démarrage. L'objectif du modèle est de maintenir le niveau d'eau dans l'intervalle limité par V_{dem} et V_{arr} . Une fois le volume d'eau dépasse le volume d'arrêt, le modèle ordonne l'arrêt d'une pompe. L'expression du V_{arr} est donnée par la relation suivante :

$$V_{arr} = \text{Min} \left[V_{max} - \Delta t \cdot (Q_p(n_p) - Q_{c.hmin}); V_{max} - \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) - n_p \cdot Q_{c.hmin} \right) \right] \quad (1.22)$$

Lorsque le volume d'eau est inférieur au volume de démarrage, le modèle met en fonctionnement une pompe. V_{dem} est donné par la formule suivante :

$$V_{dem} = \text{Max} \left[V_{min} - \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) - (n_p + 1) \cdot Q_{c.hmax} \right); V_{min} + \Delta t \cdot Q_{c.hmax} \right] \quad (1.23)$$

1.6.2.2 Démonstration des formules des volumes de commande du modèle RVP

i. Démonstration de la formule du volume d'arrêt

Pour démontrer la formule du volume d'arrêt, on se met dans le cas le plus défavorable par rapport au risque de dépassement du seuil maximal. Il s'agit donc du cas où toutes les pompes sont en marche et la demande en eau est minimale.

Supposons qu'à l'instant ($t = 1$), le volume d'eau $V(1)$ a dépassé le volume d'arrêt. Dans ce cas, nous entrons dans un processus d'arrêt progressif des pompes comme le montre la formulation suivante :

$$\begin{cases} t = 1, V(0) < V_{arr} \rightarrow V(1) = V(0) + \Delta t \cdot (Q_p(n_p) - Q_{c.hmin}) \\ t = 2, V(1) > V_{arr} \rightarrow V(2) = V(1) + \Delta t \cdot (Q_p(n_p - 1) - Q_{c.hmin}) \\ \dots \\ t = n_p, V(n_p - 1) > V_{arr} \rightarrow V(n_p) = V(n_p - 1) + \Delta t \cdot (Q_p(1) - Q_{c.hmin}) \end{cases} \quad (1.24)$$

A partir de la formulation (1.24), on peut déduire la relation qui donne $V(n_p)$ en fonction de $V(0)$:

$$V(n_p) = V(0) + \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) - n_p \cdot Q_{c.hmin} \right) \quad (1.25)$$

Pour que le niveau d'eau soit en dessous de la limite maximale, il faut que $V(1)$ et $V(n_p)$ soient inférieurs à cette limite. Ce qui donne :

$$\begin{cases} V(1) < V_{max} \rightarrow V(0) + \Delta t \cdot (Q_p(n_p) - Q_{c.hmin}) < V_{max} \\ V(n_p) < V_{max} \rightarrow V(0) + \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) - n_p \cdot Q_{c.hmin} \right) < V_{max} \end{cases} \quad (1.26)$$

A partir du système d'équations (1.26), on peut déduire les valeurs que $V(0)$ ne doit pas dépasser pour qu'il y ait un respect du seuil maximal :

$$V_{arr} = \text{Min} \left[V_{max} - \Delta t \cdot (Q_p(n_p) - Q_{c.hmin}); V_{max} - \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) - n_p \cdot Q_{c.hmin} \right) \right] \quad (1.27)$$

ii. Démonstration de la formule du volume de démarrage

Nous partons du même principe que précédemment, on se met dans le cas le plus défavorable par rapport au risque de dépassement du seuil minimal pour avoir une protection totale. On

suppose que toutes les pompes sont à l'arrêt à l'instant ($t=1$) et que la demande en eau est maximale. En se basant sur l'équation de continuité de la réserve d'eau on peut écrire le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} t = 1, V(0) > V_{dem} \rightarrow V(1) = V(0) - \Delta t \cdot Q_{c.hmax} \\ t = 2, V(1) < V_{dem} \rightarrow V(2) = V(1) + \Delta t \cdot (Q_p(1) - Q_{c.hmax}) \\ \dots \\ t = n_p + 1, V(n_p + 1) < V_{dem} \rightarrow V(n_p + 1) = V(n_p) + \Delta t \cdot (Q_p(n_p) - Q_{c.hmax}) \end{cases} \quad (1.28)$$

A partir de ce système d'équations (1.28), on peut déduire la formule de $V(n_p+1)$ en fonction de $V(0)$:

$$V(n_p + 1) = V(0) + \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) - (n_p + 1)Q_{c.hmax} \right) \quad (1.29)$$

En remplaçant (1.29) dans (1.28), on a l'expression de $V(0)$ au début et à la fin du processus de régulation, et qui représentent les deux cas extrêmes qui peuvent créer un dépassement du seuil minimal :

$$\begin{cases} t = 1: V(0) - \Delta t \cdot Q_{c.hmax} > V_{min} \\ t = n_p + 1: V(0) + \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) - (n_p + 1)Q_{c.hmax} \right) > V_{min} \end{cases} \quad (1.30)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} t = 1: V(0) > V_{min} + \Delta t \cdot Q_{c.hmax} \\ t = n_p + 1: V(0) > V_{min} - \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) + (n_p + 1)Q_{c.hmax} \right) \end{cases} \quad (1.31)$$

Pour que le volume d'eau soit protégé contre tout dépassement du seuil minimal, il faut que $V(0)$ soit supérieur à la maximale des deux valeurs tirées à partir du système d'équations (1.31). Ce qui permet de définir le volume de démarrage par l'expression suivante :

$$V_{dem} = \text{Max} \left[V_{min} + \Delta t \cdot Q_{c.hmax} ; V_{min} - \Delta t \cdot \left(\sum_{n=1}^{n_p} Q_p(n) - (n_p + 1)Q_{c.hmax} \right) \right] \quad (1.32)$$

Conclusion

La quasi-totalité de l'énergie consommée par les réseaux d'alimentation en eau potable est utilisée pour le fonctionnement des pompes. En effet, les moteurs entrainants les pompes ont besoin d'énergie pour répondre à la demande en eau en termes de débit et de pression.

L'énergie consommée par les pompes dépend de plusieurs paramètres de conception et de fonctionnement de l'installation. Tout déviation d'un paramètre de sa valeur optimale entraine une surconsommation énergétique de la station ce qui a un effet néfaste sur les plans : technique, économique et environnemental.

Pour régler cette surconsommation énergétique, on pourrait procéder à une des méthodes de réduction énergétique. Si, le paramètre mal-dimensionné est un paramètre de conception, on peut faire un redimensionnement de l'équipement concerné. Mais cette méthode est tributaire d'une étude technico-économique préalable afin de la valider. Par contre, si le dysfonctionnement énergétique est engendré par un paramètre de fonctionnement, on peut utiliser soit une méthode de régulation du débit de pompage, soit une méthode d'optimisation du planning de pompage.

Pour la méthode de régulation, il existe plusieurs techniques, telle que la variation de vitesse qui est la plus performante mais sa mise en œuvre nécessite des moyens d'investissement importants. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à la méthode de régulation par délestage de pompe en fonction du volume d'eau dans le réservoir, car la méthode présente l'avantage d'être facile à mettre en application et elle ne nécessite pas de grands moyens d'investissement pour les stations qui disposent d'un réservoir de distribution. Pour cela, nous avons développé deux modèles mathématiques basés sur cette méthode. Un premier modèle de régulation multi-volumes dont le délestage des pompes est fonction de plusieurs volumes de commandes dans le réservoir, et un second modèle de régulation progressif dont le délestage des pompes se fait de manière progressif en fonction de deux niveaux de commandes, un volume de démarrage et un volume d'arrêt. Pour les deux modèles, nous avons développé des formules permettant leur calcul en fonction de la demande en eau et des caractéristiques des pompes (débit).

Pour les méthodes d'optimisation du planning, elles sont basées sur une approche d'optimisation combinatoire pour définir le planning qui donne la consommation énergétique la plus faible tout en respectant les conditions du fonctionnement hydraulique.

Chapitre 2

2 Modèles d'optimisation d'un planning de pompage

Introduction

La surconsommation énergétique des stations de pompage représente un problème majeur pour une gestion durable et efficace de ces dernières. Elle constitue une problématique dont les répercussions pourraient être catastrophiques sur le plan technique et économique de la station. Bien que la majorité des stations de pompage sont gérées par une des techniques de régulation présentées précédemment, mais le problème reste souvent présent où ces techniques sont incapables d'y faire face.

Pour résoudre cette problématique, les gestionnaires peuvent faire appel à l'une des méthodes d'optimisation du planning de pompage, issues des techniques de la recherche opérationnelle et qui constituent un outil d'aide à la décision très efficace pour optimiser les opérations de pompage.

Ces méthodes d'optimisation consistent à établir un planning de pompage (combinaisons de pompes) sur un horizon bien défini afin d'optimiser l'énergie de pompage. Elles peuvent être utilisées seules où couplées à une méthode de régulation. Ces modèles d'optimisation reposent sur deux critères contradictoires, qui sont (*Guhl*, 1999):

- Réduction de l'énergie de fonctionnement.
- Respect des conditions du bon fonctionnement hydraulique du système.

Le premier critère représente la fonction objectif du modèle d'optimisation, il dépend des variables énergétiques de la pompe telles que le débit, la pression et le rendement. Alors que le second critère représente les contraintes d'optimisation, où il dépend principalement de la demande en eau et des caractéristiques du réservoir d'eau potable telles que les valeurs limites du volume d'eau dans le réservoir. Ces deux aspects constituent l'objectif du modèle d'optimisation des systèmes de pompage.

Pour trouver le planning optimal, il existe plusieurs méthodes permettant la résolution de ce type de problème. Ces méthodes sont classées en deux catégories essentielles (*Rebreyend*, 1999) :

- Méthodes exactes;
- Méthodes heuristiques et méta-heuristiques.

Les méthodes exactes présentent l'avantage de donner une solution optimale, cependant, elles sont limitées dans le traitement de certains problèmes de tailles importantes. Par contre, les méthodes heuristiques et méta-heuristiques permettent d'obtenir une solution approchée à un temps réduit, ce qui les rend très utile dans le traitement des problèmes complexes, d'où leur forte utilisation dans l'optimisation de divers problèmes.

2.1 Etat d'art sur les travaux d'optimisation des systèmes de pompage

L'utilisation d'une approche formelle pour résoudre un problème d'optimisation est nécessaire. Dans la littérature, plusieurs méthodes ont été présentées, commençant par les méthodes basées sur les approches heuristiques, jusqu'aux méthodes de modélisation mathématiques. Ces méthodes ont été étudiées en utilisant différentes techniques telles que la programmation linéaire, la programmation dynamique, la programmation non linéaire, la méthode de décomposition hiérarchique, la méthode de combinaison heuristique avec le calcul algorithmique (*Pulido-calvo &col.*, 2011). Parmi les travaux intéressants dans ce domaine, nous avons l'étude présentée par Guhl (1999) qui a entamé des études d'optimisation des systèmes d'AEP, permettant de montrer la faisabilité et les limites d'utilisation des outils de programmation mathématique. Le modèle est basé sur la méthode de programmation linéaire par les graphes. Cette méthode permet d'envisager des temps de calcul courts pour être compatible avec une gestion en temps réel. La méthode permet une modélisation de la majorité des configurations hydrauliques. Les résultats ont montré que la modélisation par les graphes est plus explicite en donnant une interprétation des hypothèses et des résultats plus proche de la réalité.

Un an après, Guhl et Brémond (2000) ont présenté l'amélioration des méthodes de prévision de la demande horaire de consommation, en tenant compte de l'incertitude résiduelle de prévision pour améliorer les modèles d'optimisation. Les méthodes de prise en compte de l'aspect stochastique de la demande permettent en particulier de quantifier le niveau de sécurité choisi par le gestionnaire du réseau.

Faye et ses collaborateurs (2002), ont proposé une approche globale de gestion à long terme d'un système de transfert-distribution-stockage d'eau potable, dont le but est de minimiser l'écart entre l'offre et la demande, à partir d'une prévision de la demande et des apports. L'approche est basée sur un horizon glissant, avec une procédure d'adaptation des pondérations du critère fondée sur la logique floue. Le modèle est résolu par une méthode heuristique améliorée en utilisant la programmation linéaire et la programmation dynamique pour réduire les effets de la discrétisation spatiale.

Nouiri et ses collaborateurs (2005) ont présenté un modèle d'optimisation, dont l'objectif est de réduire le débit maximal produit. L'algorithme d'optimisation utilisé est l'algorithme évolutionnaire qui procède par la combinaison des solutions, et améliore la performance maximale de l'ensemble, ce processus est répété jusqu'à la détermination de la solution optimale. Le modèle proposé a réussi à réduire le débit maximal produit de 17,9% tout en respectant les contraintes de bon fonctionnement du système, et la technique de calcul adaptée a permis d'utiliser le modèle avec efficacité, sans contraintes de matériel ni de temps de calcul.

En 2011, Pulido-Calvo et ses collaborateurs ont présenté un modèle d'optimisation des systèmes de distribution d'eau pour un périmètre d'irrigation et pour une ferme pisciculture dans le sud d'Espagne. Le modèle développé comporte deux parties:

- Algorithme de sélection de moindre coût ou de combinaison optimale des pompes et l'évaluation du coût énergétique du système de pompage ;
- Algorithme de détermination de la capacité de stockage du réservoir ce qui permet de pomper l'eau durant la période de tarification basse, et établir un planning annuel de pompage en fonction des périodes tarifaires.

L'objectif principal du modèle est de choisir les combinaisons de pompes et la capacité du réservoir qui permet de pomper l'eau pendant les heures creuses, tout en satisfaisant la demande en eau et les exigences du système hydraulique.

Le modèle permet aux services des eaux d'avoir une idée sur l'utilité d'un réservoir de régulation, ce qui leur permet de prendre la décision de l'implanter ou non. Pour la partie optimisation, le modèle a permis d'économiser 41% du coût annuel total pour le périmètre d'irrigation, par contre au niveau d'un autre système de distribution, le modèle a permis d'économiser 92% du coût annuel total sans réservoir de régulation.

Batchabani (2014) a présenté un modèle d'optimisation multi-objectif des réseaux de distribution d'eau potable avec réservoir de stockage, en se basant sur une méthode d'optimisation impliquant un processus en quatre parties : La sélection des variables de décision du réservoir, la formulation du problème, la résolution du problème formulé, et la validation du modèle. La formulation du problème d'optimisation est basée sur les équations de la fonction objectif, de continuité, de conservation d'énergie, et des critères de conception. A partir de l'équation de la fonction objectif utilisée, l'auteur a défini deux modèles d'optimisation : le premier appelé modèle mono-objectif basé seulement sur le coût comme critère d'optimisation, et le second est appelé modèle multi-objectif qui cherche à minimiser le coût et aussi maximiser les bénéfices. La résolution du modèle se fait à l'aide d'un algorithme d'optimisation (algorithme génétique) couplé à un modèle de simulation pour résoudre les équations de continuité et de conservation d'énergie à chaque itération (EPANET Solver). Le modèle a été appliqué à trois études de cas pour le valider, et les résultats obtenus ont montré que la prise en compte de la qualité de l'eau permet une intégration efficace des réservoirs dans le processus d'optimisation.

De La Vega et ses collaborateurs (2014), ont présenté un modèle d'optimisation du coût d'électricité associé au fonctionnement des pompes, pour faire face à la nature dynamique et stochastique de la demande. Pour cela, les auteurs ont proposé un modèle stochastique à deux étapes avec recours, dont les variables aléatoires sont représentées par certains nombre d'ensemble de scénarii fini et discret. Les résultats ont montré la stabilité de la méthode de génération des scénarii, la sensibilité de la solution basée sur les paramètres clés du modèle mathématique, et l'efficacité de l'heuristique dans la résolution des scénarii.

2.2 Description du problème d'optimisation

Dans notre étude, nous considérons que la station de pompage est composée de n_p pompes centrifuges identiques installées en parallèle. Les pompes refoulent l'eau vers un réservoir surélevé (*figure 2-1a*). L'opération de pompage est gérée par un planning de pompage N qui

consiste à définir à chaque pas de temps (Δt) le nombre de pompes en marche $n(t)$ avec $n(t) \in \mathbb{N} \mid n(t) \in [0, n_p]$. A partir du planning N , on peut déterminer l'énergie consommée et l'évolution de la réserve d'eau. L'objectif de l'optimisation est d'établir un planning de pompage N_{opt} (**figure 2-1b**) qui doit respecter deux les critères suivants :

- Consommation énergétique minimale,
- Respect des conditions du fonctionnement hydraulique.

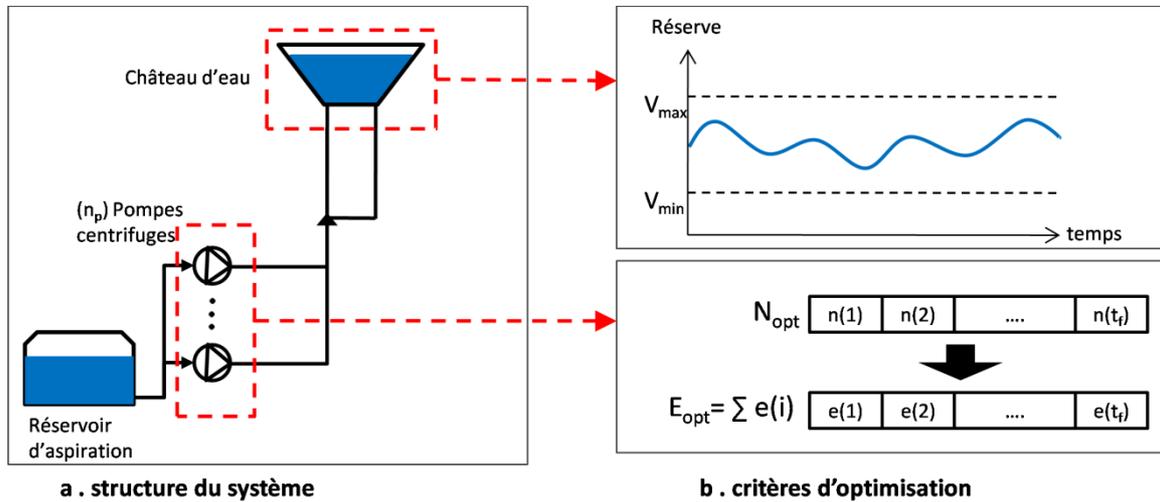


Figure 2-1 : description du modèle d'optimisation

2.3 Caractéristiques du modèle d'optimisation

2.3.1 Horizon et pas de temps d'optimisation

Le modèle d'optimisation est basé sur un horizon 24 heures. Cet horizon est souvent l'horizon le plus utilisé pour la gestion d'exploitation des systèmes de pompage. Pour le pas de temps, nous avons choisi un pas d'une heure ($\Delta t = 1$ heure) pour la discrétisation temporelle des différentes équations régissant le système de pompage, ce qui correspond au pas de temps des données disponibles chez les gestionnaires des services d'eau potable.

2.3.2 Variables d'optimisation

2.3.2.1 Variables de décision

A chaque pas de temps (t), nous avons un certain nombre de pompe $n(t)$ en marche définissant la variable de décision de l'approche d'optimisation, cette variable de décision est un nombre entier compris entre 0 et n_p . En fonction du nombre de pompes en marche, on détermine le débit de pompage Q_p , la pression de pompage H et le rendement de chaque pompe η (**figure 2-2**). L'ensemble des variables de décision sur l'horizon d'optimisation peut être représenté par vecteur entier (équation 2.1). Le vecteur de décision représente le planning du pompage.

$$N = \{n(1), n(2), \dots, n(24)\}; \text{ avec } n(t) \in \mathbb{N}; n = [0, n_p] \quad (2.1)$$

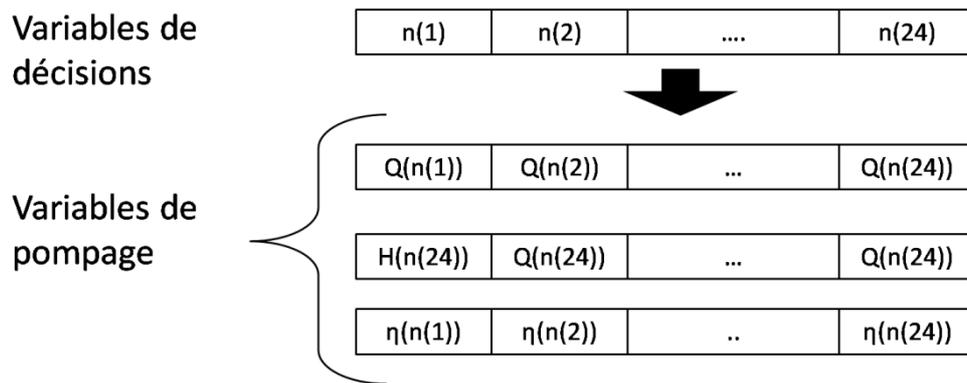


Figure 2-2 : variables d'optimisation du modèle.

2.3.2.2 Variables de pompage

Les variables de pompage sont fonction des variables de décision à chaque pas de temps (figure 2-2). Ces variables sont : le débit, la pression, et le rendement de pompage, où chaque vecteur de décision comporte implicitement les variables d'optimisation. Leurs valeurs se sont des données de la station de pompage fournies par les gestionnaires, comme elles peuvent être estimées à partir des courbes caractéristiques des pompes (figure 2-3).

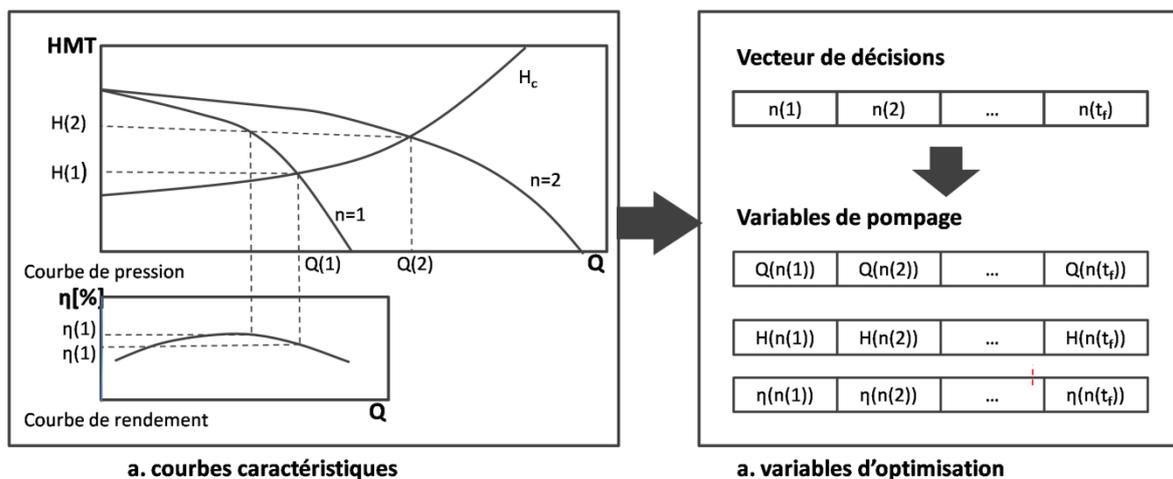


Figure 2-3 : détermination graphique des valeurs de variables d'optimisation

2.3.2.3 Variable de la demande en eau

La variable de la demande en eau représente le flux sortant du réservoir de distribution, elle est nécessaire pour le calcul des contraintes d'optimisation que nous allons décrire dans le paragraphe suivant. Cette variable est déterminée soit par un modèle normalisé de la demande en eau, ou elle est estimée par plusieurs méthodes, telle que les méthodes de prévision, de simulation, ...etc. (chapitre 5).

2.3.3 Contraintes d'optimisation

Les contraintes d'optimisation représentent les conditions de fonctionnement hydraulique du système de pompage. Dans notre cas, on doit veiller à garantir un niveau d'eau dans le

réservoir entre deux valeurs limites (V_{\min} et V_{\max}) pour assurer le bon fonctionnement de la distribution d'eau. Cette condition s'exprime par la relation suivante :

$$V_{\min} < V(t) < V_{\max} \quad (2.2)$$

$V(t)$: réserve d'eau à l'instant (t), son évolution est calculée à l'aide de l'équation de continuité de la masse d'eau dans le réservoir :

$$V(t) = V(t - 1) + \Delta t \cdot (Q_p(t) - Q_c(t)) \quad (2.3)$$

Les contraintes d'optimisation limitent l'intervalle des variables d'optimisation, car ces variables sont dépendantes des contraintes, et donc un planning optimal sous contrainte va être différent d'un planning calculé sans contraintes, alors que la valeur de la fonction objectif sous contraintes dans le cas d'un problème de minimisation par exemple sera supérieure au cas où le calcul se fait sans contraintes (*figure 2-4*).

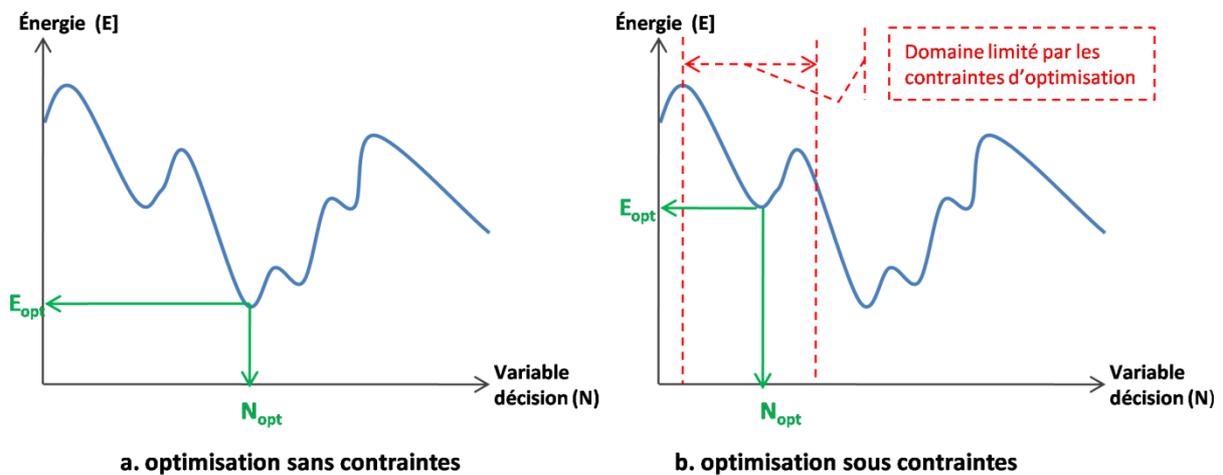


Figure 2-4 : influence des contraintes d'optimisation sur la fonction objectif

2.3.4 Fonction objectif

Par définition, l'objectif d'optimisation est de déterminer les composantes du vecteur de décision qui maximisent ou minimisent la fonction objectif sous contraintes. Cette fonction objectif est la base du modèle d'optimisation, sa forme dépend du cas d'étude considéré et peut prendre des formes différentes. D'une façon générale, le problème d'optimisation sur une période $[t_0, t_f]$ consiste à résoudre l'une des équations suivantes (François, 2013) :

$$\text{Max} \left\{ E \left[\sum_{t=t_0}^{t=t_f} F(.) \right] \right\} \quad (2.4)$$

$$\text{Min} \left\{ E \left[\sum_{t=t_0}^{t=t_f} F(.) \right] \right\} \quad (2.5)$$

Le symbole $E[.]$ représente l'espérance mathématique. F : fonction objectif.

Dans le cas d'une étude d'optimisation de la gestion des ouvrages hydrauliques, l'espérance mathématique est souvent caractérisée par un avenir incertain, ce qui ne peut garantir qu'une maximisation ou minimisation de la somme des valeurs de la fonction objectif à chaque pas de temps t (*François*, 2013). Dans notre cas, l'objectif de l'optimisation est de minimiser l'énergie consommée par les pompes sur l'horizon de pompage de 24 heures. Donc la fonction objectif du système s'écrit comme suit :

$$\text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{t_f=24} E(t) \right\} \quad (2.6)$$

où, $E(t)$: énergie consommée par les pompes à chaque pas de temps t .

En remplaçant l'énergie consommée par son expression, l'équation 2.6 devient :

$$\text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{24} \frac{\rho g H(n(t)) Q_p(n(t))}{36000 \cdot \eta(n(t))} \right\} \quad (2.7)$$

Finalement, les équations constituant le modèle d'optimisation sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{24} \frac{\rho g H(n(t)) Q_p(n(t))}{36000 \cdot \eta(n(t))} \right\} \\ V_{\min} < V(t) < V_{\max} \\ V(t) = V(t-1) + \Delta t \cdot (Q_p(t) - Q_c(t)) \end{array} \right. \quad (2.8)$$

où, $H(n(t))$: pression de pompage avec $n(t)$ pompes en marche à l'instant t , $Q_p(n(t))$: débit de pompage avec $n(t)$ pompes en marche à l'instant t et $\eta(t)$: rendement de pompage avec $n(t)$ nombre de pompes en marches à l'instant t .

2.4 Types de modèle d'optimisation

2.4.1 Modèle à long terme

Ce modèle est caractérisé par un temps de calcul long. Il est généralement utilisé dans le domaine d'eau potable pour choisir les combinaisons de pompes et le volume de stockage qui permettent de pomper l'eau durant les périodes à faible coût énergétique, et de sélectionner le tarif d'électricité le plus approprié et établir un fonctionnement de pompage adapté avec le tarif d'énergie de fonctionnement tout en satisfaisant la demande en eau et les exigences du système durant la saison annuelle (*Pulido-Calvo et col.*, 2011). La procédure de calcul commence avec une solution initiale de la sélection des combinaisons de pompes, les combinaisons qui donnent le maximum des exigences en termes de débit et de pression du réseau de distribution sont choisies comme solution initiale et sont utilisées par l'algorithme d'optimisation pour la conception et le fonctionnement de la station de pompage et le réservoir de régulation.

2.4.2 Modèle à court terme

Le modèle ressemble au modèle à long terme, à l'exception de la période de fonctionnement qui doit être courte et appropriée au temps réel de fonctionnement. Le plan de fonctionnement est préparé pour une période de vingt-quatre heures à l'avance, car la demande affiche un cycle journalier prononcé, et le tarif d'énergie est basé sur l'heure du jour. Le modèle à court terme pourrait être utilisé pour mettre à jour la solution du modèle à long terme (*Pulido-Calvo et col.*, 2011). Le modèle pourrait également être couplé à une méthode de régulation en temps réel, ce qui nécessite généralement la prévision de la demande en eau. Pour cela, les données historiques de la demande en eau ne sont pas prises en compte, la méthodologie de la prévision de la demande en eau peut se faire par une approche en série de temps, modèles de régression ou réseau de neurones. Les résultats du modèle à court terme comprennent les combinaisons de pompes en fonctionnement et leur planning pour toutes pompes de la station.

2.5 Notion de complexité

La théorie de la complexité s'intéresse à l'étude formelle de la difficulté des problèmes en informatique (*Gardeux*, 2011 ; *Boussaid*, 2013). La difficulté d'un problème peut être mesurée par la complexité du meilleur algorithme solvant le problème d'une manière optimale. La complexité algorithmique est donc un indicateur efficace qui permet d'évaluer la performance d'un algorithme et le comparer à d'autres algorithmes de même fonctionnalité (*Ourari*, 2011). En effet, pour un problème donné il se peut qu'ils existent plusieurs algorithmes permettant de le résoudre. Pour connaître quel est le meilleur algorithme pour la résolution, on pourrait calculer le temps d'exécution de l'algorithme. Cependant, ce temps d'exécution dépend également de la machine et du langage utilisé. Pour définir objectivement la performance d'un algorithme, on doit se débarrasser de l'influence matérielle dans l'évaluation. En 1973, Knuth a proposé de calculer la complexité d'un algorithme, pour obtenir un ordre de grandeur des opérations élémentaires effectuées pour fournir une solution du problème traité (*Gardeux*, 2011). Par définition : « La complexité d'un algorithme est le nombre d'opération élémentaires que celui-ci exécute » (*Rebreyend*, 1999). Le nombre des opérations élémentaires $T(n)$ effectuées par un algorithme est une fonction qui dépend de la taille du problème n , cette fonction est appelée la complexité (*Rebreyend*, 1999), elle permet d'indiquer le temps de calcul et la taille de mémoire nécessaire pour résoudre le problème (*Ourari*, 2011).

Dans certains cas, il est difficile de trouver avec précision le nombre d'opérations, on sera obligé d'estimer le comportement de l'algorithme sur des instances de grandes tailles, en étudiant le comportement asymptotique de la complexité (*Rebreyend*, 1999), où la complexité d'un algorithme sera représentée par une borne asymptotique de son nombre d'opérations élémentaires, et on dit par exemple qu'un algorithme est de complexité $O(n^p)$.

Un algorithme de complexité polynomiale $O(p(n))$ si son temps d'exécution est borné par une fonction polynomiale p de l'instance n . Si $p(n)$ est borné supérieurement par un polynôme d'ordre k , on dit que l'algorithme est polynomial d'ordre k , c'est-à-dire $T(n) = O(n^k)$.

Cependant, s'il n'existe pas de polynôme $p(n)$ tel que par exemple $T(n) = 2^n$, on dit que l'algorithme est de complexité exponentielle (*Ourari, 2011*).

Sur le plan théorique, tout problème d'optimisation peut être résolu par une énumération complète de toutes les solutions possibles de l'espace de recherche, il s'agit donc des méthodes énumératives. Cependant, pour certains problèmes de taille importante ce type de méthode peut engendrer une complexité exponentielle $O(e^n)$. Dans ce cas, ces méthodes sont pratiquement inutiles.

Dans le cas des problèmes combinatoires tel que notre cas d'étude, le fait que la station de pompage comporte 2 pompes ($n_p = 2$), et l'horizon de pompage est de 24 heures ($t_f = 24$). Le nombre de solutions possibles est égal à $(n_p+1)^{t_f}$, ce qui donne environ $2,82 \cdot 10^{11}$ solutions possibles. Dans le cas d'une méthode exacte, l'algorithme prend en considération toutes les solutions possibles engendrant ainsi un de temps de calcul énorme. Pour cette raison, il est recommandé de faire appel à des méthodes approchées pour résoudre ce type de problèmes.

2.6 Méthodes de résolution des problèmes d'optimisation

Le modèle d'optimisation établi (paragraphe 2.3.4) s'inscrit dans le cadre des modèles d'optimisation combinatoire appelé aussi optimisation discrète. Ils consistent à trouver la meilleure solution suivant un critère donné parmi un ensemble discret de solutions possibles (*Rebreyend, 1999*). Parmi les problèmes les plus célèbres de ce type d'optimisation, on a : le voyageur de commerce, les problèmes d'ordonnancement, des problèmes de la théorie des graphes, ...etc. Dans certains cas de problèmes d'optimisation, il est très difficile de trouver la meilleure solution optimale, ce qui pousse à chercher une solution sous-optimale, autrement dit c'est une solution approchée (*figure 2-5*). Parmi les méthodes utilisées pour la résolution des solutions approchées, on a les méthodes heuristiques et méta-heuristiques.

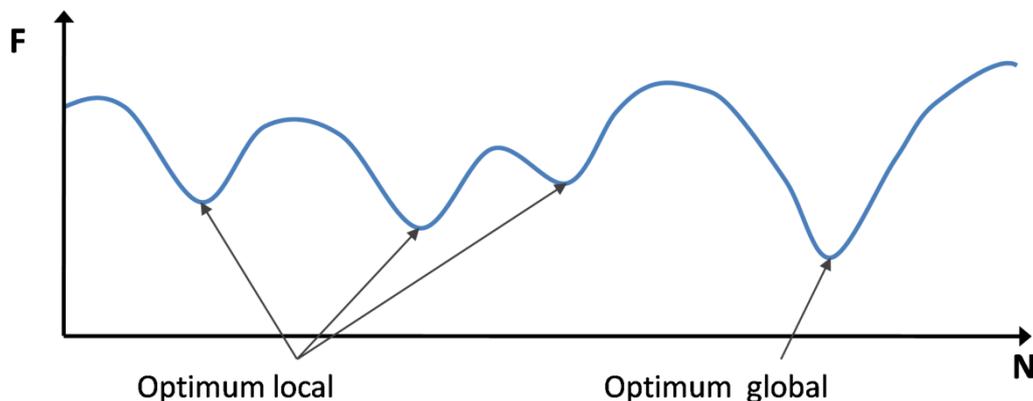


Figure 2-5 : optimum local et global d'une fonction

2.6.1 Méthodes exactes

Les méthodes exactes consistent souvent, à rechercher implicitement la ou les meilleures solutions d'un problème d'optimisation. Les méthodes exactes regroupent toutes les méthodes

dont on sait que le résultat représente la solution optimale exacte du problème. Elles s'opposent à l'heuristique car elles permettent d'obtenir une solution optimale et non pas approchée.

Cependant, la recherche d'une solution exacte n'est pas toujours facile, et spécialement pour les problèmes de taille importante, où le temps de calcul pourrait augmenter considérablement, ce qui limite l'utilisation de ces méthodes (*Layeb*, 2010 ; *Gardeux*, 2011). Ci-après nous allons présenter quelques méthodes exactes les plus utilisées.

2.6.1.1 Séparation-évaluation

La méthode est connue par son appellation en anglais (branch and bound). C'est une méthode arborescente par énumération qui s'applique à des données discrètes. Elle est caractérisée par une structure simple. Elle est basée sur la théorie des graphes qui convient aux problèmes combinatoires. La recherche se fait d'une manière exhaustive mais intelligente de toutes les solutions. En effet, dans une approche exacte classique la recherche de la solution optimale se fait dans un ordre fixé (généralement c'est l'ordre préfixe obtenu par le parcours de l'arbre des solutions). Par contre, l'algorithme séparation-évaluation effectue la recherche de l'arbre des solutions en essayant de traiter d'abord les régions de sous-arbres intéressantes, tout en se débarrassant des sous-arbres qui ne fournissent pas une solution meilleure à celle courante (*Gardeux*, 2011). L'algorithme séparation-évaluation se distingue des approches exactes classiques par les deux opérations suivantes (*Rebreyend*, 1999):

- Un sous-espace n'est pas traité si on ne sait pas d'avance qu'il porte une solution meilleure à celle courante ;
- L'ordre préfixe est remplacé par un ordre lié à la qualité estimée de la meilleure solution du sous-espace de recherche considéré.

Le calcul se fait donc en deux étapes : dans la première étape qui est l'étape de séparation l'algorithme sépare les solutions possibles en sous ensembles (ou branches). Dans la deuxième, l'algorithme évalue les différentes branches tout en majorant ses solutions possibles afin d'éliminer une branche si celle-ci présente un optimum moins performant qu'un optimum ou d'une solution déjà connue d'une autre branche, et de cette manière la solution optimale est obtenue en parcourant uniquement une partie du graphe initial réduisant ainsi le temps de calcul. Ci-après nous détaillons les deux étapes (*Favre*, 2013) :

i. Etape de séparation

L'algorithme définit une solution comme étant un ensemble de commande $N = (n(1), n(2), \dots, n(t_f))$, où t_f dans ce cas représente le nombre d'étapes (temps de fonctionnement). A chaque pas de temps la commande peut prendre n_p valeurs différentes. Dans le cas où t_f est indépendant de n_p , il y'aura $n_p^{t_f}$ solutions possibles. Le principe de la séparation consiste à diviser cette ensemble de $n_p^{t_f}$ solutions en plusieurs sous ensembles. Chaque sous ensemble est aussi divisé en sous ensembles, le tout d'une façon récursive. On obtient donc l'arbre dont chaque branche principale se ramifie en des branches plus petites qui elles même donnent naissance à plusieurs autres branches, la branche finale étant la feuille (*Favre*, 2013).

ii. Etape d'évaluation

Dans l'évaluation, l'algorithme consiste à parcourir la première branche en entier, la solution trouvée est la première valeur de référence. Celle-ci est ensuite comparée au majorant de chaque sous-branche faisant partie de la même branche d'origine, et de manière répétitive jusqu'à remonter aux premières branches de l'arbre. Si la performance de l'optimum d'une sous-branche est inférieure à la performance de la solution de référence, les solutions de cette sous-branche sont ignorées, sinon, l'optimum du niveau inférieur de l'arbre est calculé et comparé à la valeur de référence et ainsi de suite, si une solution est meilleure que la solution de référence elle devient la solution de référence. L'algorithme calcule ainsi la solution optimale sans parcourir l'ensemble du graphe réduisant ainsi le temps de calcul. L'utilisation des contraintes d'optimisation diminue encore le nombre de calcul en limitant le nombre de commandes admissibles à chaque étape. Il existe plusieurs méthodes qui décrivent la manière de parcourir le graphe. L'algorithme permet de résoudre des problèmes combinatoires de taille importante, avec un temps de calcul limité, environ moins de 10 minutes sur un ordinateur parallèle. Le seul inconvénient qu'on peut rapprocher à cette méthode, c'est que lorsque la taille de la population est très importante, la méthode perd son efficacité (*Rebreyend*, 1999 ; *Favre*, 2013).

2.6.1.2 Programmation linéaire

La programmation linéaire (PL) concerne la manière de résoudre les problèmes dont la fonction objectif et les contraintes d'optimisation sont linéaires. Elle peut être appliquée pour résoudre plusieurs problèmes économiques et industriels (*Layeb*, 2010). Par définition, La méthode consiste à déterminer une solution parmi un ensemble S qui maximise ou minimise un certain critère f, Si l'ensemble S est formulé comme un ensemble des valeurs dans l'ensemble des réels R et contraintes à satisfaire des inégalités linéaires et si f est une fonction linéaire en ces variables, on dit qu'il s'agit d'un problème de programmation linéaire (*Demassey*, 2003). Un programme linéaire peut être écrit comme suit :

$$\begin{cases} \text{Min } (cx) \\ Ax \geq b \\ x \in \mathcal{R}, c \in \mathcal{R}^m, bc \in \mathcal{R}^m \text{ et } A \in \mathcal{R}^{mn} \end{cases} \quad (2.9)$$

Pour simplifier, il s'agit d'un cas de minimisation, où x : est un vecteur n dimensionnel représentant la solution qui doit minimiser la fonction objectif (cx). Les éléments de l'ensemble $S = \{x \in \mathcal{R}^n \mid Ax \geq b\}$ sont les variables réalisables du problème, et parmi eux les variables x^* qui minimisent le critère (cx). Ces variables x^* représentent les solutions optimales du problème (*Demassey*, 2003).

Sachant que l'ensemble des solutions valides forment dans ce cas une enveloppe convexe nommée polytope et que l'ensemble des sommets du polytope forme l'ensemble dominant de solutions parmi les solutions valides (*Ourari*, 2011).

Parmi les célèbres algorithmes qui sont basés sur cette méthode, nous avons l'algorithme de simplexe développé par Dantzig en 1947 et qui permet de résoudre pratiquement tous les

problèmes linéaires. Nous avons également la méthode présentée par Khachian en 1979 et qui a été appelé méthode ellipsoïde. On rapproche à cette méthode d'être lente pour résoudre les problèmes réels (*Khachian*, 1979 ; *Ourari*, 2011).

Lorsque les contraintes sont entières, on dit alors que le programme est linéaire en nombre entiers (PLNE), tandis que si certaines des variables seulement sont contraintes à être entières, on parle d'un programme linéaire en variable mixte (PLNE mixte).

La résolution de ce type de problème est souvent difficile par le fait que l'espace de recherche n'est pas convexe mais discret, et parmi les méthodes les plus efficaces à résoudre ce type de problème c'est la méthode de séparation et évaluation (*Ourari*, 2011 ; *Favre*, 2013).

2.6.1.3 Programmation dynamique

La programmation dynamique n'est pas un algorithme de résolution proprement dit, mais un principe général permettant la résolution des problèmes d'optimisation sous contraintes (*Ourari*, 2011). La méthode a été élaborée par Bellman en 1957 (*Bellman*, 1957). Elle permet le parcours de tous les états possibles à tous les pas de temps de l'optimisation (*Favre*, 2013).

$$F = \min_N C_0^{tf} \quad (2.10)$$

F : fonction objectif, C : coût des opérations, t_f : nombre de pas.

Le système étudié est décrit intégralement par une variable d'état discrétisée temporellement qui peut être soumise à des contraintes (*Favre*, 2013).

$$x(t) = x_t \in X_t, X_t \subset R^{Ne} \quad (2.11)$$

avec, X_t : ensemble des états admissibles de dimension Ne ,

L'objectif est de trouver un vecteur commande N correspondant, qui maximise (ou minimise) la fonction F . L'inconvénient principal de cette méthode est le temps de calcul très long dont la complexité est polynomiale ou exponentielle selon le problème traité.

Pour éviter de calculer le coût sur l'ensemble de N solutions possibles, on utilise le principe de décomposition de Bellman. Ce principe consiste à diviser le problème de décision en des problèmes courts. Par exemple, on divise le problème à $t = 1$, on aura deux vecteurs commandes et la fonction objectif du problème s'écrit alors (*Favre*, 2013):

$$F = \min_N [C_0^{tf}] = \min_N [c_0(x_0, x_1) + \min_N [C_1^{tf}]] \quad (2.12)$$

Si à un pas donné, plusieurs vecteurs de commandes arrivent au même état, alors il suffit de ne garder que le vecteur optimal, et les autres peuvent être éliminés. Cela permet de travailler en séquences, où à chaque séquence plusieurs vecteurs sont éliminés. Ce qui réduit le temps de calcul considérablement.

En résumé, Il faut trouver une séquence de commande $N_{tf} = (n_0, n_1, \dots, n_{tf})$ permettant de minimiser la fonction (2.12) tout en respectant les contraintes d'optimisation (2.11). Pour cette raison, l'algorithme est très efficace dans le cadre d'étude séquentielle, et également lorsque le problème dispose un grand nombre de contraintes car elles réduisent l'espace de recherche (*Favre*, 2013).

2.6.2 Approches heuristiques

L'utilisation d'une méthode exacte n'est pas toujours possible pour certains problèmes, et notamment lorsque le temps de calcul devient trop important. Dans ce cas, on utilise des méthodes approchées appelées heuristiques. Le mot heuristique vient du grec ancien qui signifie (je trouve) et qui désigne tout ce qui aide à la découverte (*Gardeux*, 2011). Les heuristiques se sont des algorithmes qui cherchent des solutions sous-optimales (approchée) de bonne qualité avec un temps réduit, leur complexité est souvent en $O(n^i)$, avec i assez faible (*Rebreyend*, 1999). L'évaluation des méthodes heuristiques se fait par le calcul de la déviation moyenne du critère par rapport à la solution optimale (*Ourari*, 2011).

2.6.2.1 Heuristiques gloutonnes

Les algorithmes gloutons se sont des méthodes constructives où l'on construit progressivement une solution locale pour un problème d'optimisation avec l'espoir d'atteindre la solution optimale. Il faut noter que si l'algorithme fourni systématiquement des solutions optimales, il constitue une méthode exacte, dans le cas contraire il est appelé heuristique gloutonne (*Ourari*, 2011).

L'algorithme consiste donc à optimiser à chaque pas le coût de la solution provisoire. Ce type d'heuristiques a été largement utilisé pour résoudre plusieurs problèmes d'optimisation, et particulièrement pour les problèmes où on peut construire la solution pas-à-pas.

L'algorithme glouton débute son processus par une sélection de la composante la plus performante, ensuite, il insère successivement des nouvelles composantes dans l'anneau de la solution en cours de construction. Si par exemple, nous avons inséré (r) composantes dans l'anneau de la solution en cours, pour chaque composante restante $n(i)$, on cherche où l'insérer dans l'anneau de la solution courante. Pour cela, pour chaque paire consécutive de composante ($n(j)$, $n(k)$) dans la solution et pour chaque composante $n(i)$ restante, on calcule la nouvelle valeur de la fonction objectif E , on retient donc la composante et la paire qui optimisent la valeur de E , et on stocke cette valeur. Cette étape de l'algorithme a une complexité proportionnelle à $(n_p - r) \cdot r$ (*Renard*, 2005). Par la suite, et à chaque étape on insère une composante de la même manière jusqu'à avoir n_p composantes et on retient la solution qui donne une valeur optimale pour E . La complexité totale est donnée par la relation suivante (*Renard*, 2005):

$$\text{complexité} = \sum_{r=1}^{n_p} (n_p - r)r = O(n_p^3) \quad (2.13)$$

n_p : nombre de composantes et r : nombre de composantes insérées dans l'anneau.

Il faut essayer toutes les valeurs de $r(i)$, car E ne varie pas de façon monotone en fonction de r . La méthode se caractérise par une rapidité dans le calcul, mais la qualité de la solution est souvent perfectible, où d'autres heuristiques peuvent être beaucoup plus sophistiquées et fournir des résultats de meilleure qualité, en plus elle ne garantit pas l'optimalité de la solution proposée (Ngueveu, 2009 ; Essafi, 2010).

2.6.2.2 Algorithme de recherche locale

La méthode de recherche locale également appelée méthode de descente ou d'amélioration itérative. Dans la littérature, il existe plusieurs types de la recherche locale. Parmi les plus connue nous avons deux algorithmes : algorithme de la descente stochastique et algorithme de la plus grande pente, qui sont pratiquement identiques, où la seule différence réside dans l'énumération des solutions du voisinage pour l'algorithme de la plus grande pente.

La descente stochastique consiste à générer une solution initiale $N(0)$, puis on lance l'exploration de son voisinage $V(N(0))$ jusqu'à ce que une meilleure solution soit rencontrée $N(i)$.

$$\begin{cases} N(i) \in V(N(0)) \\ F(N(i)) \text{ meilleure que } F(N(0)) \end{cases} \quad (2.14)$$

Dans ce cas, la recherche locale du voisinage se termine après un nombre variable d'itérations, quand elle n'arrive plus à trouver une meilleure solution que la solution courante. La méthode consiste à ne pas explorer forcément tout le voisinage d'une solution.

Dans l'algorithme de la plus grande pente, c'est pratiquement le même principe, mais toutes les solutions du voisinage correspondant à la transformation élémentaire sont énumérées et on ne retient que la meilleure. Le principal avantage de la méthode de recherche locale est sa simplicité et est facile à programmer. Cependant, la méthode présente l'inconvénient de ne pas être adaptée à des fonctions objectifs multimodales qui présentent plusieurs optimums. Car elle s'arrête dès qu'elle rencontre le premier optimum local, à moins de la relancer à partir d'une autre solution initiale. La méthode également est critiquée pour son temps de calcul très long en particulier pour les problèmes de grande taille ou lorsque le problème comporte plusieurs variables et on opte pour une transformation élémentaire exhaustive (Alahmad, 2008).

2.6.2.3 Heuristiques aléatoires

Dans la recherche des solutions suivant un critère déterminé, l'algorithme peut rencontrer deux solutions qui sont identiques. Pour cela, plusieurs méthodes sont employées :

- utiliser un autre critère pour classer les solutions ;
- utiliser un ordre de classement
- faire un choix aléatoire.

Les heuristiques aléatoires sont basées sur le choix aléatoire pour faire le choix entre deux solutions identiques selon le critère utilisé. Ces algorithmes sont caractérisés de ne pas être déterministes, où deux exécutions de la même heuristique peuvent générer deux résultats différents (*Rebreyend*, 1999).

2.6.3 Méta-heuristique

Une méta-heuristique est un cadre général des heuristiques, qui à l'inverse des heuristiques qui se base sur le problème lui-même. Le terme méta-heuristique a été inventé par Golver en 1986 lors de la conception de l'algorithme tabou (*Golver*, 1986 ; *Gardeux*, 2011). Les méta-heuristiques se caractérisent par un concept non lié au problème, dont l'aspect aléatoire est souvent utilisé. Les méta-heuristiques regroupent plusieurs algorithmes, parmi les plus connus, les algorithmes évolutionnaires dont les algorithmes génétiques et les colonies de fourmis

2.6.3.1 Recuit simulé

L'idée du recuit simulé est venue de la technique sidérurgique, et bien précisément lors de la solidification des métaux par le refroidissement, qui consiste à monter la température du métaux à des valeurs élevées pour atteindre les états de basse énergie d'un solide, En effet, lorsqu'un métal est à température élevée, les particules qui le constituent possèdent une grande énergie qui leur permet plus de liberté dans leur déplacements aléatoires dans la matières, dès que la température commence à baisser les particules perdent leurs énergies ce qui réduit la capacité de leur mouvement. Cet état transitoire de refroidissement permet d'obtenir des matériaux très homogènes et de bonne qualité. Le processus est appelé le recuit (*Hachimi*, 2013).

La méthode de recuit simulé a été développée indépendamment par Kirkpatrick en 1983 (*Kirkpatrick*, 1983) et Cerny en 1985 (*Cerny*, 1985), dont le principe consiste à utilisé une procédure itérative à des paliers de températures décroissantes, pour atteindre l'état quasi équilibre thermodynamique. Ce qui permet de faire sortir des optimums locaux avec une probabilité d'autant plus grande que la température est élevée. Lorsque l'algorithme atteint des températures basses, les états les plus probables constituent en principe d'excellentes solutions au problème d'optimisation (*Hachimi*, 2013).

Au départ l'algorithme commence à une température élevée, ce qui engendre des mouvements aléatoires (voisinage) pour chaque paramètre d'optimisation. Pour chacun de ces mouvements la fonction objectif est comparée avec la valeur précédente, s'il y a un gain, les valeurs courantes des paramètres sont gardées, sinon, ils peuvent être gardées mais avec une certaine probabilité dite de Boltzmann (*Hachimi*, 2013):

$$P_b(T, N, N_{new}) = \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (2.15)$$

avec, P_b : probabilité de Boltzmann, ΔE : différence entre la valeur courante et précédente de la fonction objectif, T est le paramètre qui simule la température. N : solution précédente du problème et N_{new} : nouvelle solution du problème.

Par la suite, l'algorithme décrit l'étape par une relation linéaire entre la température courante et précédente :

$$T_k = \alpha T_{k-1} \quad (2.16)$$

où, T_k : température actuelle, T_{k-1} : température précédente et α : coefficient de refroidissement.

Le processus est réitéré pendant un nombre fixé (Palier de température). Ensuite, la température est réactualisée. La séquence des points générés convergent normalement vers l'optimum global.

Le choix de la température initiale doit se faire de la bonne manière, il faut qu'elle soit suffisamment élevée pour qu'elle facilite le processus d'exploration dans l'espace de recherche. Après, d'une façon graduelle la température décroît pour atteindre la valeur 0, signifiant que la méthode n'acceptera plus de détériorer la solution (*Hachimi*, 2013).

Certains auteurs ressemblent l'algorithme à la descente du gradient. Cependant, l'algorithme se distingue par le fait qu'il accepte des transitions donnant de mauvaises solutions suivant une loi de probabilité, au cours d'itérations l'algorithme autorise de moins en moins de mauvaises solutions.

Parmi les inconvénients qu'on peut rapprocher au recuit simulé c'est qu'il présente une forte dépendance du voisinage, et que l'algorithme est difficilement parallélisable. Par contre, l'algorithme présente l'avantage qu'il soit simple et facile à mettre en œuvre (*Rebreyend*, 1999).

2.6.3.2 Le tabou

La méthode de recherche avec tabou, ou tout simplement recherche tabou, a été proposée pour la première fois par Glover en 1986 (*Glover*, 1986), pour traiter en particulier les problèmes combinatoires permettant de trouver un compromis d'une manière simple entre la qualité de la solution et le temps de calcul.

L'algorithme tabou est une méthode itérative qui se base sur l'historique de la recherche pour éviter les optimums locaux et pour établir une stratégie de recherche. Cette historique de recherche est caractérisé par la liste des transitions interdites, qui est mise à jour à chaque itération. L'objectif de cette technique est d'éviter que l'algorithme revienne à une solution courante déjà visitée (*Rebreyend*, 2005).

Cette technique apporte à la méthode un caractère d'intelligence dans le processus de recherche. Le principe de base de la méthode a été inspiré de la mémoire humaine à l'encontre de la méthode du recuit simulé complètement dépourvu de mémoire (*Boussaid*, 2013 ; *Hachimi*, 2013).

La mémoire utilisée par la méthode est appelée liste tabou. Cette mémoire sauvegarde les dernières solutions rencontrées pendant un moment donné, en les déclarant tabou, d'où le nom de la méthode. Une nouvelle solution n'est acceptée que si elle n'appartient pas à la liste tabou. Cette technique de mémoire permet de choisir le meilleur voisin non tabou, même si celui-ci dégrade la fonction objectif.

Cependant, dans certains cas, les interdictions enregistrées par la liste tabou peuvent être considérées trop exagérées, où on risque d'éliminer (en les rendant tabou) certains mouvements particulièrement utiles. Pour éviter cela, un mécanisme dit d'aspiration est inséré dans l'algorithme afin de déterminer les critères selon lesquels un mouvement est accepté même s'il est tabou, s'il permet d'obtenir une meilleure solution que toutes celles déjà rencontrées.

La mémoire du processus de recherche est tributaire de la taille de la liste tabou. Pour favoriser l'intensification, il faut diminuer la taille de la liste tabou. Par contre, pour favoriser la diversification, il faut augmenter la taille de la liste tabou. Il faut noter que la taille de la liste tabou peut être modifier au cours de la recherche. Parmi les améliorations qu'on peut apporter à cette méthode est l'utilisation de structure de mémoire à moyen et à long terme afin d'approfondir les aspects d'intensification et de diversification (**Boussaid**, 2013).

Dans la recherche tabou avec des variables continues, deux concepts sont mis en jeu : le voisinage d'un point donné et un mouvement aléatoire dans le voisinage. Pour un point X et un pas donné t , le voisinage $V_z(X,t)$ est défini comme suit (**Hachimi**, 2013) :

$$V_z(X, t) = Y: |X - Y| \leq t \quad (2.17)$$

avec, Y : mouvement aléatoire faisable, il es généré aléatoirement dans le voisinage $V(X, t)$ de X , et il respecte les contraintes d'optimisation. Par définition, la taille de voisinage est le nombre de points Y générés dans le voisinage V de X avec un pas donné t . La performance de recherche tabou dépend de la taille du voisinage et la longueur de la liste tabou.

Si on commence par une solution aléatoire X appartenant à l'ensemble de recherche S , la recherche se déplace vers une solution Y située dans le voisinage V par exploration itérative de l'espace solutions.

Au début le vecteur « pas » couvre la totalité de l'espace de recherche puis il diminue à chaque itération.

Le meilleur point parmi les points générés dans le voisinage V de X est retenu. Ce point sera le centre du prochain voisinage. Il est celui qui a amélioré le plus la fonction objectif F ou bien celui qui la dégrade le moins (**Hachimi**, 2013).

En résumé, l'efficacité de l'algorithme tabou dépend surtout de la définition de la taille de la liste tabou, de la solution initiale et du voisinage défini. La méthode présente l'avantage de comporter moins de paramètres que le recuit simulé par exemple. Cependant, la méthode n'est pas souvent performante, d'où la nécessité de lui ajouter le processus d'intensification/diversification (**Rebreyend**, 2005 ; **Hachimi**, 2013).

2.6.3.3 GRASP

GRASP est le sigle (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), la technique a été présentée pour la première fois par Feo et Resende en 1989 (*Feo & Resende*, 1989). Certains auteurs parlent d'un lien qui peut exister entre le GRASP et l'algorithme de colonies de fourmis, où un algorithme de fourmi est une forme de GRASP dont la phase de construction de solution évolue au cours de l'exécution, cependant, le caractère adaptatif est plus développé dans l'algorithme de fourmis que pour le GRASP (*Grellier*, 2008). C'est un algorithme itératif qui mélange la recherche gloutonne et aléatoire (*Rebreyend*, 2005).

Le GRASP est un processus itératif, qui consiste à passer par deux étapes à chaque itération (*Rebreyend*, 2005 ; *Grellier*, 2008):

- La construction d'une solution,
- La recherche de voisinage (ou minimum local).

i. Construction d'une solution

Dans cette étape l'algorithme construit une solution réalisable à la fin de chaque itération. La construction commence par une solution vide, puis des composantes seront ajoutées successivement dans la solution à chaque itération de construction. Le choix de la prochaine composante à ajouter dans la solution est basé sur une évaluation de toutes les composantes qui n'appartiennent pas encore à la solution en construction, à l'aide d'une fonction d'évaluation. Cette méthode de construction est appelée gloutonne car à chaque itération on s'approche vers l'optimum recherché. Cette fonction représente l'amélioration immédiate de la qualité apportée par l'incorporation de ces composantes dans la solution en construction. L'évaluation des composantes à l'aide de la fonction d'évaluation mène à la création d'une liste restreinte de candidats (RCL) formée par les meilleures composantes (il s'agit ici de l'aspect glouton-greedy de la méthode). La composante ajoutée à la solution en construction est choisie au hasard de la liste des meilleures composantes dans la liste restreinte des candidats (il s'agit de l'aspect probabiliste-randomized de la méthode). Ce choix aléatoire permet de diversifier les solutions construites au cours d'itérations de la méthode. L'amélioration des composantes non encore placée dans la solution en construction est de nouveau évalué à la fin de chaque itération de telle sorte à prendre en compte les modifications de la structure de la solution en construction dues à la sélection des composantes précédentes.

ii. Recherche de voisinage

Les solutions obtenues à la fin de l'étape de construction ne sont pas forcément optimales, même par rapport à des voisinages définis de manière assez simple, d'où la nécessité d'appliquer une méthode de recherche de voisinage afin de les améliorer.

On commence à partir d'une solution réalisable qui sera successivement remplacée par une meilleure solution appartenant à son voisinage. En effet, un voisinage D associé à chaque solution N un sous ensemble de solution $D(N)$. La solution N est considérée comme un optimum local s'il n'existe pas une solution meilleure que N dans $D(N)$. L'algorithme s'arrête lorsque un minimum local est atteint, c'est lorsque les solutions voisines de la solution

courantes sont moins performantes. Cette deuxième étape dépend de plusieurs facteurs, tels que (**Grellier**, 2008):

- la structure de voisinage,
- la technique de la recherche des solutions dans le voisinage,
- le calcul rapide des coûts des solutions voisines
- et la solution de départ,

Ce dernier facteur dépend essentiellement de l'étape de construction.

Des voisinages simples tels que les 2 échanges sont souvent utilisés. L'ensemble de ces deux étapes sera répété un certain nombre de fois et la meilleure solution parmi ces itérations sera retenue.

Il est clair que la méthode GRASP combine les bonnes caractéristiques de l'algorithme glouton (convergence rapide et bonne solution) avec celles des méthodes aléatoires multi-départ (diversité des solutions). Ceci permet de proposer plusieurs solutions pour le même problème (**Grellier**, 2008).

2.6.3.4 Algorithme génétique

L'algorithme génétique appartient aux algorithmes évolutionnistes dont la méthode de recherche travaille sur une population de solutions plutôt qu'une solution unique. L'algorithme a été présenté pour la première fois par Holland en 1975. Le principe de la méthode a été inspiré de la sélection biologique décrite par Darwin. L'algorithme est caractérisé par un parallélisme intrinsèque important et une certaine robustesse par rapport aux différentes instances du problème. En effet, la technique consiste à combiner une population d'individus entre elles pour constituer une nouvelle population en se basant sur une sélection des individus en fonction de leurs fonctions de Fitness et sur des opérateurs génétiques (croisement et mutation) pour recombinaison les individus sélectionnés (**Ourari**, 2011). Malgré que certains auteurs rapprochent aux algorithmes génétiques une efficacité moyenne dans certains cas (**Rebreyend**, 2005), la technique a montré une performance unique en termes de qualité de solution et de temps de calcul à travers plusieurs études. L'approche a été choisie pour résoudre notre problème d'optimisation vu ses nombreux avantages. L'approche va être présentée en détails dans le prochain chapitre.

2.6.3.5 Algorithme de fourmis

L'algorithme de fourmi a été élaboré pour la première fois par Coloni et ses collaborateurs en 1991 (**Coloni et col.**, 1991). C'est un algorithme itératif à population où tous les individus partagent un savoir commun qui leur permet d'orienter leur futur choix à suivre ou à éviter (**Douiri & col.**, 2013). L'algorithme de fourmis est inspiré du comportement des fourmis lorsqu'elles recherchent le chemin optimal entre leur colonie et la source de nourriture. En effet, (1) lorsque les fourmis trouvent la nourriture, elles cherchent le chemin le plus court pour la transporter à leur colonie en minimisant leurs efforts. Les fourmis déposent lors de leur déplacement une substance appelée la phéromone, ce qui leur permet de marquer le chemin suivi. (2) Si les fourmis rencontrent un obstacle sur leur chemin, (3) elles contournent l'obstacle des deux côtés, au début elles se répartissent équitablement entre les deux chemins, (4) Après un certain moment, le chemin court fait circuler plus de fourmis,

donc plus de phéromone sera déposé sur le chemin le plus court, ce qui permet aux fourmis à retrouver le chemin le plus court (*figure II-6*).

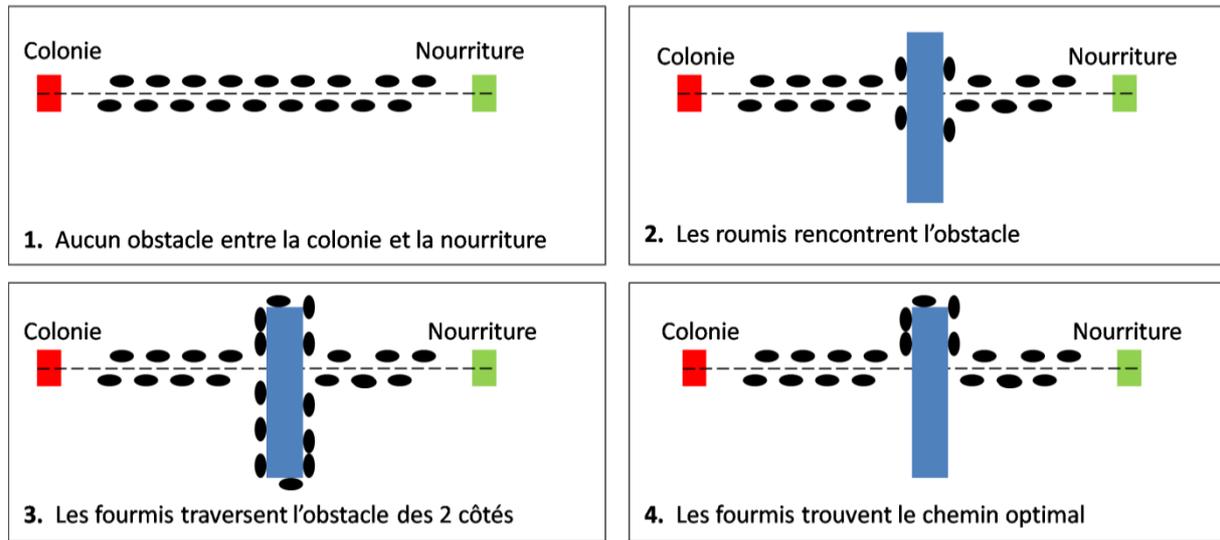


Figure 2-6 : comportement des fourmis pour la recherche du chemin optimal.

A partir d'une représentation graphique du problème, on initialise la quantité de phéromone sur les arêtes τ_{ij} , et chaque fourmi k parcourt le graphe construit un trajet complet (une solution) d'un sommet i à un sommet j .

A chaque étape de la construction des solutions, la fourmi doit décider quel sommet elle va atteindre. Ce choix se fait d'une façon probabiliste P_{ij}^k basée sur les valeurs de phéromone τ_{ij} et d'une information statistique qui permet de trouver une bonne solution. Cette valeur statistique dite visibilité η_{ij} oriente les fourmis vers les sommets proches (*Hachimi, 2013*).

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} ((\tau_{il}(t))^\alpha (\eta_{il})^\beta)} & \text{si } j \in J_i^k \\ 0 & \text{si } j \notin J_i^k \end{cases} \quad (2.18)$$

avec, α et β deux paramètres contrôlant l'importance relative de l'intensité et de la visibilité, J_i^k : liste des sommets déjà visité.

Lorsque toutes les fourmis ont construit une solution, une quantité de phéromone $\Delta\tau_{ij}$ est déposée par chaque fourmi sur son trajet, à chaque itération. La quantité de la phéromone déposée est fonction de la longueur totale de la tournée de la fourmi $L^k(t)$, plus cette longueur est grande, plus la quantité de phéromone est faible, ce qui permet d'évaluer les différentes solutions et trouver la bonne solution après un certain nombre d'itération (*Douiri & col., 2013 ; Hachimi, 2013*) :

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)} & \text{si } (i, j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{si } (j, j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (2.19)$$

avec, $T^k(t)$: trajet effectué par la fourmi k à l'itération t , et Q : paramètre constant.

Conclusion

L'optimisation énergétique du système de pompage nécessite l'établissement d'un modèle mathématique. Le modèle mathématique comporte la fonction objectif qui décrit le but de notre optimisation selon les caractéristiques techniques du système. Dans notre cas, il s'agit de minimiser l'énergie consommée par les pompes durant l'horizon d'optimisation de 24 heures sans tenir compte du coût d'énergie dans la formule de la fonction objectif, car l'objectif de notre étude est de réduire la consommation d'énergie et non pas le coût de fonctionnement en jouant sur les tranches tarifaires de consommation énergétique sans pour autant réduire l'énergie consommée réellement.

Le modèle d'optimisation prend en considération le bon fonctionnement hydraulique du système à travers les contraintes d'optimisation, dont le calcul repose sur l'équation de continuité du volume d'eau dans le réservoir. Le modèle doit fournir un planning de pompage dont l'évolution de la réserve ne doit pas dépasser les volumes limites (volume maximal et minimal) pour une gestion performante du service d'eau.

La résolution du modèle peut se faire par une méthode exacte qui consiste à évaluer toutes solutions possibles du problème, mais dans notre cas vu le nombre important des combinaisons possibles, le temps de calcul devient très long ce qui rend l'utilisation de ce type de méthode inutile. Il existe un autre type de méthode (Heuristiques et méta-heuristiques) basé sur des techniques novatrices permettant le calcul d'une solution approchée avec un temps de calcul très réduit, parmi ces méthodes qui ont réussi un succès remarquable, nous avons la méthode des algorithmes génétiques qui convient bien pour ce genre de problème d'optimisation.

Chapitre 3

3 Optimisation par la méthode des algorithmes génétiques

Introduction

Dans certains cas l'utilisation des méthodes d'optimisation exactes n'est pas recommandée, surtout pour des problèmes dont la fonction objectif n'est pas continue et/ou dérivable, tel que le problème d'optimisation du planning du pompage qui appartient à l'optimisation combinatoire, où une résolution des équations du système par une méthode exacte nécessite un temps de calcul très long, ce qui réduit la performance de l'outil d'optimisation, et il le rend pratiquement inutile pour une gestion performante des systèmes de pompage (*Nafi*, 2006 ; *Sioud*, 2011). La solution idéale face à ce type de problème est l'utilisation d'une méthode d'approximation qui permet de trouver des solutions optimales rapidement, telle que les approches méta-heuristiques. Parmi lesquelles nous avons la méthode des algorithmes génétiques qui présente un temps de calcul relativement court grâce à sa technique de calcul originale, qui permet de réduire l'espace de recherche des solutions, en limitant l'espace d'exploration de la solution optimale en utilisant une population initiale dont la taille est beaucoup moins petite par rapport à la taille de l'espace des solutions faisables employé par les méthodes exactes.

3.1 Optimisation par les AG dans le domaine d'eau potable

La méthode des algorithmes génétiques a été largement utilisée dans l'optimisation des systèmes d'alimentation en eau potable, où plusieurs chercheurs ont présenté des outils d'optimisation basés sur les algorithmes génétiques vue les nombreux avantages qu'offre la méthode. Dans ce qui suit nous présentons quelques travaux qu'ont été réalisés ces vingt dernières années.

Savic et ses collaborateurs (1997) ont développé un modèle d'optimisation du dimensionnement des réseaux d'alimentation d'eau potable, appelé GANET. La résolution des équations du modèle a été faite via les algorithmes génétiques dans leur forme originale suivie de quelques améliorations afin de mieux s'adapter au problème d'optimisation des réseaux d'eau potable. Le modèle a permis de résoudre efficacement trois exemples précédemment publiés, basés sur l'équation d'écoulement en charge de Hazen-Williams pour la prévision des performances des réseaux d'eau potable, ou le modèle a réussi de générer des meilleurs résultats.

En 2004, Van Zyl et ses collaborateurs ont proposé une méthode d'optimisation hybride combinant l'algorithme génétique avec une stratégie de recherche dite de Hillclimber. La méthode a réussi à donner de bons résultats, surtout en ce qui concerne la recherche d'un optimum local. Dans cette étude deux stratégies de recherche ont été adoptées : la méthode de Hooke and Jeevs et la méthode de Fibonacci.

Nouiri et ses collaborateurs (2005), ont présenté une étude dont l'objectif était la réduction des débits de production alimentant sept réservoirs d'un réseau de distribution en eau potable,

à l'aide d'un algorithme évolutionnaire. Le modèle établi offre un compromis entre l'importance du débit de pointe et les violations des limites. Il a permis de réduire le débit de pointe de 17.9%. Il a réussi également d'établir un fonctionnement stable du système réduisant les violations maximales des hauteurs d'eau dans les réservoirs.

Un an après Nouri et Lebdi (2006) ont utilisé la technique des algorithmes génétiques pour déterminer le nombre et l'emplacement optimal des stations d'appoint en chlore dans les réseaux d'alimentation en eau potable. L'application de la méthode a permis d'améliorer considérablement l'homogénéité en assurant pour 98% du réseau un taux de chlore libre admissible.

Nafi (2006) a présenté un outil d'aide à la décision permettant d'évaluer les besoins en renouvellement dans les réseaux d'alimentation en eau potable, en prenant compte divers critères techniques, économiques et sociales sur le moyen et long terme. L'outil comporte une méthode d'optimisation multi-objectif basée sur l'optimum de Pareto, utilisant un algorithme génétique pour la résolution. A la fin de calcul l'outil élaboré identifie les conduites devant faire l'objet des travaux, et la nature des travaux à effectuer.

Batchabani (2014) a élaboré un modèle d'optimisation multi-objectif pour évaluer la nécessité d'introduire ou non un ou plusieurs réservoirs dans le réseau tout en améliorant la qualité de l'eau. L'approche des algorithmes génétiques est utilisée dans le modèle d'optimisation en se basant sur plusieurs paramètres de référence de dimensionnement. Une version du modèle a été développée en environnement stochastique et l'autre en déterministe. A travers cette étude, l'auteur est arrivé à montrer l'importance de prendre en considération le réservoir dans le processus d'optimisation des réseaux d'alimentation en eau potable.

Récemment, Olszewski (2016) a présenté un modèle numérique basé sur la technique des algorithmes génétiques, pour l'optimisation d'un système de pompage comportant plusieurs pompes centrifuges en parallèle et un système de contrôle avec mécanismes de régulation. L'objectif du modèle est l'optimisation de l'énergie de fonctionnement tout en garantissant le débit de fonctionnement requis. Trois stratégies d'optimisation ont été étudiées : 1- Minimisation de la puissance consommée ; 2- équilibrage de débit ; 3- maximisation du rendement. Le modèle numérique a été validé par dispositif expérimental, et les résultats ont montré que les trois stratégies génèrent plusieurs solutions optimales. Tandis que l'analyse des résultats a montré que la stratégie de la minimisation de la puissance de consommation est la méthode la plus performante pour l'optimisation des systèmes de pompage.

3.2 Description d'un algorithme génétique

L'approche des algorithmes génétiques appartient à la classe des méthodes connues sous le nom des méthodes évolutionnaires. En 1975, John Holland a présenté dans son ouvrage (*Adaptation of natural and artificial system*) la première formulation des algorithmes génétiques dans le cadre d'optimisation mathématique. David Goldberg dans ces travaux publiés en 1989 a défini les applications pratiques de la méthode, contribuant ainsi au développement de la méthode, et à la faire connaître à grande échelle dans la communauté

scientifique (*Hachimi*, 2013). Par la suite, la méthode a connu un énorme succès caractérisé par une large adaptation et une forte croissance d'utilisation pour résoudre les problèmes d'optimisation.

Le principe des algorithmes génétiques a été inspiré de la théorie d'évolution naturelle des espèces, proposé par Darwin en 1859. Cette théorie repose sur deux mécanismes essentiels : sélection naturelle des espèces, et reproduction. En effet, les individus qui présentent des caractères bien adaptés à leur environnement ont une meilleure tendance à se reproduire que leurs congénères, ce qui permet à une espèce de s'évoluer pour donner naissance à une nouvelle espèce.

La théorie d'évolution naturelle a été renforcée au XX siècle suite aux énormes progrès réalisés dans le domaine biologique, et notamment avec la découverte de l'ADN par Tomas Avery en 1944, mettant en évidence la possibilité d'une éventuelle mutation dans la structure génétique des individus, ce qui peut conduire à la création d'une nouvelle espèce. Tous ces mécanismes d'évolution se faisaient au niveau des cellules de l'organisme des individus, où chaque cellule possède des chromosomes composés de molécules d'ADN qui contiennent tout le patrimoine génétique de l'individu. La reproduction qui est basée sur la combinaison des chromosomes, permet un échange génétique entre les individus. Cet échange génétique peut contribuer à l'amélioration des caractéristiques des individus de la nouvelle génération donnant ainsi plus de chances de survie aux individus de cette nouvelle génération (*Gherbouj*, 2013).

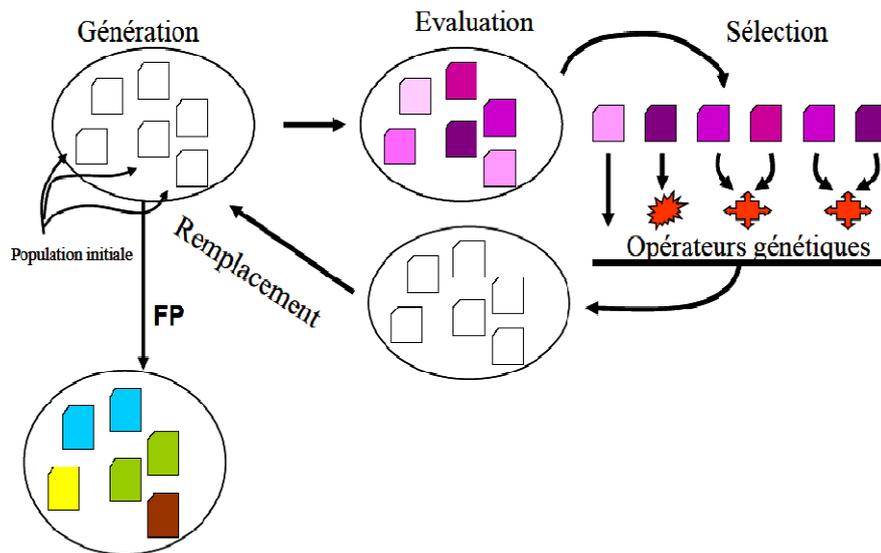


Figure 3-1 : structure générale d'un algorithme génétique (*Zidi*, 2006).

Le processus de calcul des algorithmes génétiques est pratiquement similaire aux mécanismes d'évolution naturelle (*figure 3-1*). Il est basé sur la notion des générations. Il consiste à sélectionner les meilleures solutions possibles pour constituer une nouvelle génération de solutions meilleure que la précédente, en se basant sur la technique itérative qui représente la succession des générations dans la nature. Idem pour la terminologie utilisée, où un grand nombre de termes utilisés par les algorithmes génétiques est identique à celle utilisé dans le

domaine génétique, où chaque solution du problème est appelée chromosome, et chaque chromosome est constitué d'un ensemble de variables appelées individus. Chaque individu est constitué d'un ensemble de caractères appelés gènes, et les différentes versions d'un gène sont appelées allèles (*Zidi, 2006*). Cependant, certains termes sont propres à l'approche des algorithmes génétiques telles que la fonction objectif, la fonction de Fitness, ...etc (*Sioud, 2011*). Le tableau (3.1) montre les différents termes utilisés par les algorithmes génétiques.

Tableau 3.1 : vocabulaire des algorithmes génétiques (*Nafi, 2006*).

Vocabulaire	Définition
Bit	Correspond à un code
Chromosome, individu, solution	Chaîne de caractères ou de code
Génotype	Variables de décision codées
phénotype	Variables de décisions non codées
Gène, variable	Codage associé à chaque variable de décision
Fonction d'adaptation	Evaluation de la solution dans l'espace génotypique
Fonction objectif	Evaluation de la solution dans l'espace phénotypique

3.3 Principe d'un algorithme génétique

Le principe de fonctionnement d'un algorithme génétique consiste à établir un ensemble d'individus (chromosomes) constituant la population initiale d'une façon aléatoire. Dans notre cas, ces individus représentent les solutions potentielles du problème d'optimisation. Ces individus seront ensuite évalués à l'aide d'une fonction de Fitness ou d'adaptation selon l'objectif de l'optimisation (maximisation ou minimisation) à la fin de cette étape on attribue à chaque individu une probabilité de sélection qui définit pour chaque individu sa chance de sélection. Dans cette étape d'évaluation, on favorise les meilleurs individus pour qu'ils soient sélectionnés à l'aide de la fonction Fitness, ce qui permet aux parents de donner naissance à une meilleure descendance.

Après évaluation des individus, on passe à la sélection des parents en fonction de leurs probabilités de sélection. Une fois la population des parents est établie, on passe aux mécanismes de combinaison, croisement et mutation qui permettent de générer la nouvelle génération (enfants). Cette nouvelle génération sera comparée avec la première génération afin de la remplacer ou non.

Ce processus sera répété jusqu'à la vérification du critère d'arrêt (*figure 3-2*). A la fin du calcul la solution optimale sera établie, Cette dernière représente les variables de décisions

optimales du problème d'optimisation. Nous allons voir toutes ces techniques en détail dans les paragraphes suivants.

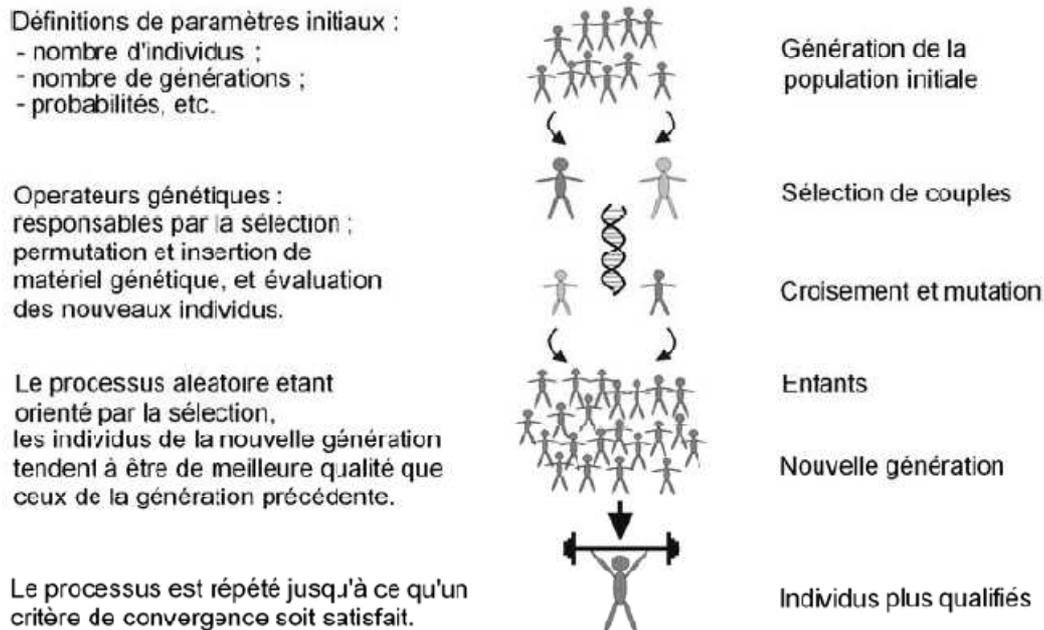


Figure 3-2 : principe de fonctionnement d'un algorithme génétique (Avila, 2006).

3.4 Codage et représentation des variables d'un algorithme génétique

Chaque problème d'optimisation est caractérisé par des variables de décision qui conditionnent la fonction objectif à satisfaire, les contraintes à respecter et les décisions à prendre (Hachimi, 2013). Le concept d'algorithme génétique permet de représenter ces variables sous deux formes : Forme phénotypique ; constituée de variables de décisions décodées, exprimée par les valeurs des fonctions objectifs, et forme génotypique ; constituée de variables de décision codées. La représentation codée de l'individu (solution) est appelée aussi chromosome.

Cependant, durant le processus du traitement des algorithmes génétiques, les variables ne sont pas utilisées telles qu'elles sont (forme génotypique), mais elles sont utilisées sous leurs formes génétique ou codée, ce qui nécessite la définition d'un principe de codage approprié des variables, ce qui permet d'établir une relation entre les valeurs de la variable et les individus de la population, de façon à imiter la connexion qui existe en biologie entre le génotype et phénotype (Zidi, 2006).

Le codage des individus doit être établi généralement juste après la modélisation mathématique du problème traité. La définition du codage des variables de décision est une étape fondamentale, et le choix d'un type de codage conditionne le succès de l'algorithme (Durand, 2004).

Les variables sont prises en compte à l'aide de caractères représentant une séquence de codes. Chaque variable de décisions est représentée sous forme d'un gène qui peut contenir un ou

plusieurs codes. La séquence de code représente un individu, c'est-à-dire une solution faisable est appelée chromosome (*Nafi*, 2006).

Le codage nécessite en premier la définition de l'alphabet utilisé A, ensuite chaque solution doit être représentée par un vecteur $x \in A^l$ avec, l la longueur du codage. Cette longueur dépend de l'espace d'application et du nombre d'éléments de l'alphabet utilisé, où plus les solutions dans l'espace d'application sont complexes plus longueur du codage sera importante. Egalement pour une complexité des solutions, moins l'alphabet comportera d'éléments, plus la longueur sera grande pour coder la même information (*Reynès*, 2007).

Le codage peut être direct lorsqu'il y a une correspondance bijective entre les chromosomes et les solutions correspondantes. Par contre, le codage est indirect, lorsqu'on doit utiliser un générateur pour définir la solution associée au chromosome (*Zidi*, 2006).

Un certain nombre d'exigences doit être satisfait pour qu'une représentation soit correcte. Tout d'abord la représentation doit être complète. Cela veut dire que toutes les solutions possibles du problème doivent pouvoir être codifiées, et inversement c'est-à-dire toutes les solutions codifiables doivent correspondre à des solutions réalisables dans l'espace de recherche. Egalement, il faut éviter tout type de redondance qui peut créer des problèmes de convergence. Cette redondance est liée au fait qu'une solution peut avoir plusieurs codage. Pour cette raison, l'ensemble des symboles utilisés pour le codage, autrement dit l'alphabet du codage, doit être le plus petit permettant une expression naturelle du problème (*Sioud*, 2011).

Le choix du type du codage se fait selon le problème traité, les codes peuvent être binaires, entiers, réels, gray ou alphabétiques. En fonction du codage utilisé, les différentes opérations génétiques sont adaptées.

C1	1	1	1	0	0	0	1	0
C2	2	4	1	5	3	8	7	6
C3	A	R	G	L	B	S	T	K

C1 : codage binaire ; C2 : codage ordinaire ; C3 : codage alphabétique.

Figure 3-3 : différents types de codage

3.4.1 Codage binaire

Le codage binaire est le premier codage utilisé pour les algorithmes génétiques, dont le principe consiste à représenter les variables sous forme de chaînes de binaires $b_0, b_1 \dots b_{l_{x_i}-1}$ définie sur $l_{x_i}-1$ bits, contenant toute l'information nécessaire à leur description. Le passage de la représentation binaire à la représentation réelle, nécessite d'abord le calcul d'une valeur entière naturelle C_n correspondant aux variables réelles. Cette valeur entière est donnée par l'équation (3.1) (*Sareni*, 1999).

$$c_n(x_i) = \sum_{i=0}^{l_{x_i}-1} 2^{l_{x_i}-1-i} b_i \quad (3.1)$$

Ainsi la variable réelle est obtenue par la mise à l'échelle linéaire de l'espace de recherche relatif à $N(x_i)$:

$$x_i = x_{i\min} + \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2^{l_{x_i}} - 1} c_n(x_i) \quad (3.2)$$

La longueur minimale l_{x_i} de la sous-chaine binaire est donnée en fonction de la précision ε_i est donnée par l'équation 3.3 :

$$l_{x_i} \geq \frac{1}{\ln 2} \ln \left(\frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{\varepsilon_i} + 1 \right) \quad (3.3)$$

Alors que, la longueur totale du chromosome est la somme des longueurs des sous-chaines (équation 3.4).

$$l = \sum_{i=1}^n l_{x_i} \quad (3.4)$$

avec, n : nombre total des variables.

Ce type de codage présente plusieurs avantages : alphabet minimum 0 et 1, s'adapte bien aux différentes opérations de traitement de l'algorithme telles que le croisement et la mutation. C'est grâce à ce type de codage que les premiers résultats de convergence ont été obtenus. Cependant, certains auteurs reprochent au codage binaire certains inconvénients. Ces derniers sont résumés en trois points essentiels (*Sareni*, 1999 ; *Durand*, 2004 ; *Reynès*, 2007 ; *Guenounou*, 2009 ; *Sioud*, 2011) :

- Un voisinage en termes de distance de Hamming ne signifie pas un voisinage dans l'espace de recherche, créant souvent des convergences vers des optimums locaux. Par exemple, l'entier 7 correspond à la chaîne 0111 et l'entier 8 correspond à la chaîne 1000. L'utilisation d'un codage Gray évite ce type d'inconvénient.
- L'importance accordée à l'ordre des variables dans la représentation binaire à travers les chaînes de bits, n'est pas forcément important dans la structure du problème.
- La performance de l'algorithme est dégradée pour les problèmes d'optimisation de grande dimension à haute précision numérique, où la performance est diminuée lorsque la longueur de la chaîne augmente.

3.4.2 Codage gray

Le codage gray est très similaire au codage binaire, il est basé sur de chaînes de bits pour représenter les variables, utilisant le même alphabet que le codage binaire [0, 1]. La seule

différence avec le codage binaire, d'ailleurs c'est la raison pour laquelle le codage a été inventé, est la façon de représentation des variables, dont l'objectif est d'éviter les problèmes de convergence vers des optimums locaux engendrés par une disproportion entre la représentation réelle et celle codée, connue sous l'appellation de « falaises de Hemming ». Le passage du codage binaire au codage gray est obtenu par l'équation suivante :

$$g_i = \begin{cases} b_i & \text{si } i = 0 \\ b_{i-1} \oplus b_i & \text{si } i \geq 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

avec, \oplus représente l'addition modulo 2.

Pour cela, dans le codage gray si deux entiers adjacents dans l'espace réel, leurs codages ne diffèrent que d'un bit (distance de Hamming de 1). Si on revient à l'exemple cité précédemment, on a constaté une différence de 4 bit entre les entiers 7 et 8 dans le codage binaire (tableau 3.2), par contre dans le codage gray, elle est de un bit seulement (*Sareni*, 1999)

Tableau 3.2 : codage binaire et gray sur 4 bits (*Sareni*, 1999)

Entier	Binaire	Gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

3.4.3 Codage réel

Le principe du codage réel est très simple. Il consiste à conserver les variables dans le codage des individus de la population, chaque chromosome est un vecteur dont les composantes sont les paramètres du processus d'optimisation. L'utilisation des vecteurs réels pour représenter les variables a permis d'éviter plusieurs problèmes posés par le codage binaire.

Actuellement le codage réel est très utilisé notamment dans le domaine applicatif pour l'optimisation des problèmes à variables continues. Ce type de codage présente les avantages suivants (Durand, 2004 ; Guenounou, 2009) :

- Simplicité de mise en œuvre : Pour représenter par exemple n variables, il suffit d'utiliser un chromosome contenant les n composantes ;
- Processus de traitement plus rapide vu l'absence d'une étape de transcodage (du binaire vers le réel).

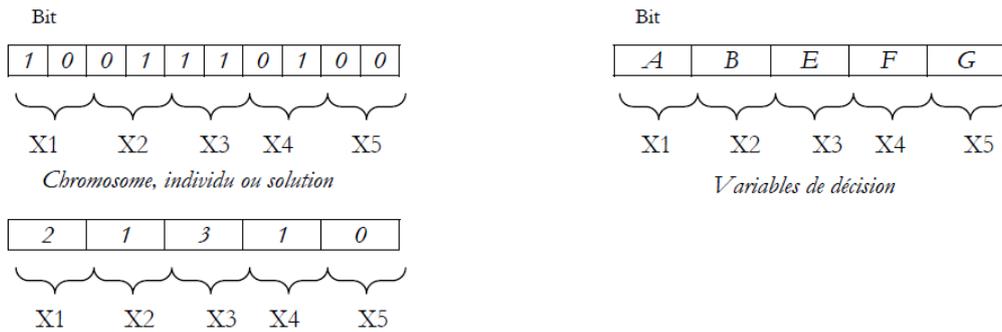


Figure 3-4 : codage d'une solution sous forme de chromosome (Nafi, 2006).

3.4.4 Codage entier

L'utilisation du codage entier est très pratique pour la résolution de certains problèmes d'optimisation combinatoire, tel que les problèmes d'ordonnancement. Le codage entier permet d'augmenter l'efficacité de l'algorithme génétique (Chaari, 2010). La représentation des variables d'optimisation dans le codage entier est similaire à celle utilisée dans le codage réel, où les différents individus de la population sont représentés par des chromosomes sous forme de vecteur dont les composantes sont des entiers représentant les variables des différentes solutions potentielles du problème d'optimisation. Le codage entier présente plusieurs avantages :

- Simplicité de mise en œuvre ;
- Absence de l'étape de transcodage ;
- Rapidité de calcul ;
- Forte chance de convergence.

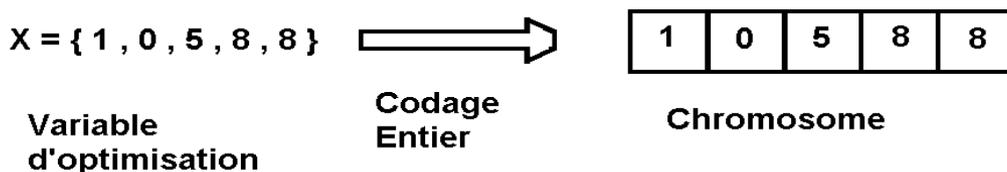


Figure 3-5: exemple d'un codage entier

3.5 Gestion des contraintes d'optimisation

Les problèmes d'optimisation sous contraintes nécessitent une prise en compte des contraintes d'optimisation pour le calcul d'une solution optimale admissible. La technique utilisée pour faire respecter ces contraintes est spécifique à chaque approche d'optimisation. Généralement dans les algorithmes génétiques, on sanctionne les éléments de la population qui ne respectent pas les contraintes d'optimisation, on leur attribue une mauvaise fitness, ce qui réduit leur chance de sélection (*Durand*, 2004). Les différentes méthodes de gestion peuvent être regroupées en trois méthodes principales (*Vanaret*, 2015) :

- Méthode de rejet qui n'exploite pas les individus inadmissibles qui sont éliminés. Cette méthode n'est recommandée que lorsque l'espace non admissible est petit devant l'espace de recherche,
- Méthode de préservation qui génère des individus admissibles à partir des individus inadmissibles,
- Méthode de pénalité consiste à associer les contraintes du problème à la fonction objectif.

Les techniques de pénalisation consistent souvent à ajouter à la fonction objectif un terme représentant la violation des contraintes. Cette technique s'écrit sous la forme générale suivante (*Khichane*, 2010) :

$$\text{Fitness}(S) = F(S) + \lambda \cdot G(S) \quad (3.6)$$

$F(S)$: fonction objectif ; λ : coefficient de pondération et $G(S)$: quantité de violation des contraintes.

A l'encontre des méthodes qui consistent à éliminer les solutions inadmissibles, certains auteurs préconisent de garder les individus qui ne respectent pas les contraintes, tout en les pénalisant, car ces individus peuvent donner naissance à de bon individus. En plus, il s'est avéré que des populations contenant des éléments inadmissibles ont de bonne chance de générer des solutions optimales, car dans certains cas la solution optimale se trouve aux frontières de l'espace admissible. En effet, le processus de traitement d'un algorithme génétique nécessite une population d'individus non homogène. Cette diversité est renforcée au cours des générations par les opérations de croisement et de mutation (*Durand*, 2004). Plusieurs travaux ont été menés pour développer les techniques de pénalisation, parmi ces techniques, il y a (*Khichane*, 2010) :

- Technique « death penalty » ;
- Technique de pénalisation statique ;
- Technique de la pénalisation dynamique ;
- Techniques de pénalisation adaptative.

Ces différentes techniques de pénalisation présentent l'avantage d'être applicables à différents problèmes, et leur implantation est relativement simple (*Khichane*, 2010). Par contre, le paramétrage des techniques est une tâche délicate, et un réglage adéquat des paramètres de pénalisation s'impose pour ne pas favoriser la recherche d'une solution admissible au détriment d'une solution optimale ou inversement (*Durand*, 2004). Les problèmes contenant plusieurs contraintes d'optimisation sont caractérisés par un grand nombre de paramètres utilisés dans la formule de fitness.

3.6 Etapes de calcul d'algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques font évoluer les individus d'une population, initialisée arbitrairement, par le biais des opérateurs génétiques. Ensuite, à chaque génération, des individus se reproduisent, survivent ou disparaissent de la population sous l'action différentes opérations : Evaluation, Sélection, croisement, mutation, et remplacement (*Nouiri et col.*, 2005). Bien que les algorithmes génétiques utilisent le hasard, ils ne sont pas purement aléatoires, ils exploitent efficacement les informations récoltées précédemment pour constituer de nouveaux individus bien adaptés à travers les différentes étapes du processus du traitement (*Lassouaoui et col.*, 2004).

3.6.1 Génération de la population initiale

L'objectif de cette étape est de choisir un ensemble de solutions potentielles au problème d'optimisation. La génération de la population initiale est garantie par un opérateur d'initialisation. Malgré que cette opération se fait qu'une seule fois au début du processus de traitement, elle joue un rôle déterminant dans la suite du calcul et la performance de l'algorithme.

Cette opération est fonction de nombreux paramètres, mais en particulier elle dépend principalement de la taille de la population initiale et de la nature du codage utilisé.

En effet, La taille de la population influence la performance de l'algorithme, où plus la population est grande, les solutions sont distinctes (diversité génétique), ce qui améliore l'exploration des solutions acceptables (*Nafi*, 2006 ; *Gherboudj*, 2013).

Cependant, une population de taille réduite permet une évolution rapide des générations, réduisant ainsi le temps de calcul. Aussi dans le cas d'une population de petite taille, si un caractère favorable est présent chez un ou plusieurs individus de la population initiale, ce caractère se propage rapidement d'une génération à l'autre (*Reynès*, 2007).

Egalement, le choix de la population initiale conditionne fortement la rapidité de convergence de l'algorithme. En fait, les individus de la population sont généralement choisis d'une façon aléatoire, et en particulier si la position de la solution optimale n'est pas connue dans l'espace de recherche. Dans ce cas, il est tout à fait évident de procéder à un tirage aléatoire pour générer la population initiale, ce tirage doit être le plus uniforme possible pour favoriser une exploration maximale de l'espace de recherche.

Par contre, si des informations a priori sur le problème sont disponibles permettant la réduction de l'espace de recherche, il sera utile dans ce cas de générer la population initiale en utilisant des initialisations gloutonnes pour fournir des solutions déjà connues que l'on cherche améliorer, ou on peut utiliser d'autres algorithmes de recherche fournissant à l'algorithme génétique des solutions qui ont subi une première phase d'optimisation.

Ces techniques permettent de limiter le domaine de recherche, afin de gagner du temps de calcul, et renforcer la convergence de l'algorithme (*Lassouaoui et col.*, 2004 ; *Souam*, 2013).

Sachant que certains auteurs préconisent le respect des contraintes d'optimisation par les individus produits (*Lassouaoui et col.*, 2004). Cependant, certains chercheurs sont contre cette condition, et ils insistent sur le fait que la population doit être aléatoire, ou générée d'une façon aléatoire pour avoir des individus non-homogènes et diversifiés (*Lachance*, 2014).

3.6.2 Evaluation des individus (Fonction Fitness)

Cette étape consiste à évaluer les objectifs et les contraintes pour chaque individu de la population (*Lachance*, 2014), où chaque solution de la population est évaluée à l'aide d'une fonction d'adaptation. Cette fonction d'adaptation est calculée à partir de la fonction objectif selon le problème traité. Ce qui permet de définir les chances de sélection de chaque individu (*Nafi*, 2006). L'évaluation des performances des individus s'effectue dans l'espace phénotypique (*Marckmann*, 2004). La fonction d'adaptation ou de fitness en terminologie anglo-saxonne est généralement donnée par la composition de deux fonctions G et H . Son expression est (*Guenounou*, 2009) :

$$\text{Fitness} = G \circ H \quad (3.7)$$

avec, \circ : loi de composition de la fonction ; G : fonction de transformation peut être linéaire, exponentielle ou logarithmique et H : fonction d'adaptation.

Une autre forme plus simplifiée de la fonction d'adaptation est utilisée selon le critère d'adaptabilité. S'il s'agit d'un problème de maximisation le critère est identique à la fonction objectif. Par contre, s'il s'agit d'un problème de minimisation le critère est l'inverse de la fonction objectif :

$$\text{Fitness} = \begin{cases} E(x) & \text{Pour les problèmes de maximisation} \\ 1/E(x) & \text{Pour les problèmes de minimisation} \end{cases} \quad (3.8)$$

avec, $E(x)$: fonction objectif.

3.6.3 Sélection des individus

Dans cette étape, on sélectionne les individus (parents) qui vont générer la nouvelle population. La sélection de ces individus est basée sur leur efficacité relative dans la population. Cette étape ne crée pas de nouveaux individus, mais elle permet de créer une population intermédiaire dont les individus sont des copies de la population initiale (*Guenounou*, 2009). En fait, elle consiste seulement à identifier les individus selon leur

fonction d'adaptation, les individus mieux adaptés sont sélectionnés, alors que les éléments moins adaptés sont écartés (*Hachimi*, 2013). Dans la littérature il existe plusieurs méthodes permettant l'échantillonnage, parmi les techniques les plus utilisées nous avons : la sélection par tournoi, la sélection par roulette, et la sélection par rang.

3.6.3.1 Sélection par roulette

La méthode la plus utilisée pour la sélection des individus pour la reproduction dans les algorithmes génétiques c'est la sélection par roulette. Cette technique assimile un tirage au sort avec une roulette, où chaque individu est représenté sur la roulette selon la valeur de sa fonction d'adaptation. Puis, une bille est lancée dans la roulette, et une fois, la bille arrêtée, elle permet de choisir un chromosome.

L'opération de sélection comporte généralement deux étapes: dans la première étape, on calcule les probabilités de sélection de tous les individus de la population. La probabilité de sélection d'un individu est la valeur de sa fonction d'adaptation divisée par la somme de toutes les fonctions d'adaptation. Dans la seconde étape, on échantillonne au hasard la distribution de probabilités trouvées dans la première étape.

L'équation de la probabilité est donnée par l'équation (3.9) dans le cas d'un problème de minimisation, et par l'équation (3.10) dans le cas d'un problème de maximisation.

$$\text{Minimisation: } P(N_i) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{m_{\max}} 1/E(N_i)} \quad (3.9)$$

$$\text{Maximisation: } P(N_i) = \frac{E(N_i)}{\sum_{i=1}^{m_{\max}} E(N_i)} \quad (3.10)$$

P : probabilité de sélection, m_{\max} : nombre d'individus ; N_i : individu ou vecteur de décision, E : fonction objectif.

Certains auteurs ont critiqué la méthode en lui rapprochant une sélection proportionnelle dominée par les individus ayant une grande fitness, En effet, le principe de sélection basé sur la performance des individus favorise la reproduction de ces individus malgré qu'ils ne sont pas forcément les meilleurs, engendrant ainsi une perte de diversité par la dominance des ces super-individus, et provoquant des convergences prématurées de l'algorithme (*Guenounou*, 2009). Pour éviter ce type de problème, certains auteurs ont proposé des techniques permettant le réajustement de la fonction d'adaptation avant la sélection. Parmi ces techniques il y a la technique de la mise à l'échelle linéaire, qui consiste à comprimer le domaine de variation de la fonction d'adaptation, puis le remettre à l'échelle, ce qui étend les valeurs de la fonction d'adaptation diminuant l'influence des individus trop faible (*Sareni*, 1999).

3.6.3.2 Sélection par rang

La méthode consiste d'abord à sélectionner les individus en fonction de leur fitness. Ensuite, chaque chromosome est associé à un rang en fonction de sa position, plus la valeur

d'adaptation est grande plus le rang de l'individu est élevé. L'ensemble des individus est représenté sur un segment de droite dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1. La sélection se fait par tirage aléatoire.

La technique est similaire à la sélection par roulette, sauf que dans ce cas les proportions sont en relation avec le rang et non pas avec la fonction d'adaptation, ce qui ne nécessite pas un réajustement de la fonction d'adaptation. La probabilité de sélection d'un individu N_i est donnée par l'équation 3.11 (*Sareni*, 1999 ; *Belbachir et col.*, 2006).

$$P(N_i) = \frac{1}{m_{\max}} \left(\eta_+ - (\eta_+ - \eta_-) \frac{i - 1}{m_{\max} - 1} \right) \quad (3.11)$$

avec, $\eta_- = 2 - \eta_+$ et $1 \leq \eta_+ \leq 2$

3.6.3.3 Sélection par tournoi

Le principe de sélection de la méthode est simple. En effet, à partir d'une population de taille m_{\max} , la technique consiste à sélectionner au hasard k individus, où k représente la taille du tournoi. Il existe une sélection par tournoi déterministe et probabiliste. Dans le cas d'une sélection déterministe le meilleur des m individus gagnent le tournoi. Dans le cas d'une sélection probabiliste, chaque individu des m individus peut gagner le tournoi en fonction de la probabilité liée à sa fonction d'adaptation. L'opération est répétée autant de fois qu'il y a des individus à sélectionner.

La probabilité de sélection d'un individu de rang i après compétition est donnée par la formule suivante :

$$P(N_i) = \begin{cases} \frac{C_{m_{\max}-i}^{k-1}}{C_{m_{\max}}^k} & \text{si } 1 \leq i \leq m_{\max} - k + 1 \\ 0 & \text{si } m_{\max} - k + 2 \leq i \leq m_{\max} \end{cases} \quad (3.12)$$

avec, k : taille du tournoi

Dans le cas où la taille de tournoi est égale à 2, le tournoi est appelé tournoi binaire probabiliste. Sa formule est donnée par l'équation suivante :

$$P(N_i) = \frac{2}{m_{\max}} \frac{m_{\max} - i}{m_{\max} - 1} \quad (3.13)$$

Il se peut que certains individus participent à plusieurs tournois, s'ils gagnent plusieurs fois, ils participent à la reproduction plusieurs fois, ce qui favorise la continuité de leurs gènes. La variance de la méthode est élevée et la pression de sélection est régler en augmentant ou diminuant la taille du tournoi m .

En effet, si la taille du tournoi est élevée, cela donne peu de chance à un faible individu de gagner le tournoi (*Sareni*, 1999 ; *Belbachir et col.*, 2006 ; *Sioud*, 2011).

3.6.4 Opérateurs génétiques

L'exploration de l'espace des solutions possible est basée principalement sur deux mécanismes qui cherchent à générer de nouvelles solutions d'une façon aléatoire à partir des individus sélectionnés.

Ces deux mécanismes sont le croisement et la mutation, qui sont appelés aussi les opérations génétiques ou opérations de diversification (Souam, 2013), où ils participent à la diversification et l'intensification de la population (Vanaret, 2015). Les opérations génétiques s'effectuent dans l'espace génotypique (Marckmann, 2004).

3.6.4.1 Croisement

L'objectif de l'opération de croisement est la reproduction d'une nouvelle génération. L'opération effectue un échange partiel de chromosomes entre les individus sélectionnés, ce qui produit de nouveaux individus dans l'espace recherche et qui permet d'améliorer la performance des individus de la nouvelle génération. L'opération n'introduit aucun gène nouveau dans la population, elle consiste uniquement à effectuer une redistribution des gènes, en recombinant les caractères génétiques des individus sélectionnés (Duvigneau, 2002). Le croisement se fait entre les parents sélectionnés, où on utilise (m) individus sélectionnés pour former m/2 couples, qui génèrent m enfants (figure 3-6). Cette opération est caractérisée par la probabilité de croisement P_c qui doit être élevée, généralement comprise entre 70 et 100% (Avila, 2006). D'une manière générale, il ya deux types de croisement : Le croisement simple, et le croisement uniforme (figure 3-7). Sachant qu'il existe d'autres types de croisement tel que PMX (partial-mapped crossover), OX (order crossover), JOX (job-based order crossover), ER (edge recombination crossover), ...etc (Chaari, 2010).

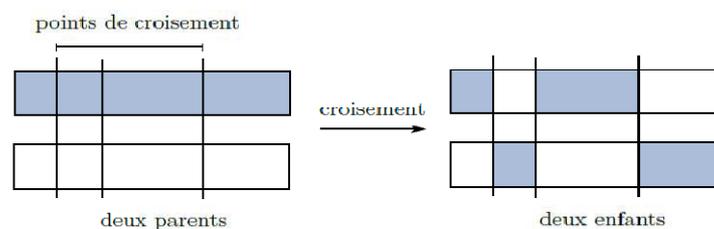
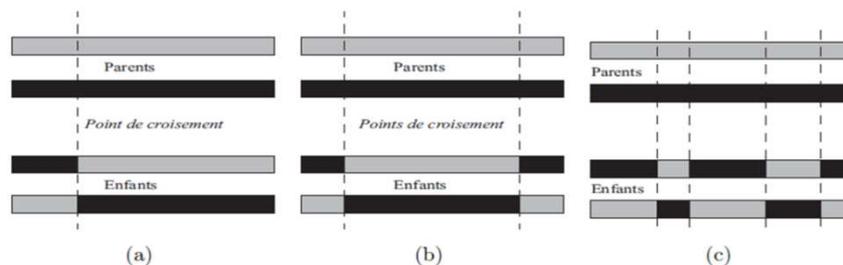


Figure 3-6 : croisement entre deux chromosomes (Venaret, 2015).



Exemples de croisement : (a) croisement simple en un point, (b) croisement en deux points, (c) croisement uniforme

Figure 3-7 : types de croisement (Boussaid, 2013).

i. Croisement simple

Le croisement simple ou le croisement à points est adapté au codage réel, entier ou alphabétique (*Nafi*, 2006). Ce type de croisement est caractérisé par le nombre de points de croisement par individu, si ce nombre est égal à un, on dit que le croisement est mono-point ou cross-over. Si le nombre de points est supérieur à 1, le croisement est dit croisement multipoints (*figure 3-7*).

Dans le cas d'un croisement mono-point, la technique consiste à diviser chaque deux parents en deux parties dans la même position choisie aléatoirement. Le premier enfant sera constitué de la première partie de l'un des parents complétée par la deuxième partie de l'autre parent, et inversement pour le deuxième enfant (*Chaari*, 2010). Dans le cas d'un croisement multipoints, les n positions de coupure sont choisies d'une façon aléatoire pour dissocier les deux parties en $n+1$ parties, les deux enfants créés seront constitués de l'alternance des parties des deux parents tout en maintenant l'ordre. Le choix des positions de croisement est dicté par la génération d'un nombre aléatoires entre 1 et la longueur du chromosome considéré.

ii. Croisement uniforme

Cette technique accorde à chaque chromosome un vecteur aléatoire binaire. En fonction de la valeur de la composante du vecteur binaire associé à la position sur le chromosome, la valeur du code associé à cette position peut avoir l'une des deux valeurs des parents considérés. Le chromosome produit sera constitué par une symétrie par rapport au chromosome initial. En fonction de la position du code, si la valeur est associée au premier parent, alors la valeur de la même position pour le second enfant sera associée au deuxième parent (*Nafi*, 2006).

3.6.4.2 Mutation

Le terme « mutation » vient de la biologie où il désigne les changements dans la séquence de l'ADN des individus (*Reynès*, 2007). Dans les algorithmes génétiques ces changements s'expriment par une modification aléatoire d'un allèle dans un chromosome (*Zidi*, 2006). Cette opération s'effectue sur des individus déjà existants (enfants issus de la recombinaison). L'objectif de la mutation est de créer un désordre dans la population pour éviter une convergence prématurée vers des optimums locaux, En effet, un individu muté pourrait être très utile pour la création d'une de bonnes solutions (*Sambou*, 2008). Cependant, certains auteurs considèrent la mutation comme un opérateur marginal pour les algorithmes génétiques, bien qu'elle leur donne la propriété d'ergodicité, c'est-à-dire que tous les points dans les espaces de recherche peuvent être atteints (*Ziyati*, 2010 ; *Sioud*, 2011 ; *Souam*, 2013).

L'opération de mutation dépend de la probabilité de mutation P_m , qui conditionne la mutation ou non d'un individu, et qui contrôle le caractère aléatoire de la recherche (*Vanaret*, 2015), elle permet également d'enrichir et agrandir la diversité. Le taux de mutation est assez faible (*Souam*, 2013), elle est généralement comprise entre 0,01 et 0,001 (*Sioud*, 2010). Certains chercheurs proposent de choisir la probabilité de mutation dans l'intervalle $[1/m, 1/l]$ (*Nafi*, 2006).

D'une façon générale, il existe deux types de mutation : mutation classique et mutation adaptative. Dans la mutation classique (*figure 3-8a*), pour les problèmes discrets l'opérateur de mutation consiste à choisir au hasard un gène pour chaque chromosome et le remplacer par un autre gène choisi d'une façon aléatoire dans le voisinage de la valeur initiale. Cette technique convient mieux pour des chaînes à domaine discret de taille quelconque (*Sioud, 2011; Ziyati, 2010*). Si le codage utilisé est binaire par exemple, on génère un nombre aléatoire entre 1 et la longueur du chromosome, la valeur de ce nombre aléatoire correspond à la position du code à muter, dans ce cas l'opération de mutation consiste simplement en l'inversion d'un ou plusieurs bits.

Pour les problèmes continus, la technique consiste à choisir un gène aléatoirement auquel on ajoute un bruit aléatoire généralement gaussien tout en veillant à ce que le gène résultant reste dans le domaine de définition. Le réglage de l'écart type du bruit est une tâche délicate, s'il est trop faible on risque la convergence local, s'il est trop grand les solutions seront modifiées brutalement et on risque de ne pas converger vers un optimum local (*Ziyati, 2010 ; Sioud, 2011*).

Dans le cas de la mutation adaptative (*figure 3-8b*), on cherche à optimiser le taux de mutation en codant ce dernier dans la structure du chromosome, ce second chromosome s'évolue de la même manière que le premier chromosome codant l'espace d'état, où il subit différents mécanismes génétiques. Au cours de l'évolution de l'algorithme, les gènes ayant une probabilité de mutation élevée disparaissent à force que la population converge vers un optimum. De même les gènes qui possèdent une probabilité de mutation trop faible s'adaptent mal au cours d'évolution et tendent à disparaître (*Ziyati, 2010*).

Il existe également d'autres types de mutation moins utilisés, telle que la mutation par échange qui consiste à choisir aléatoirement deux gènes sur le même chromosome et à échanger les positions des deux gènes choisis. Cette technique est souvent utilisée dans les codages ordinaux (*Sioud, 2011*). Il y a aussi la technique de mutation basée sur la transposition de deux ou plusieurs allèles consécutifs, ou l'inversion de l'ordre des allèles entre deux coupes dans un chromosome (*Zidi, 2006*).

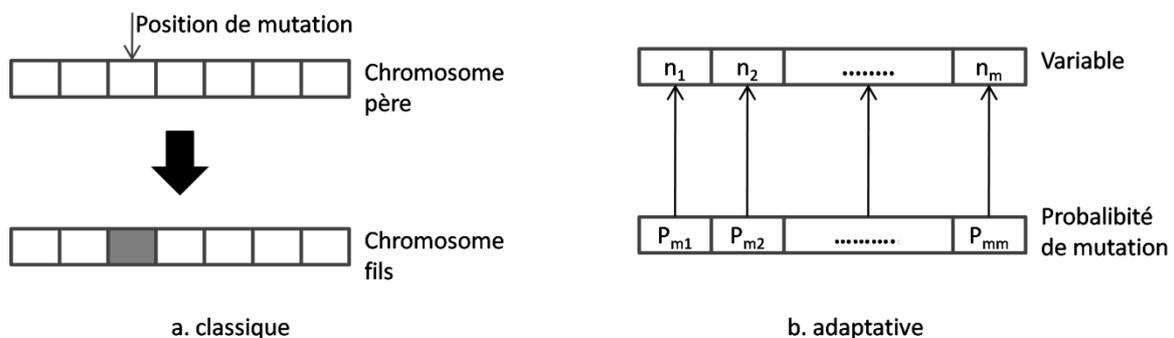


Figure 3-8 : opérateur de mutation classique et adaptative

3.6.5 Remplacement

L'opération de remplacement est la dernière étape du processus itératif des algorithmes génétiques. Elle garantit le passage d'une génération à l'autre. Elle consiste à effectuer un remplacement partiel ou total de la population initiale par la nouvelle population si le critère de remplacement est vérifié ce qui améliore la performance de la population. Dans le cas d'un remplacement partiel, les meilleures solutions de la nouvelle population remplacent les plus mauvaises de l'ancienne population, une version de ce type de remplacement consiste à garder une petite fraction de l'ancienne population et la compléter par les meilleurs individus de la nouvelle population, cette approche est appelée élitisme (*Jebari*, 2013 ; *Sioud*, 2011). Alors que dans le cas d'un remplacement total la nouvelle population remplace complètement l'ancienne, dans ce cas l'algorithme génétique est dit générationnel.

3.6.6 Critère d'arrêt

L'algorithme génétique nécessite la mise en place d'un critère d'arrêt pour arrêter le processus de calcul, il s'agit en fait d'un test d'efficacité de l'algorithme. Ce critère peut être introduit de différentes manières. En effet, dans la littérature plusieurs méthodes ont été présentées et qu'on peut regrouper en deux catégories essentielles : Le critère d'arrêt statique, et le critère d'arrêt dynamique.

Le critère d'arrêt statique dépend du matériel informatique utilisé. Dans cette catégorie le critère d'arrêt est basé sur le nombre d'itération ou d'évaluation de la fonction objectif maximale à ne pas dépasser, ou sur le temps de calcul ou d'exécution CPU.

Cependant, le critère d'arrêt dynamique est basé sur la qualité de la solution ou la convergence de l'algorithme, où le critère est fonction d'une valeur de la fonction objectif à atteindre qui sera suffisamment proche d'un optimum connu a priori. Le critère de convergence sera vérifié après un certain nombre d'itérations consécutives sans améliorer la meilleure solution connue

Une fois le critère d'arrêt est vérifié, l'algorithme arrête son évolution et la solution finale est choisie de la population issue de cette dernière itération, sinon l'algorithme continue son évolution (*Zidi*, 2006 ; *Vanaret*, 2015).

Conclusion

L'utilisation de la technique des algorithmes génétiques depuis sa présentation par John Holland en 1975 a connu une évolution exponentielle, et actuellement est parmi les méthodes les plus utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation, où plusieurs problèmes célèbres d'optimisation ont été résolus par cette approche tel que le problème du voyageur du commerce.

L'approche est très connue dans la gestion des services de l'eau ou plusieurs auteurs l'ont utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation. Elle s'adapte bien aux problèmes d'optimisation combinatoire, dans laquelle s'inscrit notre étude. Elle offre également

l'avantage de présenter de bons résultats avec un temps de calcul court, grâce à sa technique d'exploration qui consiste à réduire l'espace de recherche.

La méthode a été inspirée du principe de la révolution naturelle où elle consiste à établir des solutions initiales d'une façon aléatoire constituant la population initiale, cette population passe par une série d'opérations génétiques qui permet l'amélioration de la performance des individus (solutions). Durant le processus d'évolution, on sanctionne les mauvaises solutions qui ne respectent pas les contraintes d'optimisation. Dans notre étude, cette étape nécessite la connaissance de la demande en eau durant l'horizon d'optimisation pour cela une méthode de prévision est recommandée.

Chapitre 4

4 Prédiction de la demande en eau potable

Introduction

La prédiction de la demande en eau est une étape recommandée dans l'aménagement des ressources en eau et la gestion des systèmes d'alimentation en eau potable. Dans notre thèse en particulier, la prédiction de la demande en eau est indispensable pour augmenter l'efficacité et la fiabilité du modèle d'optimisation du fonctionnement des systèmes de pompage. La prédiction de la demande fournit au modèle d'optimisation les différentes valeurs de la demande en eau pour la période d'optimisation, afin qu'il puisse faire les calculs d'optimisation nécessaires.

La prédiction de la demande en eau reste une tâche très difficile à cause du degré élevé de la complexité du phénomène de la demande et ses diverses caractéristiques. En effet, nous avons plusieurs types de demande en eau : domestique, industrielle et agricole, et chaque type a ses propres caractéristiques. En ce qui concerne la demande en eau domestique qui est la demande la plus importante dans les réseaux d'alimentation en eau potable, elle se caractérise par une irrégularité temporelle et spatiale (variation dans le temps et dans l'espace). Cette irrégularité est causée par plusieurs facteurs.

L'étude de la demande en eau domestique est aussi délicate à cause du consommateur final de l'eau en l'occurrence l'être humain dont le comportement vis-à-vis de la consommation est difficile à prévoir, d'où la difficulté d'établir un modèle traitant la prédiction de la demande domestique. Cependant, cette complexité de la demande en eau potable, n'a jamais été un obstacle pour ne pas développer des modèles traitant la demande en eau, où depuis une dizaine d'années plusieurs approches ont été élaborées pour prévoir la demande en eau, dont la performance et la fiabilité varient d'une approche à l'autre, en fonction des techniques de calcul utilisées, et du contexte et des circonstances du cas étudié.

4.1 Types de consommation d'eau potable

A partir du 18^e siècle, la distribution d'eau potable se faisait à l'aide des fontaines publiques installées dans divers endroits accessibles aux citoyens des grandes villes en Europe. Ensuite, avec le développement des équipements de consommation d'eau dans les domiciles (robinets, équipements sanitaires, ...etc.), les services d'eau potable ont été poussés à raccorder les habitations au réseau d'alimentation (*Masmoudi*, 2009). À la fin du 19^e siècle avec l'apparition de la révolution industrielle, la distribution en eau potable a pris compte certains besoins industriels en eau. Actuellement, dans un réseau de distribution, on distingue trois types de consommation d'eau potable : consommation domestique, consommation agricole et consommation industrielle. Dans certains réseaux, on peut rencontrer les trois types de consommation, mais le plus souvent les réseaux d'alimentation en eau potable se limitent aux usages domestiques, alors que les deux autres usages industriels et agricoles sont séparés par des réseaux indépendants.

En Algérie, selon les données de l'office national des statistiques (tableau 4.1), les secteurs domestique et agricole sont les principaux consommateurs de l'eau, et les données statistiques montrent que la consommation domestique augmente d'une année à l'autre par rapport aux autres types de consommation d'eau.

Tableau 4.1 : consommation d'eau par les différents secteurs en Algérie (ONS, 2006)

Année	1975	1980	1989	1999	2002
Consommation agricole [10^6 m^3]	2620	2450	2290	2029	1800
Consommation industrielle [10^6 m^3]	100	133	166	116	200
Consommation domestique [10^6 m^3]	530	700	830	1130	1300
Total [10^6 m^3]	3250	3283	3286	3275	3300

4.1.1 Consommation domestique

La demande domestique représente la part la plus importante de l'utilisation de l'eau dans réseaux d'alimentation en eau potable (Gleick et col., 2013). Souvent, les réseaux d'alimentation d'eau potable se limitent à l'usage résidentielle de l'eau pour des raisons économiques et sanitaires car la consommation domestique est exigeante en terme de qualité sanitaire d'eau ce qui nécessite un traitement spécifique très couteux s'il est généralisé aux autres secteurs. La consommation domestique concerne les besoins en eau de l'être humain et tous ce qui en relation avec ses activités quotidiennes à l'intérieure et à l'extérieure de son domicile. La figure (4-1) donne un exemple sur la répartition quotidienne de la consommation domestique. Cette consommation se caractérise par une large domination des usages non alimentaire de l'eau potable telle que l'utilisation de l'eau par les chasses des toilettes, où elle représente à elle seule environ 26,7 % de la consommation domestique quotidienne de l'eau potable. Tandis que l'usage alimentaire se limite à environ 15,7 %. La consommation domestique se caractérise par une forte variabilité temporelle et spatiale. Cette variabilité est influencée par plusieurs facteurs climatiques, économiques et sociaux que nous développons par la suite.

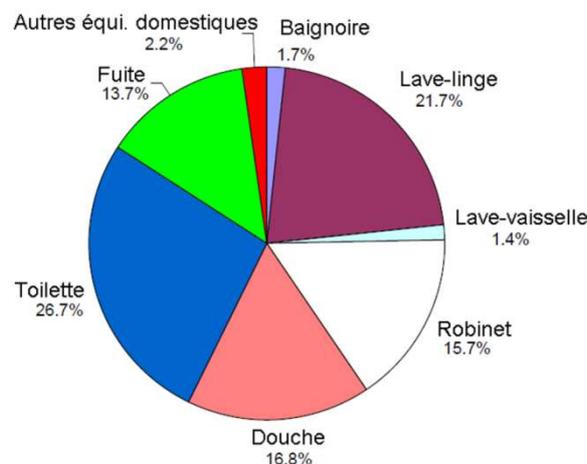


Figure 4-1 : usages domestiques de l'eau potable (Mayer et DeOreo, 1999).

4.1.2 Consommation agricole

Le secteur agricole est le plus grand consommateur d'eau à l'échelle mondiale, où sa consommation en eau est estimée à environ 70 % de la consommation mondiale totale en eau. Cette énorme quantité d'eau consommée par ce secteur stratégique et vital est parmi les raisons pour lesquelles les réseaux d'irrigation sont généralement séparés des réseaux d'alimentation en eau potable. La consommation agricole a ses propres ressources d'approvisionnement, car souvent les agricultures irriguent leurs cultures via les eaux prélevées par des forages privés.

La consommation agricole dépend essentiellement des conditions climatiques, de la technique utilisée pour l'irrigation et du type de la culture. En ce qui concerne les facteurs climatiques, le facteur le plus important c'est la pluviométrie, qui peut fournir une partie des besoins en eau des cultures réduisant ainsi la consommation d'eau par les systèmes d'irrigation.

La consommation agricole est fonction de la technique utilisée par le système d'irrigation. Par exemple le système d'irrigation goutte à goutte (Micro-irrigation) consomme moins d'eau que l'irrigation par aspersion. Aussi, la consommation d'eau dépend du type de la culture, où la quantité d'eau nécessaire à la production est différente d'une culture à l'autre comme le montre le tableau (4.2) ci-dessous.

La quantité d'eau mobilisée pour l'agriculture varie d'un pays à l'autre. En fait, cette consommation est importante chez les pays en voie de développement, dont l'économie est basée principalement sur l'agriculture comme source financière, à l'encontre des pays développés qui disposent des sources économiques autres que la production agricole. En Inde et en Mexique par exemple le secteur agricole utilise la quasi-totalité de la production d'eau, consommant environ 90 % de toute leur eau (*DIST*, 2000). Même chose pour l'Afrique avec une consommation agricole qui représente 88 % de la consommation totale de l'eau (*Zella et Smadhi*, 2007). En Algérie aussi, la consommation agricole occupe une place importante, elle représente environ 62% de la demande en eau totale du pays (*Mozas et col.*, 2013).

Tableau 4.2 : consommation d'eau moyenne par type de culture (*DIST*, 2000)

Type de culture	Consommation [l/kg]
Maïs ensilage	238
Banane	346
Maïs grain couleur	454
orge	524
Pomme de terre	590
Blé	590
Soja	900
Riz pluvial	1600
Riz inondé	5000
Coton	5263

4.1.3 Consommation industrielle

L'activité industrielle est fortement liée à l'eau. En effet, l'eau entre dans les diverses étapes du processus industriel, elle est utilisée comme matière première de production, comme liquide de refroidissement pour certaines installations, comme solvant ou comme vecteur des déchets (*Frécaut*, 1984).

La consommation industrielle dépend du type d'activité industrielle où chaque type activité industrielle est caractérisé par un besoin spécifique en eau (tableau 4.3). Certaines industries nécessitent de grandes quantités d'eau, comme par exemple le refroidissement des stations nucléaires avec une consommation qui représente environ 60 % de la consommation d'eau totale en France, 40 % au Etats-Unis et 55 % au Canada (*DIST*, 2000).

Comme pour la consommation agricole, la consommation industrielle varie d'un pays à l'autre, selon le niveau de développement industriel du pays. Dans les pays industriels tel que la France la consommation industrielle en eau croit depuis la révolution industrielle du 19^{ème} siècle, elle a été multipliée par 20 entre 1900 et 1975 (*DIST*, 2000).

Dans les pays en voie de développement, la consommation industrielle est relativement faible par rapport à la consommation des autres secteurs. En Algérie par exemple, la consommation est très faible, elle représente uniquement 3 % de la demande en eau totale du pays (*Mozas et col.*, 2013).

Tableau 4.3 : consommation moyenne d'eau par type d'industrie (*DIST*, 2000).

Type d'industrie	Consommation [l/kg]
Rayonne	400 à 11 000
Acier	300 à 600
Papier	500
Sucre	300 à 400
Carton	60 à 400
Ciment	35
Savon	1 à 35
Matière plastique	1 à 2

4.2 Variation temporelle de la demande en eau

La consommation en eau potable est variable dans le temps. Cette variabilité temporelle dépend de plusieurs facteurs climatiques, sociaux et économiques. Le nombre de ces facteurs est tributaire du pas temporel de la demande. En effet, plus le pas de temps est petit plus le nombre de facteurs est grand, où par exemple le nombre de facteurs déterminants de la demande horaire est supérieur à celui de la demande hebdomadaire.

Pour visualiser la demande en eau à cause de cette variation temporelle, on calcule certaines valeurs statistiques de référence, caractérisant la consommation d'eau potable (valeurs moyennes, maximale, ...etc.). Ces différentes valeurs statistiques permettent d'analyser la consommation d'eau potable de l'agglomération desservie, et permettent aussi le

dimensionnement des différentes installations hydrauliques du système d'alimentation en eau potable.

4.2.1 Variation annuelle de la demande en eau

La consommation annuelle dépend essentiellement du nombre de la population de la ville et du prix de l'eau. L'évolution de la consommation annuelle d'eau a une tendance croissante d'une année à l'autre, malgré que cette variation soit relativement faible par rapport aux variations journalières, ou horaires.

Cette croissance est généralement due à l'augmentation de la population, mais il existe des exceptions telle que la ville de Paris en France, où même si la population a augmenté la consommation d'eau potable a diminué ces dernières années (*Rinaudo*, 2013), ceci peut être expliqué par l'innovation et l'utilisation des équipements sanitaires et électroménagers économiques dans leurs consommations en eau potable.

En Algérie, la croissance de la demande en eau potable est importante, elle a été multipliée par quatre en quarante ans, notamment dans le nord du pays et dans les zones urbaines (*Mozas et col.*, 2013).

Pour évaluer la demande annuelle, on calcule la demande annuelle moyenne, à l'aide de méthodes d'évaluation. L'estimation de cette valeur est très utile pour comparer la demande annuelle à la production annuelle au niveau de la ressource.

4.2.2 Variation mensuelle de la demande en eau

Les facteurs climatiques et saisonniers sont très déterminants dans la variation de la demande mensuelle. Cette demande est très influencée par les conditions climatiques, c'est pour cette raison que la variation mensuelle de l'eau potable est bien visible en fonction des saisons.

En effet, la consommation est relativement élevée durant les mois d'été, caractérisés par des fortes chaleurs et une pluviométrie quasi-nulle. Tandis que durant les mois d'hiver caractérisés par des températures basses et une pluviométrie importante, la consommation est faible.

La demande mensuelle est estimée par la demande mensuelle moyenne et la demande mensuelle maximale. Sachant que dans certaines villes, la composante saisonnière de la demande est accentuée par l'irrigation et les activités touristiques (*Masmoudi*, 2009).

4.2.3 Variation journalière de la demande en eau

Outres les autres facteurs influençant la demande mensuelle (facteurs saisonniers et climatiques), d'autres facteurs s'ajoutent en ce qui concerne la variation journalière de la demande, tels que les jours de travail, les weekends, les évènements religieux,...etc. D'un jour à l'autre de la même semaine la demande en eau peut varier d'une façon significative, en particulier durant le weekend et en début de semaine, où la consommation atteint des valeurs

maximales (*figure 4-2*). La demande journalière est calculée par la demande journalière moyenne et la demande journalière maximale.

Les ouvrages de traitement et d'adduction d'eau doivent être dimensionnés pour pouvoir fournir la demande journalière maximale de l'année du projet. On définit alors le coefficient de pointe journalier K_1 , c'est le rapport entre la demande journalière maximale et la demande journalière moyenne. K_1 varie de 1,3 à 1,6. La valeur du coefficient de pointe journalier est déterminée à partir des statistiques de la demande journalière sur toute l'année (*Moussa, 2002*).

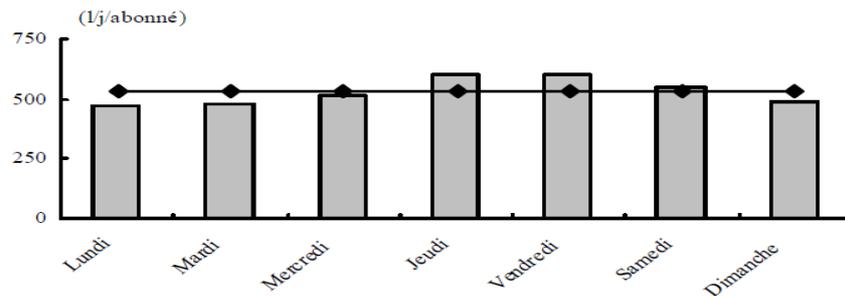


Figure 4-2 : consommation journalière moyenne par abonné de la Ville de Biskra (*Masmoudi et col., 2008*).

4.2.4 Variation horaire de la demande en eau

La variation horaire de la demande est très visible, car elle varie d'une façon très considérable d'une heure à l'autre du même jour. La consommation horaire est accentuée par d'autres facteurs en relation avec l'activité quotidienne des habitants (préparation des repas, utilisation de douche,...etc.)

La consommation horaire atteint son maximum le matin et le début de soirée, tandis que la nuit la consommation horaire est très faible et elle correspond aux fuites d'eau dans le réseau d'eau. La demande horaire en eau est caractérisée par deux valeurs, la demande horaire moyenne et la demande horaire maximale.

Les ouvrages de distribution d'eau (réseau, réservoirs) doivent être dimensionnés pour fournir la demande horaire maximale de la journée de pointe, de l'année du projet. On définit ainsi le coefficient de pointe K_2 , qui est le rapport entre la demande horaire maximale et la demande horaire moyenne. La valeur de K_2 est calculée à partir des données statistiques de la consommation horaire, elle varie de 1,5 à 3,5 selon l'importance de l'agglomération (*Moussa, 2002*).

- Grande ville : $K_2 = 1,5$ à $2,0$
- Moyenne ville : $K_2 = 2,0$ à $2,5$
- Petite ville : $K_2 = 3,0$ à $3,5$

4.3 Facteurs déterminants de la demande en eau potable

La demande en eau est différente d'une agglomération à une autre, et elle varie aussi selon l'année, le mois, le jour et même l'heure. Cette variation est liée à de nombreux facteurs économiques, sociaux et naturels.

Les modèles d'évaluation de la demande en eau doivent prendre en considération cette variation temporelle et spatiale à travers des facteurs déterminants de la demande.

La liste des facteurs déterminants de la demande est très longue et spécifique pour chaque type de modèles d'évaluation et pour chaque horizon de prévision. Pour cela, on va se limiter à quelques facteurs essentiels qu'on va présenter dans ce qui suit.

4.3.1 Prix de l'eau

Le prix est un facteur déterminant dans la consommation d'eau potable. Une augmentation du prix d'eau peut engendrer une réduction significative de la consommation d'eau potable, ce qui fait que la structure tarifaire, la périodicité de la facturation doivent entrer comme variables explicatives pour les modèles de prévision de la consommation à long et à moyen terme.

Cependant, Nauges et Reynaud (2001) ont montré que la consommation est faiblement sensible à l'augmentation du prix. En effet, une augmentation de 10 % du prix d'eau correspond à une baisse de 1 à 2 % de la consommation d'eau potable. Ce qui a conduit les deux chercheurs à considérer le prix d'eau comme un outil peu efficace pour maîtriser la consommation d'eau.

En Algérie, le prix de l'eau est subventionné par l'état algérien. Le prix de vente de la première tranche est de 6,30 DA/m³ (tableau 4.4), malgré que le coût de production soit d'environ 28 DA/m³ pour les eaux conventionnelles (barrage et souterraine), et d'environ 72 DA/m³ pour les eaux de dessalement. Ce faible prix de vente d'eau potable provoque des déficits au niveau des services de l'eau, et contribue à l'augmentation de la consommation des usagers (*Kertous*, 2013).

Tableau 4.4 : tarif de base d'eau potable en Algérie (*ADE*, 2018).

Zone territoriale	Tarif de base [DA/m ³]
Alger, Oran, Constantine	6,30
Chlef	6,10
Ouargla	5,80

4.3.2 Facteurs climatiques

Les variables climatiques influencent considérablement la demande en eau, il est évident que plus il pleut plus on consomme moins d'eau, surtout dans les zones où l'usage extérieur de l'eau est important. Dans ce cas, les précipitations sont très influentes dans la demande d'eau

potable, car les eaux de précipitations peuvent remplacer les eaux du réseau pour certains usages tels que l'arrosage des jardins, le lavage des voitures, ...etc.

Selon certaines études, la consommation d'eau potable est liée beaucoup plus au fait qu'il pleuve plutôt qu'à la quantité de pluie tombée, ce qui fait que la consommation est en corrélation avec le nombre de jours pluvieux plutôt qu'à la quantité de la pluviométrie (*Neverre et col.*, 2011).

A l'inverse de l'effet des précipitations, la température est un facteur contribuant à l'augmentation de la consommation d'eau potable, en incitant les habitants à prendre des douches, à laver le linge, d'utiliser les piscines,...etc. Gleyses et Montginou (2013) ont étudié l'impact de la variable température représentée par le nombre de jours où la température est supérieure ou égale à 29°C. Ils ont constaté que la température a pour effet d'augmenter la consommation journalière d'eau. Cette augmentation est relativement faible avec moins de 5% (*Gleyses & Montginoul*, 2013).

4.3.3 Facteurs socio-économiques

Les facteurs socioéconomiques sont tributaires de la demande en eau, ces facteurs sont nombreux, parmi ces facteurs, nous avons le revenu du ménage, et plusieurs études ont confirmé une corrélation positive entre la demande en eau potable et le revenu. Les habitants riches sont peu sensibles aux prix de l'eau. La facture d'eau ne représente qu'une faible part de leurs revenus (*Neverre et col.*, 2011).

Le nombre de la population est en relation directe avec la demande en eau, il est clair que la croissance de la population qui ne cesse pas d'augmenter est un synonyme d'augmentation de la demande en eau surtout à long terme.

L'âge de la population a un effet considérable sur la consommation d'eau. Selon certaines études, les personnes âgées effectuent des économies volontaires dans leurs consommations d'eau potable (*Nauges & Reynaud*, 2001). Ce comportement peut être expliqué par deux raisons : Premièrement, la majorité des personnes âgées sont à la retraite, ce qui limite leurs capacités financières. Deuxièmement, l'aspect moral peut entrer en considération par le fait que les personnes âgées sont plus sages dans leurs consommations en général.

4.3.4 Caractéristiques de l'habitat

La consommation d'eau potable dépend également des caractéristiques de l'habitat. Les logements récents, sont caractérisés par des équipements plus économiques en matière de consommation d'eau, et leurs installations sanitaires sont en bonne état, ce qui réduit la consommation d'eau. La présence d'un jardin contribue fortement à l'augmentation de la demande en eau. Cette augmentation peut être expliquée par l'utilisation d'eau pour l'arrosage des pelouses, le remplissage des piscines, et le lavage des voitures (*Neverre et col.*, 2011).

Le type d'habitat (collectif ou individuel) a un impact sur la demande en eau, Diverses études ont montré que la part des maisons individuelles dans une ville réduit la consommation d'eau. Cette diminution est expliquée par le fait que ces logements individuels sont équipés de compteurs individuels, ce qui incitent les gents à consommer moins d'eau pour des raisons économiques (*Nauges & Reynaud*, 2001).

4.4 Prédiction de la demande en eau

La prédiction de la demande en eau est très importante pour la gestion des systèmes d'alimentation en eau potable. Elle est indispensable pour le dimensionnement des équipements hydrauliques dans le cas d'une extension du réseau de distribution, où dans la réalisation d'un nouveau réseau d'alimentation en eau potable. La prédiction de la demande en eau est aussi nécessaire pour la gestion optimale des systèmes d'alimentation en eau potable. En effet, nous avons besoin de connaître la demande en eau pour le fonctionnement des modèles d'optimisation.

La méconnaissance de la demande a un effet très négatif sur la qualité des services, c'est le cas de la majorité des pays sous-développés, où la consommation n'est pas connue ou mal estimée, et souvent une mauvaise évaluation de la demande conduit à une sous ou surestimation de la demande en eau, créant ainsi divers problèmes techniques et économiques pour les gestionnaires des services d'eau potable.

4.4.1 Applications de la prédiction de la demande en eau

Le domaine d'application de la prédiction de la demande en eau est vaste, comme nous allons le voir par la suite, on peut faire appel à la prédiction dans le dimensionnement des systèmes d'alimentation en eau potable, ou dans la phase exploitation, telle que la détection de la défaillance, ou l'optimisation du fonctionnement. Dans chaque application de la prédiction, l'approche utilisée a ses propres caractéristiques, pour mieux s'adapter à l'objectif recherché. D'une façon générale, on peut citer quatre principales applications de la prédiction de la demande en eau.

4.4.1.1 *Optimisation des systèmes d'alimentation en eau potable*

La gestion optimale des systèmes d'alimentation est très complexe, et l'objectif de tous les gestionnaires des services de l'eau est de fournir à la population desservie une eau de bonne qualité à un moindre coût de production. Cela est possible à l'aide des modèles d'optimisation qui ont besoin de connaître la demande en eau à l'horizon d'optimisation, d'où l'importance d'utiliser un modèle de prédiction pour ce type d'opération. C'est l'objectif de notre étude, et plus précisément l'optimisation de pompage d'eau potable, qui nécessite la prédiction de la demande en eau afin de définir le planning de fonctionnement optimal.

4.4.1.2 *Dimensionnement des systèmes d'alimentation en eau potable*

La prédiction de la demande en eau est indispensable pour le bon dimensionnement des ouvrages des systèmes d'alimentation en eau potable, et la qualité de la prédiction a une influence directe sur la performance technique et économique de l'ouvrage.

Il a été constaté que dans plusieurs pays le dimensionnement des ouvrages hydrauliques ne tiennent pas compte des modèles de prédiction sophistiqués, et il se base souvent sur de simples méthodes pour estimer la demande en eau future (*Rinaudo*, 2013). Cette méthode de dimensionnement n'est pas fiable, et posera beaucoup de problèmes dans la phase exploitation. D'où l'intérêt d'utiliser des méthodes de prédiction modernes et efficaces afin d'éviter tout problème lié à une mauvaise prédiction dans le futur.

4.4.1.3 Diagnostic des systèmes d'alimentation en eau potable

Dans la gestion des réseaux d'alimentation en eau potable, certains gestionnaires des services de l'eau ont établi des modèles de détection des anomalies de fonctionnement (rupture d'une conduite, surconsommation, ...) en se basant sur des modèles de prévision. En effet, le principe est de comparer les valeurs mesurées de certains paramètres, généralement le débit et la pression, à des valeurs obtenues par des méthodes de prévision. L'écart entre les deux valeurs signale un éventuel dysfonctionnement du système d'alimentation en eau potable (Guhl, 1999).

4.4.1.4 Préservation de la ressource naturelle

La préservation des ressources en eau nécessite la connaissance de la consommation en eau dans le présent et dans le futur, ce qui permet d'établir différents scénarii possibles pour étudier leurs répercussions sur les ressources en eau.

4.4.2 Horizon de prévision de la demande en eau

On désigne par l'horizon de prévision de la demande en eau, l'éloignement temporel des valeurs prévues de la demande. L'horizon varie en fonction de l'objectif de prévision, de l'approche utilisée, et du degré de fiabilité de la prévision.

D'une façon générale, on distingue trois types d'horizon : le court-terme, le moyen terme et le long terme. Le tableau (4.5) résume les différents horizons de prévision en fonction de l'application du modèle de prévision.

Tableau 4.5 : modèles de prévision et leurs horizons (Billings et Jones, 2008).

Type de prévision	Horizon de prévision	Applications
Long-terme	décennies, 10-50 ans	Dimensionnement des capacités des systèmes d'alimentation en eau potable, et des systèmes de prises d'eau brute
Moyen-terme	7-10 ans	Dimensionnement, amélioration du traitement et distribution d'eau, investissements
Court-terme	1-2 ans	Suivi et évaluation des programmes, prévision des recettes.
Très court-terme	heures, jours, semaines, jusqu'à deux semaines	Optimisation et gestion des systèmes d'alimentation et de pompage d'eau potable.

4.4.2.1 Prédiction à court terme

A partir des années 80 les services publics de l'eau ont commencé à s'intéresser à la prévision à court terme. Avant c'était la prévision à long terme qui était utilisée dans la planification de l'approvisionnement en eau potable à grande échelle (Jentgen et col., 2007). Dans la prévision à court terme certains auteurs font la distinction entre l'horizon à court terme et l'horizon à très court terme.

L'horizon à court terme appelé aussi horizon de gestion tactique, il varie de quelques mois à un an selon Bellfield (2001), et de un jour à deux ans selon Billings et Jones (2008), et de un

jour à une semaine selon Bakker (2014). Les modèles de préviation à court terme sont utilisés pour la gestion économique et financière des systèmes d'alimentation en eau potable.

L'horizon à très court terme, ou bien l'horizon de gestion opérationnelle est de l'ordre d'une semaine selon Bellfield (2001), et de quelques heures à une semaine selon Billings et Jones, (2008), et d'une heure selon Bakker (*Bakker*, 2014). Ce type d'horizon convient aux modèles d'optimisation de fonctionnement des différentes installations d'alimentation en eau potable, telle que l'optimisation d'exploitation des stations de pompage, qui consiste à définir un planning de pompage optimal, qui dépend de plusieurs facteurs tels que, le rendement des pompes, la demande en eau et la production en eau. La préviation à très court terme fournit à ce genre de problème d'optimisation la demande en eau nécessaire au calcul d'optimisation.

4.4.2.2 Préviation à moyen terme

Préviation à moyen terme ou préviation de gestion, varie de un à quinze ans, utilisée pour la planification des mises en service et des mises en œuvre de grands ouvrages hydrauliques existants, telles que les stations de traitement des eaux et les stations de pompage (*Billings et Jones*, 2008 ; *Bellfield*, 2001). L'horizon de préviation est d'une année (*Bakker*, 2014).

4.4.2.3 Préviation à long terme

Appelée aussi préviation stratégique, leurs horizon est supérieur à dix ans. Utilisée généralement pour l'estimation de la demande et la ressource disponible sur un horizon de 25 années (*Bellfield*, 2001). La période de l'horizon dépend de la nature et de la grandeur du projet. Généralement, ce genre de préviation concerne le dimensionnement de nouveaux ouvrages hydrauliques de très grandes ampleurs tels que les barrages (*Billings et Jones*, 2008).

4.4.3 Méthodes de préviation de la demande en eau

Il existe plusieurs méthodes de préviation de la demande en eau potable. En épargnant la méthode simple, trois méthodes sont actuellement les plus utilisées dans la préviation de la demande en eau, où de nombreuses études récentes les ont utilisées comme modèles de préviation.

4.4.3.1 Méthodes simples

Le principe d'évaluation des méthodes simples comme leurs nom l'indique est très simple, il consiste soit à extrapoler la tendance passée de la demande en eau, ou à multiplier la population future par la dotation en eau potable. Ces méthodes sont généralement utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. Malgré que ces méthodes peuvent donner de bon résultats, souvent leurs utilisations engendrent une surestimation de la demande en eau ce qui génère des pertes financières considérables aux gestionnaires des services de l'eau (*Rinaudo*, 2013).

4.4.3.2 Méthodes économétriques

L'évaluation économétrique ou approche statistiques multi-variés de la demande considère que la demande en eau est une fonction complexe dépendant de plusieurs facteurs économiques, sociaux et climatiques. Elle consiste à établir une relation numérique entre la demande en eau et l'ensemble des variables explicatives, en se basant sur des données statistiques. Les principales variables explicatives sont le prix de l'eau, le revenu des ménages, le niveau économique, les caractéristiques de l'habitat, les conditions climatiques (**Rinaudo**, 2013). Parmi les modèles économétriques établis pour l'évaluation de la demande en eau potable, celui présenté par Nauges et Reynaud (2001) où la fonction demande d'eau potable est donnée par l'équation suivante :

$$Y_{it} = X'_{it} \cdot \beta + Z'_i \cdot \gamma + \epsilon_{it} \quad (4.1)$$

avec, Y_{it} : consommation moyenne par abonné de l'entité i (région étudiée) ; X'_{it} : vecteur des variables connues pour chacune des années sur la période (prix de l'eau, revenu, précipitation) ; Z'_i : vecteur des variables supposées constantes sur la période (variable issues du recensement) ; ϵ_{it} : terme d'erreur présent dans tout modèle. Sachant que les variables sont exprimées en logarithme, et que les élasticités de la demande par rapport à chaque variable sont directement lues car elles correspondent aux coefficients estimés. Dans le modèle présenté, le terme d'erreur ϵ_{it} est un terme d'erreur individuel et α_i est un terme d'erreur à double dimension (**Nauges et Reynaud**, 2001).

En 2013, Kertous a présenté un modèle économétrique dite « approche par panels dynamiques » pour estimer la demande en eau dans la ville de Bejaïa (Algérie). Basé sur plusieurs facteurs explicatifs de la demande. Le modèle élaboré a la particularité de prendre en considération le volume d'eau consommé à l'instant $t-1$ d'où vient la forme dynamique du modèle. La forme du modèle est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Ln}Y_{it} = \alpha + \pi \text{Ln}Y_{i,t-1} + \beta \text{Ln}X_{it} + \gamma \text{Ln}Z_i + v_{it} \quad (4.2)$$

avec, $\text{Ln}Y_{it}$: log de la consommation de l'individu « i » à l'instant « t » ; $\text{Ln}Y_{i,t-1}$: log de la consommation à l'instant « $t-1$ » ; $\text{Ln}X_{it}$: log des variables explicatives qui varient dans les deux dimensions individuelle et temporelle ; $\text{Ln}Z_i$: log des variables explicatives qui varient dans la seule dimension individuelle ; $\alpha, \pi, \beta, \gamma$: paramètres à estimer et v_{it} : terme d'erreur habituelle.

4.4.3.3 Méthodes physiques

La prévision physique de la demande en eau potable appelée aussi approche des usages finaux se fait par simulation des différentes utilisations d'eau potable par les usagers. La méthode consiste à estimer la consommation de chaque robinet de puisage, telles que la consommation liée à l'hygiène corporelle (douche, lavabo,... etc), l'utilisation sanitaire, l'utilisation d'eau par les équipements électroménagers (lave-vaisselle, lave-linge) la consommation de l'évier de cuisine, et la consommation des usages extérieurs par le robinet de jardin.

Le principal intérêt de cette méthode est de permettre d'évaluer la performance technique en matière d'économie d'eau par les différents robinets et les électroménagers à long terme. On reproche à la méthode le fait qu'elle ne tient pas compte des facteurs déterminant de la consommation d'eau potable d'une façon explicite. La méthode est utilisée depuis une dizaine d'années en Angleterre et aux pays de Galles (*Rinaudo*, 2013).

Mayer et DeOreo (1999), ont développé un modèle de prévision de la demande domestique basé sur la modélisation physique. Le modèle développé a confirmé sa performance en obtenant des résultats identiques à ceux de la méthode des séries temporelles (*Mayer et DeOreo*, 1999).

4.4.3.4 Méthode d'analyse des séries temporelles

La méthode d'analyse des séries temporelles ou couramment appelée méthode des séries temporelles est basée sur des techniques statistiques et mathématiques. Cette approche est souvent utilisée pour la prévision à court et moyen terme de la demande en eau (*Jentgen*, 2007). La méthode nécessite une série statistique des données de longues périodes.

L'application de la méthode des séries temporelles fait souvent appel à des méthodes statistiques de traitement. Les principales étapes de traitement d'une série temporelle sont les suivantes (*Lagnoux*, 2013).

- correction des données ;
- observation de la série ;
- modélisation avec un nombre fini de paramètres ;
- analyse de la série à partir de ses composantes ;
- diagnostic et ajustement du modèle.

La méthode des séries temporelles comporte trois composantes (tendance, composante saisonnière, et résidu), sa forme générale est donnée par l'équation (4.3) :

$$Y_t = Z_t + S_t + \varepsilon_t \quad (4.3)$$

avec, Y_t : valeur prévue ; Z_t : tendance ; S_t : composante saisonnière ; ε_t : résidu.

La tendance représente l'évolution à long terme de la série, traduisant le comportement moyen de la demande en eau ; Tandis que la composante déterministe, elle représente la variation cyclique de la demande en eau ; et enfin la composante résiduelle (bruit ou résidu) représente la variation aléatoire et accidentel le de la demande en eau.

La méthode consiste à décomposer les données suivant les différents facteurs explicatifs comme les périodicités (saison et périodicité hebdomadaire). Sachant que la consommation d'eau potable présente une certaine périodicité, ce qui permet de la considérer comme étant un processus à deux composantes, une déterministe et l'autre aléatoire.

Le principe de prévision consiste à estimer les différentes composantes du modèle en passant par plusieurs étapes (*figure 4-3*). Tout d'abord, la composante tendancielle peut être estimée par la méthode des moindres carrés, alors que dans le cas d'une série où l'effet saisonnier est très présent, on doit lisser la série à l'aide de la méthode des moyennes mobiles ou d'autres méthodes. Une représentation graphique adéquate permet d'évaluer le degré d'effet saisonnier. La tendance peut être décomposée par deux méthodes essentielles : le schéma additif et le schéma multiplicatif. La composante saisonnière est ensuite calculée en fonction du schéma de la tendance. En effet, si le schéma est additif, la composante saisonnière est calculée par la méthode des moyennes mobiles, et si le schéma est multiplicatif, la composante saisonnière est estimée par la méthode des rapports à la moyenne ou à la tendance, ou par la méthode des moyennes mobiles. Selon certains auteurs la méthode des moyennes mobiles peut être appliquée pour tous les types de modèles. Cependant, la méthode des moyennes mobiles s'adapte mieux aux modèles caractérisés par (*Lagnoux, 2013*) :

- Tendance sensiblement linéaire,
- Composante saisonnière périodique,
- Résidu de variance faible.

Une fois la tendance et la composante saisonnière sont estimées, on contrôle la pertinence du modèle par une analyse des résidus. La méthode des séries temporelles peut utiliser seulement le jour de la semaine comme variable d'entrée, comme elle peut prendre en considération d'autres variables de la demande en eau telle que la température et la pluviométrie (*Jentgen, 2007*). Miaou (1990) a présenté un modèle de séries temporelles pour la prévision mensuelle de la demande en eau, dans sa composante saisonnière. Le modèle tient compte de la température et de la pluviométrie. Il traite la non-linéarité de la pluviométrie mensuelle par l'agrégation temporelle et la réponse moyenne journalière de la réponse du modèle, ce qui a permis d'obtenir des prévisions meilleures à celles des modèles linéaires.

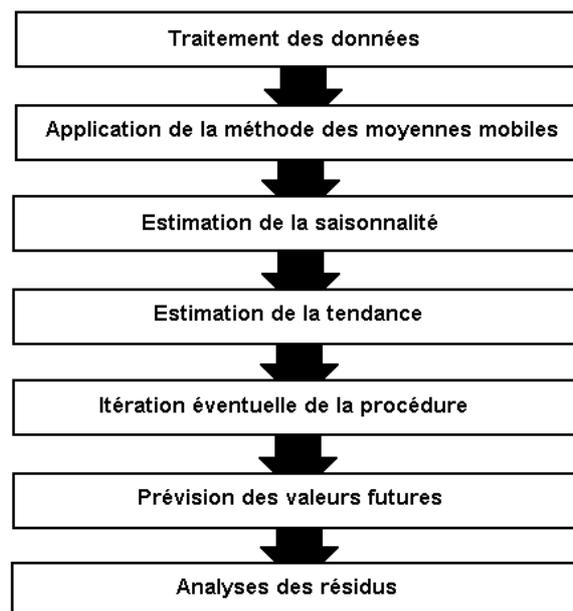


Figure 4-3 : étapes de prévision par la méthode des séries temporelles (*Lagnoux, 2013*).

4.4.3.5 Méthode de régression linéaire

La méthode de régression linéaire est l'une des méthodes les plus appliquées en statistique des données quantitatives. Elle s'adapte bien à la prévision à long terme de la demande en eau (*Haque et col.*, 2013). La méthode de régression linéaire par définition est un modèle de régression d'une variable expliquée sur une ou plusieurs variables explicatives tout en supposant que la fonction reliant la variable expliquée et les variables explicatives est linéaire. Si le modèle utilise une seule variable explicative il s'agit d'une régression simple en exprimant la variable expliquée en fonction de la variable explicative. Si le modèle utilise plusieurs variables explicatives, l'approche est dite régression multiple. L'application de la méthode exige une relation de cause entre la variable expliquée et les variables explicatives, c'est le cas de la prévision de la demande en eau potable, où la variable expliquée (Demande en eau) est fonction des variables explicatives qui sont les variables climatiques, économiques, sociales ... Etc (*Chouquet*, 2010).

La forme générale de la méthode est donnée par l'équation (4.4) :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1^1 + \dots + \beta_p x_1^p + e_i \quad (4.4)$$

avec, Y : demande en eau ; x : variables explicative de la demande ; β_i : paramètres du modèle ; e_i : erreur du modèle ; p : nombre des paramètres explicatifs.

Le modèle consiste à estimer les paramètres du modèle à l'aide de plusieurs méthodes telle que la méthode de maximum de vraisemblance, ou la méthode d'inférence bayésienne. Mais le plus souvent c'est la méthode des moindres carrées qui est utilisée.

La méthode des moindres carrés consiste à estimer les paramètres du modèle en minimisant la somme des carrés des résidus. Le critère de la méthode s'écrit par l'équation suivante (*Chouquet*, 2010):

$$\varphi(\hat{\beta}) = \min \sum_{i=1}^n (\hat{e}_i)^2 = \min \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.5)$$

$\hat{\beta}$: paramètres estimés du modèle ; \hat{e}_i : résidu du modèle ; y_i : demande réelle ; \hat{y}_i : demande prévue ; n : nombre d'observation.

Haque et ses collaborateurs (2013) ont développé un modèle de prévision de la demande en eau à long terme. Le modèle présenté est une combinaison entre la méthode de régression linéaire et l'analyse de composantes principales, dont l'objectif est d'améliorer la performance des modèles de régression linéaire en évitant le problème de multi-colinéarité lié au nombre important des variables explicatives de la demande en eau (prix de l'eau, économiques, sociales...etc). L'application du modèle a donné de meilleurs résultats que les modèles de régression classiques.

4.4.3.6 Approche des réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels sont les modèles connexionnistes les plus utilisés actuellement, où leur utilisation comme approche de prévision connaît une forte croissance

depuis la fin des années 80 (*Guhl*, 1999). Plusieurs études ont montré l'intérêt d'utiliser les réseaux de neurones artificiels pour prévoir la demande en eau, à cause leur fiabilité de prévision par rapport à d'autres modèles de prévision, ainsi qu'à l'énorme avantage qu'ils présentent en ce qui concerne les données nécessaires pour la mise en marche des modèles.

Les réseaux de neurones ne nécessitent pas une grande base de données. Ils s'adaptent bien au problème de données rencontré souvent chez les services d'exploitation des systèmes d'alimentation en eau potable, et en particulier au niveau des pays en voie de développement. Dans le chapitre suivant nous allons étudier en détail les modèles de prévision par les réseaux de neurones artificiels.

Conclusion

La variation spatio-temporelle de la demande en eau la rend plus complexe à étudier et à prévoir. Cette variabilité est engendrée par les nombreux facteurs déterminants du phénomène. Parmi, ces facteurs nous avons les conditions climatiques et météorologiques, et en particulier la température et les précipitations qui ont une influence directe sur la demande à court terme (*Jain et col*, 2001). Nous avons aussi les facteurs sociaux-économiques tels que le revenu moyen des ménages, le type de l'habitat,...etc., où plusieurs auteurs ont montré une corrélation positive entre ces paramètres socio-économique et la demande eau. Le prix de l'eau est un facteur déterminant à moyen et long terme, où une augmentation du prix d'eau peut engendrer logiquement une réduction significative de la consommation d'eau potable, cependant, certains auteurs ont montré que la consommation est faiblement sensible à l'augmentation du prix (*Nauges et Reynaud*, 2001).

La prévision de la demande en eau est actuellement indispensable pour une gestion efficace des services de l'eau, et en particulier pour l'optimisation des services d'exploitation et de production d'eau potable telles les stations de pompage et les stations de traitement.

La complexité des méthodes de prévision varie selon la précision souhaitée et la nature du projet étudié, elles varient de simples méthodes statistiques jusqu'aux méthodes récentes méthodes basée sur l'intelligence artificiel. Parmi les méthodes les plus utilisées dans la prévision de la demande en eau, nous avons l'analyse de série temporelle, la méthode de régression linéaire, et les réseaux de neurones artificiels.

Chapitre 5

5 Prédiction de la demande en eau par les réseaux de neurones artificiels

Introduction

La prédiction de la demande en eau nécessite une approche robuste et souple qui tient compte du caractère non-linéaire de la demande, et peut faire face à certains problèmes des données d'entrée, tel que le manque de données, ou la courte période de données disponibles.

La méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) a été largement utilisée ces dernières années à cause de ces nombreux avantages. En fait, la prédiction de la demande pourrait se faire par une des méthodes classiques, telle que la méthode des séries temporelles, dont les célèbres modèle ARIMA, AR, ARMA,...etc. Cependant, la majorité de ces méthodes exigent certaines conditions envers les données d'entrée, telle que la taille des séries temporelles qui doit être longue, et la continuité temporelle des données mesurées chose qui n'est pas toujours facile à réaliser (*Dochy et col.*, 1994). Ce qui représente un obstacle pour l'élaboration d'un modèle de prédiction. La méthode des RNA permet de surpasser ce problème de données par un processus de calcul qui n'exige pas une continuité de la base de données, et qui permet de générer de bons résultats pour des courtes séries temporelles. La méthode des RNA permet également de traiter efficacement la non-linéarité de la demande grâce à son processus de calcul parallèle basé sur la technique d'intelligence artificielle.

5.1 Etat d'art de la prédiction de la demande en eau par Les RNA

La prédiction par les réseaux de neurones est relativement récente. Les premiers travaux de prédiction par les RNA sont : prédiction de la consommation journalière de courant à EDF présenté par Mangeas en 1993, et la prédiction du trafic à l'université Leeds en 1993 faite par Dougherty en 1993 (*Dochy et col.*, 1994). Dans le domaine Hydraulique en général, c'est en 1996 que Maier et Dandy ont utilisé un réseau de neurones artificiel pour prévoir la salinité de l'eau dans la rivière de Murray au sud de l'Australie 14 jours d'avance afin de programmer le pompage d'une façon optimale ce qui pourrait réduire le taux de salinité d'environ 10%. En 1999, Guhl a présenté une étude d'optimisation dans laquelle il a développé deux modèles de RNA, le premier pour la prédiction de la demande à une heure, et le deuxième pour la prédiction de 24 heures. Les résultats obtenus ont été excellents pour la prédiction à une heure, et à 24 heures ont été acceptable. En 2000, Maier et dandy ont présenté une étude qui montre les étapes à suivre pour élaborer un réseau de neurones artificiels pour la prédiction des variables de la ressource en eau, tels que le choix des critères de performance, la division et le prétraitement des données, la détermination de l'architecture du réseau et l'optimisation des poids des connexions.

En 2001, Jain et ses collaborateurs ont utilisé la méthode de réseaux de neurones artificiels pour élaborer un modèle de la prédiction de la demande en eau à court terme (hebdomadaire) de l'institut indien de Technologie à Kanpur. Utilisant les précipitations hebdomadaires totales et les températures moyennes hebdomadaires totales comme variables d'entrée. Pour comparer les prévisions ils ont développé également d'autres modèles basés sur la méthode des séries temporelles et des régressions. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité des

RNA par rapport aux deux autres types de modèles de prévision, avec une erreur absolue moyenne des prévisions égale à 2,41%. En second volet, l'étude a montré que la demande en eau est influencée par l'apparition des précipitations qu'à la quantité des précipitations.

Liu et ses collaborateurs (2003) ont proposé un modèle de prévision de la demande en eau domestique dans un milieu urbain à moyen terme. Le modèle utilise un réseau de neurones artificiels à trois couches dont la fonction d'activation est la fonction sigmoïde. L'apprentissage du modèle est basé sur la méthode de rétro-propagation du gradient. Les variables d'entrée choisies du modèle sont le prix de l'eau, le revenu de l'habitant et la taille de ménage. Le modèle a été appliqué pour prévoir la demande en eau mensuelle de la ville de Weinan en Chine. Les résultats obtenus ont été excellents avec un coefficient de corrélation supérieur à 90% pour les phases d'apprentissage et de prévision.

En 2006, Chang & Chang ont présenté un modèle hybride neuro-floue pour prévoir le niveau d'eau dans le réservoir Shihmen à Taiwan afin d'optimiser la gestion des ressources en eau. Le modèle de prévision utilise un système adaptatif d'inférence floue basé sur le réseau (ANFIS). Deux modèles ANFIS ont été développés. Le premier avec décision humaine comme entrée et le second sans décision humaine. Les résultats de prévision ont démontré une fiabilité élevée des deux modèles avec supériorité du modèle qui a utilisé la décision humaine comme variable d'entrée.

Adamowski (2008) a comparé les résultats de prévision de la demande journalière maximale obtenus par plusieurs modèles : un réseau de neurones artificiel, un modèle de régression linéaire multiple et un modèle d'analyse des séries temporelles. Une base de données de 10 ans de la ville d'Ottawa au Canada a été utilisée. Elle a comporté la demande journalière maximale, la température journalière maximale et de la précipitation journalière. L'étude a montré que le modèle des réseaux de neurones artificiels a fourni les meilleures prévisions de la demande en eau par rapport aux deux autres modèles.

Dans la même année, Ghiassi et ses collaborateurs (2008) ont développé un modèle de réseaux de neurones artificiels dynamique DAN2 pour la prévision de la demande en eau urbaine à court, à moyen et à long terme. Dans cette étude, l'équipe a montré que le modèle développé fournit des prévisions excellentes sans l'utilisation des variables climatiques d'une façon explicite. Les résultats indiquent que les modèles mensuels, hebdomadaires et journaliers génèrent une précision de prévision supérieure à 99%, et les modèles horaires supérieure à 97%.

En 2012, Adamowski et ses collaborateurs ont présenté une étude de la prévision de la demande en eau journalière en mois d'été dans la ville Montréal au Canada. La méthode utilisée est basée sur le couplage de transformées en ondelettes discrètes et les réseaux de neurones artificiels. Les résultats obtenus par cette méthode ont été comparés à ceux obtenus par la régression linéaire multiple, la régression non linéaire multiple, autorégressif à moyennes mobiles intégrées (ARIMA), les réseaux de neurones artificiels. Les principales variables utilisées sont la précipitation journalière, la température maximale journalière et la demande en eau journalière d'une période de 2001 à 2009. Les résultats obtenus ont montré la fiabilité de cette méthode couplée dont les prévisions ont été meilleures que les autres modèles.

Koffi et ses collaborateurs (2012) ont élaboré un modèle de prédiction capable de traiter la non linéarité de la relation entre la consommation en eau potable et la taille de la population, la méthode présentée utilise un pas de prédiction mensuel basée sur les réseaux de neurones, de type perceptron multicouches (PMC) bouclés dirigés sur la consommation observée au temps mensuel. La fonction neurone logistique a été utilisée dans le réseau de neurones, et les modèles de neurones ont été entraînés avec la méthode d'apprentissage supervisé en s'appuyant sur l'algorithme de rétro-propagation. Les modèles développés sont uniquement des perceptrons multicouches bouclés dirigés de prédiction. Quatre modèles de ce type, d'architectures différents sont développés dans le travail présenté. Ils ont utilisé les données mensuelles de janvier 1995 à décembre 2008. Ces données sont la consommation en eau potable, la population de la ville étudiée, la pluviométrie, et la température. Koffi et ses collaborateurs ont utilisé la méthode d'analyse en composantes principales normée (ACPN) réalisée sur différentes données démographiques, hydro climatique et de la consommation d'eau potable pour établir les corrélations afin de réduire le nombre de variables.

Tiwari et Adamowski (2013) ont proposé un modèle hybride de réseaux de Neuro-Bootstrap-Ondelettes « Wavelet-bootstrap-neural network » WBNN pour la prédiction à court terme de la demande en eau des réseaux de distribution urbains. Le modèle présenté est un ensemble de plusieurs réseaux de neurones construits via la méthode de bootstrap. Les prévisions du modèle ont été comparées à celles issues de la méthode autorégressive à moyenne mobile intégrée (ARIMA), de la méthode autorégressive à moyenne mobile intégrée à variables d'entrée exogènes (ARIMAX), des réseaux de neurones traditionnels (NN), des réseaux de neurones basés sur analyse d'ondelettes « Wavelet analysis-based NNs » (WNN), des réseaux de neurones basés sur Bootstrap (NNB), et un modèle simple basé sur l'indice de persévérance. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité et la performance des méthodes hybrides WBNN et WNN dont les prévisions ont été plus précises que les autres modèles. Récemment (2016). Dans leur étude d'optimisation et de régulation des réservoirs et de la station de traitement alimentant le système d'adduction du Grand Tunis, Belhassen et ses collaborateurs ont établi un réseau de neurones artificiels à couches à fonction radiale pour la prédiction de la demande en eau journalière conçu sous Matlab. Les auteurs ont utilisé la température minimale et maximale comme facteurs déterminants de la demande en eau. Pour l'apprentissage du modèle une base de données couvrant une période de janvier 2008 à septembre 2014 a été utilisée. Les résultats ont montré la fiabilité du modèle avec 90% des prévisions de la période de validation présentant des erreurs inférieures à 10%.

5.2 Description d'un réseau de neurones artificiel

5.2.1 Historique des RNA

L'idée d'inspiration des réseaux de neurones artificiels a été présentée la première fois en 1890 lorsque James introduit le concept de mémoire associative qui deviendra une loi pour l'apprentissage des réseaux de neurones (Aouiche, 2016). Tandis que l'apparition réelle des réseaux de neurones artificiels remonte à 1943, quand MCCulloch et Pitts ont présenté un modèle simplifié d'un neurone biologique appelé neurone formel qui permet de réaliser des

fonctions logiques et arithmétiques. En 1949, Hebb a développé la notion d'apprentissage en présentant la propriété des neurones par le conditionnement chez l'animal (*Djeddou*, 2014 ; *Aouiche*, 2016). En 1958, Rosenblatt a présenté le modèle du perceptron à deux couches, une couche d'entrée et une couche dite de décision. Malheureusement, l'inconvénient majeur du perceptron est qu'il est seulement capable de résoudre les problèmes de classification qui sont linéairement séparable à la sortie. En se basant sur le principe du perceptron, Widrow et Hoff (1960) ont développé le modèle Adaline (Adaptative Linear Element), dont la structure rassemble au Perceptron mais la loi d'apprentissage est différente, qui deviendra par la suite le modèle de base des réseaux de neurones multicouches très utilisé aujourd'hui (*Burel*, 1991 ; *Ammar*, 2007 ; *Djeddou*, 2014 ; *Aouiche*, 2016).

5.2.2 Définition d'un réseau de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels constituent une nouvelle approche de modélisation des systèmes complexes, où ils ont montré une grande efficacité pour la résolution des problèmes que les méthodes statistiques classiques trouvent des difficultés pour les résoudre. Les RNA se sont les fruits des premiers travaux de l'intelligence artificielle inspirés du fonctionnement du cerveau humain. Le RNA est un modèle mathématique empirique de traitement réparti, composé de plusieurs éléments de traitement (neurones) non-linéaire interconnectés travaillant ensemble et en parallèle pour résoudre un problème spécifique (*Riad*, 2003 ; *Ammar*, 2007). Les neurones sont connectés entre eux par des poids synaptiques, ces poids sont ajustés selon des lois d'apprentissage jusqu'à ce que la sortie s'accorde avec celle calculée (*Aouiche*, 2016).

5.2.3 Neurone biologique

L'idée de base des réseaux de neurones artificiels a été inspirée du fonctionnement biologique des systèmes nerveux, qui sont constitués d'un nombre important de neurones connectés entre eux, où le cerveau humain par exemple compte environ 10^{11} neurones, et 10^{15} connexions. Le caractère marquant de ce tissu nerveux est la densité des connexions où chaque neurone est connecté en moyenne avec 10000 autres neurones. Cette densité de connexions est un indicateur de puissance du système nerveux. La communication entre les neurones biologiques est garantie par deux types de connexion : Les dendrites et l'axone (*Burel*, 1991).

Les dendrites : se sont des ramifications courtes de la cellule, elles permettent au neurone de recevoir les informations transmises par les autres neurones. Elles constituent donc les points d'entrée du neurone.

L'axone : c'est une longue fibre qui se termine par arborisation qui forme des connexions (synapses) avec les autres neurones, garantissant la propagation de l'information traitée par le neurone recevant vers les autres neurones (*figure 5-1*).

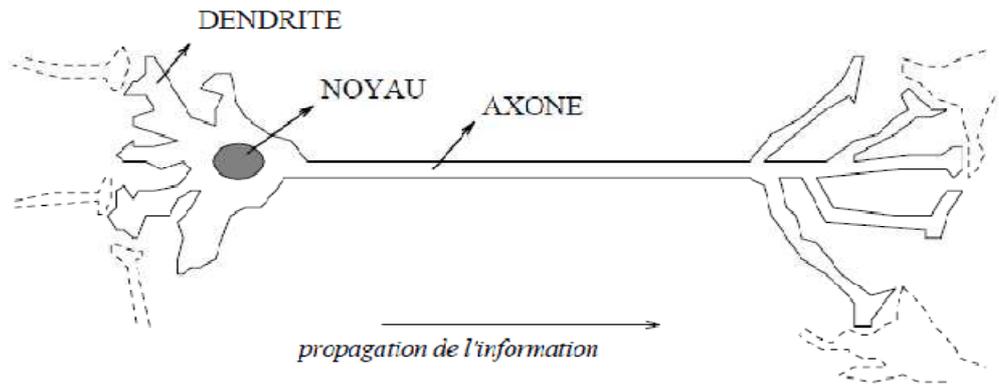


Figure 5-1 : neurone biologique (Burel, 1991)

5.2.4 Neurone formel

Par analogie avec le neurone biologique, le neurone formel est l'entité de base d'un réseau de neurones artificiels, il représente un processeur élémentaire. Le neurone formel est connecté à d'autres neurones, où il émet un signal en fonction des impulsions reçues. Le calcul se fait à l'aide d'une fonction de transfert ou d'activation f_i , qui s'applique souvent à la somme pondérée des impulsions reçues (x_1, \dots, x_n), et qui permet de calculer la sortie du neurone (figure 5-2). Chaque entrée x_i est pondérée par un poids synaptique w_{ij} , ce sont ces poids qui vont permettre au neurone d'apprendre et de modifier sa sortie au fur et à mesure de l'apprentissage.

$$f_i(X) = \sum w_{ij} \cdot x_i \quad (5.1)$$

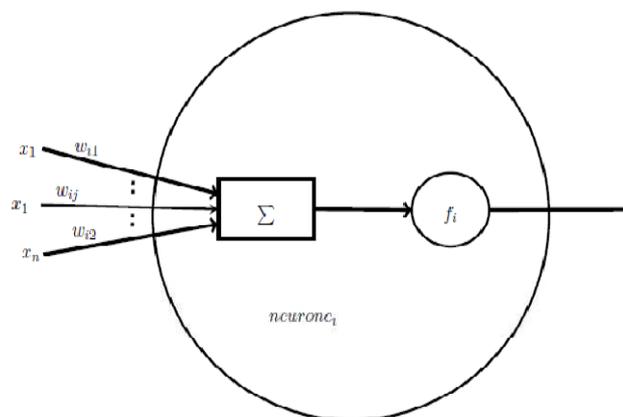


Figure 5-2 : architecture d'un neurone formel (Cherif, 2013)

5.2.5 Fonction d'activation

La sortie du neurone est déterminée par l'activation ou le transfert en fonction du neurone, leur objectif est d'introduire une non-linéarité dans le réseau. Sans cette non-linéarité le RNA ne serait pas différent d'un simple filtre linéaire (Djeddou, 2014). La fonction d'activation peut être une fonction à seuil, une fonction linéaire ou non linéaire. Le tableau (5.1) montre certaines fonctions d'activation et leurs représentations. Les fonctions de transfert les plus utilisées dans le domaine de l'ingénierie sont : la fonction seuil, la fonction sigmoïde et la

fonction linéaire (identité) (Aouiche, 2016). La fonction seuil est caractérisée par un seuil à son entrée, où toute entrée négative ne passe pas le seuil. La fonction permet de prendre des décisions binaires en attribuant des valeurs 0 ou 1 selon l'entrée (Aouiche, 2016).

La fonction linéaire ou identité affecte directement son entrée à sa sortie, ce qui fait que la sortie correspond à son niveau d'activation (Aouiche, 2016). La fonction sigmoïde est la fonction d'activation pour la couche cachée la plus populaire en raison de son dérivé facilement calculable. Elle est définie comme une approximation continument dérivable de la fonction d'activation linéaire par morceau ou de la fonction seuil. Elle présente également l'avantage d'être régulière, monotone, et bornée entre 0 et 1 (Ammar, 2007 ; Djeddou, 2014).

Tableau 5.1 : types de fonction d'activation (Aouiche, 2016)

Nom de la fonction	Relation d'entrée/sortie	Icône
Seuil	$a = 0$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
Seuil symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
Linéaire	$a = n$	
Linéaire saturée	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $0 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
Linéaire saturée symétrique	$a = -1$ si $n < -1$ $a = n$ si $-1 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
Linéaire positive	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $n \geq 0$	
Sigmoïde	$a = \frac{1}{1 + \exp^{-n}}$	
Tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
Compétitive	$a = 1$ si n maximum $a = 0$ autrement	

5.2.6 Connexions entre les neurones

L'ensemble des neurones sont connectés entre eux par des connexions appelées les poids synaptiques w_{ij} qui permettent de pondérer la liaison entre deux neurones et définir le sens de transfert de l'information (directe ou récurrente). La connexion la plus simple et la plus utilisée des connexions est la connexion unidirectionnelle pondérée. Il s'agit d'une liaison unidirectionnelle pondérée par un poids W_{ij} qui relie le neurone j au neurone i . Il existe d'autre type de connexions plus complexes telles que les connexions FIR et IIR (Cherif,

2013). Chaque réseau de neurone est caractérisé par une topologie spéciale qui définit la façon dont les neurones sont connectés.

5.3 Structure des réseaux de neurones artificiels

Selon la topologie des connexions des neurones, on peut distinguer deux types des réseaux de neurones artificiels : les réseaux de neurones non bouclés (Feed-forward) appelés également statiques, et les réseaux de neurones bouclés (Feed-back) ou dynamique (*Aouiche*, 2016).

5.3.1 Réseaux de neurones non bouclés

Un réseau de neurones non bouclé réalise une ou plusieurs fonctions algébriques de ses entrées par composition des fonctions réalisées par chacun de ses neurones (*Ammar*, 2007).

Il est caractérisé par un flux d'information qui circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière. Les neurones dont la sortie est celle du réseau sont appelés neurones de sortie, les autres, qui transmettent le signal à d'autres neurones sont appelés les neurones cachés. Il existe deux types de réseaux de neurones non bouclés : les réseaux de neurones complètement connectés et les réseaux de neurone à couches. Les réseaux de neurones non bouclés sont caractérisés par un temps de calcul pratiquement négligeable. Pour cette raison, ils sont appelés également les statiques par opposition aux neurones bouclés dits dynamiques.

5.3.1.1 Réseaux de neurones complètement connectés

Les réseaux de neurones complètement connectés se caractérisent par une numérotation de tous les neurones (neurones de sortie et de couches cachées), et la sortie de chaque neurone est connectée aux sorties des neurones de numéro supérieur. Tandis que les entrées de chaque neurone sont toutes les entrées du réseau ainsi que les sorties des neurones de numéro inférieur (*Ammar*, 2007). Ce type de RNA est utilisé dans le traitement des problèmes de classification, de reconnaissance des formes (caractères, parole,..) et de prédiction (*Ammar*, 2006).

5.3.1.2 Réseaux de neurones à couches

Ce type de réseaux de neurones est aussi appelé réseaux de neurone multicouche ou encore le perceptron multicouche. Ils sont caractérisés par une structure organisée en couches (couche d'entrée, couche cachée et couche de sortie). Les neurones de la même couche ne sont pas connectés entre eux, et également les neurones d'une couche ne sont pas connectés aux neurones d'une couche non adjacente (*Ammar*, 2007). Le transfert de l'information se produit par une propagation de la couche d'entrée vers la couche de sortie, où chaque neurone nourrit à sa sortie tous les neurones de la couche suivante (*figure 5-3*). Les fonctions d'entrée et de transfert sont les mêmes pour les neurones d'une même couche, mais peuvent être différentes selon la couche. Généralement, la fonction de transfert de la couche de sortie est la fonction identité.

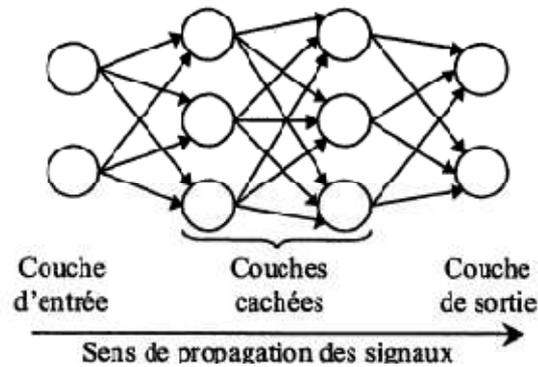


Figure 5-3 : structure d'un réseau de neurone à couches (olasagasti, 2002).

En pratique, le nombre de couche varie de 3 à 4 dont une couche d'entrée, une de sortie et une ou deux couches cachée (Cherif, 2013). Ce type est le plus utilisé, surtout en raison de sa pertinence dans le traitement des problèmes de classification (Ammar, 2007 ; Koffi et col., 2014 ; Aouiche, 2016). La majorité des modèles de prévision basés sur les réseaux de neurones est organisée en couches (Dochy et col., 1994).

5.3.2 Réseaux de neurones bouclés

La structure des réseaux de neurones bouclés est la structure la plus générale d'un RNA. Ce type de réseaux est caractérisé par des connexions dites cycliques, c'est-à-dire lorsqu'on se déplace dans le sens des connexions, on peut trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (Ammar, 2007).

5.4 Paramètres des réseaux de neurones à couches

Les paramètres de la structure d'un réseau de neurone ont une influence directe sur la fiabilité et la performance du réseau. D'une façon générale, il n'existe pas une méthode qui permet de déterminer les différents paramètres du réseau, où plusieurs auteurs se contredisent parfois pour le choix d'un tel paramètre. En réalité, seuls les essais permettent de choisir le paramètre adéquat du réseau pour une telle application (Olasagasti, 2002). Dans ce qui suit, nous allons présenter quelques généralités sur ces paramètres.

5.4.1 Choix de la fonction d'activation

Le choix de la fonction d'activation est laissé au concepteur du RNA, la seule condition est qu'elle soit dérivable. Cette fonction doit aussi vérifier les critères suivants (Burel, 1991):

- La non-linéarité de la fonction. En effet, dans le cas où la fonction est linéaire le réseau perd l'avantage d'une structure multicouche. Le réseau peut se ramener à un réseau équivalent sans couches cachées, où il suffit pour cela de faire le produit des matrices de transformation entre les différentes couches.
- La fonction est strictement croissante, pour éviter le problème du blocage d'apprentissage dans le cas où la dérivée de la fonction s'annule, et éviter aussi les problèmes d'instabilité d'apprentissage dans le cas d'un changement de signe de la dérivée.

- La fonction est saturante, c'est-à-dire elle doit être limitée par un seuil supérieur et inférieur, ceci correspond mieux aux observations de la biologie, et donne au réseau une forte robustesse par rapport au bruit.
- La fonction présente une zone quasi linéaire, ce qui est utile pour améliorer la précision de calcul.

5.4.2 Nombre de neurones d'entrée

Dans les travaux de Ding en 1995 (*Guhl*, 1999) la méthode utilisée pour déterminer le nombre de neurones en entrée est une méthode d'élimination. On commence d'abord avec un nombre maximum de paramètres, puis on élimine ceux qui ont un poids faible progressivement.

5.4.3 Nombre de couches cachées

Il n'existe pas une règle générale qui permet de déterminer le nombre optimal de couches cachées (*Aouiche*, 2016), où certains auteurs ont recommandé d'utiliser deux à trois couches cachées tels que Makhoul ou Cybenko qui ont prouvé que l'on pouvait approcher n'importe quelle fonction de classification et n'importe quelle fonction continue par un réseau de neurones de deux couches cachées. Mais ils notent que parfois il sera intéressant d'utiliser un réseau de neurones avec trois couches cachées et peu de neurones par couches qu'un réseau avec deux couches cachées et davantage de neurones dans ses couches (*Guhl*, 1999).

Cependant, d'autres auteurs ont démontré qu'un réseau de neurones avec une seule couche cachée peut approximer n'importe quelle fonction avec la précision souhaitée (*Ammar*, 2007 ; *Aouiche*, 2016). En effet, Il est mathématiquement démontré que le RNA possède une capacité d'approximation universelle, et lorsque les données sont normalisées, un RNA avec une seule couche cachée est capable d'approximer n'importe quelle fonction mathématique, c'est la raison pour laquelle les RNA à une seule couche cachée sont les plus utilisés dans la littérature (*Cherif*, 2013).

5.4.4 Nombre de neurones dans chaque couche cachée

Comme pour le nombre de couches cachées, il n'existe pas une méthode qui permet de déterminer le nombre de neurones dans les couches cachées. Ce choix est spécifique à chaque application. En fait, un nombre important des neurones permet de mieux coller avec les variables d'entrée mais diminue la capacité de généralisation du réseau, il faut chercher donc un nombre adéquat qui donne une meilleure performance du réseau. Pour cela, un nombre aléatoire est introduit au début. Ensuite, ce nombre est modifié en fonction de l'erreur de calcul permettant ainsi son identification (*Ammar*, 2007 ; *Aouiche*, 2016).

Dans le cas de la prédiction de la consommation d'eau potable, le nombre de neurones dans chaque couche cachée dépend de la fonction recherchée. La forme de la fonction n'est pas connue à l'avance. Pour cela, on procède à une démarche empirique, en testant plusieurs architectures afin de trouver l'équilibre adéquat entre une prédiction fiable et un faible nombre de paramètres (*Guhl*, 1999).

Le nombre de neurones dans les couches cachées se fait à l'aide d'une architecture initiale complexe suivie d'une simplification. La simplification comme pour la détermination de la fonction d'activation des neurones se fait de façon empirique en comparant les erreurs moyennes de prévision (*Guhl*, 1999).

5.4.5 Nombre de réseaux de neurones

Certains auteurs ont constaté que l'utilisation d'un seul RNA pour la prévision de la demande en eau de certaines régions peut influencer négativement les résultats. En effet, les régions caractérisées par une forte hétérogénéité et diversité des variables de prévision peuvent créer des problèmes d'ajustement des paramètres de RNA. Pour pallier à ce problème, l'utilisation d'un certain nombre de RNA spécialisés est recommandée. En effet, chaque RNA spécialisé est attaché à une division spatiale ou temporelle de la région réduisant ainsi nombre des variables de prévision, ce qui permet de se débarrasser des problèmes liés à l'hétérogénéité des variables.

Pour la division spatiale, la région est divisée en sous-région de telle sorte que chaque sous-région présente certains caractéristiques communes tels que le niveau de vie, les conditions climatiques, ...etc. Pour la division temporelle, elle peut être journalière, où un premier RNA est attaché aux jours de férie et aux weekends et un deuxième RNA est attaché aux autres jours de la semaine. Cette division temporelle peut être également mensuelle ou saisonnière.

5.5 Variables d'entrée

Le nombre des variables d'entrée doit être aussi petit que possibles. Il faut choisir des variables qui ont une influence réelle sur la sortie du réseau (*Ammar*, 2007). Dans le cas de la prévision de la demande en eau, *Guhl* (1999) a présenté une classification des variables de prévision de la demande en eau en deux catégories :

Variables endogènes : Ce sont des variables de la même nature que la sortie recherchée, dans le cas de la prévision de la consommation eau potable. La consommation au pas de temps précédent représente par exemple une variable endogène.

Variables exogènes : Il s'agit des paramètres influençant la consommation, tels que (la température, jour de la semaine, pluviométrie,...). Leur choix dépend de la réflexion du concepteur du modèle de prévision et du lieu où l'étude est réalisée.

Plusieurs auteurs ont utilisé des variables endogènes et exogènes comme variables d'entrée pour la prévision de la demande en eau par les RNA, tels que *Koffi* et ses collaborateurs (2012), qui ont utilisé comme variables d'entrée : la population, la pluie, la température et la consommation du mois précédent.

Dans notre thèse, pour simplifier les calculs et éviter tout problème relatif au manque de données, nous n'avons pas utilisé les variables climatiques. Ce choix est justifié par le faite que la demande est beaucoup plus liée à la variable climatique du jour de prévision, or pour avoir cela cette même variable doit être prévue, chose à éviter, car on ne doit pas utiliser des

données prévues dans un modèle de prévision. Le deuxième point qui peut justifier la non utilisation des données climatiques, c'est que ces données sont présentes d'une façon implicite dans la demande en eau des heures ou des jours précédents (*Guhl*, 1999).

5.6 Apprentissage des RNA

Les réseaux multicouches utilisent la règle de rétro-propagation du gradient. Les fonctions de transfert doivent être différentiables, c'est la raison pour laquelle on utilise des fonctions sigmoïdes, qui sont des approximations continûment dérivables de la fonction seuil.

En biologie, l'apprentissage est le mécanisme qui permet au système nerveux de s'adapter au monde extérieur (*Burel*, 1991). Pour les réseaux de neurones artificiels, l'apprentissage est une branche de l'intelligence artificielle qui peut être mise à contribution pour appréhender les problèmes de prédiction (*Cherif*, 2013). Elle représente une étape essentielle dans le processus de calcul, qui cherche à ajuster les connexions des neurones face à une source d'information à l'aide d'une procédure adaptative. L'apprentissage consiste à modifier les poids afin d'accorder la sortie du réseau aux données réelles. La base de données réelle est entrée dans le modèle sous forme d'un couple de vecteur d'entrée et de sortie, et le principe d'apprentissage est de changer les poids initiés aléatoirement au cours des itérations par une méthode d'optimisation afin de minimiser l'écart entre les données calculées et les données réelles. Pour éviter le problème de sur-apprentissage, on divise la base de données en deux, une partie pour l'apprentissage et l'autre pour la validation ou le test. L'ajustement des poids se fait au niveau de l'apprentissage, mais les poids qui seront retenus sont ceux qui présentent une faible erreur sur la base du test.

Cependant, si on utilise l'ensemble de la base de données pour l'apprentissage du réseau, on améliore la précision du calcul, mais on risque d'avoir de mauvais résultats en testant le modèle (*Ammar*, 2007).

L'objectif d'apprentissage est de déterminer la juste valeur des connexions, pour que la sortie calculée du réseau de neurones soit la plus proche possible de la sortie réelle. On distingue deux types essentiels d'apprentissage :

- apprentissage supervisé : on donne au réseau des entrées et des sorties et on modifie les poids en fonction de l'erreur entre la sortie désirée et obtenue par le réseau.
- apprentissage non supervisé : le réseau doit détecter les points communs aux exemples présentés, et modifier les poids pour fournir la même sortie pour des entrées aux caractéristiques proches.

5.6.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé nécessite un ensemble de couples de données d'entrée du réseau et de sorties réelles correspondantes. La différence entre la sortie du réseau et la sortie réelle donne une mesure quantitative sur le calcul effectué par le réseau (*Aouiche*, 2016).

La méthode d'apprentissage supervisé pousse le réseau à converger vers un état final précis, dont les poids sont mis à jour à l'aide de la mesure d'erreur. Le principe d'adaptation est basée sur la punition si l'erreur est élevée et sur la récompense en cas d'une réponse juste. Cette technique s'effectue progressivement jusqu'à ce que l'erreur soit minimisée (*Guhl, 1999 ; Ammar, 2007*).

5.6.1.1 Règle de HEBB

La règle de HEBB est la méthode d'apprentissage la plus ancienne (1949). Elle est inspirée de la biologie. Le principe est de renforcer les connexions des neurones lorsque ceux-ci sont actifs simultanément. La règle peut être classée comme apprentissage non supervisé, ou supervisé car on sait calculer directement les poids correspondant à l'apprentissage d'un certains nombres d'exemples.

5.6.1.2 Règle de delta (WIDROW-HOFF)

Cette méthode consiste à faire évoluer le réseau vers le minimum de sa fonction d'erreur (erreur commise sur l'ensemble des exemples).

L'apprentissage est réalisé par itération (les poids sont modifiés après chaque exemple présenté), et on obtient le poids à l'instant (t+1) par la formule :

$$W(t + 1) = W(t) + \eta(Y - Y_r).X \quad (5.2)$$

W : poids ; X : entrée ; Y : sortie théorique ; Y_r : sortie réelle ; η : coefficient d'apprentissage (entre 0 et 1) que l'on peut diminuer au cours de l'apprentissage.

Les premières mises à jours des poids ont été réalisées à l'aide de la règle de delta, dans laquelle les poids étaient incrémentés de ΔW_{ij}

$$\Delta W_{ij} = \alpha \delta_i S_j = \alpha (y_i - S_i) \cdot S_j \quad (5.3)$$

Cette règle était limitée aux réseaux de neurones à deux couches, pour les réseaux composés de trois couches et plus, on utilise la méthode de la rétro-propagation du gradient.

5.6.1.3 Rétro propagation du gradient (Backpropagation)

La méthode de rétro-propagation du gradient a été initiée d'abord par Parker (1985) et Le Cain (1986), en proposant une généralisation de la règle de delta. Alors qu'une présentation finale de la méthode a été donnée par Rumelhart et Williams en 1986. Ce modèle d'apprentissage est dédié aux réseaux de neurones multicouches et est connu pour sa fiabilité et son efficacité dans le calcul d'apprentissage (*Burel, 1991 ; Djeddou, 2014*).

La technique consiste à modifier les poids des connexions en se basant sur le calcul du gradient d'erreur pour chaque neurone de la couche de sortie vers la couche d'entrée. On cherche à minimiser la fonction d'erreur E (qui représente l'erreur entre la sortie désirée et la sortie obtenue), en suivant les lignes de plus grande pente technique accordées à chacune des

couches du réseau par la règle de chaîne (*Djeddou*, 2014). La dérivée partielle de la fonction d'erreur par rapport aux poids est calculée comme suit :

$$\nabla E(t) = \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial W(t-1)} \quad (5.4)$$

W : vecteur des poids et ε : fonction d'erreur.

L'adaptation des poids synaptiques est réalisée en prenant le gradient d'erreur par rapport au vecteur des poids de l'itération précédente, comme le montre la relation suivante :

$$W(t) = W(t-1) + \eta \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial W(t-1)} \quad (5.5)$$

avec, η : taux d'apprentissage.

L'apprentissage s'arrête lorsque l'erreur calculée sur l'ensemble de la base d'entraînement est inférieure au seuil défini par l'utilisateur, ou lorsque le nombre d'itérations atteint sa valeur maximale donnée également par l'utilisateur.

Le succès de la méthode de rétro-propagation dépend de trois facteurs : le taux d'apprentissage η , la différence entre la sortie réelle et calculée, et la fonction d'activation. Le taux d'apprentissage contrôle la vitesse du réseau à s'ajuster en réponse à des erreurs. Si ce taux est trop élevé, le risque d'instabilité du réseau est grand et le réseau ne converge pas vers un minimum local. Par contre, si le taux d'apprentissage est trop faible, le calcul est plus lent et le réseau pourrait être piégé dans un minimum local. Il est recommandé de choisir un taux d'apprentissage dans l'intervalle allant de 0 à 1 (*Djeddou*, 2014).

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle s'arrête dans le premier minimum local rencontré (*figure 5-4*), où il suffit que les gradients ou leurs dérivés soient nuls pour que le calcul converge vers un minimum local. La technique a été critiquée aussi à cause de la lenteur de convergence surtout lorsque la base de données est de grande taille (*Ammar*, 2007). On lui rapproche aussi une grande sensibilité aux conditions initiales, et notamment aux valeurs initiales des poids synaptiques (*Aouiche*, 2016). La méthode comporte plusieurs variantes :

Gradient stochastique : Qui fait appel à des termes aléatoires au niveau de la fonction du transfert ou dans la règle de mise à jour des poids.

Gradient local : les poids sont modifiés d'une façon individuelle pour chaque élément de l'ensemble d'apprentissage.

Gradient total : la mise à jour des poids se produit à l'issue de la présentation de tous les éléments de l'ensemble d'apprentissage.

Gradient conjugué : on modifie les poids en fonction du gradient courant et de celui calculé pour l'individu précédent.

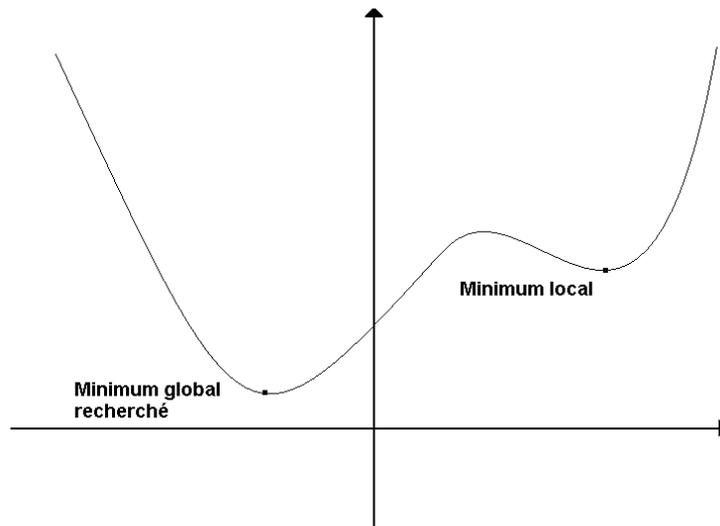


Figure 5-4 : courbe de la fonction d'erreur

5.6.2 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé ou l'auto-organisation est la technique où le réseau de neurones lui-même détermine sa propre évolution et ses propres règles de classification par l'extraction d'information à partir des données présentées au réseau. En effet, l'ajustement des poids se fait en fonction des données d'entrée uniquement sans fournir un vecteur de sortie. Leur principe consiste à détecter les similarités et les différences dans la base d'apprentissage, ce qui lui permet d'établir une représentation interne de l'espace des données d'entrée (*Cherif*, 2013). En principe, les poids et les sorties du réseau convergent vers les représentations qui capturent les régularités statiques des données. Ce type d'apprentissage est souvent employé pour le traitement de signale et l'analyse factorielle (*Ammar*, 2007).

5.6.3 Problème de sur-apprentissage et sous-apprentissage

Le problème de sur-apprentissage ou sous-apprentissage est la façon pour laquelle le RNA réalise les prédictions pour les cas qui ne sont pas dans le jeu de données d'apprentissage, car l'objectif d'apprentissage est d'entraîner le RNA à calculer des données de sortie où seules les données d'entrée sont connues (*Djeddou*, 2014).

Dans le cas où le RNA est entraîné uniquement sur une seule base de données, le réseau ne cherche plus l'allure générale de la relation entre les variables d'entrée et les sorties du système, mais cherche à reproduire la même base de données sur laquelle il s'est entraîné, il devient donc spécialisé de cet échantillon de données c'est ce qu'on appelle le problème de sur-apprentissage. La figure (5-5) montre un exemple de sur-apprentissage, où la droite en pointillé représente une fonction linéaire qu'on cherche à approximer en connaissant que les gros points noirs, et la courbe en trait plein représente ce que le réseau a pu produire. Il est clair que le réseau réalise de bons résultats pour tous les points d'entraînement, où l'erreur est presque nulle, alors que la généralisation du réseau sur les autres points n'a pas bien marché. Le modèle dans ce cas de figure est surentraîné (*Djeddou*, 2014).

Le phénomène de sur-apprentissage apparaît également lorsque le réseau contient trop de neurones cachées, ceci augmente le calcul durant l'apprentissage (trop de paramètre à ajuster), et la validation du réseau pourrait donner de mauvais résultats (*Ammar*, 2007).

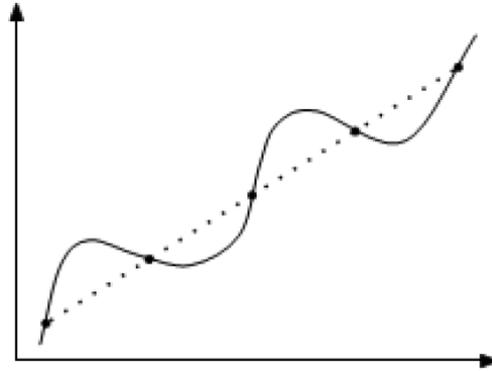


Figure 5-5 : présentation graphique du phénomène de sur-apprentissage (*Djeddou*, 2014).

Le phénomène de sous-apprentissage à l'encontre du phénomène du sur-apprentissage se produit quand le réseau n'arrive plus à maîtriser la variabilité des données, et les sorties calculées durant l'apprentissage ne correspondent pas aux valeurs réelles. Dans ce cas, le réseau n'aura aucun effet prédictif et on dit que le réseau est sous-entraîné.

Il faut chercher donc l'intervalle adéquat qui permet d'éviter ces deux cas extrêmes de sur-apprentissage et sous-apprentissage. Pour cela, on peut utiliser un critère d'arrêt, et d'utiliser deux ensembles de données indépendantes, une pour l'apprentissage et l'autre pour la validation (*Djeddou*, 2014).

5.7 Evaluation de la qualité de prévision

La performance d'un modèle s'évalue par sa capacité de prédiction ou de généralisation. Pour évaluer la qualité de prévision, Theil (1958) est le premier à présenter des indicateurs statistiques permettant une évaluation scientifique de la qualité des prévisions pour une période donnée. Il s'agit de l'erreur absolue moyenne (MAE) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). (*Mathis & Brociner*, 1994 ; *Bouthevilain & Mathis*, 1995). Par la suite, d'autres critères d'erreur ont été utilisés tels que le coefficient de corrélation R, et la Moyenne des erreurs absolues en pourcentage MAPE.

5.7.1 Erreur absolue moyenne MAE

Ce critère représente l'écart entre les valeurs prévues et les valeurs réelles de la variable étudiée sur une période donnée. La valeur absolue indique que l'on pénalise les erreurs positives de la même manière que les erreurs négatives (*Mathis & Brociner*, 1994).

$$MAE = \frac{1}{T} \sum |e(t)| \quad (5.6)$$

avec,

$$e(t) = y(t) - y_r(t) \quad (5.7)$$

$e(t)$: erreur de prédiction ; y_r : valeur réel à l'instant t ; $t = 1, \dots, T$. y : la valeur prévue à l'instant t .

5.7.2 Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (root mean square error) est utilisée comme la mesure de la performance globale du modèle. L'indice permet une évaluation combinée de la variance et du biais.

Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de 0. Ce qui donne une parfaite optimisation. Cet indicateur mesure la variation des valeurs prévues autour des valeurs mesurées. Plus sa valeur est petite plus la qualité de prédiction est meilleure (*Trahi*, 2011). Il est donné par la formule suivante :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} \quad (5.8)$$

avec,

$$\text{MSE} = \frac{1}{T} \sum e(t)^2 \quad (5.9)$$

5.7.3 Coefficient de corrélation R

Le coefficient de corrélation mesure la liaison linéaire entre deux variables quantitatives, en exprimant l'intensité et le sens de la relation linéaire entre les deux variables, ce qui permet d'évaluer la capacité de prédire l'évolution d'une variable par une autre variable par un modèle linéaire. On distingue deux types de corrélation :

La corrélation positive : signifiant qu'une augmentation d'une variable correspond à l'augmentation de la seconde variable ;

La corrélation négative : une augmentation d'une variable correspond à la diminution de la seconde variable et vis versa.

Dans notre cas, le coefficient de corrélation est utilisé pour mesurer la corrélation linéaire entre la demande réelle et la demande prévue. Il est donné par la relation suivante (*Koffi et col.*, 2012) :

$$R = \frac{\sum (y_r(t) - \overline{y_r(t)}) (y(t) - \overline{y(t)})}{\sqrt{\sum (y_r(t) - \overline{y_r(t)})^2 \sum (y(t) - \overline{y(t)})^2}} \quad (5.10)$$

Le coefficient donne combien les valeurs prédites se rapprochent des valeurs réelles. Une valeur du coefficient de corrélation proche de l'unité signifie une meilleure prédiction. Selon Koffi et ses collaborateurs (2012), par convention, la relation est parfaite si $R=1$; très forte si $R>0,8$; forte si $0,5<R<0,8$; moyenne $0,2<R<0,5$; faible si $0<R<0,2$; nulle si $R=0$. D'une façon générale si R est inférieur à 0,7 la relation est sujette à problème.

Le coefficient de corrélation est donné par d'autres formules, en fonction de la covariance et l'écart type comme le montre la relation 5.11 :

$$R = \frac{\text{cov}(y, y_r)}{\sigma(y) \cdot \sigma(y_r)} \quad (5.11)$$

avec,

$$\text{cov}(y_r, y) = \frac{1}{T} \sum (y_r(t) - \overline{y_r(t)})(y(t) - \overline{y(t)}) \quad (5.12)$$

5.7.4 Moyenne des erreurs absolues en pourcentage MAPE

La MAPE (mean absolute percentage error) représente une estimation de la justesse de la prévision. Selon certains auteurs une valeur du MAPE inférieur à 10% montre que la prévision est acceptable (*Trahi*, 2011). Son expression est donnée par la formule suivante :

$$\text{MAPE} = \frac{1}{T} \sum \left| \frac{y_r(t) - y(t)}{y_r(t)} \right| 100 \quad (5.13)$$

Conclusion

Le principe de l'approche des RNA a été inspiré du fonctionnement du cerveau humain dont l'élément de base est le neurone. Selon la structure des neurones et leurs connexions, on distingue plusieurs types de réseaux de neurones. Les réseaux de neurones à couches sont les plus utilisés (*Ammar*, 2007 ; *Koffi et col.*, 2014 ; *Aouiche*, 2016). Ils sont organisés en couches dont les paramètres sont déterminés généralement lors des essais, tel que le nombre de couche et le nombre de neurones dans chaque couche.

Les RNA permettent de traiter la non linéarité de la demande en eau grâce à un calcul parallèle de l'ensemble des neurones, dont la fonction de transfert des neurones dans les couches cachée est souvent fonction sigmoïde, et la fonction linéaire pour le neurone de sortie.

La méthode des RNA permet de surpasser le problème de taille et de qualité de la base des données. Elle ne nécessite pas forcément des longues séries temporelles et continues.

Egalement, pour les facteurs déterminants de la demande en eau, où l'approche fournit de bons résultats avec peu de données d'entrée sans la prise en compte explicitement de certaines variables exogènes telles que la température ou les précipitations (*Guhl*, 1999 ; *Ghiassi*, 2008. *Pulido-Calvo et col.*, 2011).

La validation des réseaux de neurones se fait en deux phases : une phase d'apprentissage et une phase d'essai. Dans la phase d'apprentissage, on ajuste les poids synaptique du réseau via une méthode d'apprentissage sur une partie de la base de données. La méthode de rétro-propagation du gradient est la plus utilisée pour ajuster les poids synaptiques du réseau (*Aouiche*, 2016). Dans la phase d'essai, on évalue la performance du réseau sur l'autre partie

de la base de données. L'utilisation de ces deux phases est nécessaire pour éviter les problèmes de sur-apprentissage, dans laquelle le réseau devient spécialisé uniquement de sa base de données d'entraînements.

Plusieurs études ont montré l'efficacité de la méthode en la comparant à d'autres méthodes de prédiction telle que l'analyse de série temporelle ou la régression linéaire. La méthode devient plus performante si on la couple avec d'autres méthodes telle que la méthode de Bootstrap (*Chang & Chang*, 2005 ; *Adamowski*, 2008 ; *Tiwari & Adamowski*, 2013).

Dans notre étude, la technique des RNA a été utilisée pour prévoir la demande en eau nécessaire pour le calcul des contraintes d'optimisation dans le modèle d'optimisation. Ce qui permet d'établir un planning de fonctionnement optimal. L'évaluation énergétique du planning de gestion optimal des pompes, nécessite un outil d'aide à la décision afin de prendre les mesures nécessaires. Pour cette raison, nous avons développé une liste d'indicateurs de performance que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

Chapitre 6

6 Indicateurs de performance énergétique d'un système de pompage

Introduction

L'évaluation énergétique est considérée comme étant une étape primordiale dans toute gestion efficace d'une station de pompage. En effet, une évaluation objective permettrait de détecter la source du dysfonctionnement dans le cas échéant, comme elle constituerait un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires des services d'eau.

D'une façon générale, pour l'évaluation énergétique des stations de pompage il n'existe pas pratiquement un outil faisant cette tâche convenablement, où il existe quelques indicateurs qui ne permettraient pas une évaluation énergétique efficace. Pour cette raison, nous avons élaboré une liste d'indicateurs de performance énergétique afin d'évaluer la consommation énergétique des systèmes de pompage et détecter la source d'anomalie dans le cas d'une éventuelle surconsommation énergétique.

Cette tâche est assez délicate car elle nécessite une connaissance parfaite des différentes formules utilisées dans le dimensionnement des réseaux d'adduction et de distribution et une connaissance approfondie du fonctionnement hydraulique des pompes.

Les problèmes de surconsommation énergétique des stations de pompage peuvent être dus à un mauvais dimensionnement des ouvrages et équipements dans la phase étude, ou à une mauvaise gestion des pompes dans la phase exploitation. Pour cela, nous avons développé trois types d'indicateurs permettant l'évaluation énergétique du système de pompage :

- Indicateurs de performance énergétique globale ;
- Indicateurs de performance énergétique de conception ;
- Indicateurs de performance énergétique de fonctionnement ;

Les indicateurs développés peuvent délimiter la source du dysfonctionnement à l'aide d'une représentation arborescente des indicateurs. Ceci aidera les gestionnaires à choisir quelle méthode à utiliser pour régler le problème de la surconsommation.

6.1 Définition d'un indicateur de performance

Avant de développer ces différents indicateurs, nous définissons d'abord c'est quoi un indicateur de performance. En fait, les indicateurs performance représentent un outil qui permet d'évaluer l'état et la performance d'un système quelconque sur un sujet précis : énergie, service, économie...etc. En outre, les indicateurs de performance permettent de faire la comparaison entre deux systèmes différents.

« Les indicateurs de performance sont des outils de plus en plus utilisés pour évaluer la qualité d'un produit ou d'un service. Ils sont présents dans des domaines aussi variés que la santé publique, l'éducation, l'industrie ou les services et font partie dorénavant du langage courant » (*Chesneau*, 2006).

C'est à partir des années 2000 que les indicateurs de performance ont été mis en pratique, malgré que l'idée des indices de performance est apparue dans les années 30. Les indicateurs de performance permettent de calculer l'écart entre la valeur cible de référence, appelée aussi objectif de performance et la valeur mesurée (*Chesneau*, 2006). Un indicateur de performance n'est pas calculé uniquement par des valeurs mesurées, mais il peut inclure des valeurs issues d'un calcul.

6.1.1 Critères d'élaboration des indicateurs de performance

L'élaboration d'un indicateur de performance est une tâche délicate, car elle doit respecter au moins une partie d'un certain nombre de critères. Ci-dessous, on cite quelques points à vérifier pour la mise en œuvre des indicateurs de performance (*Chesneau*, 2006) :

- représenter tous les aspects importants du système pour avoir une idée globale de celui-ci à l'aide d'un certain nombre des indicateurs de performance ;
- Etre capable de donner une interprétation non biaisée des différents aspects caractéristiques du système ;
- Etre bien définis, pour que leur sens ne prend pas plusieurs interprétations ;
- Eviter d'être redondants entre eux ;
- Ne nécessite que des outils de mesure accessibles et disponibles.
- Etre vérifiable ;
- Etre facile à comprendre, même par les simples usagers ;
- se rapporter à une période de données, généralement annuelle ;
- appliquer à une zone géographique précise
- être applicable à des services, dont le degré de développement est différent.

6.1.2 Limites des indicateurs de performance

Une utilisation très généralisée ne doit pas cacher certaines précautions, parmi les limites d'application des indicateurs de performance, on peut citer ce qui suit (*Chesneau*, 2006) :

- le caractère agrégé de l'information conduit à leur affaiblissement ;
- Dans certains cas, il est difficile voire impossible de trouver la valeur de référence afin de fixer l'objectif ;
- Indicateur de performance ne donne pas toujours la solution à prendre pour résoudre le problème ;
- L'évaluation donnée par les indicateurs de performance concerne le passé du paramètre à évoluer, ce qui ne reflète pas la situation en temps réel.

6.2 Indicateurs de performance existants

6.2.1 Indicateur d'énergie volumique

L'indicateur d'énergie volumique est l'indicateur le plus utilisé pour évaluer la performance énergétique des systèmes de pompage, connu aussi sous plusieurs appellations : la consommation énergétique spécifique, indicateur de performance énergétique ...etc. Il

représente la relation entre l'énergie consommée par le système de pompage et le volume total d'eau produit.

Le calcul de l'indicateur peut se faire quotidiennement ou annuellement (*BID*, 2011). L'indicateur est donné par la relation suivante :

$$IEV = \frac{E}{V} \quad (6.1)$$

IEV: indicateur d'énergie volumique [kWh/m³] ; E : énergie totale consommée par les pompes [kWh] et V : volume total d'eau fournie [m³].

Il n'existe pas de valeur de référence de l'indicateur, car cette valeur dépend du type de la ressource en eau disponible, et de la topographie de la région. Les systèmes de pompage situés dans des zones topographiques accidentées ont des valeurs élevées de l'indicateur de l'énergie volumique. La présence des fuites d'eau dans l'installation contribue aussi à l'augmentation de cet indicateur (*BID*, 2011).

Le suivi de l'évolution de l'indicateur permet d'évaluer quotidiennement ou mensuellement toute dérive par rapport à la valeur initiale traduit soit une augmentation de la hauteur à cause d'un éventuel abaissement du niveau d'eau dans la chambre d'aspiration, soit une modification du rendement de la pompe (*Luc et col.*, 2004).

6.2.2 Indicateur d'énergie manométrique

L'indicateur d'énergie manométrique est calculé en divisant l'énergie consommée d'un système de pompage pour une période donnée par la hauteur manométrique. Il représente donc l'énergie nécessaire pour élever le volume pompé de 1 m, l'indicateur est donné par la relation suivante :

$$IEM = \frac{E}{H} \quad (6.2)$$

IEM: indicateur d'énergie manométrique [kWh/m].

Cet indicateur permet de comparer deux systèmes de pompage qui pompent le même volume d'eau sur une période donnée, offrant ainsi un outil de diagnostic pour évaluer des choix technologiques, par exemple : choix entre un montage d'une ou plusieurs pompes, incidence de la forme de la courbe de rendement des pompes (*Luc et col.*, 2004).

6.3 Détermination des valeurs de référence

Afin de situer la performance énergétique de chaque paramètre de système de pompage par rapport à des paliers de performance, nous avons défini pour chaque paramètre une ou plusieurs valeurs de référence (*Rey*, 2012). Ces dernières peuvent être données par le constructeur, ou calculées en fonction de la performance du paramètre à évaluer.

6.3.1 Valeurs de référence des paramètres de fonctionnement

6.3.1.1 Volume de pompage optimal

Dans un système de pompage, le volume de pompage optimal est le volume nécessaire pour satisfaire la demande en eau, tenant compte du volume initial dans le réservoir, tout en respectant le volume minimal dans le réservoir. Le volume optimal est donné par la relation suivante :

$$V_{\text{opt}} = V_d - V_i + V_{\text{min}} \quad (6.3)$$

V_d : volume d'eau demandé ; V_i : volume d'eau initial dans le réservoir ; V_{min} et volume d'eau minimal dans le réservoir.

Le volume horaire optimal est calculé par la formule suivante :

$$V_{\text{h.opt}} = \frac{V_{\text{opt}}}{T_f} \quad (6.4)$$

T_f : temps de pompage.

6.3.1.2 Rendement de pompage optimal

Le rendement de pompage doit correspondre au rendement maximal des pompes. Sachant que ce dernier varie d'une pompe à l'autre selon les performances énergétiques internes de la pompe.

$$\eta_{\text{opt}} = \eta_{\text{max}} \quad (6.5)$$

η_{opt} : rendement de pompage optimal et η_{max} : rendement maximal des pompes

6.3.1.3 Hauteur manométrique optimale

Pour évaluer la hauteur manométrique totale, nous définissons deux valeurs de référence, à savoir : la hauteur manométrique optimale H_{opt} , et la hauteur manométrique optimale de fonctionnement $H_{\text{f.opt}}$.

La hauteur manométrique optimale est la pression requise par le système de pompage dans le cas où la conception du système est optimale (résistance hydraulique et hauteur géométrique ont des valeurs optimales) et le fonctionnement des pompes est optimal (débit de pompage optimal) également. Cette hauteur est donnée par l'expression suivante :

$$H_{\text{opt}} = H_{\text{g.opt}} + r_{\text{h.opt}} Q_{\text{opt}}^2 \quad (6.6)$$

H_{opt} : hauteur manométrique optimale [m], $H_{\text{g.opt}}$: hauteur géométrique optimale [m], $r_{\text{h.opt}}$: résistance hydraulique optimale [h^2/m^5] et Q_{opt} : débit de pompage optimal [m^3/h].

Néanmoins pour des raisons pragmatiques, nous avons proposé aussi la hauteur manométrique optimale de fonctionnement qui correspond à la hauteur manométrique requise dans le cas d'un fonctionnement optimal des pompes (débit de pompage optimal). En effet, pour calculer cette hauteur de référence, on ne tient pas compte des caractéristiques de conception optimales telles que la hauteur géométrique, et la résistance hydraulique (diamètre, longueur des conduites, ...), mais on s'intéresse uniquement au fonctionnement optimal à travers le débit, la pression et le rendement des pompes, autrement dit c'est la hauteur manométrique qui correspond au débit de fonctionnement optimal, son expression est donnée par l'équation suivante :

$$H_{f,opt} = H_g + \Delta H_{f,opt} \quad (6.7)$$

avec, $\Delta H_{f,opt}$ représente les pertes de charge de fonctionnement optimal. Sa formule est donnée par la relation suivante :

$$\Delta H_{f,opt} = r_h \cdot Q_{opt}^2 \quad (6.8)$$

r_h : résistance hydraulique du système de pompage.

6.3.1.4 Débit de fonctionnement optimal

Le débit de fonctionnement optimal est le rapport entre le volume optimal et le temps d'optimisation. Dans notre cas, l'expression du débit optimal est donnée par l'équation suivante :

$$Q_{opt} = \frac{V_{opt}}{T_{opt}} \quad (6.9)$$

T_{opt} : temps d'optimisation, dans notre cas le temps d'optimisation est 24 heures.

6.3.2 Valeurs de référence des paramètres de conception

6.3.2.1 Résistance hydraulique optimale

La résistance hydraulique optimale est donnée par l'équation (6.10), elle a une valeur optimale lorsque les trois variables de l'équation ont des valeurs optimales.

$$r_{h,opt} = \frac{\lambda_{opt} L_{opt}}{16,2 \cdot 10^5 \cdot \pi^2 g D_{opt}^5} \quad (6.10)$$

λ_{opt} : coefficient optimal de pertes de charge linéaire, L_{opt} : longueur optimale de la conduite et D_{opt} : diamètre optimal de conduites.

i. Longueur optimale de la conduite

Par définition la longueur optimale est la distance directe DS entre le point d'aspiration et le point de puisage au niveau de château d'eau (**figure 6-1**).

$$L_{opt} = DS \quad (6.11)$$

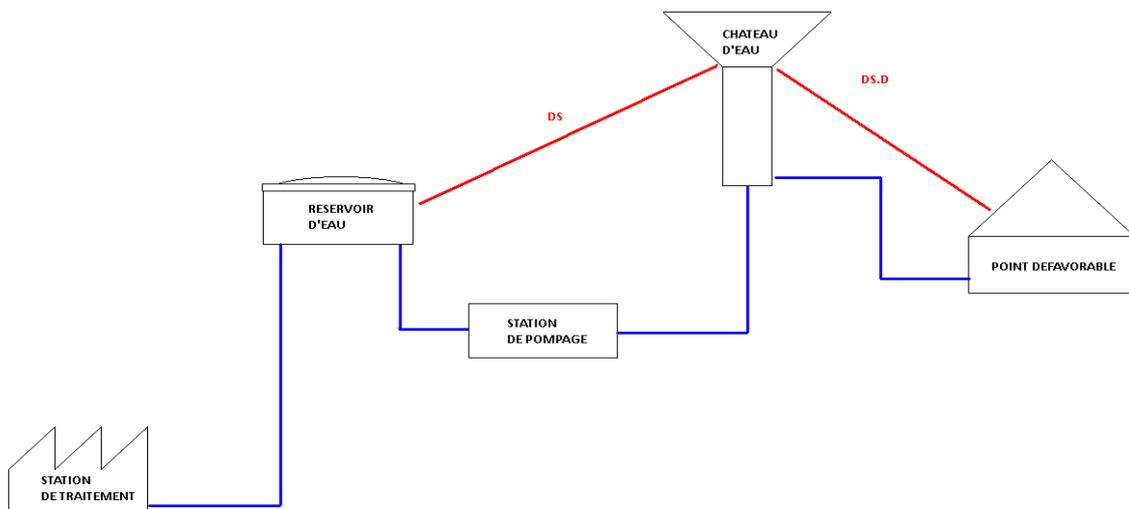


Figure 6-1 : distances caractéristiques d'un système d'alimentation en eau potable.

ii. Diamètre optimal de la conduite

La valeur optimale du diamètre des conduites du système de pompage est calculée soit par une formule usuelle (tableau 6.1), ou à l'aide de l'équation (6.12) en imposant une valeur minimale pour la vitesse d'écoulement dans la conduite du système de pompage. Cette valeur est comprise en générale entre 0,25 et 0,5 m/s, ce qui nous permet de déduire le diamètre du système de pompage optimal :

$$D_{opt} = \frac{1}{30} \sqrt{\frac{Q_{hm}}{\pi v_{min}}} \quad (6.12)$$

Où, v_{min} : vitesse d'adduction admissible minimale [m/s], et Q_{hm} : représente le débit horaire moyen [m^3/h], il est calculé à partir de la consommation journalière maximale :

$$Q_{hm} = Q_{jmax}/24 \quad (6.13)$$

avec, Q_{jmax} : consommation journalière maximale.

Tableau 6.1 : différentes formules de calcul du diamètre optimal (Bedjaoui et col., 2005).

Formule	Expression
Bresse	$D_{opt} = 1,5Q^{0,5}$
Bonnin	$D_{opt} = Q^{0,5}$
Vuibert	$D_{opt} = 1,35(e/f)^{0,154}Q^{0,46}$
Munier	$D_{opt} = (1 + 0,02)Q^{0,5}$

Note : Les formules présentées dans le tableau (6.1) utilisent le m^3/s comme unité du débit

iii. Coefficient de frottement optimal λ_{opt}

Le calcul du coefficient du frottement dépend du régime d'écoulement à travers le nombre de Reynolds. Le nombre de Reynolds est donné par la formule (6.14).

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (6.14)$$

où, ν : viscosité cinématique de l'eau est égale à 10^{-6} [m²/s] à 20 [°C] ; D : diamètre de conduite [m] et v : vitesse d'écoulement [m/s].

Dans le cas des conditions optimales qui correspondent aux pertes de charge minimales, le diamètre de la conduite sera égal au diamètre optimal, et la vitesse d'écoulement sera égale à la vitesse admissible minimale. En remplaçant ces différentes valeurs optimales dans l'expression du coefficient de frottement, on a la formule du coefficient de frottement pour un régime laminaire :

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{64\nu}{v_{\text{min}} \cdot D_{\text{opt}}} \quad (6.15)$$

Cependant, dans le cas d'un écoulement turbulent qui caractérise l'écoulement dans les réseaux d'eau potable (*Jaumouillé*, 2009), le coefficient de frottement est donné par l'équation de Colebrook-White (*Achour & Bedjaoui*, 2006) :

$$\lambda = 2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) \quad (6.16)$$

avec, ε : rugosité absolue de la conduite [m].

Pour calculer le coefficient de frottement optimal, on attribue à la vitesse une valeur minimale. Pour le diamètre, on utilise le diamètre optimal, alors que pour la rugosité, on utilise la rugosité des matériaux plastiques synthétiques, qui présentent la rugosité absolue la plus faible sur le marché actuellement ($\varepsilon = 4 \cdot 10^{-5}$ m) (*Brière*, 2012). Ensuite, on utilise une méthode itérative pour résoudre l'équation (6.16) et déterminer λ_{opt} .

$$\lambda_{\text{opt}} = 2 \log_{10} \left(\frac{4 \cdot 10^{-5}}{3,7 D_{\text{opt}}} + \frac{2,51}{\frac{v_{\text{min}} \cdot D_{\text{opt}}}{\nu} \sqrt{\lambda_{\text{opt}}}} \right) \quad (6.17)$$

6.3.2.2 Hauteur géométrique optimale $H_{g,\text{opt}}$

Pour que la hauteur géométrique du système de pompage soit optimale, il faut que le château d'eau soit bien dimensionné en choisissant le meilleur emplacement et en utilisant les meilleures dimensions des conduites en termes de longueur et de diamètre afin de réduire les pertes de charge entre le château d'eau et le point défavorable du réseau de distribution, ce qui permet d'avoir une hauteur géométrique optimale du réservoir (*figure 6-2*). Le calcul de cette hauteur se fait selon la formule suivante :

$$H_{g,\text{opt}} = H_{\text{pd}} + \Delta H_{\text{d,opt}} + H_{\text{ce}} - C_{\text{ra}} \quad (6.18)$$

C_{ra} : côte du réservoir d'aspiration ;

H_{pd} : hauteur du point défavorable du réseau de distribution, elle est donnée par l'expression suivante :

$$H_{\text{pd}} = C_{\text{pd}} + H_{\text{pd,min}} \quad (6.19)$$

C_{pd} : côte du point défavorable ; $H_{\text{pd,min}}$: hauteur minimale au point défavorable ;

H_{ce} : hauteur du château d'eau, elle est donnée par la formule suivante :

$$H_{ce} = C_{tp} - C_r \quad (6.20)$$

où, C_{tp} : côte du trop-plein du château d'eau, C_r : côte du radier du château d'eau.

$\Delta H_{d,opt}$: pertes de charge optimale entre le château d'eau et le point défavorable.

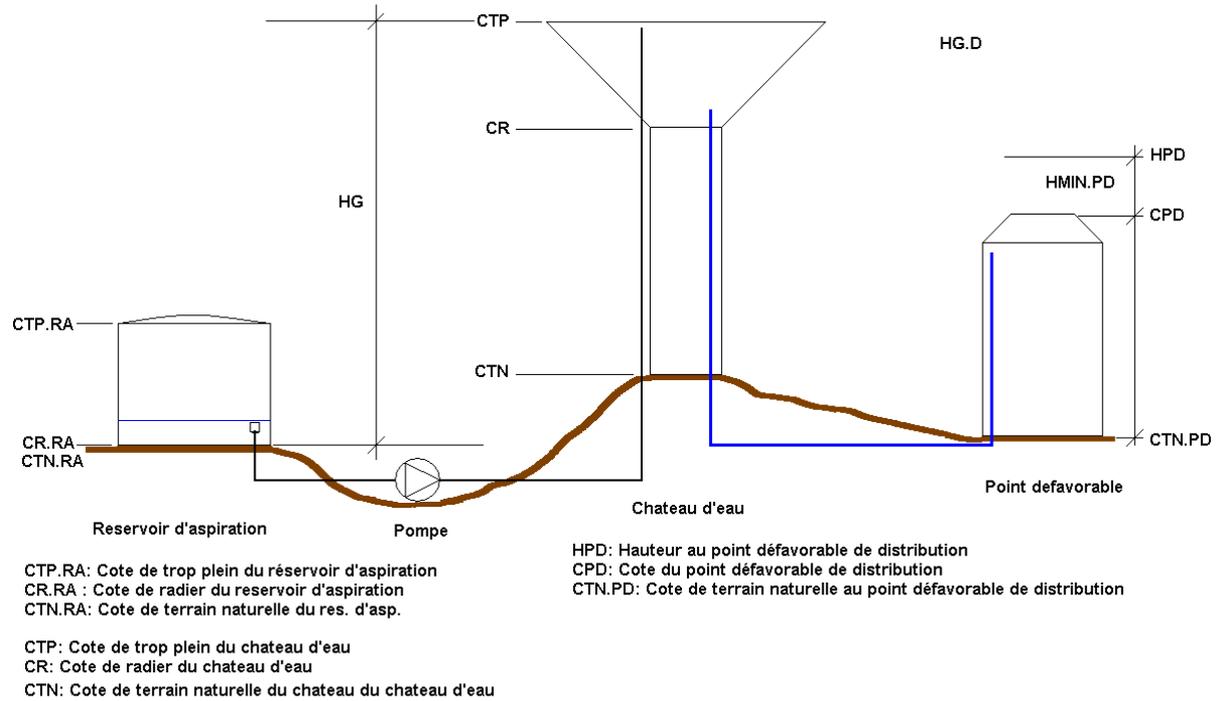


Figure 6-2 : hauteurs caractéristiques du système de pompage

Comme le montre la relation de Darcy-Weisbach (équation 6.21) pour que les pertes de charge entre le château d'eau et le point le point défavorable soient minimales, il faut que la conduite de distribution reliant les deux point soit bien dimensionnée, c'est-à-dire la longueur, le diamètre et la rugosité de conduite doivent avoir des valeurs optimales.

$$\Delta H = \frac{\lambda L Q_p^2}{16,2 \cdot 10^5 \cdot \pi^2 g D^5} \quad (6.21)$$

La longueur de distribution optimale correspond à une longueur de distribution la plus petite possible. Pour avoir une valeur de référence pour le calcul des indicateurs de performance nous avons considéré que cette longueur est égale à la distance directe entre le château d'eau et point défavorable (figure 6-1).

$$L_{d,opt} = D S_d \quad (6.22)$$

Le diamètre de distribution optimal est calculé de la même manière que le diamètre d'adduction, la seule différence réside dans le débit d'écoulement, où dans le cas de distribution on utilise le débit horaire maximal.

$$D_{d,opt} = \sqrt{\frac{4Q_{h,max}}{\pi v_d}} \quad (6.23)$$

On calcule le coefficient de frottement optimal pour la partie distribution de la même manière que pour la partie pompage.

6.3.3 Valeurs de référence globale

6.3.3.1 Energie optimale

La formule générale de l'énergie consommée est donnée par l'équation 6.24. Pour que l'énergie soit optimale il faut que les trois variables de cette équation (Hauteur, volume et rendement de pompage) aient des valeurs optimales. Ce qui donne l'expression de l'énergie optimale :

$$E_{\text{opt}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{opt}} \cdot V_{\text{opt}}}{36000 \cdot \eta_{\text{opt}}} \quad (6.24)$$

E_{opt} : énergie optimal [KWh]; H_{opt} : hauteur manométrique optimale [m] ; V_{opt} : volume de pompage optimal [m^3] et η_{opt} : rendement de pompage optimal [%].

6.3.3.2 Energie de fonctionnement optimale

Par définition, le calcul de l'énergie de fonctionnement optimale consiste à utiliser la hauteur de fonction optimale à la place de la hauteur optimale dans l'expression de l'énergie. Cette énergie correspond à l'énergie consommée par un fonctionnement idéal des pompes sans modifier les paramètres de conception telles que la hauteur géométrique et les différentes caractéristiques des conduites :

$$E_{\text{f.opt}} = \frac{\rho g H_{\text{f.opt}} V_{\text{opt}}}{36000 \eta_{\text{opt}}} \quad (6.25)$$

$E_{\text{f.opt}}$: énergie de fonctionnement optimale, $H_{\text{f.opt}}$: hauteur de fonctionnement optimale, V_{opt} : volume de pompage optimal et η_{opt} : rendement de pompage optimal.

6.4 Indicateurs de conception énergétique du système de pompage

La consommation énergétique d'un système de pompage dépend essentiellement des paramètres de conception qui sont déterminant dans la consommation énergétique. Ces paramètres sont classés en deux :

- Hauteur géométrique du système de pompage;
- Paramètres des pertes de charge (Diamètre, longueur, force de viscosité, et singularités).

Les différents paramètres de conception doivent avoir des valeurs optimales afin de réduire l'énergie nécessaire pour le pompage d'eau. Pour évaluer un éventuel dysfonctionnement énergétique à cause d'un paramètre mal dimensionné, nous avons développé des indicateurs comparant les paramètres de conception du système à des valeurs optimales, afin d'évaluer leur impact sur la consommation énergétique. Le tableau (6.2) résume la liste des indicateurs de la partie conception.

Tableau 6.2 : indicateurs de performance énergétique de conception

Indicateur de performance	Formule	Signification
Id.de hauteur géométrique	$IHG = \frac{H_{g,opt}}{H_g}$	Evaluation de la hauteur géométrique du système de pompage.
Indicateur de longueur de conduite	$ILA = \frac{L_{opt}}{L_a}$	Evaluation de la longueur de la conduite d'aspiration
	$ILR = \frac{L_{opt}}{L_r}$	Evaluation de la longueur de la conduite de refoulement.
Indicateur de diamètre de conduite	$IDA = \left(\frac{D_a}{D_{opt}}\right)^5$	Evaluation du diamètre de la conduite d'aspiration.
	$IDR = \left(\frac{D_r}{D_{opt}}\right)^5$	Evaluation du diamètre de la conduite de refoulement.
Indicateur de frottement	$IFA = \frac{\lambda_{opt}}{\lambda_a}$	Evaluer les pertes de charge dues aux frottements des particules entre elles et aux parois de la conduite d'aspiration (rugosité).
	$IFR = \frac{\lambda_{opt}}{\lambda_r}$	Evaluer les pertes de charge dues aux frottements de viscosité des particules entre eux et aux parois de la conduite de refoulement (rugosité).
Indicateur des pertes singulières	$IPS = \frac{1}{\alpha_s}$	Evaluer l'effet des pertes singulières
Indicateur de résistance hydraulique	$IRH = \frac{r_{h,opt}}{r_h}$	Evaluation de la résistance hydraulique de la conduite d'adduction.
Taux de hauteur géométrique	$THG = \frac{H_g}{H_{f,opt}}$	Part de l'énergie consommée par la hauteur géométrique du système de pompage.
Taux des pertes de charge	$TPC = \frac{r_h \cdot Q_{opt}^2}{H_{f,opt}}$	Part de l'énergie consommée par les pertes de charges du système de pompage.
Indicateur global de conception	$IGC = \frac{E_{opt}}{E_{f,opt}}$	Evaluation des variables de conception du système de pompage.
Perte énergétique de conception	$\Delta E_c = E_{f,opt} - E_{opt}$	Evaluation des pertes énergétiques engendrées par le mauvais dimensionnement des paramètres de conception.
Taux des pertes énergétiques de conception	$PEC = \frac{\Delta E_c}{E_{f,opt}} \cdot 100$	Le taux de l'énergie perdue à cause du mauvais dimensionnement par rapport à l'énergie de fonctionnement optimale

6.4.1 Evaluation de la hauteur géométrique du système

6.4.1.1 Indicateur de hauteur géométrique IHG

Cet indicateur est le rapport entre la hauteur géométrique optimale et la hauteur géométrique du système de pompage.

$$IHG = \frac{H_{g,opt}}{H_g} \quad (6.26)$$

Pour que le système soit opérationnel l'indicateur doit être toujours inférieur ou égale à 1. En effet, le cas idéal correspond à IHG égal à 1, cela veut dire que la hauteur géométrique est optimale.

6.4.1.2 Taux de hauteur géométrique THG

La hauteur de pompage est la somme de la hauteur géométrique et les pertes de charge, pour connaître la part que représente la hauteur géométrique de la hauteur optimale de fonctionnement, nous avons développé l'indicateur dit taux de hauteur géométrique donné par l'équation suivante :

$$THG = \frac{H_g}{H_{f,opt}} \quad (6.27)$$

6.4.2 Evaluation des paramètres des pertes de charge du système

6.4.2.1 Evaluation détaillée des paramètres de pertes de charge

i. Indicateur de diamètre des conduites de pompage

L'indicateur de diamètre est le rapport entre le diamètre optimal et le diamètre des conduites du système de pompage. Pour la partie aspiration, on a :

$$IDA = \left(\frac{D_a}{D_{opt}} \right)^5 \quad (6.28)$$

Et pour la partie refoulement, on a :

$$IDR = \left(\frac{D_r}{D_{opt}} \right)^5 \quad (6.29)$$

avec, D_a et D_r diamètres des conduites d'aspiration et de refoulement successivement.

ii. Indicateur de longueur des conduites de pompage

Cet indicateur est le rapport entre la longueur optimale des conduites du système de pompage (aspiration et refoulement) et la longueur réelle des conduites. Pour la conduite d'aspiration, on a :

$$ILA = \frac{L_{opt}}{L_a} \quad (6.30)$$

Pour la conduite de refoulement, on a :

$$ILR = \frac{L_{opt}}{L_r} \quad (6.31)$$

avec, L_a et L_r longueurs des conduites d'aspiration et de refoulement successivement.

iii. Indicateur de frottement dans les conduites

Cet indicateur est le rapport entre le coefficient de frottement optimal et le coefficient de frottement. Il permet d'évaluer l'influence du coefficient des frottements qui dépend principalement du régime d'écoulement et de la rugosité des conduites.

Pour la conduite d'aspiration, on a :

$$IFA = \frac{\lambda_{opt}}{\lambda_a} \quad (6.32)$$

Pour le refoulement, on a :

$$\text{IFR} = \frac{\lambda_{\text{opt}}}{\lambda_r} \quad (6.33)$$

λ_a et λ_r : coefficients de frottement d'aspiration et de refoulement respectivement.

iv. Indicateur des pertes singulières

L'indicateur des pertes singulières permet d'évaluer l'effet des pertes singulières sur la consommation énergétique. L'indicateur est donné par la formule suivante :

$$\text{IPS} = \frac{1}{\alpha_s} \quad (6.34)$$

avec, α_s coefficient des pertes de charges singulières. Ce coefficient estime les pertes singulières à partir des pertes linéaires. Il peut être calculé comme suit :

$$\alpha_s \Delta H = r_h \cdot Q_p^2 \quad (6.35)$$

Après manipulation, on a :

$$\alpha_s = \frac{16,2 \cdot 10^5 g \pi^2 r_h}{\left(\frac{\lambda_a L_a}{D_a^5} + \frac{\lambda_r L_r}{D_r^5} \right)} \quad (6.36)$$

La résistance hydraulique de l'installation est déduite en connaissant le point de fonctionnement du système :

$$r_h = \frac{H - H_g}{Q_p^2} \quad (6.37)$$

6.4.2.2 Évaluation globale des paramètres de pertes de charge

i. Indicateur de résistance hydraulique IRH

L'indicateur de résistance hydraulique est le rapport entre la résistance hydraulique optimale et la résistance hydraulique du système de pompage. Il permet d'évaluer les paramètres de conception des pertes de charge :

$$\text{IRH} = \frac{r_{h,\text{opt}}}{r_h} \quad (6.38)$$

En remplaçant les différents termes de $r_{h,\text{opt}}$ et r_h par leur expression et après manipulation, on a :

$$\text{IRH} = \frac{1}{\alpha_s \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_{\text{opt}}} \cdot \frac{L_a}{L_{\text{opt}}} \cdot \frac{D_{\text{opt}}^5}{D_a^5} + \frac{\lambda_r}{\lambda_{\text{opt}}} \cdot \frac{L_r}{L_{\text{opt}}} \cdot \frac{D_{\text{opt}}^5}{D_r^5} \right)} \quad (6.39)$$

Ce qui donne l'IRH en fonction des autres indicateurs de conception.

$$\text{IRH} = \frac{\text{IPS}}{\left(\frac{1}{\text{IFA}} \cdot \frac{1}{\text{ILA}} \cdot \frac{1}{\text{IDA}} + \frac{1}{\text{IFR}} \cdot \frac{1}{\text{ILR}} \cdot \frac{1}{\text{IDR}} \right)} \quad (6.40)$$

ii. Taux des pertes de charge TPC

Comme pour le taux de hauteur géométrique, le taux des pertes de charge représente la part des pertes de charge de la hauteur optimale de fonctionnement dans le cas d'un fonctionnement optimal ($Q = Q_{opt}$) pour évaluer uniquement les paramètres de conception. Il est donné par l'équation suivante :

$$TPC = \frac{r_h \cdot Q_{opt}^2}{H_{f,opt}} \quad (6.41)$$

6.4.3 Evaluation globale de conception

6.4.3.1 Indicateur global de conception IGC

L'indicateur global de conception donne une vision générale de la performance énergétique du système sans tenir compte des variables de fonctionnement. En fait, il permet d'évaluer d'un point de vue énergétique le dimensionnement des différents paramètres de conception.

L'analyse de la formule de l'énergie consommée, nous a permis de constater que la variable influencée par les paramètres de conception est la hauteur de pompage à travers la hauteur géométrique et les paramètres des pertes de charges (diamètre, longueur, rugosité, et singularités). Pour cela, nous avons défini l'indicateur global de conception comme étant le rapport entre la hauteur optimale et la hauteur optimale de fonctionnement :

$$IGC = \frac{E_{opt}}{E_{f,opt}} \quad (6.42)$$

En remplaçant l'énergie optimale et l'énergie de fonctionnement optimale par leur expression, la relation (6.42) devient :

$$IGC = \frac{\frac{\rho g H_{opt} V_{opt}}{3600 \eta_{opt}}}{\frac{\rho g H_{f,opt} V_{opt}}{3600 \eta_{opt}}} = \frac{H_{opt}}{H_{f,opt}} \quad (6.43)$$

En remplaçant la hauteur optimale par son expression, on a :

$$IGC = \frac{H_{g,opt} + r_{h,opt} Q_{opt}^2}{H_{f,opt}} \quad (6.44)$$

Après manipulation de l'équation (6.44), l'équation devient ;

$$IGC = \frac{H_{g,opt}}{H_g} \cdot \frac{H_g}{H_{f,opt}} + \frac{r_{h,opt}}{r_h} \cdot \frac{r_h \cdot Q_{opt}^2}{H_{f,opt}} \quad (6.45)$$

Ce qui donne l'indicateur global de conception en fonction des différents indicateurs de conception.

$$IGC = IHG \cdot THG + IRH \cdot TPC \quad (6.46)$$

6.4.3.2 Pertes énergétiques de conception

Les pertes énergétiques de conception ΔEc sont égales à l'énergie fonctionnement moins l'énergie optimale du système de pompage, comme le montre l'équation (6.47) :

$$\Delta E_c = E_{f,opt} - E_{opt} \quad (6.47)$$

A partir de l'équation (6.47), on déduit l'énergie optimale en fonction des pertes énergétiques de conception. En la remplaçant dans l'équation (6.42), on a :

$$IGC = \frac{E_{opt}}{E_{f,opt}} = \frac{E_{f,opt} - \Delta E_c}{E_{f,opt}} = 1 - \frac{\Delta E_c}{E_{f,opt}} \quad (6.48)$$

Ce qui permet d'estimer les pertes énergétiques de conception en fonction de l'indicateur global de conception par l'expression suivante :

$$\Delta E_c = (1 - IGC) \cdot E_{f,opt} \quad (6.49)$$

6.4.3.3 Taux des pertes énergétiques de conception

Le taux des pertes énergétiques de conception est le rapport entre les pertes énergétiques de conception et l'énergie de fonctionnement optimale.

$$PEC = \frac{\Delta E_c}{E_{f,opt}} \cdot 100 [\%] \quad (6.50)$$

En remplaçant ΔE_c par son expression, on a le taux des pertes énergétiques de conception donnée en fonction de l'indicateur global de conception.

$$PEC = (1 - IGC) \cdot 100 \quad (6.51)$$

6.5 Indicateurs de fonctionnement énergétique du système de pompage

La deuxième famille des indicateurs concerne l'évaluation de la consommation énergétique, en se limitant aux paramètres de fonctionnement des pompes qui sont le volume d'eau pompée, la hauteur et le rendement de pompage. Le tableau (6.3) donne la liste des indicateurs de fonctionnement du système de pompage.

Tableau 6.3 : indicateurs de performance énergétique de fonctionnement

Indicateur de performance	Formule	Signification
Indicateur de volume d'eau pompé	$IV = \frac{V_{opt}}{V}$	Evaluation du volume d'eau pompé.
Indicateur de pression de pompage	$IH = \frac{H_{f,opt}}{H}$	Evaluation de la pression fournie par les pompes.
Indicateur de rendement de pompage	$IR = \frac{\eta}{\eta_{opt}}$	Evaluation du rendement de fonctionnement des pompes
Indicateur globale de fonctionnement	$IGF = \frac{E_{f,opt}}{E}$	Evaluation des variables de fonctionnement du système de pompage.
Perte énergétique de fonctionnement	$\Delta E_f = E - E_{f,opt}$	Evaluation des pertes énergétiques engendrées par les paramètres de fonctionnement.
Taux des pertes énergétiques de fonctionnement	$PEF = \frac{\Delta E_f}{E} \cdot 100$	Taux des pertes énergétiques du fonctionnement par rapport à l'énergie consommée.

6.5.1 Evaluation détaillée des paramètres de fonctionnement

6.5.1.1 Indicateur de volume de pompage

L'indicateur de volume de pompage est le rapport entre le volume optimal d'eau pompée et le volume d'eau sur l'horizon d'optimisation :

$$IV = \frac{V_{opt}}{V} \quad (6.52)$$

IV : indicateur de volume de pompage [%] ; V : volume d'eau pompé sur une période donnée ; V_{opt} : volume d'eau optimal sur la période d'optimisation.

L'indicateur est toujours inférieur à 1, sinon on ne respecte pas les exigences en termes de volume d'eau pour ne pas avoir un manque d'eau. Plus l'indicateur est proche de 1 plus la consommation d'eau est optimal.

L'indicateur de volume de pompage horaire est donné par la formule suivante :

$$IVH_i = \frac{V_{h,opt}}{V_{h,i}} \quad (6.53)$$

avec, $V_{h,i}$: volume horaire de l'heure i, il est déduit à partir des débits de pompages horaires.

L'indicateur de volume d'eau est donné en fonction des indicateurs de volume d'eau horaire par la relation suivante :

$$IV = \frac{t_f}{\sum_{i=1}^{T_{fct}} \left(\frac{1}{IVH_i} \right)} \quad (6.54)$$

6.5.1.2 Indicateur de pression de pompage

L'indicateur de pression de pompage est défini comme étant le rapport entre la hauteur de fonctionnement optimale et la hauteur fournie par le système de pompage.

$$IH = \frac{H_{f,opt}}{H} \quad (6.55)$$

La hauteur de fonctionnement soit elle est mesurée directement à l'aide des appareils de mesure de pression, ou elle est calculée à partir des courbes caractéristiques des pompes en fonction du débit de pompage.

Idem pour la hauteur de pompage horaire $H_{h,i}$, soit mesurée directement par les appareils de mesure ou bien déduite à l'aide des courbes caractéristiques des pompes. La hauteur de pompage est donnée en fonction des hauteurs horaires par la relation suivante :

$$H = \frac{\sum_{i=1}^{t_f} H_{h,i}}{T_{fct}} \quad (6.56)$$

En remplaçant l'expression (6.56) dans la formule de l'indicateur de pression de pompage, on a l'expression suivante :

$$IH = \frac{H_{f,opt}}{\frac{\sum_{i=1}^{t_f} H_{h,i}}{T_{fct}}} = t_f \frac{1}{\sum_{i=1}^{t_f} \frac{1}{\frac{H_{f,opt}}{H_{h,i}}}} = t_f \frac{1}{\sum_{i=1}^{t_f} \frac{1}{IH_{h,i}}} \quad (6.57)$$

avec, IHH_i indicateur de pression de pompage horaire de l'heure i . son expression est :

$$IHH_i = \frac{H_{f,opt}}{H_{h,i}} \quad (6.58)$$

6.5.1.3 Indicateur de rendement de pompage

L'indicateur de rendement est le rapport entre le rendement de fonctionnement des pompes et le rendement optimal. Sa valeur est toujours inférieurs ou égal à 1, où plus l'indicateur est proche de 1, plus le fonctionnement des pompes se rapproche de fonctionnement optimal en terme de rendement des pompes, et donc une quantité d'énergie sera économisée.

$$IR = \frac{\eta}{\eta_{opt}} \quad (6.59)$$

En pratique, on peut déduire le rendement de fonctionnement horaire à partir des courbes caractéristiques données par le constructeur, ensuite on déduira le rendement de fonctionnement qui est égal à la moyenne arithmétique des rendements horaires.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{t_f} \eta_{h,i}}{t_f} \quad (6.60)$$

En remplaçant l'équation (6.60) dans l'équation (6.59), on a :

$$IR = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{t_f} \eta_{h,i}}{t_f}}{\eta_{opt}} = \frac{1}{t_f} \sum_{i=1}^{t_f} \frac{\eta_{h,i}}{\eta_{opt}} = \frac{1}{t_f} \sum_{i=1}^{t_f} IRH_i \quad (6.61)$$

avec, IRH_i : indicateur de rendement de pompage horaire donné par la relation suivante :

$$IRH_i = \frac{\eta_{h,i}}{\eta_{opt}} \quad (6.62)$$

6.5.2 Evaluation globale du fonctionnement énergétique du système

6.5.2.1 Indicateur globale de fonctionnement

L'indicateur global de fonctionnement permet d'évaluer l'énergie consommée par l'ensemble de pompes sur l'horizon d'optimisation, en tenant compte des variables de fonctionnement (volume, hauteur et rendement de pompage). Il est le rapport entre l'énergie optimale de fonctionnement et l'énergie consommée par le système de pompage.

$$IGF = \frac{E_{f,opt}}{E} \quad (6.63)$$

Afin d'évaluer l'influence des différentes variables de fonctionnement sur la consommation énergétique, nous avons développé l'équation (6.64), en remplaçant les différents termes par leurs expressions :

$$IGF = \frac{\frac{H_{f,opt} \cdot V_{opt}}{\eta_{opt}}}{\frac{H \cdot V}{\eta}} = \frac{V_{opt}}{V} \cdot \frac{H_{f,opt}}{H} \cdot \frac{\eta}{\eta_{opt}} = IV \cdot IH \cdot IR \quad (6.64)$$

Ce qui donne l'indicateur global de fonctionnement en fonction des différents indicateurs de fonctionnement du système de pompage.

6.5.2.2 Pertes énergétiques de fonctionnement

Les pertes énergétiques de fonctionnement sont les pertes d'énergie qui sont dues au fonctionnement des pompes de la station de pompage. Ces pertes sont données par la formule suivante :

$$\Delta E_f = E - E_{f,opt} \quad (6.65)$$

On remplace l'expression des pertes énergétique du fonctionnement dans la formule de l'indicateur global de fonctionnement, on a :

$$IGF = \frac{E_{f,opt}}{E} = \frac{E - \Delta E_f}{E} = 1 - \frac{\Delta E_f}{E} \quad (6.66)$$

Ce qui donne les pertes énergétique de fonctionnement en fonction de l'indicateur global de fonctionnement :

$$\Delta E_f = (1 - IGF) \cdot E \quad (6.67)$$

6.5.2.3 Taux des pertes énergétiques de fonctionnement

Le taux des pertes énergétiques de fonctionnement représente le pourcentage des pertes énergétiques de fonctionnement par rapport à l'énergie consommée par le système de pompage. Sa formule est donnée par l'équation suivante :

$$PEF = \frac{\Delta E_f}{E} \cdot 100 [\%] \quad (6.68)$$

En remplaçant les pertes énergétiques de fonctionnement par leur expression, on a :

$$PEF = (1 - IGF) \cdot 100 \quad (6.69)$$

6.6 Evaluation énergétique globale

L'évaluation énergétique globale du système de pompage donne une idée générale sur la consommation énergétique du système. Elle permet de déterminer la surconsommation et de comparer entre plusieurs scénarii de pompage. Le tableau (6.4) résume l'ensemble des indicateurs de performance énergétique globale.

Tableau 6.4 : indicateurs de performance énergétique global

Type d'indicateur	Formule	Objectif
Indicateur global d'énergie	$IGE = \frac{E_{opt}}{E}$	Evaluation énergétique globale du système de pompage
Pertes énergétiques globales	$\Delta E = E - E_{opt}$	Evaluation globale des pertes énergétiques de conception et de fonctionnement
Taux des pertes énergétiques globales	$PE = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100$	Part des pertes énergétiques globales par rapport à l'énergie consommée par le système de pompage.

6.6.1 Indicateur global d'énergie IGE

L'indicateur global d'énergie permet une évaluation énergétique générale du système de pompage, tenant compte des variables de conception et de fonctionnement à la fois. Il est défini comme étant le rapport entre l'énergie optimale et l'énergie consommée par le système de pompage.

$$IGE = \frac{E_{opt}}{E} \quad (6.70)$$

En développant l'équation précédente, on a l'indicateur d'énergie en fonction de l'indicateur global de conception et l'indicateur global de fonctionnement :

$$IGE = \frac{E_{opt}}{E} = \frac{E_{opt}}{E_{f,opt}} \cdot \frac{E_{f,opt}}{E} = IGC \cdot IGF \quad (6.71)$$

En remplaçant l'indicateur global de conception et l'indicateur global de fonctionnement par leurs expressions, on a :

$$IGE = IGC \cdot IGF = (IHG \cdot THG + IRH \cdot TPC) \cdot (IV \cdot IH \cdot IR) \quad (6.72)$$

6.6.2 Pertes énergétiques globales

La perte d'énergie globale du système de pompage, représente l'écart d'énergie consommée entre le fonctionnement courant et celui du cas d'une conception optimale et un fonctionnement optimal. Sa formule est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta E = E - E_{opt} \quad (6.73)$$

Ces pertes d'énergie représentent aussi la somme des pertes énergétiques de fonctionnement et de conception.

$$\Delta E = \Delta E_C + \Delta E_F \quad (6.74)$$

Après manipulation de l'équation (6.73), on a la perte d'énergie en fonction de l'indicateur d'énergie :

$$\Delta E = (1 - IGE) \cdot E \quad (6.75)$$

6.6.3 Taux des pertes énergétiques globales

Le taux des pertes énergétiques globales est un pourcentage qui représente les pertes énergétique de conception et de fonctionnement par rapport à l'énergie consommée par le système de pompage. Il est donné par l'équation suivante :

$$PE = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100 \quad (6.76)$$

Ce qui donne :

$$PE = (1 - IGE) \cdot 100 \quad (6.77)$$

6.7 Représentation arborescente des indicateurs de performance énergétique

La représentation arborescente des IPE permet une meilleure compréhension des résultats. Elle facilite également le processus du diagnostic énergétique du problème en détectant la source du dysfonctionnement énergétique.

Cette représentation s'appuie sur un panel d'indicateurs (tableau 6.5), et sur un algorithme permettant la détermination de la source du dysfonctionnement énergétique (figure 6.3).

Tableau 6.5 : panel d'indicateurs de performance énergétique

Valeur de l'indicateur	Classe d'indicateurs	Explication
[0 – 0,5]	Très faible	Surconsommation très importante
]0,5 – 07]	Faible	Surconsommation importante
]0,7 - 09]	Bon	Surconsommation faible
]0,9 – 1]	Excellent	Surconsommation négligeable

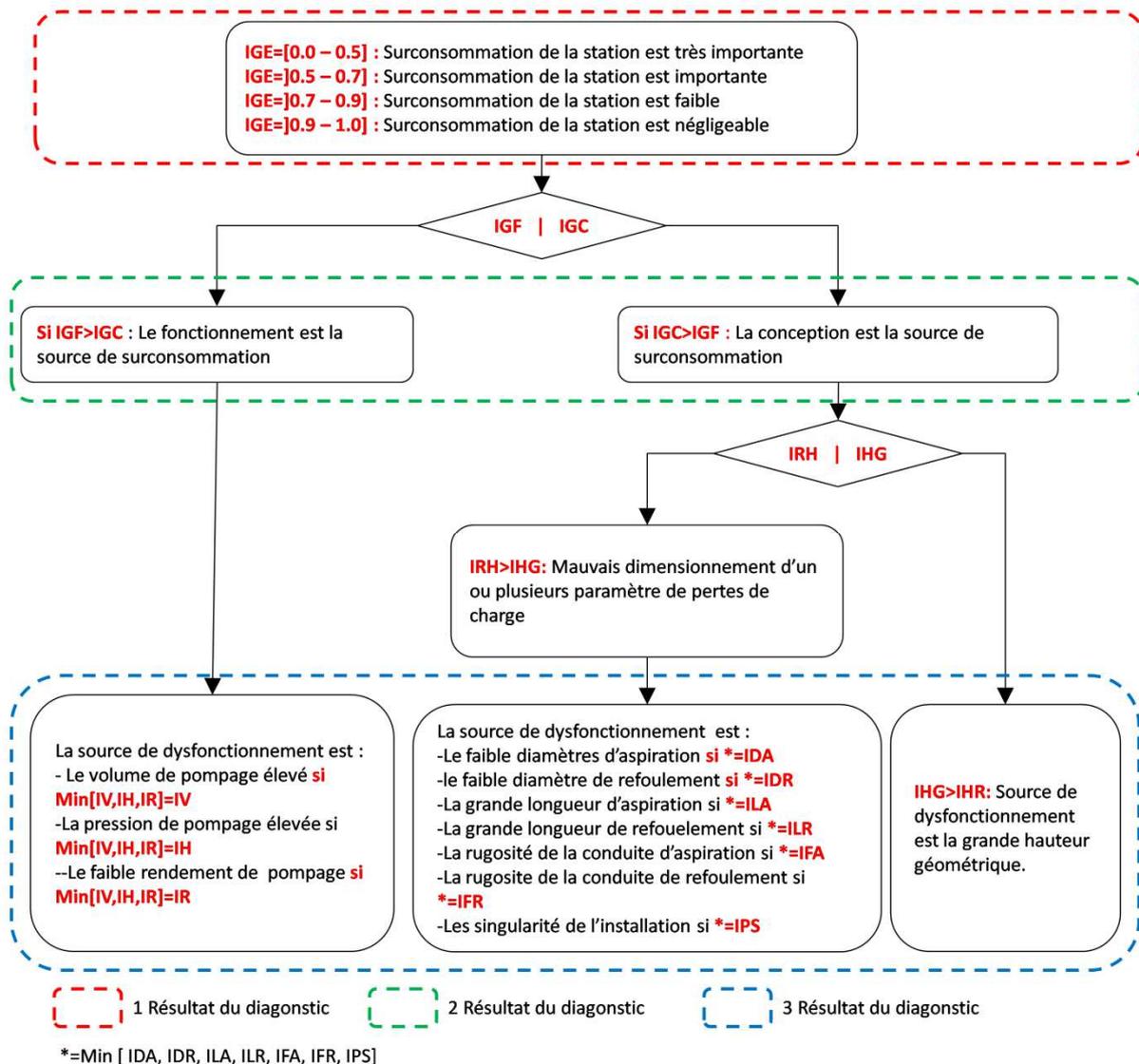


Figure 6-3 : diagramme de la détermination de la source du dysfonctionnement énergétique

Il faut noter qu'à ce stade tous les indicateurs sont pondérés par une pondération unitaire à l'exception de l'indicateur de résistance hydraulique IRH et l'indicateur de la hauteur géométrique IHG qui sont pondérés par le taux de pertes de charge TPC et le taux de hauteur géométrique THG successivement. La figure (6-4) montre la représentation arborescente des IPE.

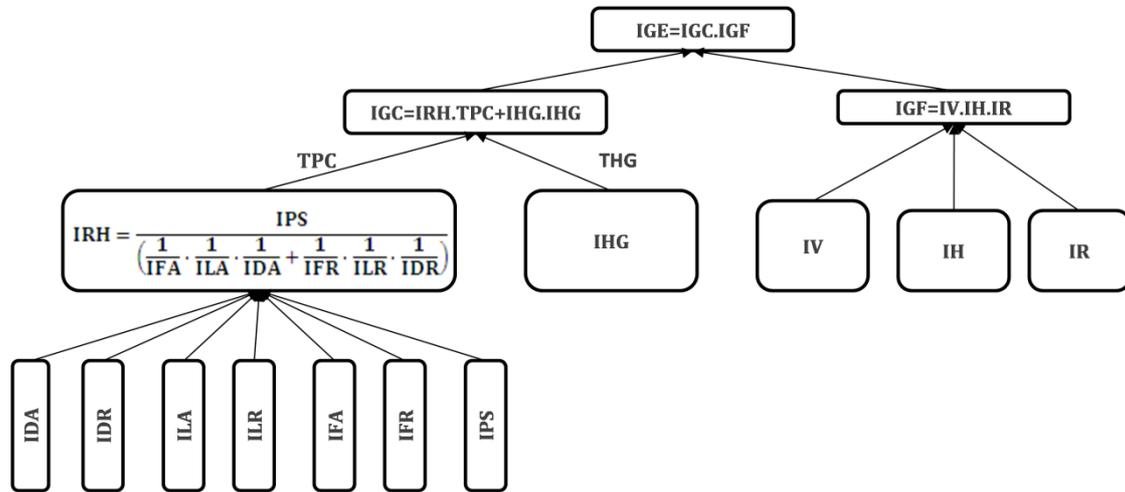


Figure 6-4 : représentation arborescente des indicateurs de performance énergétique

Conclusion

Les indicateurs de performance énergétique constituent un outil efficace dans l'évaluation énergétique du système de pompage, ils facilitent énormément cette tâche, et permettent aux gestionnaires du système de comprendre la situation énergétique ce qui leurs permettent de prendre des décisions adéquates pour optimiser la consommation énergétique. Les indicateurs de performance existant auparavant présentent une simple évaluation de la consommation énergétique tel indicateur d'énergie volumique qui représente le rapport entre l'énergie consommée et le volume pompé, permettant de connaître uniquement l'énergie consommée par unité de volume d'eau pompée.

Dans ce présent travail, nous avons élaboré une liste des indicateurs de performance énergétique, qui non seulement présente une évaluation énergétique globale mais elle offre une évaluation détaillée permettant de mener un diagnostic énergétique de chaque paramètre du système, et de faire des comparaisons crédibles entre les différents scénarii de pompage possibles

L'évaluation générale de la consommation énergétique est donnée par l'indicateur global d'énergie IGE. Pour les paramètres de conception, l'indicateur global de conception IGC donne une évaluation globale. Alors que pour les paramètres de fonctionnement c'est l'indicateur global de fonctionnement IGF.

Pour la partie conception, l'évaluation détaillée pour chaque paramètre est réalisée par les indicateurs de la hauteur géométrique IHG et de la résistance hydraulique IRH. Ces deux indicateurs permettent d'évaluer la hauteur du château d'eau et les autres paramètres de résistance hydraulique (diamètre, longueur, ...etc) séparément. Pour approfondir l'analyse énergétique encore, les indicateurs de diamètre de conduite IDA et IDR (aspiration et

refoulement), de longueur de conduite ILA et ILR (aspiration et refoulement), des forces de viscosité IFVA et IFVR (aspiration et refoulement) et des pertes de charge singulière IPS permettent de présenter une évaluation de chaque paramètre de la résistance hydraulique du système de pompage.

Pour la partie fonctionnement, les indicateurs de volume de pompage IV, de pression de pompage IH et de rendement de pompage IR estiment la performance énergétique de chacun de ces paramètres de fonctionnement.

La représentation arborescente des indicateurs de performance énergétique est une méthode simple et précise permettant un diagnostic énergétique rapide du système de pompage. La méthode s'appuie sur un panel des IEP pour évaluer la performance, et sur le calcul du chemin de dysfonctionnement afin de détecter la source de surconsommation énergétique.

Chapitre 7

7 Application de l'outil développé à la station de pompage de Rassauta

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'outil RNAG que nous avons élaboré pour la gestion des systèmes de pompage. L'outil comporte deux modèles. Un modèle de prévision de la demande basé sur les réseaux de neurones artificiels RNA, qui permet de prévoir la demande en eau horaire, et un second modèle d'optimisation qui utilise les algorithmes génétiques pour résoudre la fonction objectif sous contraintes. L'outil permet d'établir un planning de pompage optimal sur un horizon d'optimisation de vingt quatre heures.

Le modèle d'optimisation RNAG a été appliqué pour optimiser l'énergie de pompage de la station de Rassauta. Et pour étudier son efficacité, nous avons comparé les résultats obtenus par le modèle RNAG avec trois autres plannings de pompage :

- un planning employé par la société chargée de la gestion de la station de pompage, en l'occurrence la SEAAL ;
- deux autres plannings issus des deux modèles de régulation de pompage RV et RVP que nous avons présenté en chapitre 1.

L'évaluation, le diagnostic et la comparaison de chaque scénario de pompage se fait à l'aide des indicateurs de performance énergétique que nous avons élaboré (chapitre 6). Ces derniers facilitent énormément la tâche d'évaluation et de comparaison, et permettent un diagnostic énergétique détaillé du système et du planning de pompage en détectant le paramètre causant une éventuelle surconsommation énergétique.

7.1 Description de la zone d'étude

La station de pompage de Rassauta assure l'alimentation en eau potable de la partie Est de la commune de Bordj El Kiffan en banlieue Algéroise. Elle alimente le château d'eau de Rassauta, qui à son tour assure la desserte en eau potable du réseau de distribution de Rassauta et également approvisionne le château d'eau d'El Hamiz.

La station de pompage est approvisionnée par le système d'adduction appelée SPIK « Système de production Isser-Kadara » (*figure 7-1*).

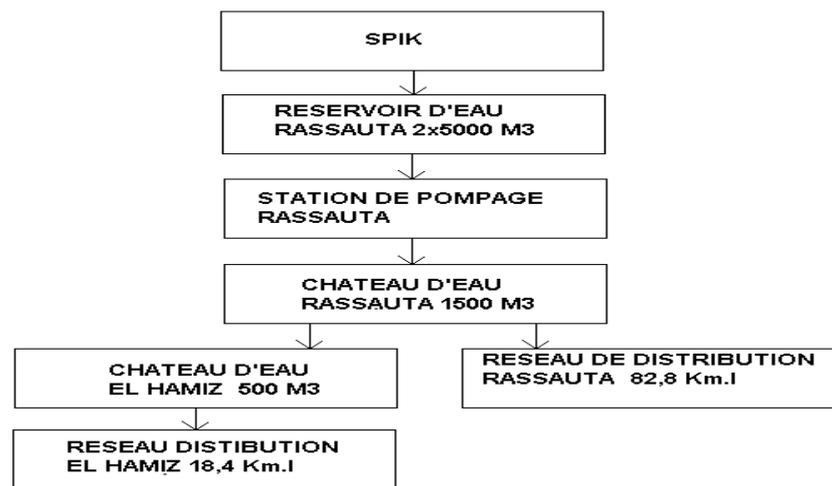
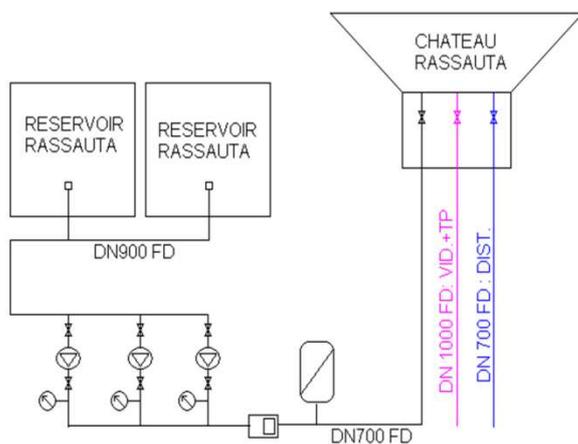


Figure 7-1 : système d'alimentation de Bordj El Kiffan Est (SEAL, 2017)

7.1.1 Description de la station de pompage

Pour valider les modèles développés, nous les avons appliqué sur la station de pompage de Rassauta. Cette station de pompage est composée de trois pompes centrifuges horizontales à volute en construction process de marque KSB et de type ETANORM RG 250-400, chaque pompe est entraînée par un moteur électrique de marque SIEMENS, les pompes aspirent l'eau de deux réservoirs d'aspiration ($2 \times 5000 \text{ m}^3$) dont le volume d'eau est géré par des vannes altimétriques. Le groupe de pompage est installé à 3 mètre en dessous du plan d'aspiration, ce qui permet aux pompes de fonctionner en charge réduisant ainsi les problèmes liés à l'amorçage et à la cavitation des pompes (figure 7-2).



a. schéma de la station de pompage



b. carte satellitaire de la station de pompage

Figure 7-2 : station de pompage de Rassauta

L'aspiration se fait via une conduite de diamètre 900 mm et d'une longueur de 105 m. L'eau pompée est refoulée vers le château d'eau dont la côte du radier est 57 m. Le diamètre de la conduite de refoulement est de 700 mm. Cette conduite est équipée d'un anti-bélier juste après le collecteur de refoulement, et d'un débitmètre relié à un système de transmission permettant la connaissance du débit de pompage en temps réel. Pour la lecture de pression, le système est doté d'un manomètre à la sortie de chaque pompe, le château d'eau est également

équipé d'une conduite de trop-plein et de vidange de diamètre 1000 mm, et d'une conduite de distribution de diamètre 700 mm (figure 7-3).

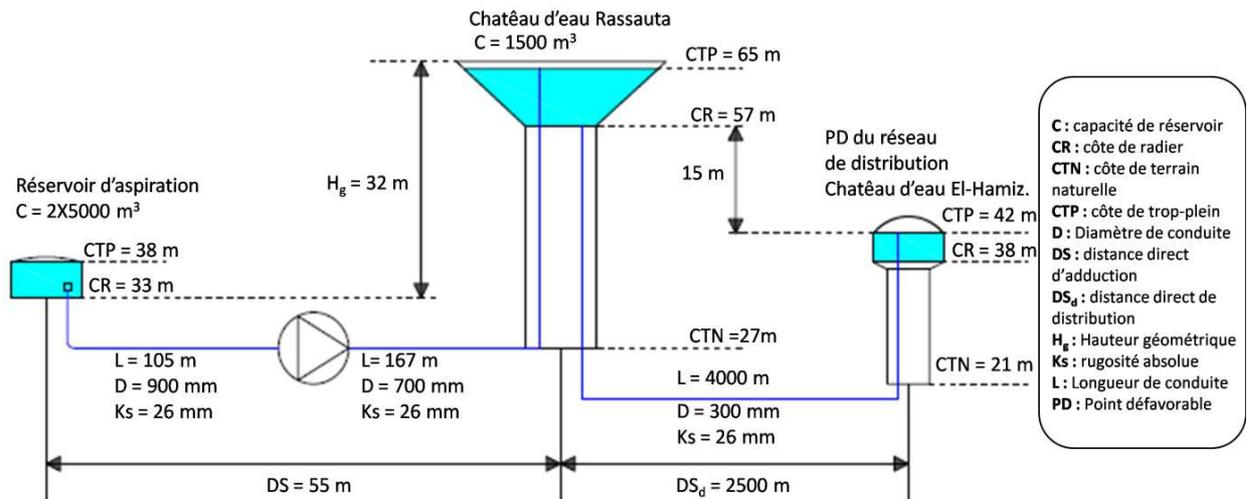


Figure 7-3 : paramètres de conception du système de pompage de Rassauta

Les pompes fonctionnent en mode appelé couramment (2+1), c'est-à-dire deux pompes fonctionnent en cascade et une pompe de secours. Les deux pompes en marche sont gérées par un système de régulation automatique basé sur le niveau d'eau dans le château d'eau. En effet, lorsque le niveau d'eau atteint le seuil maximum de 7,3m, une pompe s'arrête, et si le niveau d'eau descend au dessous du niveau minimum de 5,4m une pompe démarre. Selon ce principe de régulation il se peut que les deux pompes se trouvent à l'arrêt lorsqu'une pompe seulement soit en marche et le niveau d'eau dépasse le niveau max. Le système de gestion automatique consiste à l'alterner les pompes à chaque démarrage pour garantir un temps de travail égal pour les trois pompes. Les courbes caractéristiques des pompes sont données dans la figure (7-4).

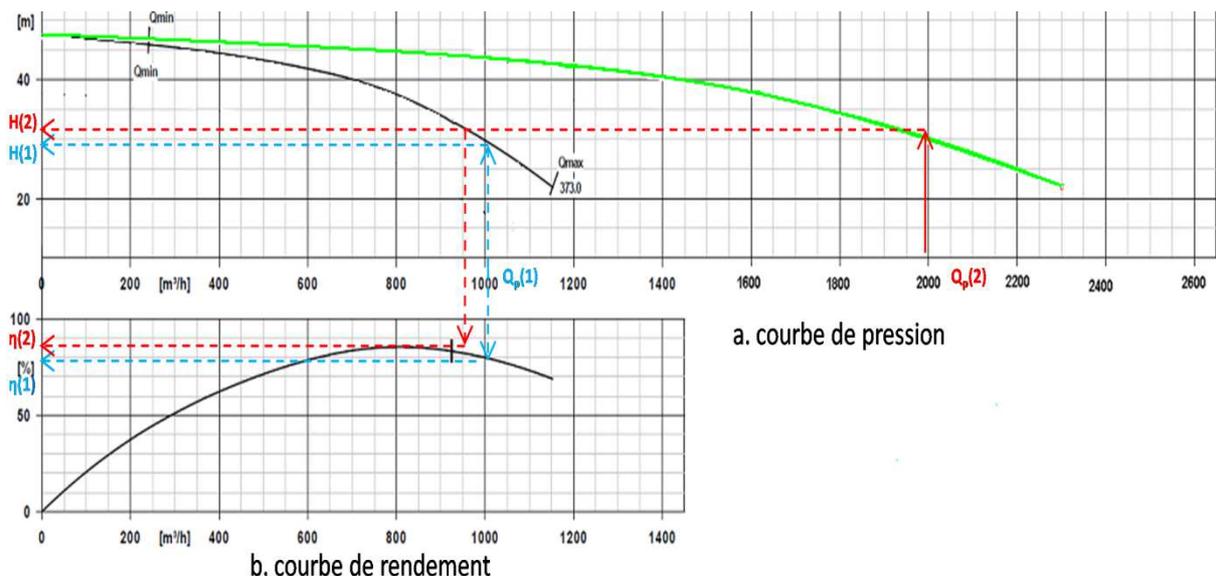


Figure 7-4 : courbes caractéristiques du système de pompage de Rassauta

7.1.2 Réseau de distribution de Rassauta

Le réseau de distribution de Rassauta compte un linéaire total de conduites de 82 831 ml réparti en 8 secteurs de distribution (*figure 7-5*). Le point défavorable du réseau de distribution se trouve au niveau du secteur de distribution SS4 de la localité « Bateau Cassé », dont la côte du terrain naturel la plus élevée est de 10 m.

Le diamètre de la conduite principale est de 150 mm, ce qui provoque de très forte perte de charge durant les périodes de forte consommation durant la journée.

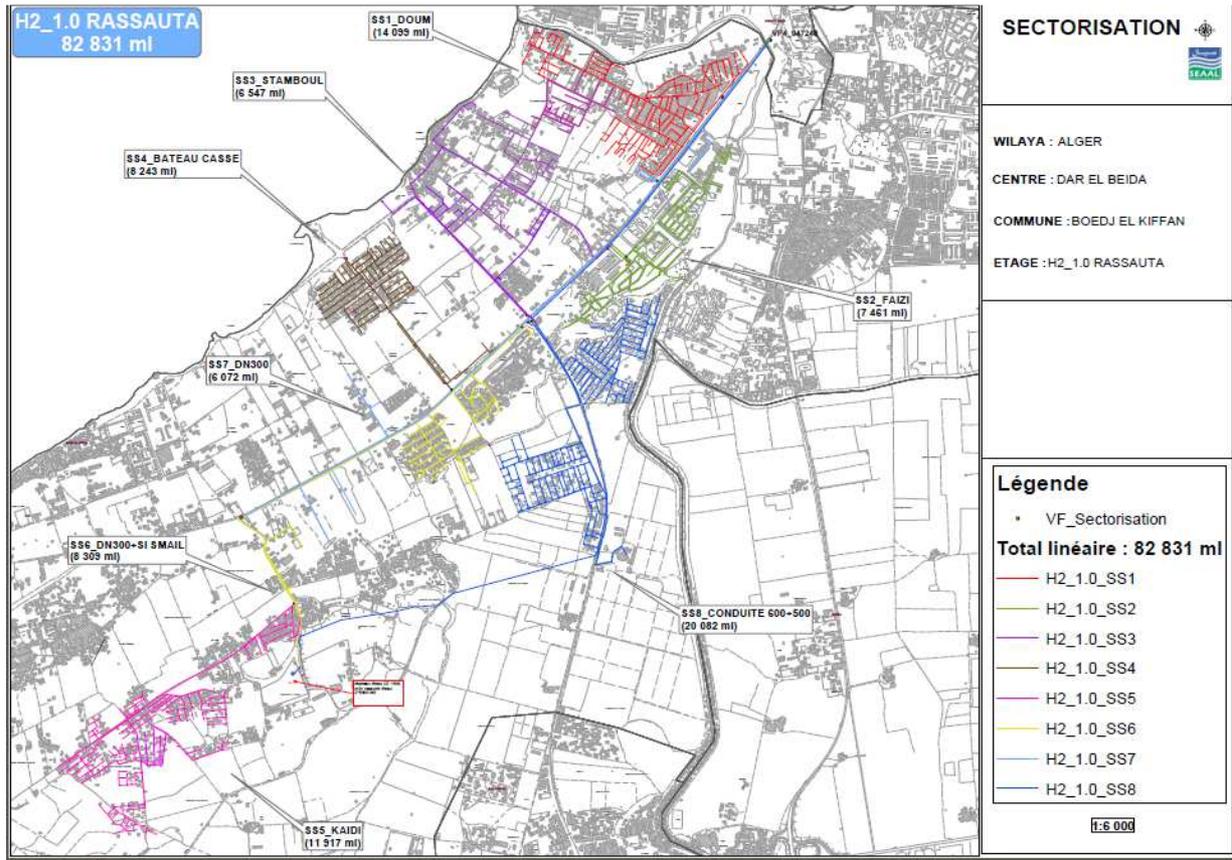


Figure 7-5 : réseau de distribution de Rassauta

7.1.3 Château d'eau d'El Hamiz

Le château d'eau d'El Hamiz a un volume de 500 m³ caractérisé par une côte du radier de 38 m et une côte du trop plein de 42 m (*figure 7-6*). Ce château d'eau dessert la partie sud de la ville d'El Hamiz dont le réseau de distribution compte environ 18 408 m linéaire de conduites répartis en trois secteurs de distribution : Les orangers, Hamiz 2, et Haouch Batata.

Le calcul hydraulique des pertes de charge a montré que le point défavorable pour le système d'alimentation est le château d'eau d'El Hamiz (tableau 7.1).

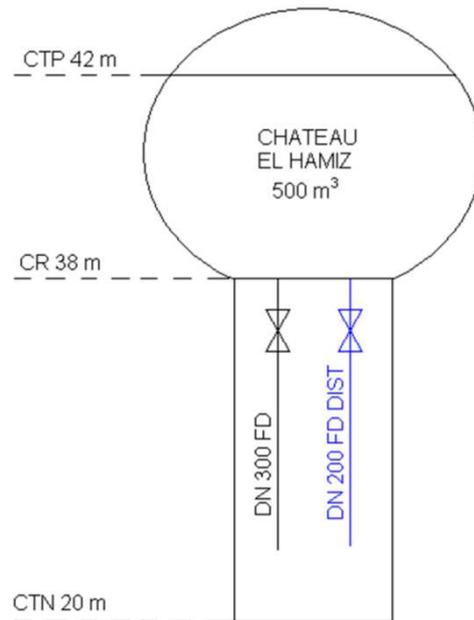


Figure 7-6 : schéma du château d'eau d'El-Hamiz

Tableau 7.1 : caractéristique du point le plus défavorable (Château d'eau d'El Hamiz)

Débit [m ³ /s]	624,00
Diamètre [m]	0,30
Longueur[m]	4004,00
Matériau	Fonte Ductile
Rugosité absolue [mm]	0,26
Facteur de frottement	$19,30 \cdot 10^{-3}$
Résistance hydraulique [s/m ²]	2630,31
Perte de charge [m]	79,03
Côte du point défavorable [m]	42,00
Hauteur du point défavorable [m]	121,03

7.1.4 Caractéristiques de la demande en eau

Le réseau de distribution est caractérisé par une consommation moyenne journalière d'environ 24878 m³/j. L'analyse de la courbe de modulation (*figure 7-7*) nous a montré que la consommation journalière passe pratiquement par trois plages. La première plage commence de 9 à 15 h avec un coefficient de point horaire d'environ 1,2, cette période correspond à la forte consommation d'eau à causes des différents activités quotidiennes des usagers : douches, vaisselles ... etc. La deuxième plage commence de 16 à 22 H caractérisée par un coefficient de point égal à 1,1, correspond aux activités relative au diner et aux douches, et la troisième plage elle concerne la consommation nocturne de 23 à 8 h dont le coefficient de point est de l'ordre de 0,7 correspond pratiquement aux fuites dans le réseau.

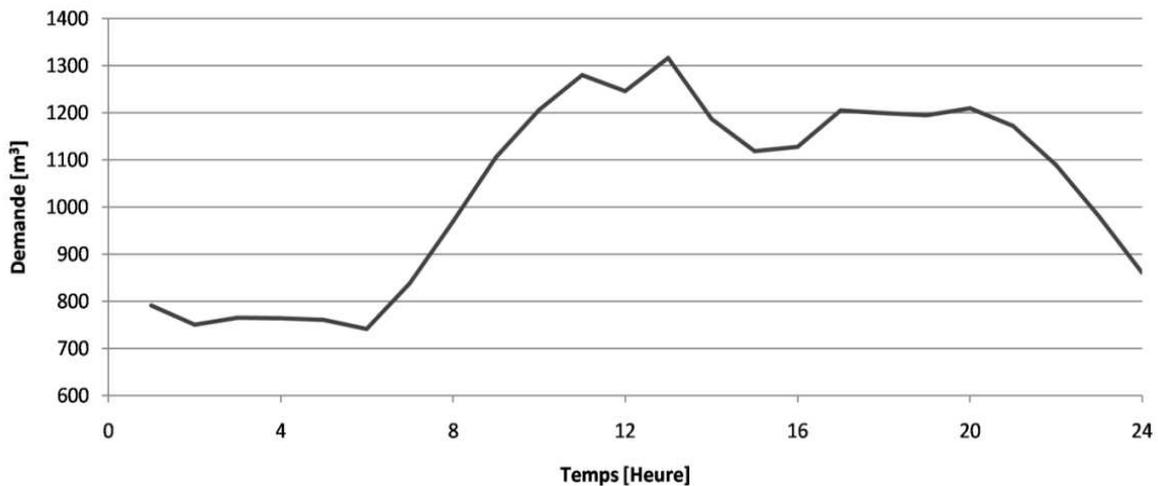


Figure 7-7 : courbe de modulation du réseau de distribution de Bordj El Kiffan Est

7.2 Présentation de l’outil de gestion RNAG

L’outil de gestion du système de pompage que nous avons développé comporte deux modèles : Un modèle de prévision de la demande en eau RNA, qui fournit la demande en eau horaire à l’horizon d’optimisation nécessaire pour le calcul d’optimisation. Un second modèle d’optimisation énergétique des pompes basé sur les algorithmes génétiques AG, qui génère le planning de fonctionnement optimal à chaque heure de l’horizon d’optimisation (24 heures).

7.2.1 Modèle de prévision de la demande en eau RNA

Le modèle d’optimisation nécessite pour leur processus de calcul de connaître la demande d’eau potable horaire du réseau de distribution. Il existe plusieurs méthodes pour estimer cette demande en eau. Dans notre cas, nous avons utilisé l’approche des réseaux de neurones artificiels (RNA) pour prévoir la demande sur les 24 heures d’horizon d’optimisation. En effet, pour chaque saison de l’année nous avons un RNA de type bouclé où la demande prévue à l’instant (t) est utilisée à l’instant (t+1) comme donnée d’entrée. Le modèle a été programmé via MATLAB.

7.2.1.1 Traitement et correction des données

Dans notre étude, nous nous disposons d’une base de données fournie par la SEAAL de la consommation et de la production d’eau potable de la station de pompage de Rassauta. La base de données couvre la période de 01/06/2016 au 01/09/2016 pour la demande en eau horaire et la période de 01/08/2016 au 01/09/2016 pour le débit de pompage horaire. La série chronologique de la demande comporte 2 208 composantes et celle du pompage 740 composantes. La série temporelle peut comporter des valeurs manquantes, accidentelles ou aberrantes. Pour cela, un prétraitement des composantes de la série est recommandé. Dans notre travail, nous avons remplacé les composantes de la demande en eau horaire erronées par leurs valeurs moyennes dans le cas où la composante de la série temporelle présente un écart d’erreur dépassant 30% par rapport à la valeur moyenne.

7.2.1.2 Choix de la forme du modèle RNA

Le réseau de neurone adopté comporte trois couches (1 couche d'entrée, 1 couche de sortie, et 1 couche de sortie).

La couche cachée comporte deux neurones, la couche de sortie un seul neurone. Tandis que pour la couche cachée elle comporte 25 ou 27 selon la variante du réseau de neurones. En effet, nous avons utilisé deux variantes de réseaux de neurones pour étudier l'impact de la variation de la consommation d'eau potable entre les jours du weekend et les autres jours de la semaine.

Variante 1 (RN1) : Cette variante considère que tous les jours de la semaine se ressemblent. A cet effet, la couche d'entrée comporte 25 neurones, 24 neurones pour l'heure du jour, et 1 neurone pour la consommation précédente.

Variante 2 (RN2) : Cette variante fait la distinction entre les jours du weekend et les autres jours de la semaine. Pour cela, la couche d'entrée comporte 25 neurones, 24 neurones pour l'heure du jour, 2 neurones pour désigner le jour est qu'il s'agit d'un weekend ou non. Et 1 neurone pour la consommation précédente.

Tous les neurones de la couche d'entrée sont connectés aux neurones de la couche suivante, ainsi que tous les neurones de la couche d'entrée sont connectés aux deux neurones de la couche cachée (*figure 7-8a*).

La fonction d'activation des neurones de la couche cachée est la fonction sigmoïde (logistic) tandis qu'en couche de sortie nous avons utilisé la fonction identité.

Les valeurs de la consommation précédente sont normalisées, en les divisant par la composante maximale de la série temporelle.

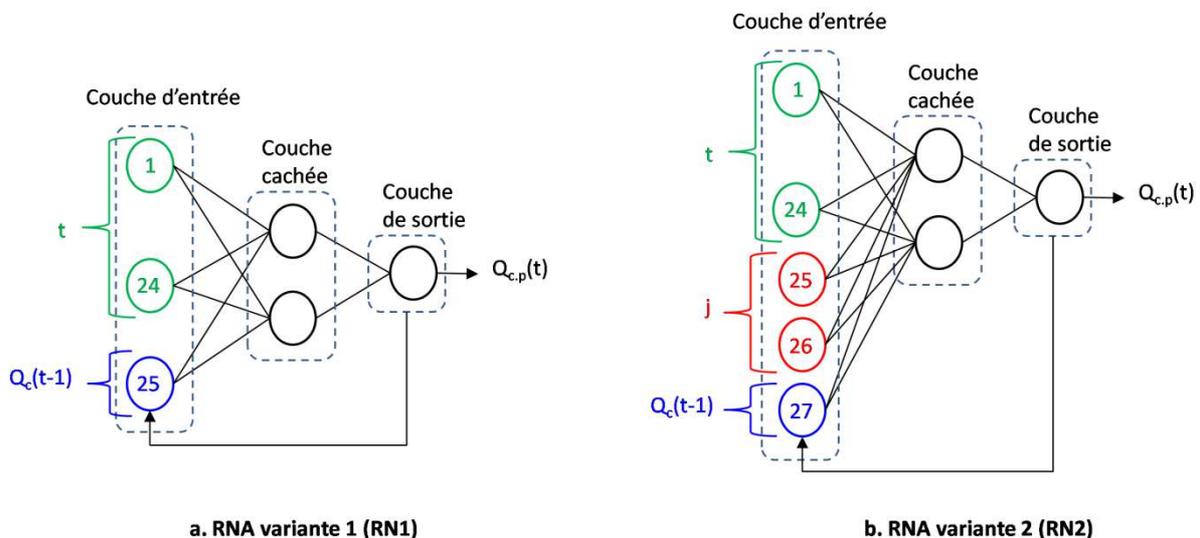


Figure 7.8 : structure du réseau de neurones adopté

L'entraînement des réseaux de neurones a été effectué sur une période de 85 jours de la saison d'été 2016. Alors que la semaine du 05/08/2016 au 11/08/2016 a été utilisée pour la validation. Le choix de cette semaine au milieu de la saison a été fait pour éviter toute perturbation de la consommation liée au retour des vacanciers à la fin de la saison estivale.

L'évaluation de la qualité de prévision a été faite en fonction de quatre critères de qualité qui sont : le coefficient de corrélation R, la Moyenne des erreurs absolues en pourcentage MAPE, l'erreur absolue moyenne MEA et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE. Le tableau (7.2) résume les principales caractéristiques des différents modèles et leurs critères d'erreur.

L'analyse des résultats à l'aide des critères de qualité montre que l'entraînement des 2 variantes a été bien fait, où le coefficient de corrélation \textcircled{R} est supérieur à 0.95 et la moyenne des erreurs absolues (MAPE) est inférieures à 5 % (tableau 7.2), avec le constat que d'une légère performance de la variante 2.

Pour la validation, les résultats ont été relativement bons. Malgré que la performance est un peu faible par rapport à l'entraînement, avec un coefficient de corrélation d'environ 0.91 et une moyenne d'erreurs absolue supérieure à 6 % (tableau 7.3). Les résultats montrent également que la performance de la variante est légèrement meilleure à celle de la variante 1.

Tableau 7.2 : critères d'évaluation durant la phase d'apprentissage

Variante RNA	R	MAPE	MAE	RMSE
RN1	0.9545	4.4929	44.8431	64.0055
RN2	0.9567	4.3995	43.9264	62.4414

Tableau 7.3 : critères d'évaluation durant la phase de validation

Variante RNA	R	MAPE	MAE	RMSE
RN1	0.9128	6.1093	65.1000	90.1600
RN2	0.9193	6.0588	62.6032	88.1287

7.2.1.3 Procédure de calcul du modèle RNA adopté

- i. Algorithme d'apprentissage
 - a. Paramétrage et acquisition des données du modèle

Dans cette étape, on définit les paramètres de calcul du modèle, ces paramètres sont : le nombre d'heures d'entraînement n_{\max} selon la taille de série la temporelle utilisée pour l'apprentissage, le nombre d'itération i_{\max} , le taux d'apprentissage α , et les poids synaptiques w qui se génèrent d'une façon aléatoire. Ensuite, on passe à l'acquisition des données d'entrée du modèle RNA qui sont :

- les vingt-quatre valeurs de l'heure du jour (la valeur 1 pour l'heure concernée et 0 pour le reste),
- le type du jour (férié ou ouvrable) pour la variante RN2.
- La consommation de l'heure précédente,
- La consommation de l'heure de prévision.

Les séries temporelles de la consommation de l'heure précédente et de l'heure de prévision sont par la suite normalisées.

b. *Processus itératif*

Phase de propagation

Dans cette phase dite de progression, on fait un calcul vers l'avant (de la couche d'entrée vers la couche de sortie) qui permet de calculer les valeurs de la couche d'entrée, ensuite la couche de sortie et qui aboutit à la détermination de la consommation de l'heure de prévision. Le calcul des valeurs des neurones ou l'activité du neurone se fait en deux étapes : Une première étape est réalisée grâce à la fonction de combinaison, la valeur du neurone obtenue $a_p(m,i)$ avant l'application de la fonction de transfert ou d'activation.

$$a_p(m, i) = \sum_{j=1}^{n_n(m-1)} a(m-1, j) \cdot w(j, i) \quad (7.1)$$

avec, $a(m,i)$: valeur du neurone i de la couche m ; $a(m-1,j)$: valeur du neurone j de la couche $(m-1)$, $w(j,i)$: poids synaptique du neurone j de la couche précédente et le neurone i de la couche suivante et $n_n(m-1)$: nombre de neurone de la couche $(m-1)$.

En deuxième étape, on calcule la valeur finale du neurone par la fonction d'activation, qui est la fonction logistic (sigmoïde) dans la couche cachée :

$$a(m, i) = \text{Logistic} \left(a_p(m, i) \right) = \frac{1}{1 + \exp \left(-a_p(m, i) \right)} \quad (7.2)$$

Dans la couche de sortie, l'activité du neurone de sortie est calculée par la fonction identité

$$a(m_s, i_s) = a_p(m_s, i_s) \quad (7.3)$$

où, m_s : rang de la couche de sortie dans notre cas $m_s = 3$ et i_s : nombre du neurone de la couche de sortie, dans notre cas, nous avons un seul neurone ce qui fait que $i_s = 1$.

On calcule ensuite la demande prévue en multipliant l'activité du neurone de sortie par la consommation horaire maximale :

$$Q_{pr}(n) = a(m_s, i_s) \cdot Q_{c.hmax} \quad (7.4)$$

$Q_{pr}(n)$: demande en eau prévue à l'instant (n) .

Calcul de l'erreur

L'erreur calculée est la différence entre les valeurs réelles et les valeurs prévues de la demande en eau. Elle peut servir comme critère d'arrêt, et c'est également la fonction qu'on cherche à minimiser dans la procédure itérative.

$$\Delta(n) = |Q_{pr}(n) - Q_r(n)| \quad (7.5)$$

c. *Rétro-propagation*

On a utilisé une méthode d'apprentissage supervisée de la rétro-propagation du gradient. C'est la phase essentielle d'apprentissage qui permet d'ajuster les poids synaptiques afin de réduire l'erreur de calcul.

La méthode consiste à faire une propagation en arrière de l'erreur, en la propageant de la couche de sortie jusqu'à la couche d'entrée. L'erreur $\Delta(m, i)$ sur chaque neurone (i) de la couche (m) est calculée par la formule suivante :

$$\Delta(m, i) = a(m, i) \cdot (1 - a(m, i)) \cdot w(i, j) \cdot \Delta(m + 1, j) \quad (7.6)$$

Après, on procède à la mise à jour des poids synaptiques en fonction du taux d'apprentissage, de l'erreur et de l'activité du neurone.

$$w(i, j) = w(i, j) + \alpha \cdot a(m, i) \cdot \Delta(m + 1, j) \quad (7.7)$$

avec, $w(i, j)$: poids synaptique entre le neurone i de la couche m et le neurone j de la couche $m+1$, α : taux d'apprentissage, et $a(m, i)$: valeur du neurone i de la couche m , $\Delta(m+1, t)$: perte du neurone j de la couche $m+1$.

ii. *Algorithme de prévision*

L'algorithme de prévision est utilisé pour prévoir la demande en eau horaire à l'horizon de prévision désiré (dans notre cas l'horizon est de 24 heures). Cet algorithme est basé sur l'algorithme d'apprentissage. Il consiste à charger les paramètres de ce dernier, y compris les poids synaptiques ajustés durant cette phase d'apprentissage, ensuite en fonction des données d'entrées fournies, l'algorithme procède le calcul des différentes valeurs des neurones de la couche d'entrée jusqu'à la couche de sortie (propagation en avant), déterminant ainsi la demande en eau horaire $Q_c(h)$. Ce processus sera répété 24 fois pour déterminer la demande en eau sur l'horizon de prévision.

7.2.2 **Modèle d'optimisation énergétique AG**

Pour la partie optimisation énergétique nous avons élaboré un modèle basé sur les algorithmes génétiques AG pour résoudre la fonction objectif du problème d'optimisation tout en respectant les contraintes d'optimisation afin de proposer un planning de pompage optimal en termes d'énergie consommée et qui garantie un bon fonctionnement hydraulique du système de pompage.

7.2.2.1 *Génération de la population initiale*

i. *Générateur aléatoire de la population initiale*

La population initiale est l'ensemble de m_{\max} individus ou solutions potentielles du problème d'optimisation, où chaque solution est écrite sous forme d'un vecteur décision ou vecteur de commande. Le codage utilisé est le codage entier qui indique le nombre de pompes en marche

à chaque pas de temps de l'horizon d'optimisation. Chaque individu ou vecteur de décision est donné sous la forme suivante :

$$N(m) = \{n(1), n(2), \dots, n(t_f)\} \text{ avec } m = 1 \text{ à } m_{\max} \quad (7.8)$$

$N(m)$: vecteur de décision ; $n(i)$: nombre de pompes en fonctionnement du pas du temps (i) ; t_f : temps de fonctionnement, il correspond à l'horizon de pompage. Dans notre cas d'étude, nous avons $t_f = 24$ heures.

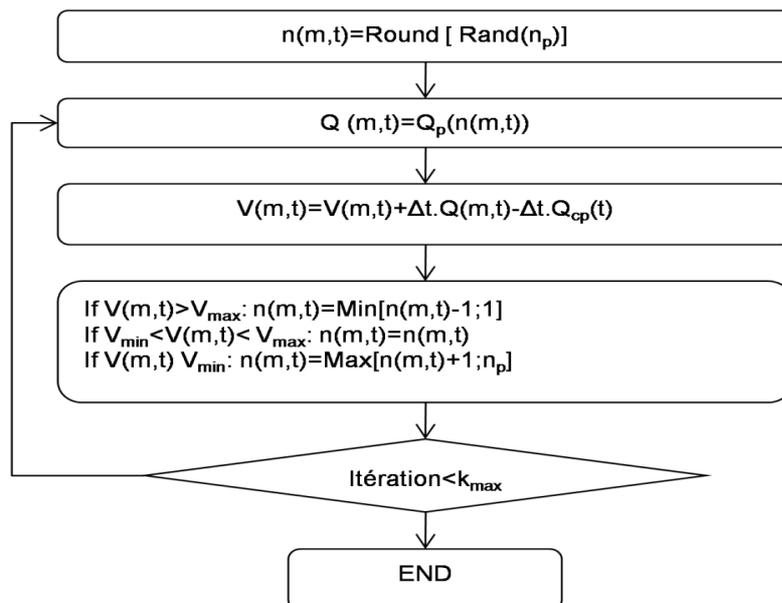
Généralement, dans les AG ordinaire la génération de la population initiale $G(0)$ se fait d'une manière aléatoire.

$$G(0) = \{N(1), N(2), \dots, N(m_{\max})\} \quad (7.9)$$

Dans notre modèle AG, nous avons développé un générateur de solutions valides afin d'améliorer la performance du modèle.

ii. Générateur des individus valides pour la population initiale

Le générateur aléatoire de la population initiale génère parfois des populations initiales qui ne contiennent aucun individu valide qui respecte les contraintes d'optimisation, ce qui provoque des problèmes de calcul et augmente le temps de calcul d'une façon considérable. Pour pallier à ce problème nous avons intégré un taux de 25% de population initiale constituée d'individus valides (admissibles) générés par un algorithme que nous avons conçu. L'algorithme consiste à générer une population initiale aléatoire. Ensuite, un processus de calcul itératif est lancé, à chaque itération, le débit de pompage est calculé en fonction du nombre de pompes en fonctionnement. Ensuite, ce nombre de pompes en fonctionnement est modifié en fonction du volume d'eau dans le réservoir (*figure 7.9*). Ce processus est répété k_{\max} fois, et à la fin du calcul une génération d'individus valides est créée. Cette population valide est ajoutée à la population générée aléatoirement pour former la population initiale de l'AG.



m : 1 à m_{\max} et $t=1 : t_f$; m_{\max} : taille de la population ; et t_f : temps de fonctionnement ; V : volume d'eau dans le château d'eau ; Q : débit de pompage ; Q_{cp} : débit de consommation prévue par le modèle RNA (demande en eau) ; k_{\max} : nombre d'itération de l'algorithme.

Figure 7-9 : structure du générateur des individus valides

7.2.2.2 Evaluation des individus

La fonction fitness du modèle représente l'énergie consommée par l'ensemble des pompes sur l'horizon d'optimisation t_f . Elle est calculée pour chaque individu m de la population initiale par la relation suivante :

$$E(m) = \sum_{t=1}^{t_f} \frac{\rho g H(m, t) Q_p(m, t)}{36000 \cdot \eta(m, t)} \text{ avec } m \in [1, m_{\max}] \quad (7.10)$$

avec, m_{\max} : taille de la population,

Ensuite, la probabilité de sélection de chaque individu est calculée par la relation suivante :

$$P(m) = \frac{\frac{1}{E(m)}}{\sum_{m=1}^{m_{\max}} \frac{1}{E(m)}} \quad (7.11)$$

$P(m)$: probabilité de sélection de l'individu m .

7.2.2.3 Vérification des contraintes d'optimisation

Le modèle d'optimisation AG sanctionne les individus qui ne respectent pas les contraintes d'optimisation en les écartant de l'opération de sélection. En effet, le volume d'eau dans le réservoir engendré par chaque vecteur de décision doit respecter l'équation suivante :

$$t \in [1, t_f] \text{ et } m \in [1, m_{\max}] : V_{\min} < V(m, t) < V_{\max} \quad (7.12)$$

Le calcul de l'évolution de la réserve d'eau dans le réservoir, nécessite d'abord la détermination de la matrice du débit de pompage, qui est donnée par la formule 7.13 :

$$Q_p(m, t) = Q_p(n(m, t)) \quad (7.13)$$

$Q_p(m, t)$: matrice de débit de pompage et $Q_p(n(m, t))$: débit de pompage pour $n(m, t)$ pompes en marche.

En se basant sur le principe de continuité, le volume d'eau à chaque pas de temps est donné comme suit :

$$V(m, t) = V(m, t - 1) + \Delta t \cdot Q_p(m, t) - \Delta t \cdot Q_c(t) \quad (7.14)$$

En fin, on sanctionne les individus qui ne respectent pas les contraintes d'optimisation en leurs attribuant une probabilité nulle (équation 7.15). Ensuite, on recalcule la nouvelle probabilité P_n de chaque individu (équation 7.16).

$$\begin{cases} V_{\min} < V(m, t) < V_{\max} & : P_n(m) = P(m) \\ \text{Si non} & : P_n(m) = 0 \\ \text{avec } m \in [1, m_{\max}] \text{ et } t \in [1, t_f] \end{cases} \quad (7.15)$$

$$P_n(m) = \frac{P_n(m)}{\sum_{m=1}^{m_{\max}} P_n(m)} \times 100 \quad (7.16)$$

$P_n(m)$: nouvelle probabilité de sélection de l'individu m .

7.2.2.4 Sélection des parents

La sélection des parents parmi la population initiale se fait en fonction de la nouvelle probabilité de sélection $P_n(m)$ pour chaque vecteur de décision. Le principe de calcul consiste d'abord à créer m_{\max} intervalles de probabilité cumulée pour chaque individu.

$$[0, P_c(1), P_c(2), \dots, P_c(m_{\max} - 1), P_c(m_{\max})] \quad (7.17)$$

Ensuite, on fait un tirage aléatoire des rangs des parents (r_p), il est évident que les individus qui possèdent une bonne performance ont une forte probabilité ce qui augmente leurs chance de sélection.

$$\text{si } r_p = (\text{rand. } 100) \in [P_c(m), P_c(m + 1)] \rightarrow n_{\text{parent}}(m, t) = n(m + 1) \quad (7.18)$$

n_{parent} : individu parent

7.2.2.5 Croisement des couples

Dans cette étape, on forme $(m_{\max}/2)$ couples de parents, qu'on va croiser et ainsi constituer m_f individus appelés enfants (génération d'enfants). En effet, pour chaque couple de parents on génère un rang de croisement $t_c(m)$ défini aléatoirement et qui appartient à l'intervalle $[1, t_f]$. Ensuite, on fait un échange des composantes entre deux parents de chaque couple comme le montre la formulation suivante :

$$\begin{cases} t \in [1, t_c] : n_{\text{crois}}(m - 1, t) = n_{\text{parent}}(m - 1, t) \\ t \in [1, t_c] : n_{\text{crois}}(m, t) = n_{\text{parent}}(m, t) \\ t \in [t_c, t_f] : n_{\text{crois}}(m - 1, t) = n_{\text{parent}}(m, t) \\ t \in [t_c, t_f] : n_{\text{crois}}(m, t) = n_{\text{parent}}(m - 1, t) \end{cases} \quad (7.19)$$

n_{crois} : individu issu après croisement.

7.2.2.6 Opération de mutation

L'opération de mutation consiste à générer pour chaque individu (m) de la population enfant, un nombre aléatoire $P_{\text{mut}}(m)$ appartenant à l'intervalle $[0, 100]$. Si ce nombre $P_{\text{mut}}(m)$ est supérieur à un seuil de mutation $P_{\text{mut.max}}$ qu'on a fixé auparavant l'opération n'a pas lieu, sinon on génère aléatoirement un nombre entier de l'intervalle $[1, t_f]$ pour sélectionner la composante t_{mut} à muter.

Une fois cette composante est choisie, on la remplace par une autre composante choisie également au hasard à la seule condition qu'elle appartient à l'intervalle des gènes, c'est-à-dire il faut qu'elle soit limitée dans l'intervalle des entier allant de 0 à n_p (n_p est le nombre de pompes de la station de pompage).

Après l'opération de mutation, on a une nouvelle génération, pour laquelle on recalcule pour chaque individu : la fonction de Fitness, le débit de pompage et le volume d'eau dans le réservoir, et on sanctionne les individus qui ne respectent pas les contraintes d'optimisation. Ensuite, on choisit la meilleure solution, comme nous l'avons déjà fait précédemment.

Puis, on passe au critère de remplacement, qui consiste à comparer la meilleure solution de la génération initiale et celle de la nouvelle génération. Si la meilleure solution se trouve dans la nouvelle génération on remplace la population initiale par la nouvelle génération, sinon on garde la population initiale et on refait les différentes opérations d'évolution j_{max} fois. La figure (7-10) résume ces différentes étapes de calcul du modèle AG.

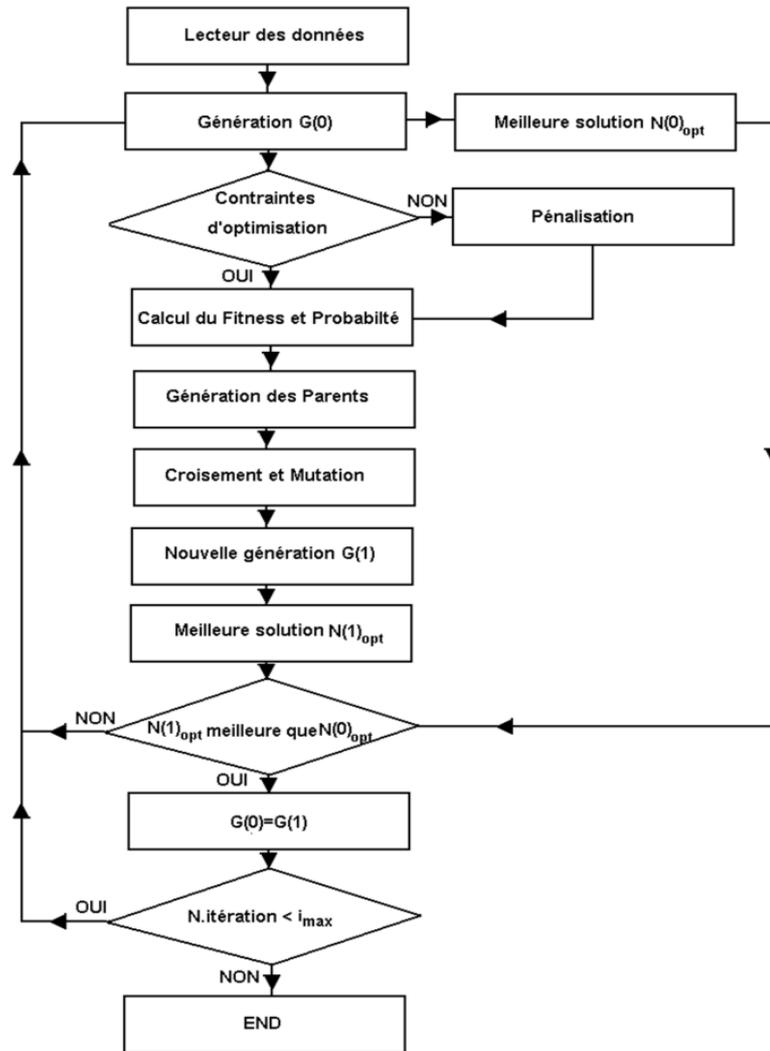


Figure 7-10 : organigramme du modèle d'optimisation par les algorithmes génétiques

7.2.2.7 Génération des résultats

A la fin du calcul le modèle génère le planning de fonctionnement optimal des pompes (vecteur de décision optimal), et l'énergie consommée par l'ensemble de pompes selon le planning optimal. Le modèle génère aussi à chaque pas de temps de l'horizon d'optimisation les variables suivantes :

- Débit de fonctionnement et débit unitaire,
- Pression de fonctionnement,
- Le volume d'eau dans le réservoir,
- Le rendement de fonctionnement,

- La puissance hydraulique et absorbée,
- L'énergie consommée.

7.3 Résultats des scénarii de pompage

7.3.1 Prévision de la demande en eau

Le modèle RNA adopté (RN1 et RN2) nécessite de lui fournir les valeurs des neurones de la couche d'entrée pour qu'il puisse fournir la demande en eau horaire sur l'horizon d'optimisation. Après exécution du modèle, nous avons les résultats de prévision de la demande en eau sur la semaine du 05/08/2016 au 11/08/2016 (*figure 7-11*). Cette dernière montre que la demande réelle et celle prévue sont pratiquement identiques.

Les critères de qualité de prévision confirment la performance des 2 variantes, avec un coefficient de corrélation R égal à 0,91 et 0,92 pour les variantes RN1 et RN2 respectivement, et une moyenne des erreurs absolue MAPE égale à 6,11 et 6,06 pour RN1 et RN2 respectivement.

Les résultats montrent que la demande prévue par la variante RN1 est légèrement inférieure à la demande réelle, tandis que celle fournie par la variante RN2 est légèrement supérieure à la demande réelle. Dans les paragraphes suivants, nous allons étudier l'impact de ce fait sur l'optimisation énergétique et sur le fonctionnement hydraulique de chaque variante.

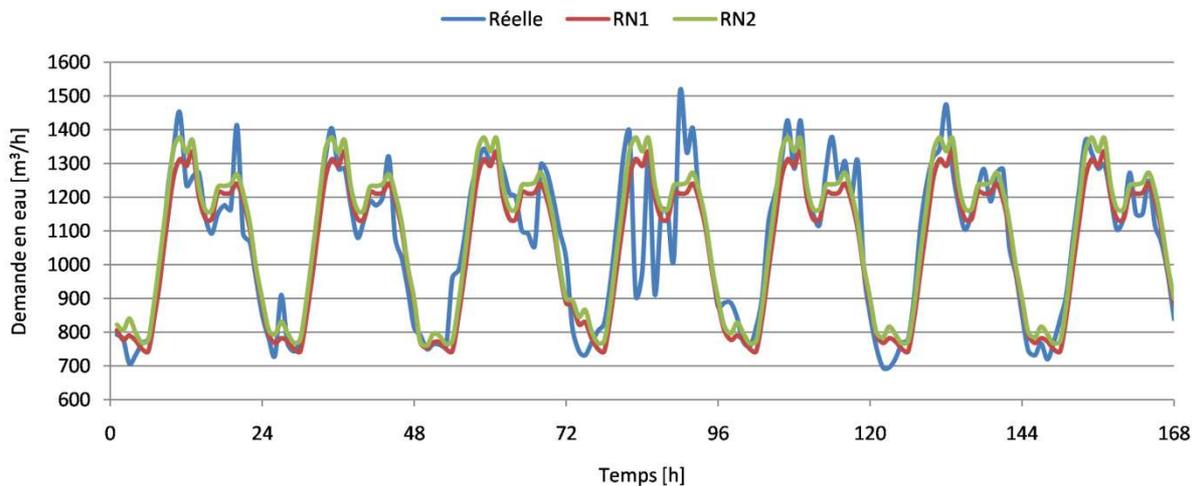


Figure 7-11 : demande en eau réelle et prévue par le modèle RNA

7.3.2 Evolution de la réserve d'eau des différents plannings

L'application des modèles développés (RV, RVP, RNAG1 et RNAG2) a généré quatre plannings de pompage. La figure (7-12) représente ces plannings de pompage outre le planning employé par les services de l'eau SEAAL).

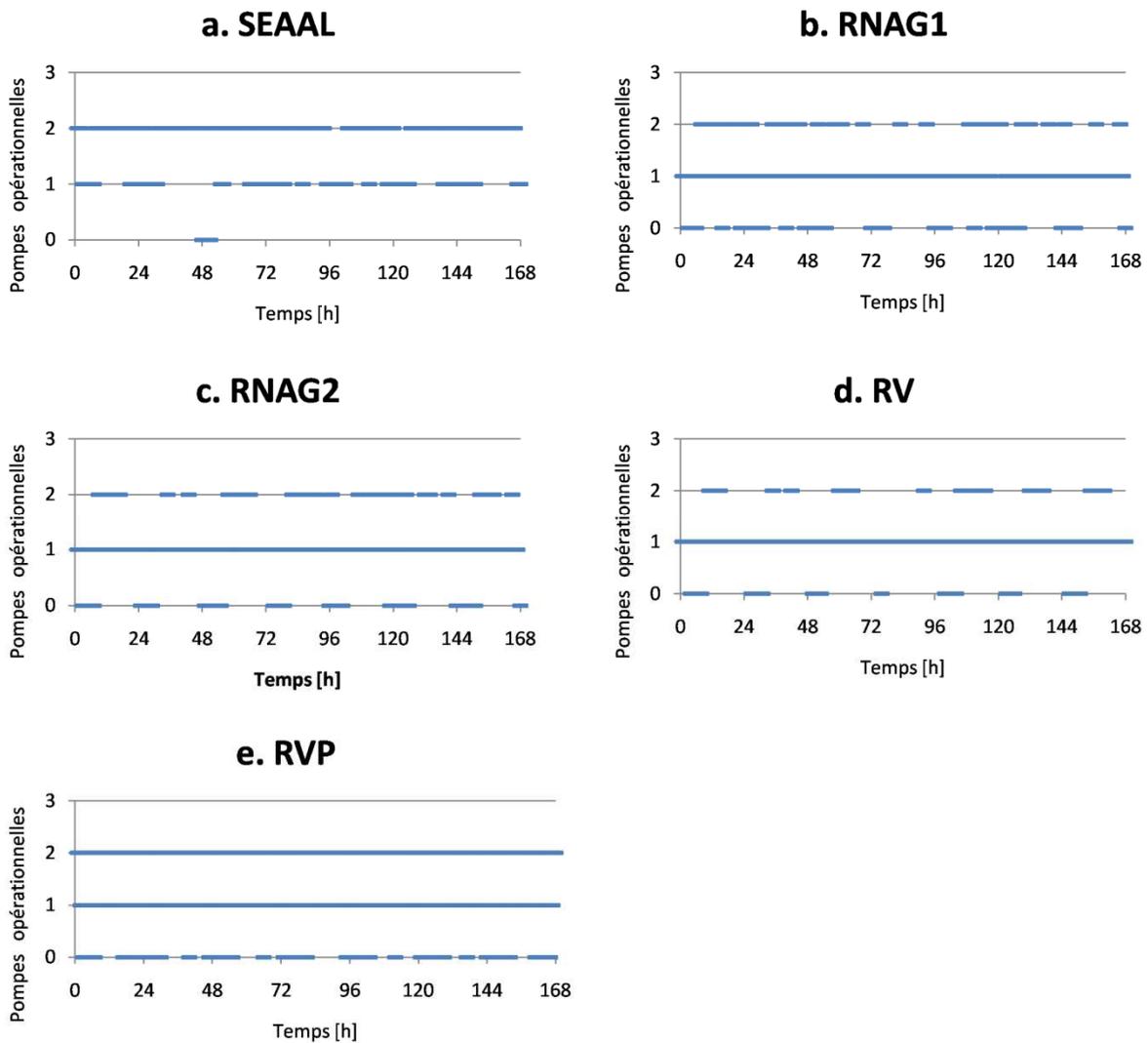


Figure 7-12 : plannings de pompe des différents scénarii étudiés

Le premier critère que les cinq (05) plannings de pompage doivent garantir c'est le respect des seuils limites dans le réservoir de distribution, car tout dépassement des seuils limites signifie un dysfonctionnement hydraulique du système de pompage. La figure (7-13) montre l'évolution de la réserve d'eau pour les quatre plannings de pompage.

Pour modèle d'optimisation RNAG, avec ces deux variantes : le RNAG1 dont le modèle de prévision est le RN1 et le RNAG2 dont le modèle de prévision est le RN2 ont enregistré 19 et 17 violations des seuils limites successivement, Ce résultat est considéré comme positif. En effet, en dépit de la variation exceptionnelle de la demande en eau à certaines heures le modèle a réussi à respecter les seuils limites avec un taux de violation des seuils limites qui n'a pas dépassé les 11,31 % sur toute la période d'étude. (*figure 7-13b et 7-13c*), ceci est le obtenu grâce à deux facteurs :

- la prise en comptes des contraintes d'optimisation dans l'élaboration du planning,
- des bons résultats de prévision de la demande fournis par le modèle de prévision.

Le modèle de régulation multi-volumes (RV) a enregistré 9 violations (*figure 7-13d*). Ce qui correspond à un taux de violation des seuils d'environ 5.36 %. Cette Bonne performance du

modèle RV par rapport au respect des seuils limites est résultat du mode de fonctionnement en temps réel du modèle, et de l'utilisation des volumes de commande calculés par les formules proposées précédemment (chapitre 1).

Cependant, le modèle de régulation progressif (RVP) a enregistré 73 violations de seuil limite (*figure 7-13d*). Ce qui correspond à un taux de violations des seuils égal à 43,45 %. Cette contre performance est causée par la mauvaise définition du volume d'arrêt. Le calcul des volumes de commande via les formules (Equations 1.22 et 1.23) a donné un volume d'arrêt de $V_{arr} = 188,2 \text{ m}^3/\text{h}$ et un volume de démarrage de $V_{dem} = 1411,6 \text{ m}^3/\text{h}$. Ce qui n'est pas faisable car le volume d'arrêt devrait être supérieur au volume de démarrage. Ce qui nous a poussé à prendre $V_{arr} = 1420 \text{ m}^3$ pour qu'il soit supérieur à V_{dem} .

En ce qui concerne le planning de la SEAAL, la figure (7-13a) montre que le volume d'eau a tout le temps dépassé le volume maximal du réservoir (157 violations) correspondant à un taux de violation des seuils égal à 93.45 %. Ceci peut être dû à plusieurs raisons : pour avoir une pression de distribution importante, pour cause de fuite interne, ...etc.

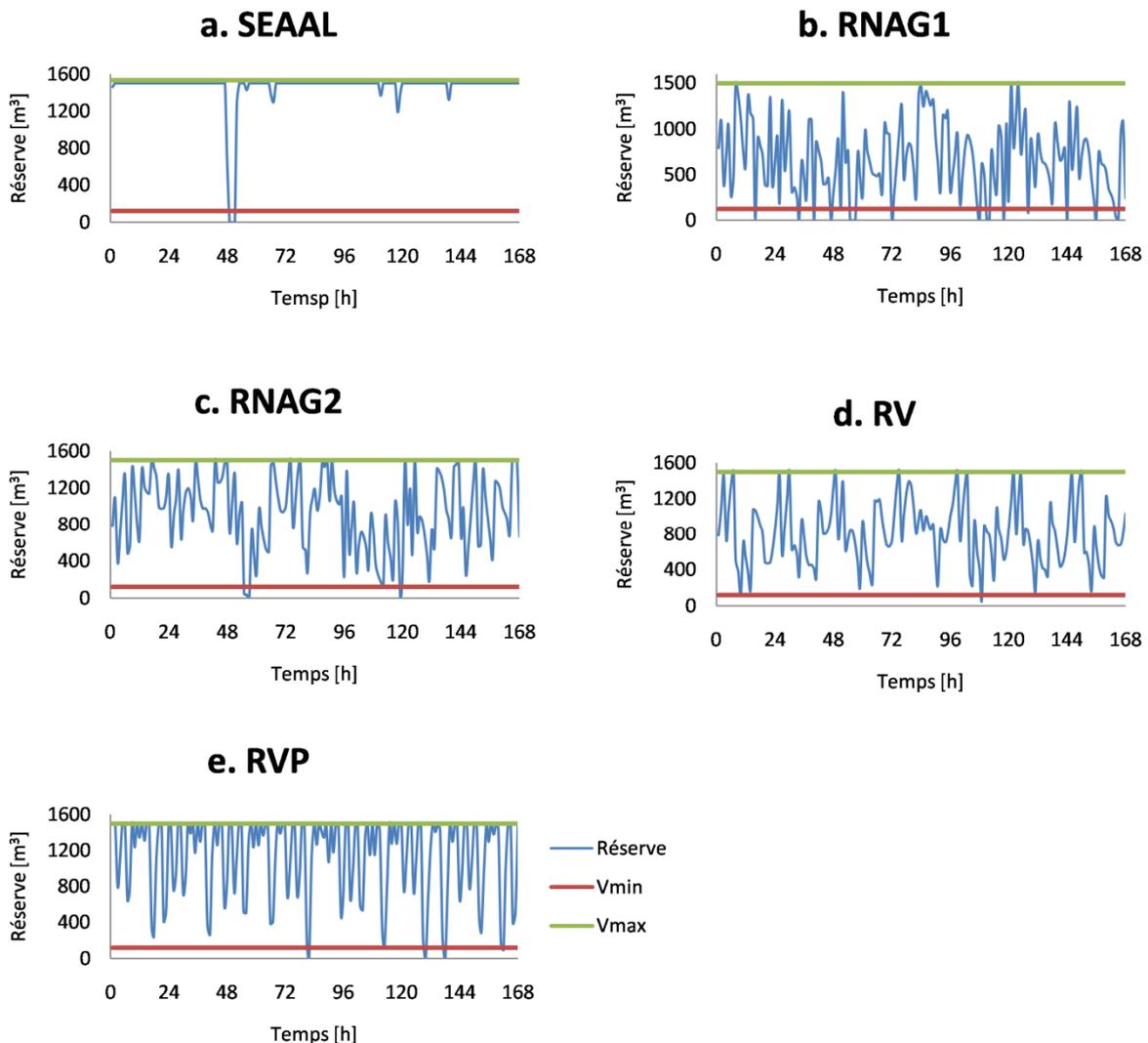


Figure 7-13 : évolution de la réserve d'eau dans le château d'eau

7.3.3 Consommation énergétique des différents plannings

Les résultats de la consommation énergétique (*figure 7-14*) montrent que la variante RNAG1 du modèle d'optimisation s'est distingué par la plus faible consommation énergétique, avec une consommation d'environ de 20 243.09 kWh suivi par le modèle RV avec une consommation de 20 550,00 kWh. Ensuite, c'est la variante RNAG2 avec une consommation d'environ 20 742.78 kWh. Après, c'est le modèle RVP avec une consommation de 24 542.86 kWh, et en dernière position c'est le planning de la SEAAL avec une consommation de 32 797.96 kWh.

Ces résultats confirment que le modèle RNAG outre sa performance dans le respect des seuils limites, il a réussi également à établir le meilleur planning de pompage en terme de consommation énergétique (variante RNAG1), où il a permis d'économiser 38,3 % d'énergie par rapport au planning de la SEAAL.

Sachant que le modèle RNAG aurait pu présenter une consommation énergétique plus optimale dans le cas d'une autre situation, car dans notre cas, le modèle énergétique est limité par les caractéristiques spécifiques de la station de pompage où le débit unitaire de pompage ($Q_p(1) = 1080,3 \text{ m}^3/\text{h}$) est relativement grand par rapport au volume du château d'eau (1500 m^3), ce qui fait que la solution optimale est plus imposée par les contraintes d'optimisation que par le processus de minimisation de la fonction objectif.

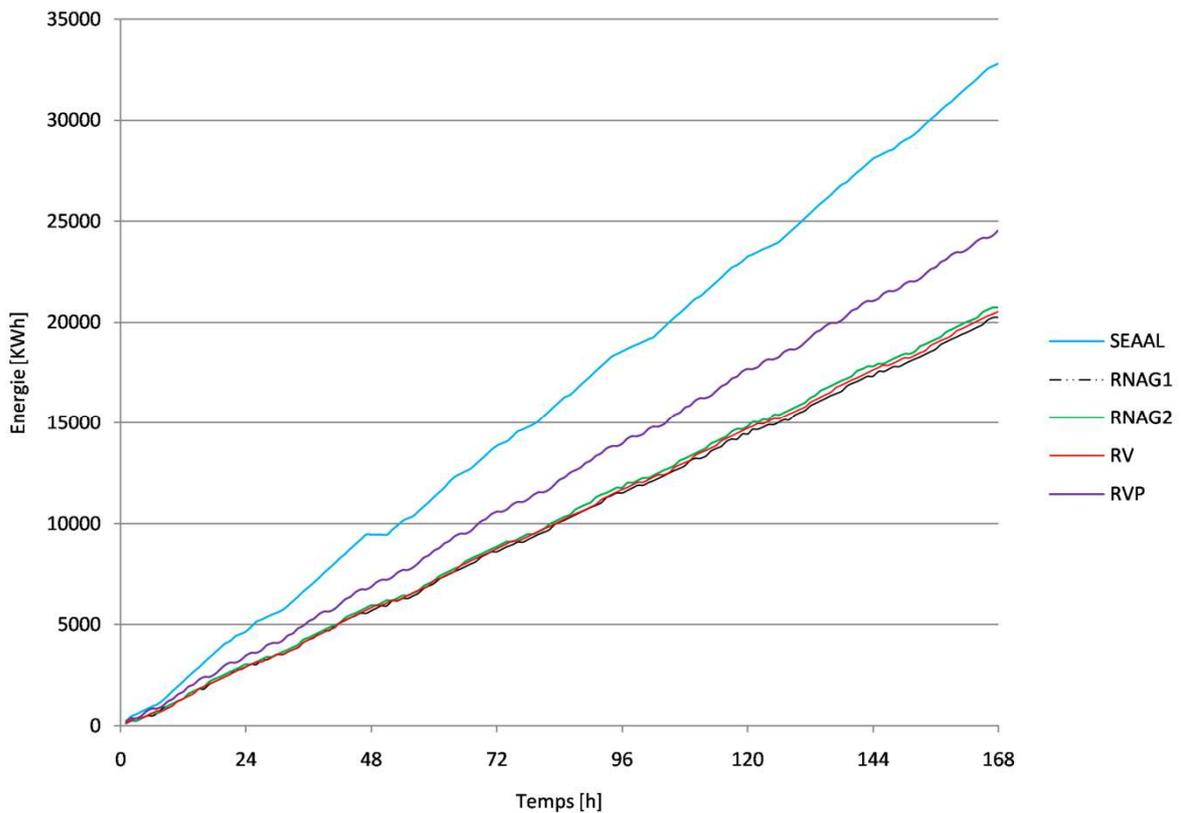


Figure 7-14 : consommation énergétique des différents plannings de pompage

7.3.4 Indicateurs de performances énergétiques IPE

Le diagnostic énergétique se fait par étapes, tout d'abord dans la première étape une évaluation générale de la consommation énergétique est garantie par l'indicateur global d'énergie IGE. Dans la deuxième étape, l'indicateur global de conception IGC et l'indicateur global de fonctionnement IGF donne une évaluation énergétique générale des paramètres de conception et de fonctionnement.

En troisième étape, pour la partie conception les indicateurs de la hauteur géométrique IHG et de la résistance hydraulique IRH permettent d'évaluer la hauteur du château d'eau et les autres paramètres de conception (diamètre, longueur, ...etc) séparément.

Alors que pour la partie fonctionnement, les indicateurs de volume IV, de pression IH et de rendement de pompage IR estiment la performance énergétique de chacun de ces paramètres de fonctionnement.

En dernière étape, pour approfondir l'analyse de la consommation énergétique. Les indicateurs de diamètre de conduite IDA et IDR (aspiration et refoulement), de longueur de conduite ILA et ILR (aspiration et refoulement), des forces de viscosité IFA et IFR (aspiration et refoulement) et des pertes de charge singulière IPS permettent de présenter une évaluation de chaque paramètre de la résistance hydraulique du système de pompage.

7.3.4.1 Evaluation énergétique globale

L'indicateurs global d'énergie (IGE) des cinq scénarii de pompage (tableau 7.4) montrent que le modèle d'optimisation RNAG (RNAG1 et RNAG2) et le modèle de régulation multivolume RV présentent les meilleurs résultats d'optimisation d'énergie avec un indicateur global d'énergie relativement bon égal à 0,67 0,65 et 0,66 pour les planning fourni par RNAG1, RNAG2 et RV respectivement, avec des pertes énergétique qui ne dépassent pas les 36 % de l'énergie totale consommée, ce qui représente une faible perte énergétique si on la compare avec les pertes énergétiques enregistrées par le pompage de la SEAAL qui est de 58,94 % (PE = 58,94 %).

En deuxième position, nous avons le modèle de régulation progressif RVP qui a obtenu un indicateurs égal à 0,55, et en dernière position, nous avons le planning de pompage de la SEAAL avec un indicateurs global d'énergie de IGE = 0,41, qui est le moins performant énergiquement. Si on compare cette consommation avec la consommation énergétique du fonctionnement optimisé par le modèle RNAG1 on a une différence de 12 554,87 KWh sur la période d'étude, ce qui représente une surconsommation énergétique énorme.

Tableau 7.4 : indicateurs de performance énergétique globale

	SEAAL	RNAG1	RNAG2	RV	RVP
DE [KWh]	19 330,98	6 776,11	7 275,80	7 083,02	11 075,88
PE [%]	58,94	33,47	35,08	34,47	45,13
IGE	0,41	0,67	0,65	0,66	0,55

7.3.4.2 Evaluation énergétique des paramètres de conception

Nous commençons notre analyse énergétique par l'influence des différents paramètres de conception sur la consommation énergétique. Cette étape est commune pour les cinq scénarii de pompage, car elle est indépendante des variables de fonctionnement, et elle dépend uniquement des paramètres de conception tels que le diamètre et la longueur des conduites, la hauteur géométrique du système, ...etc.

Les indicateurs de performance énergétique de conception montrent que le dimensionnement du système de pompage est bon, comme le montre l'indicateur global de conception de 0,77 (IGC = 0,77) causant une perte énergétique de 4 124,58 KWh ce qui représente 23,45 % de l'énergie optimale (PEC = 23,45 %).

Tableau 7.5 : évaluation globale de la conception

IPE	Valeur
IGC	0,77
DEC [KWh]	4124,58
PEC [%]	23,45

Le taux de la hauteur géométrique (THG = 96,90 %) montre que la hauteur géométrique représente le paramètre de conception le plus déterminant de la consommation énergétique. Cette hauteur géométrique est évaluée à l'aide de l'indicateur de hauteur géométrique IHG qui égal à 0,79 ce qui signifie que le dimensionnement de la hauteur du réservoir est correct.

Tableau 7.6 : évaluation de la hauteur géométrique

IPE	Valeur
IHG	0,79
THG [%]	96,90

Les paramètres de conception relatifs aux pertes de charge (tableau 7.7) sont évalués via l'indicateur de la résistance hydraulique (IRH = 0,01), ce qui montre que d'une façon générale les paramètres relatif aux pertes de charge ont été très mal dimensionnés.

Cependant, ce très faible indicateur a perdu de son influence sur l'indicateur global de conception par le fait que le taux des pertes de charge est très faible (TPC = 3,10 %), car le TPC est le coefficient de pondération du IRH pour le calcul de l'indicateur global de conception IGC.

La mauvaise performance des paramètres de résistance hydraulique est expliquée par : les fortes pertes de charge singulière (IPS = 0,12), la grande longueur de refoulement (ILR = 0,33), et le faible diamètre de refoulement (IDR = 0,29). La longueur de la conduite d'aspiration est également importante avec un indicateur ILA = 0,52. La seule exception vient du diamètre de la conduite d'aspiration qui présente un excellent indicateur (IDA = 1,03).

Tableau 7.7 : évaluation de la résistance hydraulique

IPE	Valeur
IRH	0,01
TPC [%]	3,10
ILA	0,52
ILR	0,33
IDA	1,03
IDR	0,29
IFA	0,98
IFR	0,97
IPS	0,12

7.3.4.3 Evaluation énergétique des variables de fonctionnement

Dans cette partie, nous présentons l'influence des différentes variables de fonctionnement sur la consommation énergétique de la station de pompage. En effet, la consommation énergétique dépend de trois variables de fonctionnement (volume, pression et rendement de pompage) qui sont à la fois interdépendantes entre elles et parfois contradictoires. Un fonctionnement optimal d'un point de vue énergétique nécessite que les trois variables aient des valeurs optimales, seulement il est pratiquement rare de tomber sur ce genre de situations idéales, car souvent lorsque l'on veut faire fonctionner les pompes à un rendement optimal par exemple ceci influence négativement les deux autres variables.

La solution est de trouver un compromis entre les trois variables de fonctionnement. Comme le montre l'indicateur global de fonctionnement (tableau 7.8), Le modèle d'optimisation de RNAG avec ses deux variantes et le modèle RV ont été relativement performants dans l'optimisation énergétique ($IGF > 0,85$), alors que le modèle RVP a été moins performant avec un $IGF = 0,72$.

Ce gain énergétique été réalisée grâce à des techniques de gestion permettant une consommation énergétique optimale. Qui consistent à manipuler les trois les variables de fonctionnement dans le modèle d'optimisation RNAG, et à adapter le débit de pompage pour les modèles de régulation RV, RVP.

Tableau 7.8 : indicateurs de performance énergétique de fonctionnement

	SEAAL	RNAG1	RNAG2	RV	RVP
IGF	0,54	0,87	0,85	0,86	0,72
DE.f [KWh]	15 206,40	2 651,53	3 151,22	2 958,43	6 951,30
PEF [%]	46,36	13,10	15,19	14,40	28,32
IV	0,66	1,01	0,99	0,99	0,84
IH	0,88	0,99	0,98	0,99	0,96
IR	0,93	0,87	0,88	0,88	0,89

i. Evaluation du fonctionnement de l’outil d’optimisation (RNAG)

Variante RNAG1 : Le tableau (7.8) montre que planning proposé par la variante RNAG1 présente le meilleur résultat d’optimisation énergétique avec un indicateur global de fonctionnement $IGF = 0,87$, et un taux de pertes énergétique de fonctionnement $PEF = 13,10 \%$.

Cette performance énergétique repose sur le meilleur compromis des trois variables de fonctionnement, et en particulier grâce à la réduction importante du volume de pompage comme le montre l’indicateur de volume de pompage $IV = 1,01$, ce qui signifie que le volume de pompage a été inférieur au volume optimal (*figure 7-12*). Cette réduction relativement importante du volume de pompage a été engendrée par les résultats de prévision fournis par le modèle de prévision RN1 dont la demande prévue est légèrement inférieure à celle du modèle RN2 et à celle de la demande réelle. Cependant, cette réduction du volume de pompage a coûté à la variante RNAG1 deux violations aux seuils limite en plus par rapport à la variante RNAG2.

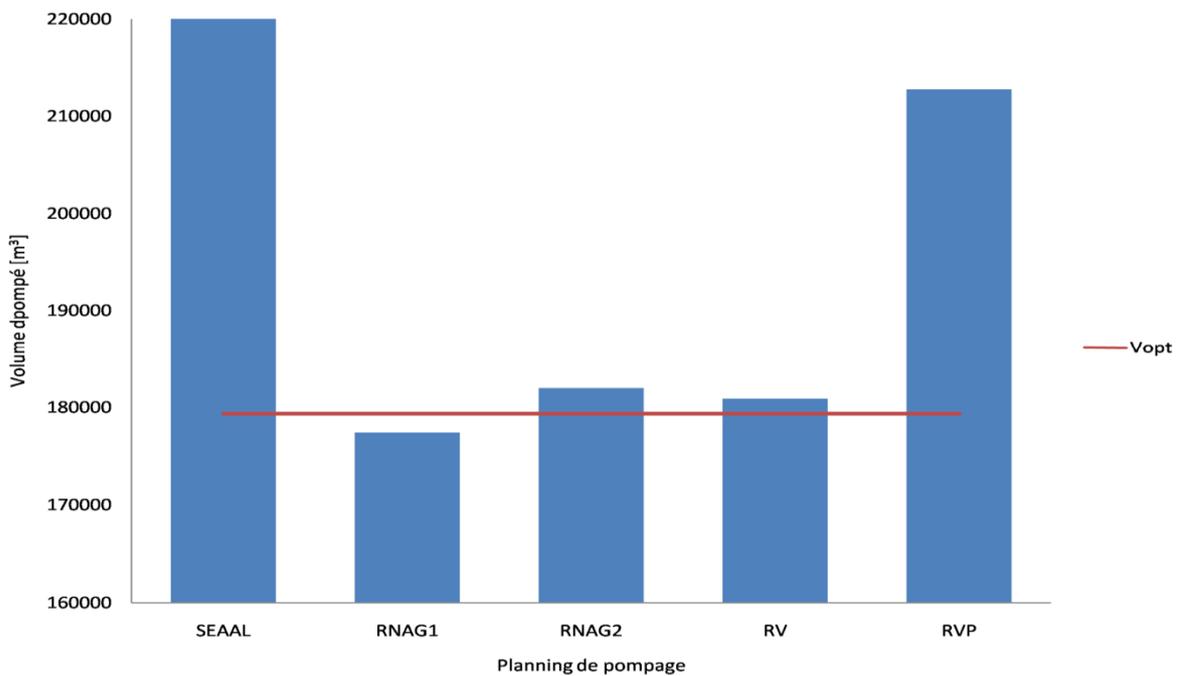


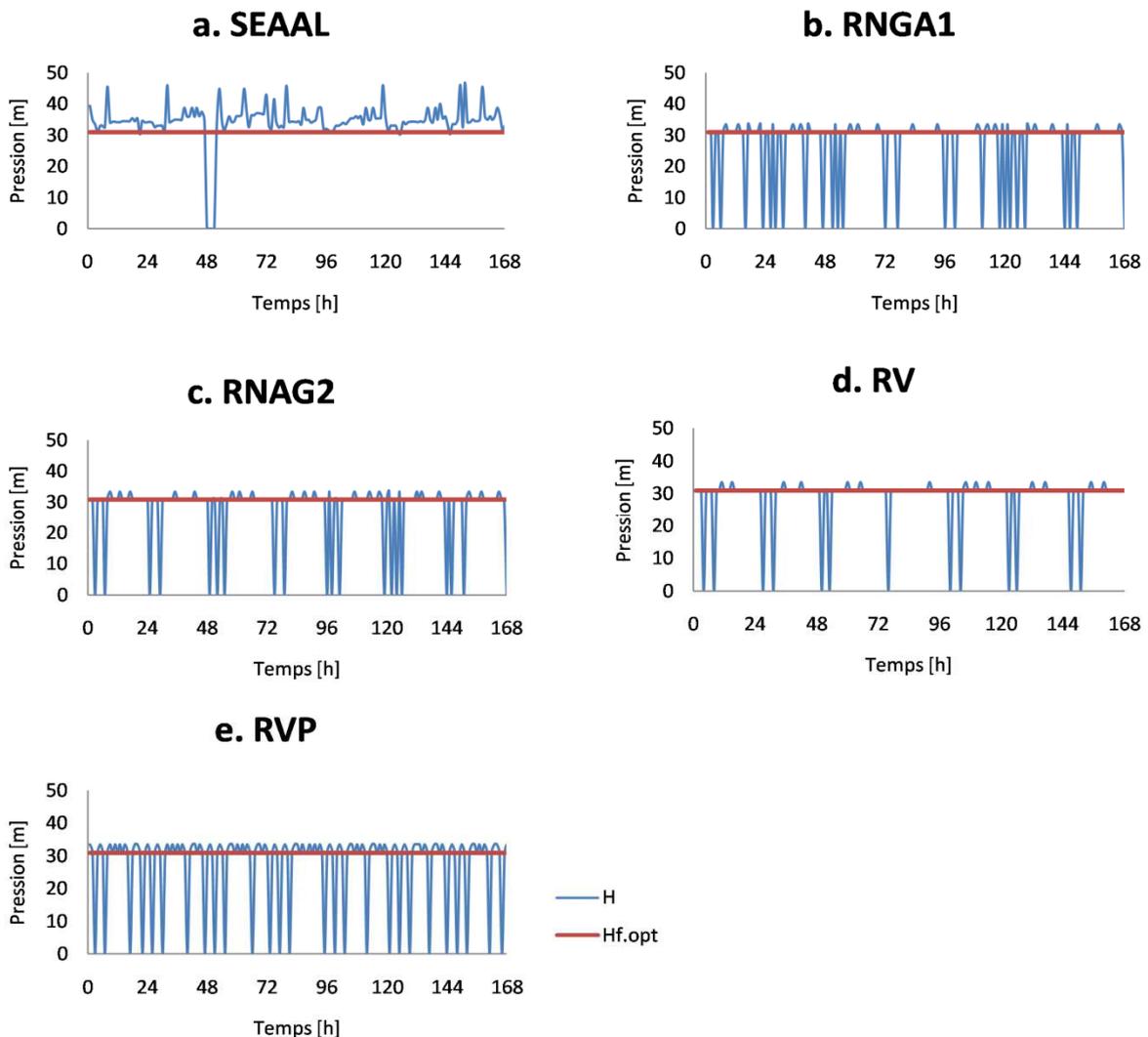
Figure 7-15 : volumes d’eau pompés des différents plannings

L’indicateur de pression de pompage ($IH = 0,99$), qui reflète en réalité le degré des pertes de charge dans l’installation montre que le modèle d’optimisation a permis de réduire les pertes d’énergie dues aux pertes de charge à un niveau très bas (*figure 7-16b*).

L’indicateur de rendement de pompage ($IR = 0,87$) est le plus faible des trois indicateurs de performance, ce qui indique que le point de fonctionnement ne correspond pas parfaitement au rendement maximal des pompes, montrant ainsi que les pompes ont été mal choisies (*figure 7-17b*).

Variante RNAG2 : La performance énergétique de cette variante est classée troisième après le RNAG1 et le RV avec un indicateur IGF = 0,85. Ceci est le résultat de la demande en eau prévue légèrement supérieure à la demande réelle, ce qui a augmenté le volume de pompage comme le montre la *figure 7-15* et comme le confirme l'indicateur de volume de pompage égal à 0,99.

Pour les autres variables de fonctionnement (pression et rendement de pompage), les résultats se ressemblent pratiquement à ceux de la variante RNAG1.



Figures 7-16 : évolution de la pression de pompage

ii. Evaluation du fonctionnement des modèles de régulation RV et RVP

Pour les modèles de régulation basés sur le volume d'eau dans le château d'eau, le meilleur résultat d'optimisation a été obtenu par le programme RV (IGF = 0,86), le modèle a permis d'obtenir un volume de pompage presque optimal (IV = 0,99), idem pour la pression où l'indicateur de pression de pompage IH = 0,99 c'est-à-dire que la pression fournie par les pompes était presque celle demandée. Pour le rendement de pompage, l'indicateur IR = 0,88, ce qui représente un bon rendement de fonctionnement des pompes.

La bonne performance du modèle RV est le résultat de trois facteurs :

- Bon ajustement des volumes de commande via les formules développées ;
- Principe de fonctionnement en temps réel ;
- Particularité de la station de pompage étudiée qui fait que le planning de pompage optimal et celui admissible sont très proches.

En quatrième position, nous avons les modèles RVP qui est moins performant par rapport au premier modèle de régulation, avec un indicateur global de fonctionnement $IGF = 0,72$. Cette contre performance par rapport aux autres modèles est le résultat de l'inadéquation des volumes de commande avec les paramètres de la station, provoquant ainsi un dysfonctionnement de volume de pompage dont l'indicateur $IV = 0,83$. Cette perte énergétique à cause de volume d'eau pompé est engendrée aussi par le principe du modèle qui se base sur l'arrêt progressif des pompes si le volume d'eau dans la réserve dépasse le volume d'arrêt, ce qui explique également le nombre de dépassements élevé du volume maximal de la réserve d'eau.

D'une façon générale, l'inconvénient des modèles de régulation est qu'ils sont basés sur le volume de pompage uniquement, ce qui réduit la marge de manœuvre des modèles pour avoir des bons résultats.

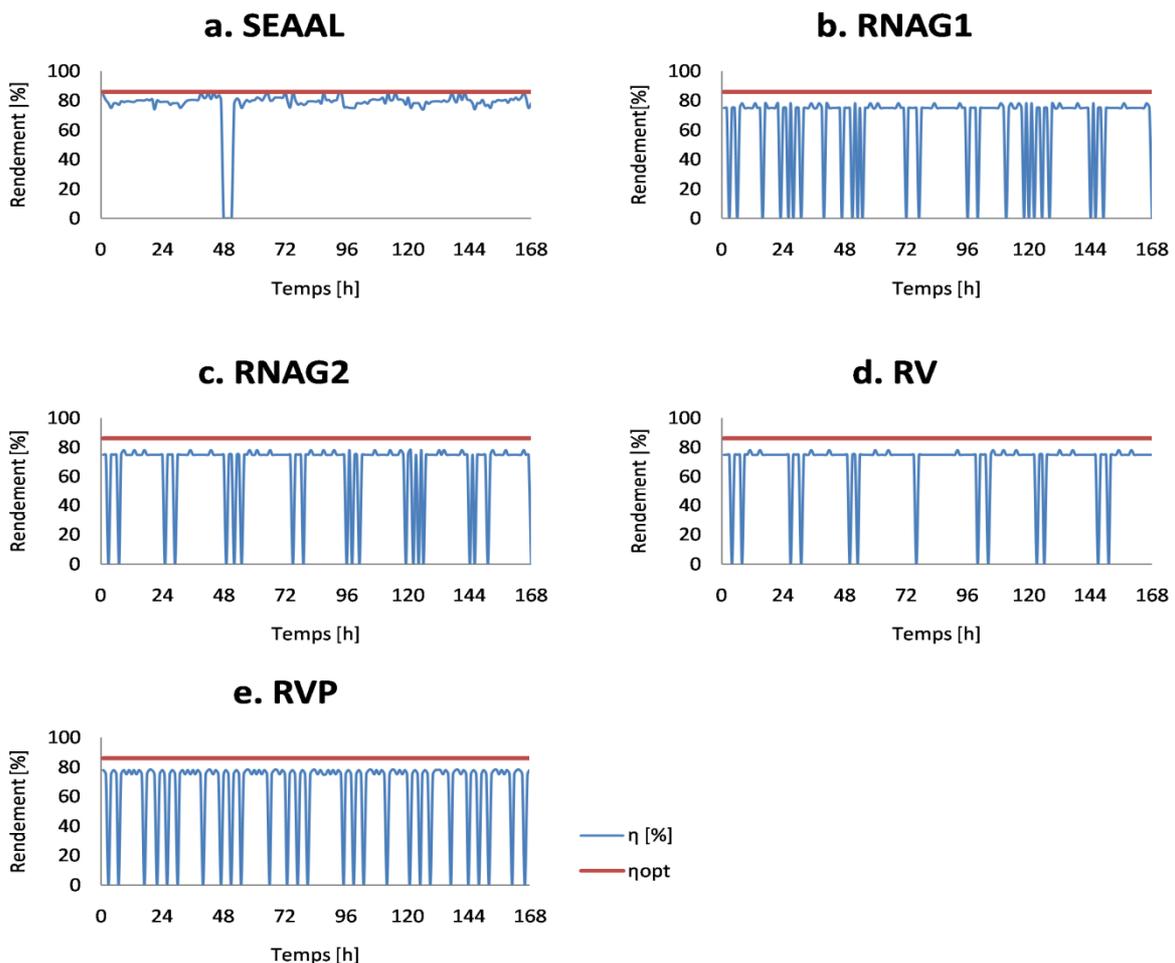


Figure 7-17 : évolution du rendement de pompage pour chaque planning

iii. Evaluation du planning de gestion de la SEAAL

Bien que le type de pompage utilisé par la SEAAL utilise une méthode de régulation de débit, leur planning est le moins performant avec un indicateur global de fonctionnement de $IGF = 0,54$. Ce faible indicateur de fonctionnement est influencé par la mauvaise performance de la variable volume d'eau pompé dont l'indicateur est $IV = 0,66$, ce qui explique que le planning engendre une importante perte énergétique à cause de ce volume d'eau en excès qui dépasse largement la demande. Ce dysfonctionnement pourrait être expliqué par, soit :

- Les sondes de niveau dans le château d'eau sont mal ajustées ou défectueuses,
- Présence d'une fuite interne dans le château d'eau.
- Une gestion volontaire d'avoir un niveau d'eau maximal afin d'augmenter la pression de distribution

Le volume de pompage élevé et la variation de la hauteur géométrique créée par la variation du niveau d'eau dans le réservoir d'aspiration modifient la courbe caractéristique de la conduite, ce qui déplace le point de fonctionnement du système de pompage, créant ainsi des pertes énergétiques supplémentaires comme le confirme l'indicateur de pression de pompage $IH = 0,88$ qui est le plus faible indicateurs de pression de tous les plannings de pompage.

7.3.5 Représentation arborescente

Une représentation arborescente des cinq plannings permet un diagnostic énergétique rapide et précis du fonctionnement de chaque planning et de la conception de la station:

Planning SEAAL (figure 7-18) : Surconsommation énergétique très importante ($IGE = 0,41$ faible) engendré principalement par le mauvais planning de pompage, et bien précisément le volume de pompage qui dépasse largement la demande ($IV = 0,66$). Pour les paramètres de conception, le dysfonctionnement énergétique crée par la forte singularité, le faible diamètre de refoulement, et la importante longueur ont été atténués par la faible pondération associée ($TPC = 0,03$).

Planning RNAG1, RNAG2 et RV (figure 7-19, 7-20 et 7-21) : Importante surconsommation engendrée par le mauvais dimensionnement des paramètres de conception cités précédemment. Tandis que le fonctionnement est caractérisé par une faible surconsommation énergétique causée par le mauvais rendement des pompes (mauvais choix des pompes).

Planning RVP (figure 7-22) : importante surconsommation causée par le volume de pompage ($IV = 0,84$).

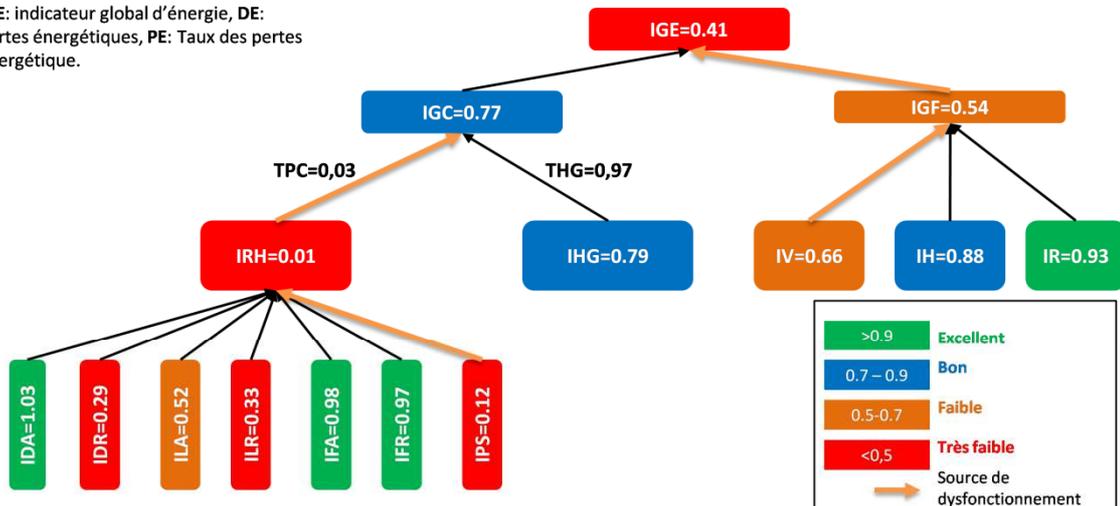
En fin, le constat final en ce qui concerne le diagnostic via les IPE est le suivant :

- **SEAAL :** Problème d'ajustement du volume d'eau
- **RNAG1, RNAG2 et RV :** Mauvais choix de la pompe.
- **RVP :** Problème de régulation du volume d'eau.

- **Conception de la station** : Faible diamètre de refoulement, longue chemin de refoulement, forte singularité dans l'installation.

La station de pompage nécessite une réparation du système de régulation de débit (sondes de niveaux), et le redimensionnement de certains équipements, qui sont : les pompes, diamètre de la conduite d'aspiration, le diamètre de la conduite de refoulement et les singularités (vannes, coudes, débitmètres, ...etc).

IGE: indicateur global d'énergie, DE: Pertes énergétiques, PE: Taux des pertes énergétique.



IGC: indicateur global de conception, DEC: Pertes énergétiques de conception, PEC: Taux des pertes énergétique de conception.

IRH:Indicateur de résistance hydraulique, TPC: Taux des pertes de charge, IHG: indicateur de hauteur géométrique, THG: taux de hauteur géométrique.

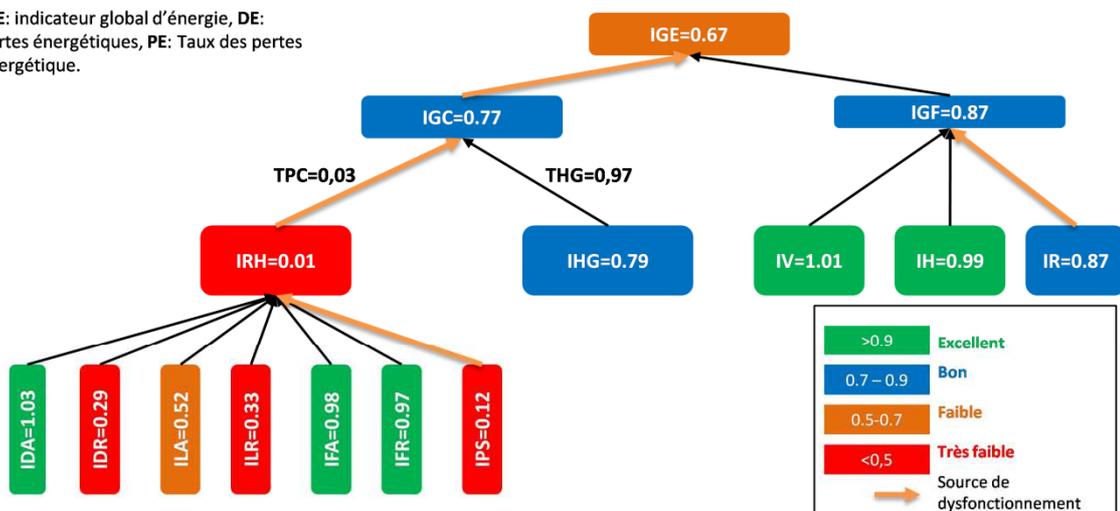
IDA(R): indicateur de diamètre d'aspiration (refoulement), ILA(R): indicateur de longueur d'aspiration (refoulement), IFA (R): indicateur de frottements d'aspiration (refoulemnt), IPS: indicateur des pertes singulières.

IGF: indicateur global de fonctionnement, DEF: Pertes énergétiques de fonctionnement, PEF: Taux des pertes énergétique de fonctionnement.

IV: Indicateur de volume de pompage, IH: indicateur de pression de pompage, IR: indicateur de rendement de pompage.

Figure 7-18 : représentation arborescente des IPE du planning SEAAAL

IGE: indicateur global d'énergie, DE: Pertes énergétiques, PE: Taux des pertes énergétique.



IGC: indicateur global de conception, DEC: Pertes énergétiques de conception, PEC: Taux des pertes énergétique de conception.

IRH:Indicateur de résistance hydraulique, TPC: Taux des pertes de charge, IHG: indicateur de hauteur géométrique, THG: taux de hauteur géométrique.

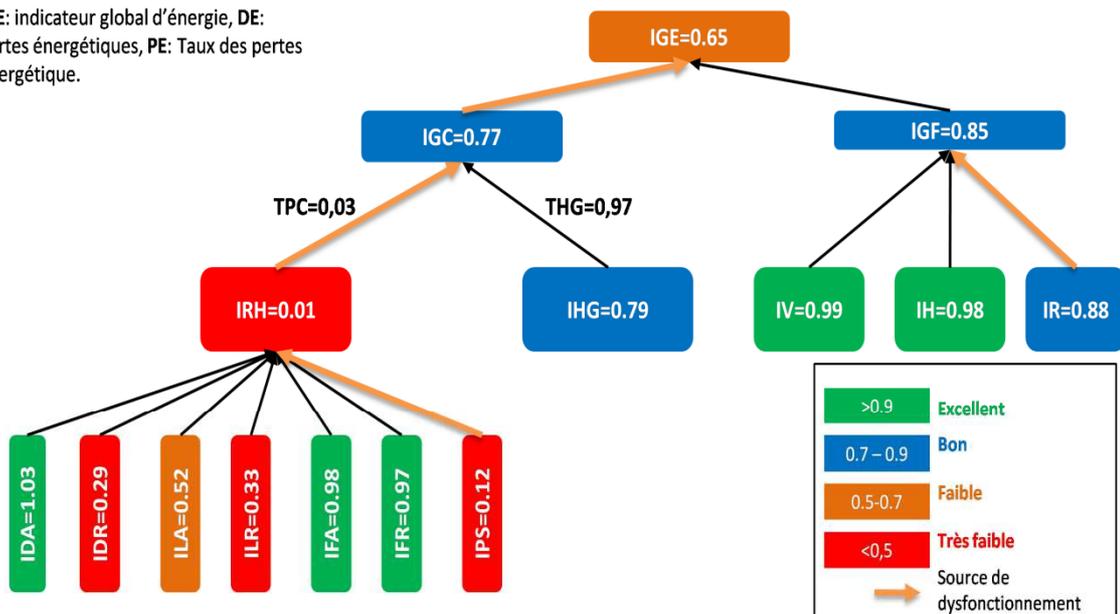
IDA(R): indicateur de diamètre d'aspiration (refoulement), ILA(R): indicateur de longueur d'aspiration (refoulement), IFA (R): indicateur de frottements d'aspiration (refoulemnt), IPS: indicateur des pertes singulières.

IGF: indicateur global de fonctionnement, DEF: Pertes énergétiques de fonctionnement, PEF: Taux des pertes énergétique de fonctionnement.

IV: Indicateur de volume de pompage, IH: indicateur de pression de pompage, IR: indicateur de rendement de pompage.

Figure 7-19 : représentation arborescente des IPE du planning RNAG1

IGE: indicateur global d'énergie, DE: Pertes énergétiques, PE: Taux des pertes énergétique.

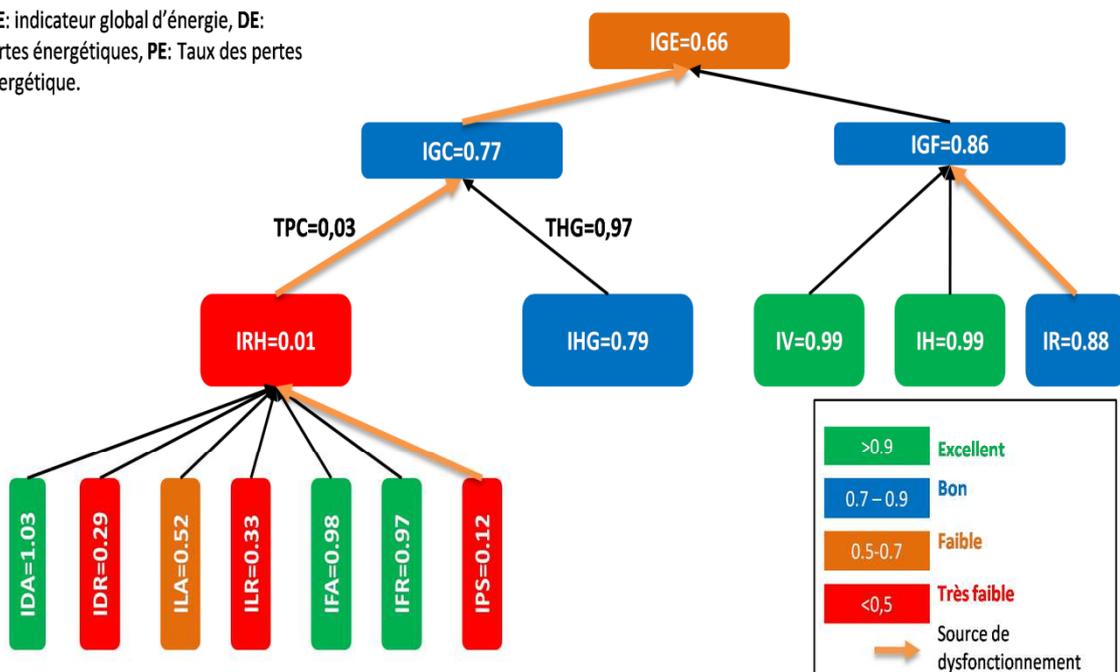


IGC: indicateur global de conception, DEC: Pertes énergétiques de conception, PEC: Taux des pertes énégetique de conception.
 IRH:Indicateur de résistance hydraulique, TPC: Taux des pertes de charge, IHG: indicateur de hauteur géométrique, THG: taux de hauteur géométrique.
 IDA(R): indicateur de diamètre d'aspiration (refoulement), ILA(R): indicateur de longueur d'aspiration (refoulement), IFA (R): indicateur de frottements d'aspiration (refouelemnt), IPS: indicateur des pertes singulières.

IGF: indicateur global de fonctionnement, DEF: Pertes énergétiques de fonctionnement, PEF: Taux des pertes énergétique de fonctionnement.
 IV: Indicateur de volume de pompage, IH: indicateur de pression de pompage, IR: indicateur de rendement de pompage.

Figure 7-20 : représentation arborescente des IPE du planning RNAG2

IGE: indicateur global d'énergie, DE: Pertes énergétiques, PE: Taux des pertes énergétique.

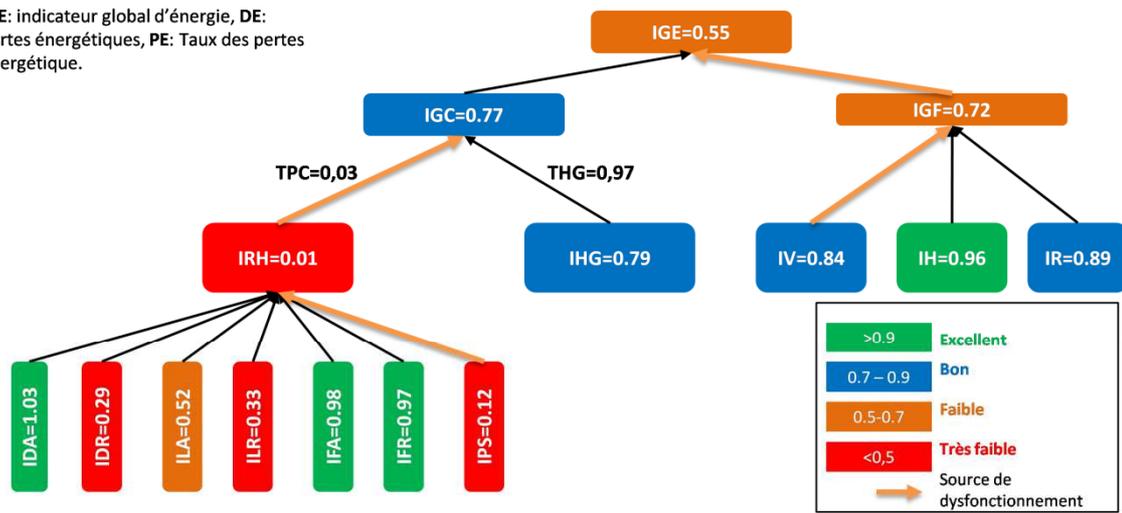


IGC: indicateur global de conception, DEC: Pertes énergétiques de conception, PEC: Taux des pertes énégetique de conception.
 IRH:Indicateur de résistance hydraulique, TPC: Taux des pertes de charge, IHG: indicateur de hauteur géométrique, THG: taux de hauteur géométrique.
 IDA(R): indicateur de diamètre d'aspiration (refoulement), ILA(R): indicateur de longueur d'aspiration (refoulement), IFA (R): indicateur de frottements d'aspiration (refouelemnt), IPS: indicateur des pertes singulières.

IGF: indicateur global de fonctionnement, DEF: Pertes énergétiques de fonctionnement, PEF: Taux des pertes énergétique de fonctionnement.
 IV: Indicateur de volume de pompage, IH: indicateur de pression de pompage, IR: indicateur de rendement de pompage.

Figure 7-21 : représentation arborescente des IPE du planning RV

IGE: indicateur global d'énergie, DE: Pertes énergétiques, PE: Taux des pertes énergétique.



IGC: indicateur global de conception, DEC: Pertes énergétiques de conception, PEC: Taux des pertes énergétique de conception.
 IRH: Indicateur de résistance hydraulique, TPC: Taux des pertes de charge, IHG: indicateur de hauteur géométrique, THG: taux de hauteur géométrique.
 IDA(R): indicateur de diamètre d'aspiration (refoulement), ILA(R): indicateur de longueur d'aspiration (refoulement), IFA (R): indicateur de frottements d'aspiration (refoulement), IPS: indicateur des pertes singulières.

IGF: indicateur global de fonctionnement, DEF: Pertes énergétiques de fonctionnement, PEF: Taux des pertes énergétique de fonctionnement.
 IV: Indicateur de volume de pompage, IH: indicateur de pression de pompage, IR: indicateur de rendement de pompage.

Figure 7-22 : représentation arborescente des IPE du planning RVP

Conclusion

L'outil de gestion RNAG a montré son efficacité dans l'optimisation et la gestion du système de pompage, où il permet d'économiser 38,3% de l'énergie consommée (variante RNAG1). L'outil a non seulement optimisé l'énergie consommée mais il a garanti un bon fonctionnement hydraulique en respectant les volumes limites dans le château d'eau à avec un taux de violation des seuils limites qui n'a pas dépassé les 11,3% sur toute la période d'étude.

L'utilisation des indicateurs de performance énergétique IPE a énormément facilité la tâche d'évaluation et de comparaison énergétique du système. Ils ont confirmé la fiabilité de l'outil de gestion RNAG avec un IGE = 0,67 et un taux de perte énergétique PE = 33,47 % (pour la variante RNAG1). Comme ils ont montré la mauvaise performance du planning de pompage de la SEAAL avec IGE = 0,41 et PE = 58,94 %.

Les IPE ont permis également de faire un diagnostic efficace du système de pompage, en détectant les paramètres mal dimensionnés que ce soit dans la phase de conception ou de fonctionnement. En effet, les IPE ont montré que les paramètres de la résistance hydraulique ont été très mal dimensionnés (IRH = 0,01), ceci est due aux fortes singularités IPS = 0,12, et au faible diamètre de refoulement IDR = 0,29 et à la longueur de refoulement ILR = 0,33.

Pour la partie fonctionnement, les IPE ont bien interprété le dysfonctionnement énergétique du planning de pompage de la SEAAL dont la perte énergétique est de 46,36 % par rapport au fonctionnement optimal. Ceci est le résultat d'un mauvais contrôle du volume d'eau pompé, où son indicateur IV = 0,66 est le plus faible des indicateurs de fonctionnement.

CONCLUSION GENERALE

L'optimisation énergétique par le modèle RNAG a permis de réaliser d'excellent résultat, avec une économie d'énergie qui a atteint les 38,3 %. Confirmant ainsi sa supériorité sur le plan énergétique. Les modèles de régulation ont également réussi à réaliser des résultats relativement bons, en particulier pour le modèle RV dont l'énergie consommée est très proche à celle du modèle RNAG. Néanmoins, ce rapprochement des résultats est exceptionnel, et en fait il est imposé par la faible marge de manœuvre du modèle RNAG pour la station de pompage en particulier, vue les caractéristiques techniques exceptionnelles (faible capacité du réservoir (1500 m³) et grand débit nominal de chaque pompe 900 m³/h). Ce qui fait que le planning optimal est imposé par le respect des conditions hydrauliques, et non par le choix d'un planning optimal.

L'autre performance du modèle RNAG est son respect des conditions du fonctionnement hydraulique, à travers les seuils limites dans le réservoir, avec un planning de pompage qui n'a pas dépassé 11.3% de violation des seuils limites, garantissant ainsi une qualité de service de distribution d'eau et minimisant les pertes. Cette performance hydraulique du modèle est le résultat de la prise en compte des seuils limites dans les contraintes d'optimisation durant le processus d'AG, et de bons résultats de prévision de la demande en eau fournis par les RNA, où le calcul des contraintes d'optimisation nécessite la demande en eau comme donnée d'entrée.

Les modèles de régulation ont donné des plannings optimaux en termes d'énergie, en particulier le modèle de régulation multi-volumes RV. Le seul inconvénient est le principe de fonctionnement qui repose sur le volume de pompage ce qui réduit leur performance énergétique. Le calcul des volumes de commande via les formules proposées a renforcé les modèles de régulation. Néanmoins, ces volumes de commande ajustés sont calculés en fonction des données historiques de la demande et des caractéristiques des pompes. Cependant, la demande peut avoir des valeurs exceptionnelles, ce qui provoque la violation des seuils limites dans le réservoir. Pour le modèle RVP, sa contre performance énergétique et hydraulique a été causée par les caractéristiques particulières de la station de pompage (débit nominal et capacité de réservoir).

Les indicateurs de performance énergétiques élaborés ont facilité énormément la procédure d'évaluation, de comparaison et de diagnostic de la station et des différents plannings de pompage, où ils ont permis une évaluation globale de la consommation énergétique pour la partie conception et pour la partie opération.

En ce qui concerne la conception de la station de pompage, l'indicateur global de conception (IGC) a montré que la conception de la station de pompage d'un point de vue énergétique est bonne (IGC = 0,77), malgré le mauvais dimensionnement de plusieurs paramètres hydrauliques causant une surconsommation énergétique. Cependant, ce dysfonctionnement énergétique causé par le mauvais dimensionnement de ces paramètres a été affaibli par leur faible pondération (TPC = 0,03) et par le bon dimensionnement de la hauteur géométrique (Hauteur du château d'eau).

Conclusion Générale

Sur le plan opérationnel, les indicateurs ont montré l'efficacité du modèle RNAG, en particulier la variante RNAG1 avec un indicateur global de fonctionnement (IGF) égal à 0,87, tout en indiquant que les variables ont été très bien ajustées par le modèle comme le confirme les indicateurs de volume et de pression de pompage égaux tous les deux à 1,01, à l'exception de l'indicateur de rendement qui est égal à 0,87 montrant le mauvais choix de la pompe.

PERSPECTIVES

La gestion des stations de pompage d'eau potable est une tâche très complexe, où il faut prendre en considération plusieurs paramètres de la station de pompage et du réseau de distribution en interaction. Cette difficulté est accentuée par le caractère non-linéaire de la demande. Ce qui rend l'utilisation d'une méthode d'optimisation très utile pour une gestion efficace de la station.

Les modèles d'optimisation basés sur un délestage des pompes permettent d'adapter le débit de pompage à la demande en eau. Cette tâche peut être améliorée encore si on intègre dans le modèle d'optimisation la régulation par vannage, dont le principe consiste à modifier la courbe de l'installation pour adapter le débit de pompage.

Un autre point, qui permet d'améliorer le modèle de gestion est la prise en compte de la variation de la vitesse de rotation des pompes, où certaines pompes sont équipées de cette technique. Le principe de fonctionnement consiste à ajuster la vitesse de rotation de la pompe en fonction de la demande. Garantissant ainsi une économie d'énergie considérable.

En ce qui concerne les paramètres de pompage, le modèle d'optimisation considère dans ces calculs que leurs valeurs sont tout le temps fixes. Cependant, ces paramètres pourraient se détériorer au fil du temps. Une prise en considération de cet aspect est assez intéressante pour rendre le modèle plus réaliste.

Le modèle d'optimisation nécessite la demande en eau comme donnée d'entrée pour le calcul des contraintes d'optimisation. Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer cette demande en eau, telle que l'approche des réseaux de neurones artificiels. Cette approche elle-même a besoin de données d'entrée pour sa mise en application. Pour augmenter la qualité de la prévision, il faut que la base de données utilisée pour entraîner et valider le RNA soit fiable. Pour cela, Il faut que les services des eaux disposent de centres performants d'enregistrement des données relatives à la demande en eau. En effet, plus la série des données est longue et précise plus la qualité de prévision est meilleure. A ce point également, il est intéressant de prendre en considération d'autres facteurs déterminants de la demande en eau telles que les variables climatiques :(précipitations, température...Etc.) et socioéconomiques (prix de l'eau, revenu des ménages, ...etc.). La recherche concernant les modèles de prévision est assez riche, où une simple modification de la structure du modèle pourrait améliorer considérablement la qualité de prévision.

Le planning de gestion pourrait être plus efficace encore s'il tient compte du fonctionnement en temps réel, où un couplage entre le modèle d'optimisation du planning tel que le modèle RNAG par exemple avec un système de transmission des données en temps réel, permet au modèle de remplacer la demande en eau de l'heure précédente (prévue) par celle transmise par le système de télégestion, ce qui contribue à l'amélioration des résultats d'optimisation, sachant qu'à ce point, même le pas de temps pourrait être réduit davantage afin d'augmenter la performance du modèle.

Un autre point important qui permet d'améliorer le modèle d'optimisation, c'est la prise en compte de la variation de la hauteur du niveau d'eau dans le réservoir de distribution sur la pression du réseau en particulier pour les points vulnérables. Dans ce même contexte, la

variation de la hauteur d'eau dans le réservoir d'aspiration engendre la variation de la hauteur géométrique du système. Une prise en considération de ce point dans les calculs va améliorer le modèle d'optimisation.

En ce qui concerne les indicateurs de performance, il est intéressant d'élaborer des indicateurs de performance qui donnent avec précision l'influence de chaque paramètre de conception ou de fonctionnement sur les pertes énergétiques, permettant une évaluation énergétique directe de chaque paramètre de pompage. En fin, il faut réfléchir à étendre les indicateurs pour qu'ils englobent d'autres aspects de fonctionnement des systèmes de pompage tels que le NPSH, la cavitation, la violation des contraintes hydrauliques, ...etc.

BIBLIOGRAPHIE

ACHOUR, Bachir et BEDJAOUI, Ali. Calcul du coefficient de frottement en conduite circulaire sous pression. *Larhyss Journal*, juin, 2006, vol. 5, p.197-200.

ADAMOWSKI, Jan Franklin. Peak daily water demand forecast modeling using artificial neural networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2008, vol. 134, n°2, p. 119-128.

ADAMOWSKI, Jan, FUNG CHAN, Hiu, PRASHER, Shiv O., *et al.*. Comparison of multiple linear and nonlinear regression, autoregressive integrated moving average, artificial neural network, and wavelet artificial neural network methods for urban water demand forecasting in Montreal, Canada. *Water Resources Research*, 2012, vol. 48, n°1, p. 1-14.

ALAHMAD, Khalaf. Systèmes de contrôle de la qualité de production: méthodologie de modélisation, de pilotage et d'optimisation des systèmes de production. 179 p. Thèse de doctorat : Université Paul Verlaine-Metz : 2008.

AMMAR, Mohamed Yessin. Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu. 171 p. Thèse de doctorat : Tunis : ENIS: 2007.

AOUCHE, Abdelaziz. Contribution à l'Etude des Structures Microruban Cylindriques par la Méthode Neuro-Spectrale. 138 p. Thèse de doctorat : Batna, Université de Batna 2,: 2016.

ASSOCIATION DES GEOGRAPHE TUNISIENS. *Prévision de la demande en eau potable journalière par les réseaux de neurones artificiels : cas du système de réparation du grand du Tunis* : Premier symposium international de l'association des géographes tunisien, 03-06 novembre 2016, Hammamet. Sous la dir. de Belhassen, K., Nouiri, I., Jeridi, A. & Rdiene, S. 13 p.

AVILA, Sergio Luciano.. Optimisation multiobjectif et analyse de sensibilités appliquées à la conception de dispositifs. Application: *Synthèse d'antennes à réflecteur embarquées dans un satellite*. 145 p. Thèse de doctorat : Lyon, Ecole Centrale de Lyon : 2006.

BATCHABANI, Essoyeke. Nouvelle approche pour le dimensionnement et l'optimisation de la gestion des réservoirs et de la qualité de l'eau potable dans les réseaux de distribution. 150 p. Thèse de doctorat : Montréal, Université de Montréal : 2014.

BAKKER, Martijn. Optimized control and pipe burst detection by water demand forecasting. 157 p. Doctor thesis : Delft, Delft University : 2014.

BEDJAOUI, A., ACHOUR, B. and BOUZIANE, M.T. Nouvelle approche pour le calcul du diamètre économique dans les conduites de refoulement. *Courier du savoir*, juin 2005, vol. 6, p. 141-145.

BELBACHIR, Assia, DEAU, Raphaël, LENNE, Renaud. et SNOUSSI, Jihene. La programmation génétique. Rapport CNRS. LIRIS. 2006, 9 p.

BELFIELD, Sherryl. Short-term domestic water demand, estimation, forecasting and management. 229 p. doctoral thesis: Leeds, School of geography: University of Leeds.: 2001.

BELLMAN, Richard . Dynamic programming. Princeton: University Press, 1957, 392 p. ISBN 0-486-42809-5.

BENIAICHE, El Amine. Optimisation de la consommation énergétique en irrigation localisée. *Agriculture du Maghreb*, Juillet 2012, vol. 63, p.170-175.

BID. Evaluation des systèmes de pompage d'eau. Manuel d'évaluation de l'efficacité énergétique. Banque Interaméricaine de Développement. Washington IDB-MG-112, 2011, 100 p.

BILLINGS, R.B and JONES, C.V. Forecasting urban water demand. Second edition. Denver : American water works association, 2008, 360 p. Science and technology. ISBN 9781583215371.

BLINDU, Igor. Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques. 304 p. Thèse de doctorat : Ecole nationale supérieure des mines Saint-Etienne.: 2004.

BOURBONNAIS, Régis et TERRAZA, Michel. Analyse des séries temporelles : Application à l'économie et à la gestion : Cours et exercices corrigé. Dunod, 2016, 354 p. ISBN 978-2-10-074536-4.

BOUSSAID, Ilhem. Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue. 169 p. Thèse de doctorat : Paris, Université de Paris-Est Créteil : 2013.

BOUTHEVILLAIN, Carine et MATHIS, Alexandre. Prévisions: mesures, erreurs et principaux résultats. *Economie et statistique*, 1995, vol. 285, n° 1, p. 89-100.

BRIERE, François. G. Distribution et collecte des eaux. Livre troisième édition. Presses internationales polytechnique. 2012. 598 p. collection cursus. ISBN 9782553016370.

BUREL, Gilles. Réseaux de neurones en traitement d'images-Des Modèles théoriques aux Applications Industrielles. 321 p. Thèse de doctorat : Brest, Université de Bretagne occidentale-Brest : 1991.

CELI, C. L., IGLESIAS-REY, P. L., et SOLANO, F. M. Energy optimization of supplied flows from multiple pumping stations in water distributions networks. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 186, p. 93-100.

CERNY, Vladimír. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of optimization theory and applications*, 1985, vol. 45, n° 1, p. 41-51.

CHAARI, Tarek. Un algorithme génétique pour l'ordonnancement robuste : application au problème du flow shop hybride. 134 p. Thèse de doctorat : Famars, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis : 2010.

CHANG, Fi-John et CHANG, Ya-Ting. Adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of water level in reservoir. *Advances in water resources*, 2006, vol. 29, n° 1, p. 1-10.

CHERIF, Aymen. Réseaux de neurones, SVM et approches locales pour la prévision de séries temporelles. 189 p. Thèse de doctorat : Université de Tours : 2013.

CHESNEAU, Olivier. 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. 219 p. Thèse de doctorat : Strasbourg, Université de Louis Pasteur Strasbourg I : 2006.

CHOUQUET, Cécile. Modèles linéaire : Notes de cours. Toulouse : Laboratoire de statistiques et probabilité, Université Paul Sabatier, 2010, 50 p.

COLORNI, Alberto, DORIGO, Marco, MANIEZZO, Vittorio, *et al.* Distributed optimization by ant colonies. In : *Proceedings of the first European conference on artificial life*. 1991. p. 134-142.

DE LA VEGA, Jonathan et ALEM, Douglas. An improved stochastic optimization model for water supply pumping systems in urban networks. *CEP*, 2014, vol. 18052, p. 1-41.

DEMASSEY, Sophie. Méthodes hybrides de programmation par contraintes et programmation linéaire pour le problème d'ordonnancement de projet à contraintes de ressources. 139 p. Thèse de doctorat : France, Université d'Avignon : 2003.

DJEDDOU, Messoud. Prévision du taux d'échec avec les réseaux neurones artificiels dans une station de traitement des eaux résiduaires. 196 p. Thèse de doctorat : Biskra, Université Mohamed Khider: 2014.

DJOUKAM, J (1999). Guide de conception des stations de pompage. Ouagadougou : Groupe des écoles EIER-ETSHER, 1999. 35 p.

DOCHY, Thierry, DANECH-PAJOUH, Mehdi, et LECHEVALLIER, Yves. Prévision du trafic à court terme par réseau de neurones. *RTS*, 1994, vol. 42, p. 1-21.

DOUIRI, Sidi Mohamed, ELBERNOUSSI, Souad, et LAKHBAB, Halima. Cours des méthodes de résolution exactes heuristiques et métaheuristiques : Master codes, cryptographie et sécurité de l'information. Rabat : Université Mohamed V, 2013, 41 p.

DURAND, Nicolas. Algorithmes génétiques et autres outils d'optimisation appliqués à la gestion du trafic aérien. 168 p. Habilitation à diriger des recherches : Toulouse, Institut nationale polytechnique de Toulouse : 2004.

DUVIGNEAU, Régis. Contribution à l'optimisation de forme pour des écoulements à forts nombres de Reynolds autour de géométries complexes. 322 p. Thèse de doctorat : Nantes, Université de Nantes : 2002.

EDF. Mieux s'équiper pour moins consommer : les pompes centrifuges équipées de variateurs électroniques de vitesse. Paris : ENT139, Document technique, 2008. 6 p.

ESSAFI, Mohamed. Conception et optimisation d'allocation de ressources dans les lignes d'usinage reconfigurables. 142 p. Thèse de doctorat : Paris, Ecole Nationale Supérieure des Mines : 2010.

FAVRE, Bérenger. Etude de stratégie de gestion énergétique des bâtiments par l'application de la programmation dynamique. 284 p. Thèse de doctorat : Paris, Ecole nationale supérieure des mines de Paris : 2013.

FAYE, R., SAWADOGO, S., et MORA-CAMINO, F. Logique floue Appliquée à la gestion à long terme des ressources en eau. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 2002, vol. 15, n°3, p. 579-596.

FEO, Thomas A. et RESENDE, Mauricio GC. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations research letters*, 1989, vol. 8, n°2, p. 67-71.

FRAENKEL, P.L. Les machines élévatoires. Rome : Intermediate Technology Power Ltd Reading (Royaume-Uni), 1994, 170 p. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage 43. ISBN 92-5-202515-4.

FRANÇOIS, Baptiste. Gestion optimale d'un réservoir hydraulique multiusages et changement climatique. Modèle, projection et incertitudes. 302 p. Thèse de doctorat : Terre, Univers et Environnement: Grenoble, Université de Grenoble : 2013.

FRÉCAUT, René. L'eau industrielle et sa part dans les bilans d'utilisation d'eau en pays méditerranéens. L'exemple de l'Algérie orientale. *Revue Géographique de l'Est*, 1984, vol. 24, n° 2, p. 123-132.

GARDEUX, Vincent. Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension: application à l'analyse de données de puces à ADN. 143 p. Thèse de doctorat : France, Université Paris-Est : 2011.

GHERBOUDJ, Amira. Méthodes de résolution de problèmes difficiles académiques. 190 p. Thèse doctorat : Informatique, Constantine, Université de Constantine 2 : 2013.

GHIASSI, Manoochehr, OLSCHIMKE, Michael, MOON, Brian, *et al.* Automated text classification using a dynamic artificial neural network model. *Expert Systems with Applications*, 2012, vol. 39, n° 12, p. 10967-10976.

GHIMIRE, Santosh Raj. The effect of demand, tank parameters and pumping stations on energy use in municipal drinking water distribution systems. 148 p. Doctoral thesis: Michigan, Michigan Technology University: 2008.

GLEICK, Peter, HAASZ, Dana, HENGES-JECK, Christine, STRINIVASAN, Veena, WOLFF, Gary, CUSHING, Katherine Kao et MANN, Amardip. Waste Not, Want Not: The Potential for urban Water Conservation in California. Oakland : Nicholas L. Cain, Pacific Institute for studies in development, environment and security, 2003. 165 p. ISBN 1-893790-09-6.

GLEYSES, Guy et MONTGINOUL, Marielle. Influence de la température journalière sur la consommation d'eau potable des ménages : étude de cas sur une résidence de Montpellier. Montpellier : IRSTEA (ex. CEMAGREF), 2013. 21 p.

GLOVER, Fred. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 1986, vol. 13, no 5, p. 533-549.

GRELLIER, Émilie. Optimisation de tournées de véhicules dans le cadre de la logistique inverse: modélisation et résolution par des méthodes hybrides. 123 p. Thèse de doctorat : Nantes, Université de Nantes : 2008.

GUENOUNOU, Ouahib. Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique-application à un bioprocédé. 133 p. Thèse de doctorat : Toulouse, Université de Toulouse, : 2009.

GUHL, Florent. Gestion optimale des réseaux d'eau potable. 166 p. Thèse de doctorat : sciences physiques : Strasbourg, Université Louis Pasteur : 1999.

GUHL, Florent et BRÉMOND, Bernard. Optimisation du fonctionnement des réseaux d'eau potable. Prise en compte de l'aspect stochastique de la demande. *Ingénieries-EAT*, 2000, vol. 23, p. 15-23.

HACHIMI, Hanaa. Hybridations d'algorithmes métaheuristiques en optimisation globale et leurs applications. 116 p. Thèse de doctorat : Agdal, Ecole Mohammadia d'ingénieurs : 2013.

HAQUE, M. M., RAHMAN, Aatur, HAGARE, Dharma, *et al.* Principal component regression analysis in water demand forecasting: an application to the Blue Mountains, NSW, Australia. *J. Hydrol. Environ. Res*, 2013, vol. 1, n° 1, p. 49-59.

HYDRO-QUEBEC. Système de pompage : Les économies d'énergie électrique dans les systèmes de pompage. Québec : Bibliothèque du Québec, 94 p. 1993. Guide technique. ISBN 2-550-27191-2.

IAV Hassan II. *Performances des stations de pompes 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* : Actes du Séminaire Modernisation de l'agriculture irriguée, 19-23 avril 2004, Rabat. Sous la dir. de Luc, J.P., Tarhouni, J., Calvez, R., Liman, M. & Sablayrolles, C. Paris : Cirad, 2007, 18 p.

IFP. *Pompes: Technologie et fonctionnement des pompes centrifuges*. Hauts-de-Seine : IFP Training, 2005. 49 p.

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *A comparison between NMPC and LQG for the level control of three tank interacting system*. Indian Control Conference (ICC), 4-6 Janvier 2017, Guwahati. PARIKH, Nishant, RATHORE, Saruch, MISRA, Rahul, *et al.* New Jersey: IEEE, 2017, p. 200-205.

JAUMOUILLE, Elodie. *Contrôle de l'état hydraulique dans un réseau d'eau potable pour limiter les pertes*. 135 p. Thèse de doctorat : Ecole doctorale de mathématiques et informatique : Bordeaux, Université de Bordeaux I : 2009.

JAIN, Ashu, VARSHNEY, Ashish Kumar, et JOSHI, Umesh Chandra. *Short-term water demand forecast modelling at IIT Kanpur using artificial neural networks*. *Water resources management*, 2001, vol. 15, n° 5, p. 299-321.

JEBARI, Khalid. *Modèles évolutifs flous pour l'optimisation dynamique*. 87 p. Thèse de doctorat : Faculté des sciences : Rabat, Université Mohammed V : 2013.

JENTGEN, Lawrence A., KIDDER, H., HILL, R., *et al.* *Water consumption forecasting to improve energy efficiency of pumping operations*. Denver : Awwa Research Foundation, 2007. 150 p.

KHACHIYAN, Leonid G. *A polynomial algorithm in linear programming*. *Soviet Mathematics. Doklady Akademii Nauk SSSR*, 1979, Vol. 244, p. 1091-1094.

KHICHANE, Madjid. *Optimisation sous contraintes par Intelligence Collective Auto-adaptative*. 129 p. Thèse de doctorat : Lyon, Université Claude Bernard-Lyon I: 2010.

KERTOUS, Mourad. *Analyse des déterminants de la demande d'eau potable en Algérie: Une approche par panels dynamiques*. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 2013, vol. 26, n° 3, p. 193-207.

KIRKPATRICK, Scott, GELATT, C. Daniel, et VECCHI, Mario P. *Optimization by simulated annealing*. *science*, 1983, vol. 220, n° 4598, p. 671-680.

KOFFI, Yao Blaise, AHOUSI, Kouassi Ernest, KOUASSI, Amani Michel, *et al.* *Modélisation De La Consommation En Eau Potable Dans Les Capitales Africaines Au Sud Du Sahara: Application Des Reseaux De Neurones Formels A La Ville De Yamoussoukro, Capitale Politique De La Cote D'ivoire*. *Journal of Asian Scientific Research*, 2012, vol. 2, n° 10, p. 562-573.

KOFFI, Yao Blaise, AHOUSSE, Kouassi Ernest, KOUASSI, Amani Michel, *et al.* Application des réseaux de neurones formels pour la prévision des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 2014, vol. 10, n° 3, p. 134-145.

Krieger & Stewart. Eastern municipal water district potable water: booster pumping station submittal and design guidelines. California: Eastern municipal water district, 2005. 68 p.

LABYE, Y., OLSON, M.A., GALAND, A. et TSIOURTIS, N. Conception et optimisation des réseaux d'irrigation. Rome : Food & Agriculture Org.1996, 259 p. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. ISBN 92-5-202666-5.

LACHANCE, Étienne. Résolution de conflits et séquençage d'avion par algorithmes évolutionnaires multiobjectifs. 169 p. Thèse de doctorat : Sherbrooke, Université de Sherbrooke : 2014.

LAGNOUX, A. Série chronologiques : Notes de cours. Toulouse : Université de Toulouse le Mirail, 2013. 53 p.

LASSOUAOUI, Nadia, HAMAMI, Latifa, et NOUALI, Nadia. Les algorithmes génétiques, application a la segmentation des images. *Revue d'Information Scientifique et Technique (RIST)*, 2004, vol. 14, n° 02, p. 27-56.

LAYEB, Abdesslem. Utilisation des Approches d'Optimisation Combinatoire pour la Vérification des Applications Temps Réel. 207 p. Thèse de doctorat : Constantine, Université Mentouri : 2010.

LIU, Junguo, SAVENIJE, Hubert HG, et XU, Jianxin. Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, vol. 28, n° 4-5, p. 219-224.

MAIER, Holger R. et DANDY, Graeme C. The use of artificial neural networks for the prediction of water quality parameters. *Water resources research*, 1996, vol. 32, n° 4, p. 1013-1022.

MARCHESE, Yann. Mécanique des fluides. Lyon : Ecole catholique d'art et métier, département de génie énergétique et mécanique, 2011. 254p.

MARCKMANN, Gilles. Contribution à l'étude des élastomères et des membranes soufflées. 192 p. Thèse de doctorat : Nantes, Ecole Centrale de Nantes : Université de Nantes : 2004.

MASMOUDI, Rachid. Etude de fiabilité des systèmes de distribution d'eau potable en zones arides cas de la région de Biskra. 170 p. Thèse de doctorat : Biskra, Université de Mohamed Khider : 2009.

INTERNATIONAL WATER RESOURCES ASSOCIATION. *Evaluation des paramètres de fonctionnement et de performance des systèmes de distribution d'eau potable en Algérie. Cas*

de la région de Biskra. 13th IWRA World Water Congress. Montpellier,. 1-4 septembre 2008. Sous la dir. De Masmoudi, R., Kettab, A., et Brémond, B. 15 p

MATHIS, Alexandre et BROCIER, Andrew. Retour vers le futur. Une analyse rétrospective des prévisions de MOSAÏQUE. *Revue de l'OFCE*, 1994, vol. 49, n° 1, p. 207-228.

MAYER, Peter W., DEOREO, William B., OPITZ, Eva M., *et al.* Residential end uses of water. Denver : AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 1999, 18 p. ISBN 1-58321-016-4.

MIAOU, Shaw-Pin. A class of time series urban water demand models with nonlinear climatic effects. *Water Resources Research*, 1990, vol. 26, n° 2, p. 169-178.

MOUSSA, Mahmoud. Alimentation en eau potable : Cours de génie civil. Tunis : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 2007. 123 p.

MOZAS, Morgan et GHOSN, Alexis. Etat des lieux du secteur de l'eau en Algérie. Etude et analyse. Paris : Institut de prospective économique du monde méditerranéen, 2013. 27 p.

NAFI, Amir. La programmation pluriannuelle du renouvellement des réseaux d'eau potable. 230 p. Thèse de doctorat : Strasbourg, Université de Louis Pasteur : 2006.

NAUGES, Céline et REYNAUD, Arnaud. Estimation de la demande domestique d'eau potable en France. *Revue économique*, 2001, vol. 52, n° 1, p. 167-185.

NEVERRE, N., RINAUDO, J.D. et MONTGINOUL, M. Etude de la demande en eau potable : Résultat d'une analyse économétrique dans le département de l'Hérault. Orléans : BRGM , 2011, 86 p.

NGUEVEU, Sandra Ulrich. Problèmes de tournées de véhicules avec contraintes particulières pour la maîtrise des risques. 201 p. Thèse de doctorat : Troyes, Université de technologie : 2009.

NOUIRI, Issam et LEBDI, Féthi. Algorithme Génétique (AG) pour le choix optimal des stations d'appoint de chlore sur les réseaux d'eau potable. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 2006, vol. 19, n° 1, p. 47-55.

NOUIRI, I., LEBDI, F., et LAMADDALENA, N. Algorithme évolutionnaire (AE) pour l'optimisation des débits sur les réseaux hydrauliques a la demande. *Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches*, 2005, vol. 52, p. 49-58.

OFFICE NATIONAL DES STATISTIQUES (ONS). Compendium national sur les statistiques de l'environnement. Alger ; ONS, 2006. 89 p. ISBN 9961-792-01-7.

OLASAGASTI, Eñaut Muxika. Application des réseaux de neurones à l'identification d'un axe de machine-outil. 155 p. Thèse de doctorat : Grenoble, Institut National Polytechnique de Grenoble : 2002.

OLSZEWSKI, Pawel. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps. *Applied Energy*, 2016, vol. 178, p. 527-539.

OURARI, Samia. De l'ordonnancement déterministe à l'ordonnancement distribué sous incertitudes. 192 p. Thèse de doctorat : Toulouse, Université de Toulouse : 2011.

POULAIN, Jean. Installation de pompage : Coût global et perspectives. Saint-Denis : Technique de l'ingénieur, 2004. 10 p.

PULIDO-CALVO, Inmaculada et GUTIÉRREZ-ESTRADA, Juan Carlos. Selection and operation of pumping stations of water distribution systems. *Environ. Res. J*, 2011, vol. 5, n° 3, p. 1-20.

RENARD, Héléne. Équilibrage de charge et redistribution de données sur plates-formes hétérogènes. 96 p. Thèse de doctorat : Lyon, Ecole normale supérieure : 2005.

REBREYEND, Pascal. Algorithmes génétiques hybrides en optimisation combinatoire. 112 p. Thèse de doctorat : Lyon, Ecole normale supérieure : 1999.

REY, Emmanuel. Régénération des friches urbaines et développement durable : vers une évaluation intégrée à la dynamique du projet. Louvain : Presses universitaires de Louvain, 2012. 269 p. ISBN 978-2-87588-078-8.

REYNES, Christelle. Etude des algorithmes génétiques et application aux données de protéomique. 151 p. Thèse de doctorat : Montpellier, Université de Montpellier I : 2007.

RIAD, Souad. Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. 147 p. Thèse de doctorat : Lille , Université de Lille: 2003.

RINAUDO, Jean-Daniel. Approches économiques de la gestion des eaux souterraines. 62 p. Thèse de doctorat : Montpellier, Université Montpellier I : 2013.

SARENI, Bruno. Méthodes d'optimisation multimodales associées à la modélisation numérique en électromagnétisme. 221 p. Thèse de doctorat : Lyon, Ecole centrale de Lyon : 1999.

SAVIC, Dragan A. et WALTERS, Godfrey A. Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks. *Journal of water resources planning and management*, 1997, vol. 123, n° 2, p. 67-77.

SEAAL. Documents techniques, 2017. 5 p.

SIOUD, Aymen. Approches hybrides pour la résolution d'un problème d'ordonnancement industriel. 196 p. Thèse de doctorat : Chicoutimi, Université du Québec : 2011.

SOGREAH, Les pompes et les petites stations de pompage. Paris : Ministère de la coopération, 1978. 217 p. Collection techniques rurales en Afrique.

SOUAM, Fatiha. Approche de détection de communautés chevauchantes dans des réseaux bipartis. 131 p. Thèse de doctorat : Tizi Ouzou, Université de Mouloud Mammeri : 2013.

TIWARI, Mukesh K. et ADAMOWSKI, Jan. Urban water demand forecasting and uncertainty assessment using ensemble wavelet-bootstrap-neural network models. *Water Resources Research*, 2013, vol. 49, n° 10, p. 6486-6507.

TRAHI, Fatiha. Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi ousou par les réseaux de neurones artificiels: Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche LAMPA. 72 p. Thèse de doctorat : Tizi Ouzou, Université Mouloud Mammeri : 2011.

VANARET, Charlie. Hybridation d'algorithmes évolutionnaires et méthodes d'intervalles pour l'optimisation de problèmes difficiles. 163 p. Thèse de doctorat : Toulouse, Université de Toulouse : 2015.

VAN ZYL, Jakobus E., SAVIC, Dragan A., et WALTERS, Godfrey A. Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm. *Journal of water resources planning and management*, 2004, vol. 130, n° 2, p. 160-170.

ZIDI, Kamel. Système interactif d'aide du développement multimodal. 126 p. Thèse de doctorat : Lille, Université des sciences et technologies de Lille : 2006.

ZELLA, L. et SMADHI, D. Evolution de l'irrigation. *LARHYSS Journal*, 2007, vol. 6, p. 65-80.

ZIYATI, Elhoussaine. Optimisation de requêtes OLAP en Entrepôts de Données: Approche basée sur la fragmentation génétique. 115 p. Thèse de doctorat : Maroc, Université de Mohamed V : 2010.

LA DELEGATION A L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE (DIST). L'eau douce :une ressource précieuse [en ligne]. Paris : Centre nationale de la recherche scientifique (CNRS), 2000 (modifié en 2003). [Consulté le 2 novembre 2018]. Disponible sur : <<https://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/accueil.html>>.

ALGERIENNE DES EAUX (ADE). La tarification de l'eau potable [en ligne] Alger : ADE, 2018 [consulté 2 novembre 2018]. Disponible sur : <<https://www.ade.dz/index.php/tarification>>.