



HAL
open science

Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d'une zone de desserte d'un réseau d'alimentation en eau potable

Floriane Ben Hassen

► **To cite this version:**

Floriane Ben Hassen. Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d'une zone de desserte d'un réseau d'alimentation en eau potable. Sciences de l'environnement. 2012. hal-02597884

HAL Id: hal-02597884

<https://hal.inrae.fr/hal-02597884>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de
l'ENGEES pour la formation initiale



Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d'une zone de desserte d'un réseau d'alimentation en eau potable

BEN HASSEN Floriane

IRSTEA, Groupement de Bordeaux
Unité de recherche REBX
50, avenue de Verdun, Gazinet
33612 Cestas cedex

Janvier à Juin 2012

Maître de stage : Eddy RENAUD

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur Hugues AYPHASSORO directeur régional d'Irstea Bordeaux pour m'avoir accueillie durant les six mois de mon stage.

Je remercie toute l'équipe REBX, ainsi que son chef d'unité Daniel POULAIN, pour leur aide leur soutien et leur disponibilité.

J'adresse des remerciements tout particuliers à mon maître de stage, Eddy RENAUD pour le temps qu'il a pris pour moi, pour sa patience, sa compréhension, et le savoir qu'il m'a transmis.

Merci à tous ceux qui ont été mes collègues, stagiaires, permanents, ou sous contrat à durée déterminée, pour leur aide, leur bonne humeur, et spécialement à Clément RAVAIL, avec qui j'ai partagé le bureau, pour sa gentillesse et toute l'aide qu'il m'a apportée, et Denis GILBERT pour son appui sur les modèles hydrauliques.

Je remercie ensuite Anne-Claire SANDRAZ, de Veolia Eau, pour son aide tout au long de mon stage. Merci également à ses collègues, pour les explications et les données qu'ils ont accepté de me fournir.

Merci à Jean Paul POUCKET et John PEPERLOT, pour avoir fait le déplacement jusqu'à l'IRSTEA afin de nous faire une présentation. Merci ensuite à Simon BOURDAUDHUI pour le temps qu'il m'a consacré en explications.

Je tiens à remercier les deux directeurs qui ont dirigé l'ENGEES pendant mes études, Claude BERNHARD, et Jean François QUERE.

Merci au corps professoral de l'ENGEES, pour toutes les connaissances qu'ils m'ont apportées, et pour la passion qu'ils ont de leur métier.

Merci à ma famille et à mes amis pour tout le soutien, l'amour, l'enseignement qu'ils m'ont apportés, et continuent de m'apporter.

Merci à Youssef BENZOUBAIR.

Enfin merci à mes camarades de promotion pour les trois merveilleuses années que j'ai passées avec eux à Strasbourg.

Résumé

« Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d'une zone de desserte d'un réseau d'alimentation en eau potable »

La lutte contre les pertes dans les réseaux est une préoccupation majeure tant du côté des organismes publics que des exploitants.

Afin d'évaluer le potentiel de réduction des fuites dans les réseaux d'eau potable, il est nécessaire de se munir d'indicateurs pertinents et complets.

En France, contrairement à ceux utilisés à l'étranger, aucun indicateur caractérisant la performance des services d'eau et spécifié dans le code général de collectivités territoriales ne prend en compte la pression de service du réseau. Or la pression influe sur le niveau des pertes d'un réseau et sa gestion est un mode reconnu de lutte contre les fuites.

Face à ce constat, l'unité Réseau Epuration et Qualité des Eaux d'Irstea de Bordeaux et la direction technique et synergies de Veolia Eau se sont engagés dans une collaboration dont le but est la création d'un indicateur de pertes des réseaux d'alimentation en eau potable incluant le nombre de branchements et la pression.

Ce mémoire présente une étude dont la finalité est l'évaluation de la pression moyenne minimale qui peut être atteinte sur une zone de desserte avec les technologies disponibles et dans le respect des standards de qualité du service délivré aux usagers.

L'étude a débuté par un état de l'art sur les techniques et technologies existantes en matière de régulation de pression, ainsi que sur la façon dont ces appareils sont représentés au sein des logiciels de modélisation hydraulique PORTEAU, EPANET et SynerGEE.

Une méthode de détermination de la pression minimale d'une zone est ensuite proposée et mise en œuvre sur dix secteurs extraits de trois terrains différents.

Enfin une analyse des résultats permet d'établir un lien entre les caractéristiques des secteurs étudiés, et la pression moyenne minimale calculée.

Abstract

“How to feature and assess minimum average pressure of a water supply network zone?”

Fighting against water losses in the distribution network is a major concern both for public authorities and private companies.

Comprehensive and relevant indicators are necessary to assess the potential of water loss reduction.

Unlike other countries, in France the indicators used to evaluate water services, and specified in local authorities act, do not take into account the operating pressure. However, pressure has a significant impact on water losses and pressure management is one of the means to fight against water loss.

Given this situation, IRSTEA's team “Réseaux Epuration et Qualité des Eaux” and Veolia Water decided to build a partnership to create a leak indicator which includes the number of connections and the pressure.

This report presents a study whose goal is to evaluate the average pressure which can be reached over a water supply area, with available technologies and with a respect of service quality standards delivered to consumers.

The study was conducted through analyzing the existing technologies in terms of pressure regulation and how they are represented within hydraulic modeling software PORTEAU, EPANET, SynerGEE.

Next a method for determining minimum pressure of a zone is proposed and applied on ten sectors taken from three different areas.

Finally an analysis of the outcome enables to establish a link between the features of the studied sectors and the minimum average pressure worked out.

SOMMAIRE

I Introduction au sujet de stage	13
I.1 Cadre général de l'étude	13
I.1.1 Intérêt de la gestion de pression	14
I.1.2 Indicateurs de pertes	14
II Lien entre pression et pertes	17
II.1 Formulation du lien pression/volumes de pertes	17
II.2 Objectif de l'étude	17
II.3 Méthode globale	18
II.3.1 Méthode hydraulique pour le calcul de CASP	18
II.3.2 Démarche suivie pour la détermination de Pmin	19
III Etat de l'art, technologie et logiciels de modélisation	20
III.1 Technologie de régulation de pression	20
III.1.1 Préambule	20
III.1.2 La réduction de pression	20
III.1.3 Modulation de pression	24
III.2 Logiciels de modélisation hydraulique	25
III.2.1 Modélisation d'un ou plusieurs stabilisateurs aval sur Epanet, Porteau et SynerGEE	25
III.2.2 Test de modélisation d'un réseau simple	28
IV Méthodologie de détermination de Pmin	33
IV.1 Informations disponibles	33
IV.2 Indicateurs choisis	33
IV.2.1 Indicateurs descriptifs	33
IV.2.2 Indicateurs de pression	33
IV.3 Méthodologie d'étude de cas	35
IV.3.1 Diagnostic	35
IV.3.2 Proposition de solutions	36
IV.3.3 Limite de la méthode	36
V Etudes de cas	37
V.1 Présentation des terrains d'étude	37
V.1.1 Terrain 1	37
V.1.2 Terrain 2	37
V.1.3 Terrain 3	37
V.2 Etude des secteurs	38
V.3 Choix des solutions	39
V.3.1 Introduction	39
V.3.2 Exemple d'application de la méthode ACE	39
V.3.3 Résultats pour l'ensemble des secteurs	41
V.3.4 Calcul de la pression moyenne minimale limite	43
VI Analyse des données calculées et extraites	45

VI.1	Corrélation entre les caractéristiques du secteur initial	45
VI.2	Corrélations entre données de base et Pminéco, Pminmin, Pminlimite	46
VI.3	Corrélations entre indicateurs élaborés et éléments descriptifs des secteurs	46
VI.4	Estimation des pressions minimales à partir des pressions caractéristiques	48
VII	Conclusion	49
VII.1.1	Bilan	49
VII.1.2	Perspectives	50
Annexes		53
VIII	Annexe 1 : Etat de l'art sur l'utilisation des stabilisateurs de pression aval pour réguler la pression des réseaux d'Adduction en Eau Potable	55
VIII.1	Préambule	55
VIII.1.1	Définitions	55
VIII.1.2	Technologies utilisées	55
VIII.2	Principes de fonctionnement du stabilisateur aval	56
VIII.2.1	Fonction du stabilisateur de pression aval	56
VIII.2.2	Différents types de stabilisateurs	57
VIII.3	Conception et exploitation d'une installation de régulation de pression	64
VIII.3.1	Eléments de dimensionnement des stabilisateurs aval	64
VIII.3.2	Limites d'utilisation et solutions techniques	68
VIII.3.3	Réalisation d'une installation de régulation de pression	70
VIII.4	La modulation de pression	75
VIII.4.1	Principe de la modulation de pression	75
VIII.4.2	Technologies de la modulation de pression	77
IX	Annexe 2 : Exemple d'étude de cas , Secteur S3	80
IX.1	Diagnostic du secteur	80
IX.1.1	Description du secteur	80
IX.1.2	Modèle hydraulique	84
IX.1.3	Altitudes	85
IX.1.4	Répartition des débits	86
IX.1.5	Profils de charge	87
IX.1.6	Etude des pressions	89
IX.2	Solutions proposées	93
IX.2.1	Solution S3-1	93
IX.2.2	Solution S3-2	93
IX.2.3	Solution S3-3	93
IX.2.4	Solution S3-4	93
IX.2.5	Solution S3-5	94
IX.3	Bilan des solutions proposées	94
IX.3.1	Bilan en pression	94
IX.3.2	Bilan en volume d'eau économisés	96
IX.3.3	Bilan en terme de ratio coût efficacité	96
IX.3.4	Recherche de Pminlimite secteur S3	97
X	Annexe 3 : Elaboration d'un critère économique pour le choix d'une solution de régulation de pression	99
X.1	Généralités sur l'ACE	99

X.2 Application de la méthode à la régulation de pression	100
X.2.1 Choix du référentiel	100
X.2.2 Calcul du coût	101
X.2.3 Estimation de l'impact	102
X.2.4 Calcul du ratio coût efficacité	102
X.2.5 Référence de comparaison	103

Table des illustrations

Figures

FIGURE 1: SCHEMA D'ACTION DE LUTTE CONTRE LES PERTES [RENAUD ET AL., 2012]	13
FIGURE 2 : UTILISATION COMBINEE DE ILI ET PMI [TROW, 2009]	16
FIGURE 3 : REGIMES PIEZOMETRIQUES DE FONCTIONNEMENT D'UN STABILISATEUR DE PRESSION AVAL	21
FIGURE 4 : SCHEMA D'INSTALLATION D'UNE VANNE DE REGULATION	23
FIGURE 5 : SCHEMA DU RESEAU MODELISE	28
FIGURE 6 : DEMANDE UTILISEE POUR LA SIMULATION	29
FIGURE 7 : CONSIGNE DE PRESSION DU STABILISATEUR	29
FIGURE 8 : EXEMPLE DE COURBE, AVEC DEMANDE CONSTANTE.....	30
FIGURE 9 : EXEMPLE DE COURBE COMPARATIVE EPANET, PORTEAU, SYNERGEE.....	31
FIGURE 10 : SECOND EXEMPLE DE COURBE COMPARATIVE EPANET, PORTEAU, SYNERGEE	31
FIGURE 11 : SCHEMA DU RESEAU SANS STABILISATEUR	32
FIGURE 12: PRESSION MOYENNE EN FONCTION DU NOMBRE DE STABILISATEURS POUR LE SECTEUR S2.....	43
FIGURE 13: PRESSION MOYENNE EN FONCTION DE $1/(NOMBRE \text{ STABILISATEURS}+1)$ SECTEUR S2	44
FIGURE 14: $P_{MONYOND}-P_{MINMIN}=F(P_{10\%}-20)$	47
FIGURE 15: $P_{MOYOND}-P_{MINLIMITE}=F(P_{CRITIQUE})$	48
FIGURE 16 : REGIMES PIEZOMETRIQUES DE FONCTIONNEMENT D'UN STABILISATEUR DE PRESSION AVAL	56
FIGURE 17 : VANNE A REGULATION MECANIQUE BAYARD « MONOSTAB SERIE F2 10 »	57
FIGURE 18 : VUE EN COUPE D'UNE VANNE A REGULATION MECANIQUE.....	58
FIGURE 19 : VANNE A REGULATION MECANIQUE : EQUILIBRE DES FORCES LIEES A LA PRESSION AMONT.....	58
FIGURE 20 : VANNE A REGULATION MECANIQUE : ACTION DES FORCES LIEES AU RESSORT ET A LA PRESSION AVAL	59
FIGURE 21 : VANNE A REGULATION HYDRAULIQUE BAYARD « HYDROBLOC »	60
FIGURE 22: VANNE A REGULATION HYDRAULIQUE, FORCES EN JEU	62
FIGURE 23 : VANNE A REGULATION HYDRAULIQUE : DEBITS ET PERTES DE CHARGE.....	62
FIGURE 24 : ELEMENT D'APPAREIL MOBILE AYANT SUBI LE PHENOMENE DE CAVITATION.....	65
FIGURE 25 : DIAGRAMME DE CONTROLE DU PHENOMENE DE CAVITATION	66
FIGURE 26 : DIAGRAMME DE CONTROLE DES VITESSES	67
FIGURE 27 : DIAGRAMME DE CONTROLE DES TAUX D'OUVERTURE	67
FIGURE 28 : IMPACT DE LA PERTE DE CHARGE DU STABILISATEUR SUR LE DEBIT INCENDIE	69
FIGURE 29 : IMPACT DE LA CONSIGNE DU STABILISATEUR SUR LE DEBIT INCENDIE	69
FIGURE 30 : SCHEMA D'INSTALLATION D'UNE VANNE DE REGULATION	71
FIGURE 31 : PRESSIONS EN PERIODE DE POINTE	75
FIGURE 32 : PRESSIONS DE NUIT	76
FIGURE 33 : STABILISATEUR AVEC CONSIGNE FIXE	76
FIGURE 34 : STABILISATEUR AVEC CONSIGNE MODULEE	77
FIGURE 35 : MODULATION PAR ACTION SUR LA TENSION DU RESSORT	78
FIGURE 36 : MODULATION PAR ELECTROVANNE ET DOUBLE PILOTE.....	78
FIGURE 37 : MODULATION HYDRAULIQUE PAR COMPENSATEUR.....	79
FIGURE 38 : NIVEAU D'EAU DANS LE RESERVOIR DE C.	81
FIGURE 39 : CARACTERISTIQUE DE LA POMPE SRP_P._GR1_PORVISOIRE	82
FIGURE 40 : COURBE D'ASSERVISSEMENT DE LA POMPE SRP_P._GR1_PORVISOIRE.....	82
FIGURE 41 : SCHEMA DU SECTEUR BCP.....	83
FIGURE 42 : PROFIL DE CONSOMMATION DOMESTIQUE.....	84
FIGURE 43 : ALTITUDE DU SECTEUR B. C. P.	85
FIGURE 44 : CARTES DES DEBITS A 4H DU MATIN – B. C . P.	86
FIGURE 45 : CARTES DES DEBITS A 8H – B.C . P.	87
FIGURE 46 : SCHEMA DU PROFIL DE CHARGE N°1	87
FIGURE 47 : SCHEMA DU PROFIL DE CHARGE N°2	88
FIGURE 48 : PERTES DE CHARGE LE LONG DU PROFIL N°1	88
FIGURE 49 : PERTES DE CHARGE LE LONG DU PROFIL N°2	89

FIGURE 50 : REPARTITION DES PRESSIONS – B. C. P.	90
FIGURE 51 : REPARTITION DES ECARTS TEMPORELS DE PRESSION – B. C. P.	90
FIGURE 52 : CARTE DES ZONES DE PRESSION B. C. P.	92
FIGURE 53 : REPARTITION DES PRESSIONS B. C. P.	95
FIGURE 54 : : REPARTITION DES ECARTS TEMPORELS DE PRESSION B. C. P.....	95
FIGURE 55 : S3 - PRESSION MOYENNE EN FONCTION DE $1/(NOMBRE\ DE\ STABILISATEURS+1)$	98
FIGURE 56: PRESSION MOYENNE SECTEUR S2 EN FONCTION DU NOMBRE DE STABILISATEURS	99

Tableaux

TABLEAU 1: COMPARAISON EPANET, SYNERGEE, PORTEAU SANS STABILISATEUR	32
TABLEAU 2: INDICATEURS DESCRIPTIFS S1 A S10	38
TABLEAU 3: BILAN DES PRESSIONS MOYENNES PONDEREES PAR LA CONSOMMATION S1 A S10	39
TABLEAU 4: VOLUME ECONOMISES SECTEUR S4	40
TABLEAU 5: VALEURS PRISES POUR LE CALCUL DU CMA	40
TABLEAU 6: RESULTATS CMA SECTEUR S4	41
TABLEAU 7: RATION COUT EFFICACITE S4	41
TABLEAU 8: RATIO €/M3 DE TOUS LES SECTEURS PAR RAPPORT AU SECTEUR INITIAL	42
TABLEAU 9: RATIO €/M3 CALCULES POUR LES M3 ADDITIONNELS.....	42
TABLEAU 10: SOLUTION RETENUE PAR L'APPLICATION DU CRITERE ECONOMIQUE.....	43
TABLEAU 11: PRESSIONS CARACTERISTIQUES DE CHACUN DES SECTEURS	44
TABLEAU 12: MATRICE DE CORRELATION D'ELEMENTS DESCRIPTIFS DES SECTEURS INITIAUX.....	45
TABLEAU 13: MATRICE DE CORRELATION LIANT LES ELEMENTS DESCRIPTIFS ET P _{MINECO} , P _{MINMIN} , P _{MINLIMITE}	46
TABLEAU 14: MATRICE DE CORRELATION LIANT LES INDICATEURS ET LES DONNEES DESCRIPTIVES (EXTRAIT)	47
TABLEAU 15 : BILAN DES RELATIONS, EQUATIONS ET R ² APRES ANALYSE DES DONNEES	48
TABLEAU 16: ENTRETIEN ANNUEL D'UNE VANNE DE REGULATION	72
TABLEAU 17: ENTRETIEN QUADRIENNAL D'UNE VANNE DE REGULATION.....	73
TABLEAU 18: ENTRETIEN DECENNAL D'UNE VANNE DE REGULATION	74
TABLEAU 19 : DEMANDE DES CONSOMMATEURS LES PLUS IMPORTANTS DU SECTEUR B. C. P.....	85
TABLEAU 20 : RECAPITULATIF DES INDICATEURS DE PRESSION CALCULES POUR LE SECTEUR B. C. P.....	94
TABLEAU 21 : RECAPITULATIF DES VOLUMES ECONOMISES PAR SOLUTION S3	96
TABLEAU 22 : BILAN DES CMA EN € DE CHACUNE DES SOLUTIONS DE B. C. P.....	97
TABLEAU 23 : RATIO COUT EFFICACITE B. C. P.....	97
TABLEAU 24 : ATOUTS ET INCONVENIENT DE L'ANALYSE COUT EFFICACITE	100
TABLEAU 25 : COUTS D'UN STABILISATEUR DN100 INSTALLE DANS UNE CHAMBRE DE VANNES.....	102
TABLEAU 26 : COUTS D'UNE VANNE DE SECTIONNEMENT DN100 INSTALLEE SOUS BOUCHE A CLEF.....	102
TABLEAU 27 : RATIOS COUT EFFICACITE DE MESURES D'ECONOMIE D'EAU OU DE SUBSTITUTION DE RESSOURCE.....	103

Sigles, acronymes et abréviations

ACE Analyse Coût Efficacité

AEP Alimentation en Eau Potable

CARL Current Annual Real Losses

CASP Current Average System Pressure

CEMAGREF Centre du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts

CGCT Code Général des Collectivités Territoriales

CLE Commission Locale de l'Eau

CMA Coût Moyen Annuel

DTS Direction Technique et Synergies

ENGEEES École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg

EPANET Environmental Protection Agency Network

GLI Global Leakage Index

ILC Indice Linéaire de Consommation

ILI Infrastructure Leakage Index

ILP Indice Linéaire de Perte

Irstea Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

IWA International Water Association

m Mètre

Mce Mètre de Colonne d'Eau

MARP Minimum Annual Référence Pressure

NETWATER NETwork WATER (UK), réseau d'eau (F)

PMI Pressure Management Index

R Coefficient de corrélation

RAD Rapport Annuel du Délégué

REBX Réseaux Epuration et Qualité des Eaux

RPQS Rapport annuel sur le Prix et la Qualité du Service public d'eau potable et d'assainissement

SAGE Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SIG Système d'Information Géographique

SMEGREG Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau de la Gironde

UARL Unavoidable annual Real Losses

WSAA Water Services Association of Australia

Notations

deltaP10% : valeur de l'amplitude temporelle de pression du nœud de consommation à 10% de l'effectif total d'un secteur

deltaP50% : valeur de l'amplitude temporelle de pression du nœud de consommation à 50% de l'effectif total d'un secteur

deltaP90% : valeur de l'amplitude temporelle de pression du nœud de consommation à 90% de l'effectif total d'un secteur

Pmoypond : pression moyenne du secteur pondérée par la consommation

Pmin : pression minimum moyenne atteignable sur un secteur

Pminéco : pression minimum moyenne atteinte en utilisant la méthode ACE

Pcritique : pression minimum journalière du point critique d'un secteur

Pmoycritique : pression moyenne journalière du point critique d'un secteur

Pminmin : pression moyenne minimale atteinte par la modélisation

Pminlimite : pression moyenne minimale limite obtenue par extrapolation

P10% : premier décile de la distribution des pressions des nœuds auxquels sont rattachées les consommations

P50% : médiane de la distribution des pressions des nœuds auxquels sont rattachées les consommations.

P90% : neuvième décile de la distribution des pressions des nœuds auxquels sont rattachées les consommations

Sn : secteur n

Sn-s : solution s du secteur n

I Introduction au sujet de stage

I.1 Cadre général de l'étude

La lutte contre les fuites dans les réseaux d'eau potable est une préoccupation majeure tant du côté des organismes publics que des exploitants. Réduire les pertes en eau permet d'une part d'économiser la ressource, d'autre part d'économiser de l'argent.

Il existe quatre familles d'actions pour lutter contre les pertes (Figure 1) :

- La recherche active de fuites permet de réduire les pertes dues aux fuites détectables non-visibles ;
- La rapidité d'intervention permet de réduire les pertes dues aux fuites visibles ou détectées en réduisant leur temps d'écoulement ;
- Le contrôle de la pression permet de réduire les pertes dues aux fuites de tous types en réduisant leur débit d'écoulement, elle permet par ailleurs de réduire le nombre de casses ;
- La gestion patrimoniale ciblée (renouvellement ou réhabilitation des canalisations, branchements et autres organes du réseau), réduit le nombre de fuites de tous types sur les organes concernés.

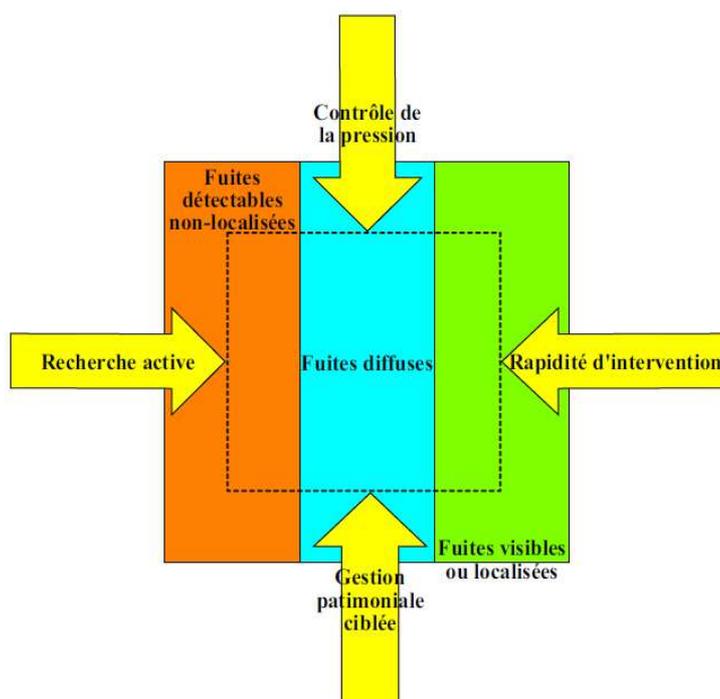


Figure 1: schéma d'action de lutte contre les pertes [Renaud et al., 2012]

La gestion de la pression est donc l'un des axes de lutte contre les fuites que l'on peut envisager, avec cependant une limite : la réduction de la pression ne doit pas altérer la qualité du service rendu à l'abonné.

I.1.1 Intérêt de la gestion de pression

Beaucoup d'études ont été menées à l'étranger sur l'intérêt de réduire la pression dans les réseaux de distribution d'eau potable.

Une réduction de pression réduit non seulement les fuites, mais aussi leur taux d'apparition. Ainsi, le contrôle de la pression empêche un vieillissement prématuré du réseau. Les casses sont alors réduites et les pertes en eau diminuent. Une étude expérimentale a montré que la réduction de pression est plus efficace quand les fuites et les pressions sont relativement grandes et que, dans certains cas, le contrôle de la pression ne peut se faire que pendant les heures creuses [Farley *et al.*, 2008].

Dans la plupart des études, une ou plusieurs vannes de contrôle, destinées à diminuer la pression, sont placées dans le réseau d'eau potable et une réduction du volume des fuites est observée.

Exemples : [Moreau, 2007]

- Manchester : installation de 118 vannes de régulation => économie de 58 000 m³/j,
- Johannesburg : installation de 14 vannes de régulation => économie de 22 000 m³/j,
- Londres : installation de 31 vannes de régulation => économie de 29 000 m³/j,
- Sao Paulo : installation de 66 vannes de régulation => économie de 65 000 m³/j.

Autre exemple : Maroc étage 85 à Casablanca, installation de 6 vannes de régulation => économie de 8000 m³/j [Lkhalidi, 2007]

I.1.2 Indicateurs de pertes

I.1.2.1 Indicateurs de perte utilisés en France

Les indicateurs caractérisant la performance des services d'eau sont définis dans le Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT) (décret et arrêté du 2 mai 2007 codifié dans les annexes V et VI des articles D2224-1 à D2224-3). En ce qui concerne les pertes en eau, deux indicateurs sont principalement utilisés :

- Le rendement du réseau de distribution
- L'Indice Linéaire de Pertes. Il s'exprime en m³/(km.j).

Ces deux indicateurs se calculent de la façon suivante :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Volume consommé autorisé}}{\text{Volume mis en distribution}} \times 100$$

$$\text{ILP} = \frac{\text{Volume mis en distribution} - \text{Volume consommé autorisé}}{\text{Longueur du réseau de desserte} \times 365}$$

Avec :

$$\text{Volumemis en distribution} = \text{Volumeproduit} + \text{Volumeacheté en gros} - \text{Volumevendu en gros}$$

$$V_{\text{volume consommé autorisé}} = V_{\text{volume comptabilisé}} + V_{\text{volume consommateur sans comptage}} - V_{\text{volume de service du réseau}}$$

Le rendement est fortement influencé par les évolutions de la consommation. Ainsi, à volume de perte constant, une baisse de consommation entrainera une baisse du rendement, sans pour autant que la performance du réseau ne se soit dégradée.

Pour apprécier la valeur de l'ILP d'un réseau il est nécessaire de prendre en compte son caractère urbain ou rural qui est souvent apprécié à l'aide de l'Indice Linéaire de Consommation (ILC). Apprécier ILP en fonction de ILC est très similaire au rendement, et présente donc les mêmes inconvénients.

En tout état de cause, aucun de ces deux indicateurs ne prend en compte la pression, or nous avons vu auparavant que c'est un paramètre qui influence le volume de perte. Ce n'est pas le cas au niveau l'international où plusieurs indicateurs utilisent cette notion.

I.1.2.2 Indicateurs internationaux prenant en compte la pression

a) Infrastructure Leakage Index (ILI)

ILI est un indicateur de performance visant à évaluer la gestion opérationnelle des pertes [Alegre *et al.*, 2006], qui a été développé par l'IWA (International Water Association). Il est largement utilisé dans plusieurs pays depuis une dizaine d'années. Il est le quotient des Pertes Réelles Annuelles (CARL, Current Annual Real Losses) et des Pertes Réelles Annuelles Incompressibles (UARL, Unavoidable Annual Real Losses). On entend par pertes réelles, les pertes qui ne sont pas issues d'erreurs de comptage ou de vols d'eau :

$$ILI = \frac{CARL}{UARL}$$

UARL est calculé en utilisant la formule suivante:

$$UARL(\text{litres / day}) = (18 \times L_m + 0.8 \times N_c + 25 \times L_p) \times P$$

où L_m est la longueur du réseau (km), N_c est le nombre de branchements, L_p la longueur cumulée entre le réseau public et le compteur de l'abonné (km), et P la pression moyenne en mcE.

ILI fait intervenir la pression explicitement au dénominateur et implicitement au numérateur. En effet, si l'on modifie la pression, tout comme UARL, CARL est changé. ILI n'est donc pas représentatif de l'impact de la gestion de la pression. C'est pour cela que S.W. Trow [Trow, 2009] propose un autre indicateur : PMI (Pressure Management Index).

b) Pressure Managment Index

Le PMI, Pressure Management Index est le quotient de la pression moyenne de service (Current Average System Pressure, CASP) et de la pression annuelle minimum de référence (Minimum Annual Reference Pressure, MARP):

$$PMI = \frac{CASP}{MARP}$$

S.W. Trow [Trow, 2009] a suggéré d'utiliser ILI et PMI ensemble afin de surveiller les progrès dans la réduction des volumes de pertes grâce à la gestion de pression et la recherche active de fuite (Figure 2).

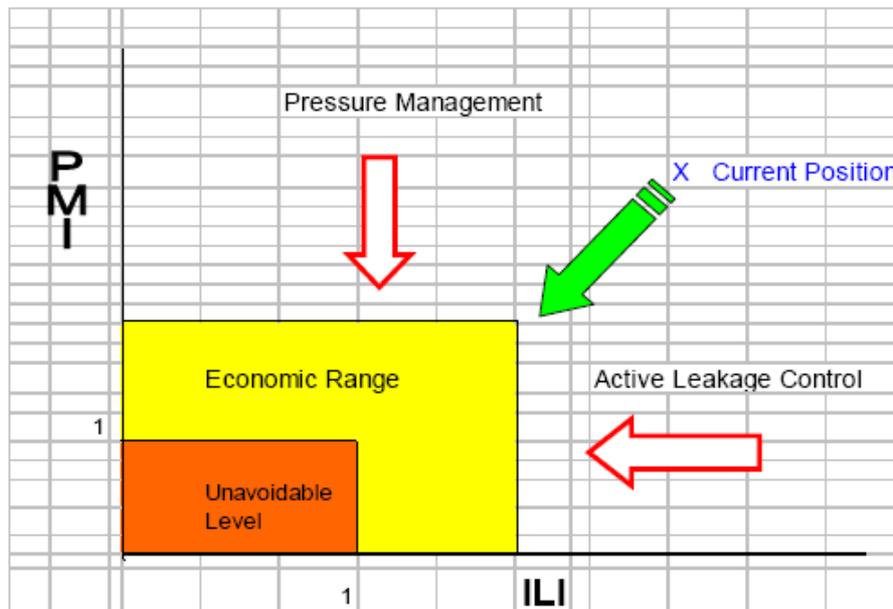


Figure 2 : Utilisation combinée de ILI et PMI [Trow, 2009]

1.1.2.3 Création d'un nouvel indicateur

Dans ce contexte, une collaboration entre l'unité REBX (Réseau Epuration et Qualité des Eaux) de l'Irstea de Bordeaux et la DTS de l'entreprise Veolia Eau (Direction Technique et Synergies) a vu le jour, son objectif est la création d'un indicateur de pertes incluant le nombre de branchements et la pression.

Le présent stage, pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES pour la formation initiale et intitulé "Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d'une zone de desserte d'un réseau d'alimentation en eau potable" s'inscrit dans la continuité de trois études : la première, menée par Irstea dans le cadre d'un projet réalisé pour le compte de l'ONEMA (Office national des milieux aquatiques) s'est intéressée au calcul de la pression moyenne sur une zone de desserte [Sissoko, 2010], la seconde, dans le cadre du même projet, a porté sur le suivi des actions de lutte contre les fuites dont la réduction de pression [Aubin, 2011]. La dernière, réalisée dans le cadre de la collaboration entre Irstea et Veolia, a concerné l'évaluation de la pertinence technique d'un indicateur prenant en compte la pression [Le Glatin, 2011].

II Lien entre pression et pertes

II.1 Formulation du lien pression/volumes de pertes

Lorsque l'on étudie le lien entre la pression et le débit de perte à l'échelle d'un secteur, on considère généralement que le débit de fuite (L) est une fonction puissance de la pression (P) avec un exposant de fuite donné (N1) [Thornton, 2003] :

$$\frac{L1}{L0} = \left(\frac{P1}{P0} \right)^{N1}$$

Avec :

L0 et P0 : les valeurs avant la réduction de la pression

L1 et P1 : les valeurs après la réduction de la pression

Les règles de l'hydraulique (formule de Torricelli, vitesse d'écoulement d'un fluide en fonction de la charge, $v=\sqrt{2gP}$) conduisent à une valeur de N1=0,5 si l'on assimile une fuite à un orifice de taille constante.

Toutefois l'expérience montre que, la taille et la forme de l'orifice varient en fonction de la pression, du matériau et du type de fuite. Ainsi en pratique, l'exposant N1 varie de 0,5 à 2,5 suivant le type de fuite et sa proportion sur le réseau.

Le débit des fuites diffuses (joints, raccords, points de corrosion) est très sensible à la pression, avec des valeurs typiques de N1 proches de 1,5.

La valeur typique de N1 pour les fuites sur les conduites en plastique est généralement de 1,5, mais peut atteindre 2,5 (orifice de la fuite très déformable).

La valeur typique de N1 pour les fuites importantes sur les conduites en métal est proche de 0,5 (orifice de la fuite peu déformable).

Sans connaissance particulière des matériaux des conduites et des niveaux de pertes, on fait l'hypothèse d'une relation linéaire entre la pression et le débit des pertes (N1 = 1).

II.2 Objectif de l'étude

Dans la prolongation des indicateurs proposés par l'IWA, Irstea propose un nouvel indicateur, GLI.(Global Leakage Index) [Renaud, 2009] qui s'exprime de la façon suivante :

$$GLI = ILI \times PMI$$

Il est le produit d'ILI et de PMI, et représente l'aire délimitée par les valeurs d'ILI et PMI (Figure 2). Il permet donc d'avoir une idée globale du potentiel de réduction des pertes en utilisant une combinaison de recherche active et de gestion de la pression.

Ce stage porte sur la partie PMI, et a pour but de définir au dénominateur une pression moyenne minimale atteignable sur un secteur Pmin, qui remplacerait la notion de MARP.

$$GLI = ILI \times PMI = ILI \times \frac{CASP}{P_{\min}}$$

En effet, la notion utilisée par S.W Trow [Trow, 2009] est la pression de service minimum standard délivrée au compteur de l'utilisateur (en France, souvent 20 mCe), or cette valeur de pression moyenne minimale est généralement techniquement et économiquement irréaliste. Il convient donc de savoir quelle valeur peut être raisonnablement envisagée, et comment la calculer.

II.3 Méthode globale

L'objectif de ce stage est de savoir quelle est la pression minimum moyenne atteignable pour un secteur de distribution d'eau potable donné.

Pour le calcul de la pression moyenne d'une zone (CASP), nous utiliserons une des méthodes mises en œuvre par Mamadou Toumani Sissoko lors de son stage de fin d'étude : La méthode hydraulique [Sissoko, 2010].

II.3.1 Méthode hydraulique pour le calcul de CASP

Les méthodes proposées par [Sissoko, 2010] sont inspirées des méthodes de calcul de la pression moyenne de service mises en œuvre par La Water Services Association of Australia (WSAA), mais adaptées aux données disponibles dans les services français.

La méthode hydraulique consiste tout d'abord à calculer, grâce à un modèle hydraulique, la pression dynamique moyenne journalière de chacun des nœuds du réseau. Pour cela on calcule pour chaque nœud la pression à chaque pas de temps et on en fait une moyenne.

Ensuite, la pression moyenne journalière du secteur est le résultat de la moyenne pondérée des pressions moyennes journalières de chacun des nœuds.

L'étude de Mamadou Sissoko a montré que le meilleur système de pondération serait le nombre de branchements, car des pertes importantes sont constatées au niveau des branchements, cependant cette donnée n'étant généralement pas disponible au niveau des nœuds sur les secteurs d'études, elle est remplacée par la consommation au nœud, que l'on estime représentative du nombre de branchements.

L'équation donnant la pression moyenne est alors :

$$P_{\text{moyenne_secteur}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{moyenne_journaliere}_i} \times C_{\text{journaliere}_i}}{\sum_{i=1}^n C_{\text{journaliere}_i}}$$

Avec

N, nombre de nœuds sur le secteur

I, nœud

P, pression,

C, consommation

Selon [Sissoko, 2010]: « L'utilisation de la méthode hydraulique nécessite un bon modèle de réseau, une bonne connaissance de la demande (courbe de consommation) sinon il y a un risque d'erreur sur l'évaluation de paramètres »

II.3.2 Démarche suivie pour la détermination de Pmin

Sur les secteurs d'étude, nous allons simuler un projet de diminution de pression, en passant par une modélisation hydraulique.

L'idée est d'ajouter sur le secteur un certain nombre d'ouvrages permettant de réduire la pression, jusqu'à ce que l'on estime que la pression ne peut pas être davantage réduite de façon sensible sans l'ajout d'un nombre démesuré d'appareils. Pour chaque solution la pression moyenne de service est calculée selon la méthode exposée précédemment.

Même si la méthode choisie utilise un modèle numérique, il nous paraît important de garder à l'esprit la faisabilité du projet, et de n'utiliser que des technologies existantes et dans leurs limites d'utilisation.

Une fois Pmin déterminée, la deuxième étape du travail consiste à rechercher une méthode permettant d'approcher cette valeur sans passer par une étude complète.

Pour réaliser ces objectifs le plan de travail suivant a été adopté:

- Tout d'abord établir un état de l'art à la fois sur les technologies existantes en matière de régulation de pression, et également sur les logiciels de modélisation hydraulique que nous allons utiliser.
- Etablir une méthodologie de diagnostic puis d'étude des différents secteurs.
- Mettre en pratique cette méthode sur plusieurs secteurs.
- Analyser les résultats obtenus, et tenter d'identifier les paramètres qui influencent significativement la valeur de Pmin et qui permettraient de la déterminer rapidement.

III Etat de l'art, technologie et logiciels de modélisation

III.1 Technologie de régulation de pression

Cette partie a fait l'objet d'un rapport plus détaillé disponible en Annexe 1 ; nous nous contenterons ici de résumer l'essentiel.

III.1.1 Préambule

On utilisera l'expression « régulation de pression » pour désigner la mise en œuvre de dispositifs spécifiquement destinés à modifier la pression d'une zone de desserte en eau. Au sein de la régulation de pression on distinguera la « réduction de pression » qui vise à réduire la pression d'une zone selon une consigne stable dans le temps (supérieur à un jour) et la « modulation de pression » qui vise à adapter la pression en fonction d'un paramètre potentiellement variable dans un temps inférieur à la journée.

III.1.2 La réduction de pression

Dans le domaine de la réduction de pression, trois grandes technologies peuvent essentiellement être utilisées :

- Les pompes à vitesse variable
- Les vannes à opercule perforé
- Les stabilisateurs de pression aval

Les deux premières technologies restent une exception, c'est pour cela que nous nous intéresserons en priorité aux stabilisateurs de pression aval [Guillaume Jean-Paul, 2012].

III.1.2.1 Principe de fonctionnement du stabilisateur de pression aval

Un stabilisateur de pression aval est une vanne, qui ajuste son degré d'ouverture pour créer une perte de charge qui abaisse la pression dans le but de respecter une consigne de pression fixe à son aval.

Dans la pratique, certains stabilisateurs sont munis d'un système anti-retour, et d'autres non. Cette technologie est conçue pour fonctionner selon un sens d'écoulement de l'eau unique, nous considérerons donc, pour clarifier les choses, que le stabilisateur aval est muni d'un clapet anti-retour ; ainsi, dans le cas où la pression aval est supérieure à la pression amont, le clapet se ferme et il n'y a pas de circulation de l'eau.

Dans le cas où la pression amont est supérieure à la pression aval, trois cas se présentent (Figure 3) :

1. La pression amont est supérieure à la pression de consigne, et il n'y a pas de contre pression aval supérieure à la pression de consigne

2. La pression amont est supérieure à la pression de consigne, et il y a une contre pression aval supérieure à la pression de consigne.
3. La pression amont est inférieure à la pression de consigne

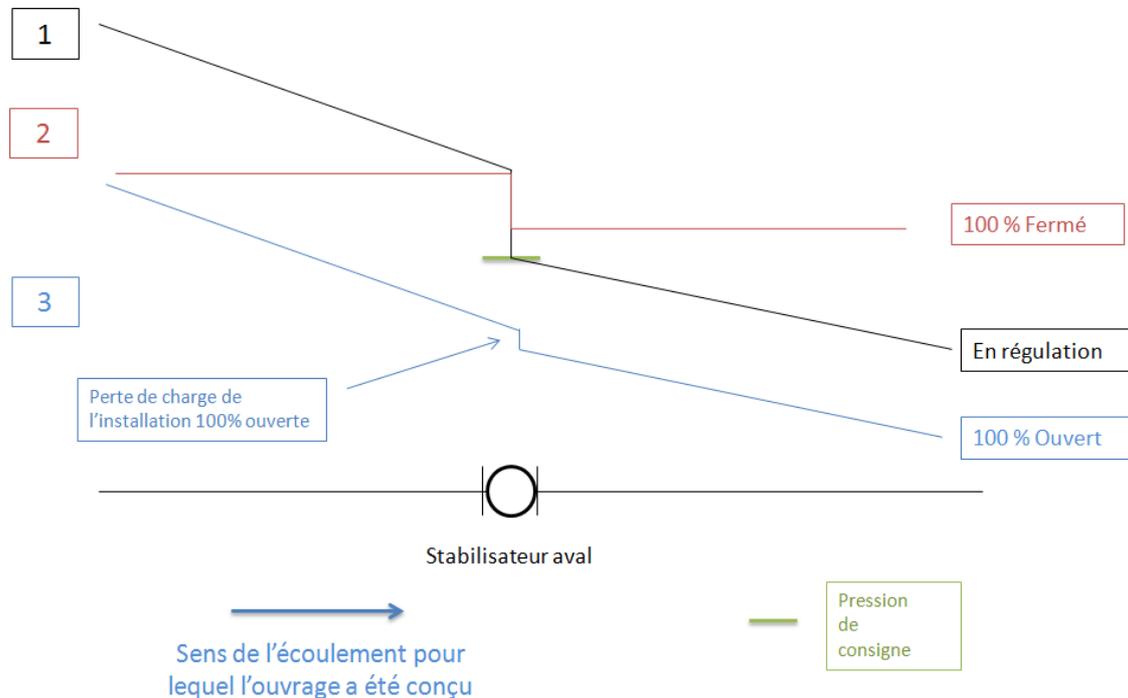


Figure 3 : Régimes piézométriques de fonctionnement d'un stabilisateur de pression aval

En fonctionnement normal, on se trouve dans la situation 1 et la pression aval se régule autour d'une valeur pré-réglée, qui ne varie que si l'on change la consigne de fonctionnement de l'ouvrage

III.1.2.2 Différents type de stabilisateurs

Il existe deux grands types de vannes stabilisatrices de pression aval :

- les vannes à régulation mécanique ;
- et les vannes à régulation hydraulique

Tous les détails concernant ces deux types de vannes, schéma et fonctionnement se situent en Annexe 1.

Le premier type de vanne régule la pression en compensant les forces de pression amont et aval par l'action d'un ressort ; la seconde est asservie par un pilote hydraulique.

III.1.2.3 Limites d'utilisation et solutions techniques

a) Dimensionnement

Des éléments de dimensionnement sont donnés en Annexe1, cependant nous retiendrons quelques chiffres.

Les conditions de vitesse optimales sont : $3\text{m.s}^{-1} < v < 5 \text{ m.s}^{-1}$. Dans des conditions exceptionnelles de débit (type débit incendie) la vitesse d'écoulement ne doit pas dépasser 7m.s^{-1} .

Pour un dimensionnement correct, il convient de vérifier que la vanne s'ouvre à 70% dans les conditions normales d'utilisation. La marge de 15 à 30% permet d'accepter un débit exceptionnel ponctuel qui pourrait se manifester pendant une courte période.

b) Condition d'ouverture de la vanne

La vanne ayant un poids, il faut un différentiel de pression minimum pour pouvoir l'ouvrir, par exemple la valeur pour les vannes Hydrobloc de type XG de Bayard est 0,4bar. C'est une valeur minimale, importante pour que le mécanisme d'obturation de la vanne de base puisse se mettre en mouvement ascendant et descendant.

c) Cavitation

Pour éviter la cavitation, si les conditions de pression sont trop critiques et ne permettent pas d'installer une vanne (même en ajoutant un dispositif dissipatif d'énergie anti-cavitation), il est possible de poser deux stabilisateurs de pression aval en série, afin de diviser la réduction de pression en deux paliers.

d) Ecart de débits importants

Si l'écart entre les débits transitant par exemple le jour et la nuit est trop important, il est envisageable de monter deux stabilisateurs de diamètres différents en parallèle. Le stabilisateur de petit diamètre est réglé avec une consigne de pression la plus haute, ainsi c'est lui qui fonctionne pour les faibles débits (le stabilisateur de diamètre plus important ayant une consigne plus faible, il reste fermé). Lorsqu'un débit important est appelé, le stabilisateur de petit diamètre s'ouvre en entier et occasionne une perte de charge importante de telle sorte que la pression aval baisse au dessous de la consigne d'ouverture du second stabilisateur.

e) Protection incendie

Un élément important à prendre en compte lorsque l'on veut faire de la régulation de pression est la contrainte de protection incendie. Si elle est présente il faut garantir un débit minimum (le plus souvent $60 \text{ m}^3/\text{h}$ à 1bar de pression aux poteaux-incendie), que le stabilisateur peut dans certains cas contrarier.

Deux cas sont à envisager :

1. La perte de charge singulière créée par le stabilisateur à pleine ouverture ne permet pas de satisfaire la sécurité incendie (en général stabilisateur de petit diamètre)

2. La pression de consigne du stabilisateur est trop basse pour permettre de délivrer le débit compte tenu des pertes de charge engendrées par le tronçon aval.

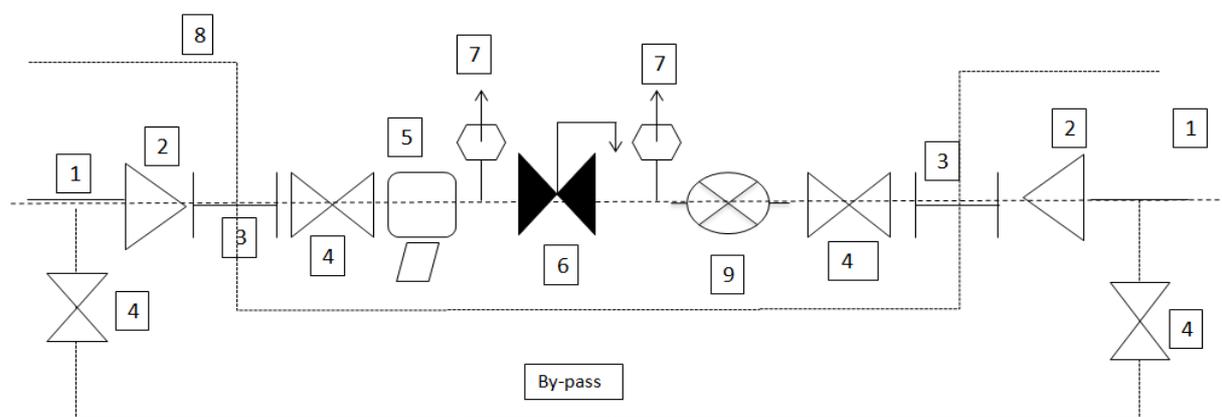
Le premier cas peut se résoudre avec la même solution que pour les écarts de débits importants évoqués précédemment, c'est-à-dire l'installation de deux stabilisateurs de diamètres différents.

Dans le second cas, il n'y a pas d'autre choix que de changer la consigne du stabilisateur.

III.1.2.4 Réalisation d'une installation de régulation de pression

De plus amples détails concernant l'installation d'un stabilisateur se trouvent en Annexe1, cependant nous mettrons ici le schéma type d'une installation en petit diamètre inspirée de [Ramarojaona, 2009] (Figure 4)

Chambre de vanne type en petit diamètre



Légende :

- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1- Conduite du réseau | 5-Boîte à boue |
| 2-Cône | 6-Stabilisateur de pression |
| 3-Manchette d'ancrage | 7-Ventouse |
| 4-Robinet vanne papillon | 8-Chambre de régulation |
| | 9-Compteur |

Figure 4 : Schéma d'installation d'une vanne de régulation

Concernant la maintenance, trois tableaux détaillés sont fournis en Annexe1 ; il est conseillé d'effectuer la maintenance usuelle une fois par an.

III.1.3 Modulation de pression

III.1.3.1 Principe

La modulation de pression est une solution qui permet d'adapter la pression aux variations de pertes de charges dans le réseau

En effet, la pression en un point du réseau est égale à la pression statique moins les pertes de charges générées par le réseau :

$$P = P_{\text{statique}} - J$$

Or les pertes de charges augmentent avec le débit, ainsi la pression varie de façon inverse à la demande. Lorsque la demande est maximale (en général, le jour), les pertes de charges sont élevées et la pression chez l'utilisateur est minimale. Au contraire, quand la demande est minimale (en général la nuit), les pertes de charges sont faibles et les pressions plus importantes. La modulation de pression a donc pour objectif d'ajuster la pression aux variations de pertes de charge.

En pratique, pour mettre en œuvre une modulation de pression on s'intéresse aux conditions de pression d'un point critique du réseau, c'est-à-dire un des points où les pressions en pointe sont les plus faibles (Lorsque qu'un tel point ne concerne qu'une sous partie du réseau nous avons choisi de le nommer « point limitant » de la zone). Ensuite la pression de consigne du stabilisateur de pression est ajustée pour que la pression au point critique reste proche du minimum requis pour assurer la qualité du service.

La modulation de pression est d'autant plus efficace que les variations journalières de pression au point critique sont importantes. C'est le cas notamment, pour des réseaux qui ne sont pas surdimensionnés et pour lesquels les variations de la demande sont importantes.

III.1.3.2 Technologie de la modulation de pression

Les vannes de modulation de pression sont des stabilisateurs de pression aval à régulation hydraulique auxquels on rajoute une commande.

L'asservissement de la commande peut être de trois types :

- Asservissement horaire commandé par une horloge (souvent une consigne de jour et une consigne de nuit) ;
- Asservissement au débit, la consigne est corrigée en fonction du débit mesuré au niveau de stabilisateur ;
- Asservissement à la pression mesurée en un point du réseau (souvent un point critique).

Plusieurs technologies permettent de moduler la consigne de la vanne de régulation en fonction de la commande. Les principales familles sont :

- La commande électronique par action sur la tension du ressort du pilote ;
- La commande par électrovannes de pilotes multiples ;
- La commande hydraulique par compensateur.

III.2 Logiciels de modélisation hydraulique

Le but de cette partie est de comparer les trois logiciels de modélisation à notre disposition afin de mieux comprendre comment ils modélisent les stabilisateurs et pour s'assurer que le choix du logiciel utilisé n'impacte pas les résultats. On ne cherche pas ici à comparer les équations ou le code utilisé, mais plutôt l'idée générale de la modélisation et les résultats obtenus.

On commencera donc par comparer la façon dont sont représentés les stabilisateurs de pression aval au sein des logiciels Epanet, Porteau et SynerGEE avant de comparer les résultats d'une modélisation très simple sur les trois logiciels.

III.2.1 Modélisation d'un ou plusieurs stabilisateurs aval sur Epanet, Porteau et SynerGEE

III.2.1.1 Epanet

a) Cas d'un stabilisateur

Epanet modélise un stabilisateur comme étant une vanne, c'est-à-dire un arc, ayant une longueur nulle. Les éléments calculés en sortie de simulation pour une vanne sont le débit et la perte de charge hydraulique.

Une vanne stabilisatrice aval limite la pression au nœud aval, et le logiciel calcule à chaque pas de temps l'état dans lequel se trouve la vanne. Il y a trois états possibles :

- Partiellement ouvert : c'est-à-dire en régulation, pour maintenir une pression en aval qui corresponde à la consigne voulue, quand la pression en amont est plus élevée que la pression de consigne
- Entièrement ouvert : si la pression en amont est au-dessous de la consigne souhaitée.
- Fermé si la pression en aval dépasse la consigne.

Le stabilisateur ne permet l'écoulement que dans un sens.

Un stabilisateur ne peut être connecté directement à une bêche ou un réservoir ; il faut créer un tuyau de longueur limité.

Pour plus de précision, il est possible de rentrer dans le modèle un coefficient de perte de charge qui représente la perte de charge singulière générée par la vanne lorsqu'elle est entièrement ouverte.

On peut rentrer trois types de consignes pour le stabilisateur :

- Une consigne fixe, ainsi on peut modéliser une vanne à pilote hydraulique ou à pilote mécanique
- Une consigne horaire, en rédigeant une commande élaborée en respectant les règles stipulées dans le Guide d'utilisateur [Générale des Eaux, 2003], cela permet de modéliser une vanne de modulation asservie au temps.

- Une consigne dépendante du débit, en passant également par une commande élaborée.

Dans le dernier cas, il faut cependant garder à l'esprit que le débit utilisé par le logiciel afin de définir la consigne de vanne est celui du pas de temps précédent celui du calcul, on ne peut donc pas réellement modéliser un asservissement en temps réel.

b) Cas de plusieurs stabilisateurs

Lorsque le modèle possède plusieurs stabilisateurs, Epanet va considérer l'ensemble des stabilisateurs avec, comme paramètre, la pression de consigne. Epanet choisit alors pour chaque stabilisateur un des trois états, si cette combinaison permet de satisfaire aux équations de conservation de la masse et de l'énergie, elle est conservée. Sinon Epanet teste une autre combinaison jusqu'à arriver à trouver celle qui satisfait le plus ces équations.

Lors de la construction du modèle il faut veiller à respecter les deux règles suivantes :

- un stabilisateur aval ne peut pas être mis en série avec un autre stabilisateur aval, ou partager le même nœud aval.
- un stabilisateur amont ne peut pas être relié au nœud aval d'un stabilisateur aval.

III.2.1.2 Porteau

a) Cas d'un stabilisateur

Dans ce modèle, les stabilisateurs sont des équipements hydrauliques portés par les tronçons [Cemagref, 2011].

Un seul stabilisateur peut être mis sur un tronçon, et au maximum 3 équipements différents peuvent être portés par le même tronçon.

On entre dans le logiciel la consigne du stabilisateur, et lui calcule la perte de charge créée par le stabilisateur pour satisfaire cette condition, qu'il superpose ensuite à la perte de charge linéaire créée par le tronçon. Le stabilisateur est donc considéré par Porteau comme étant une perte de charge qui se superpose à celle créée par le tronçon. Il n'a donc pas de longueur, et a le même diamètre que le tronçon qui le porte. Il est impératif de veiller à bien définir le nœud amont et le nœud aval du tronçon, car le stabilisateur adopte les mêmes références. Il est possible d'avoir des incohérences si le tronçon a été défini « à l'envers ».

Porteau permet le retour d'eau dans les stabilisateurs, sauf si l'option anti-retour est cochée.

Pour plus de précision on peut rajouter deux coefficients de perte de charge :

- un coefficient de perte de charge ouvert à fond, permettant de préciser la perte de charge singulière créée par la vanne une fois ouverte entièrement
- un coefficient de perte de charge retour, afin d'entrer la perte de charge singulière créée par la vanne si l'eau la traverse en sens inverse de l'écoulement.

Dans ce logiciel, il est possible d'entrer une consigne fixe ou de rentrer un profil horaire de fonctionnement. En revanche un asservissement au débit ou à la pression n'est pas possible.

b) Cas de plusieurs stabilisateurs

Contrairement à Epanet, Porteau ne cherche pas à déterminer l'état de l'ensemble des stabilisateurs se trouvant dans le système. En fait, il cherche à calculer une perte de charge, puis un débit afin que la pression soit aussi proche que possible de la pression voulue, tout en respectant les équations de conservation de la masse et de l'énergie.

L'idée est d'optimiser les paramètres en incluant un certain nombre de contraintes. On considère que, pour respecter la consigne de pression, le stabilisateur produit une perte de charge locale de la forme $\lambda \times q^2$ avec $0 \leq \lambda \leq 150\ 000$. On recherche la valeur de λ qui minimise l'écart entre la charge du nœud aval et la consigne du stabilisateur [Piller et Bremond, 2001]

III.2.1.3 SynerGEE

SynerGEE modélise un stabilisateur comme étant un « Facilities » avec une longueur nulle. Ce terme englobe tous les équipements du modèle à travers lesquels l'eau circule. Autrement dit c'est un tronçon avec une longueur nulle appelé « Pressure regulator ».

Un « pressure regulator » permet de modéliser trois choses : un stabilisateur aval, un stabilisateur amont, et un point où la pression est constante. Dans les trois cas, la consigne de pression peut être soit une constante, soit une variable en fonction du temps.

Un régulateur est considéré comme un élément n'ayant pas une ouverture de vanne donnée mais permettant de maintenir une pression amont ou aval constante. C'est-à-dire que le modèle calcule une ouverture de vanne (en l'occurrence Tau) pour maintenir la pression voulue au point de contrôle (ici nœud aval du stabilisateur) sauf si les conditions hydrauliques font que la vanne a atteint son maximum d'ouverture ou son minimum.

Si le stabilisateur doit s'ouvrir plus que son diamètre maximum, la valeur de « Tau » est maintenue au maximum, et la pression est calculée en fonction de cette ouverture maximale.

De même, si le stabilisateur doit se fermer entièrement, la valeur de « Tau » sera ramenée à zéro, et la valeur de pression correspondante sera utilisée dans le modèle.

A partir du moment où les conditions hydrauliques le permettent, un régulateur qui était à l'état entièrement ouvert ou entièrement fermé se remettra à réguler la pression suivant la consigne rentrée dans le modèle.

L'utilisateur peut spécifier une valeur initiale de « Tau », le modèle déterminera l'état de la vanne régulatrice en fonction de cette valeur. Ainsi, à chaque réinitialisation du modèle, la vanne se remettra automatiquement dans l'état d'ouverture initiale spécifiée.

L'utilisateur peut activer ou désactiver l'option qui permet au modèle de changer l'inconnue dans les calculs associés aux régulateurs. On peut par exemple décocher cette option si le réseau contient plusieurs vannes de régulation qui interagissent entre elles et rendent le système instable. Ainsi, les pressions de consignes sont maintenues et toutes les ouvertures de vannes sont calculées dans les limites de 0 à 1. Cette option permet de faire une première simulation et de savoir si les régulateurs ont été mal dimensionnés. Elle permet de vérifier la faisabilité des consignes de simulation.

Il est possible d'entrer dans le modèle un « minimum drop of pressure » c'est-à-dire l'écart de pression amont/aval lorsque la vanne est entièrement ouverte.

Tout comme dans Porteau, l'utilisateur peut, soit donner une consigne fixe, soit définir un profil horaire. Deux interpolations sont disponibles :

- Step : en escalier
- Ramp : interpolation linéaire

Il n'est pas possible de simuler un asservissement de la vanne au débit ou à la pression. [Stoner Software, 2011]

III.2.2 Test de modélisation d'un réseau simple

III.2.2.1 Réseau contenant un stabilisateur

a) Description

Le but de cette étude est de tester les trois logiciels en modélisant une situation très simple récapitulée Figure 5, les côtes des nœuds apparaissent en rouge :

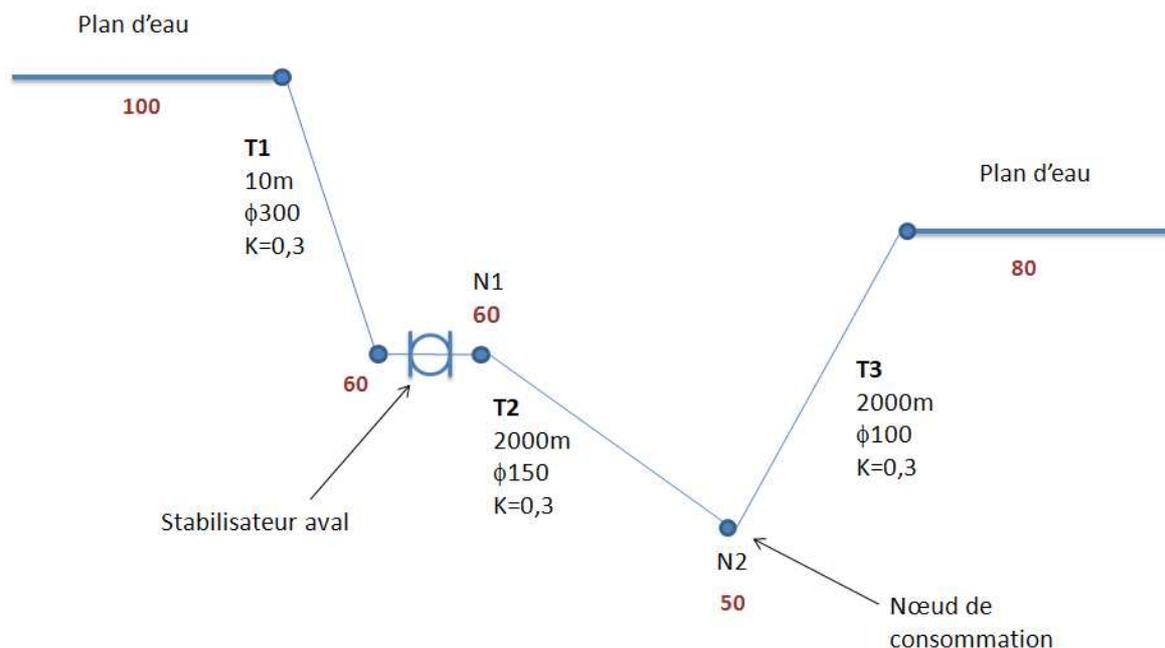


Figure 5 : Schéma du réseau modélisé

On effectue sur les trois logiciels quatre simulations :

- Consigne de pression du stabilisateur 20m, demande variable D1
- Consigne de pression du stabilisateur 30m, demande variable D1
- Consigne de pression du stabilisateur 10m, demande variable D1
- Consigne de pression du stabilisateur variable S1, demande fixe D2

La courbe de demande variable D1 est tirée d'un cas réel rencontré sur nos secteurs d'étude et est donnée ci-après (Figure 6).

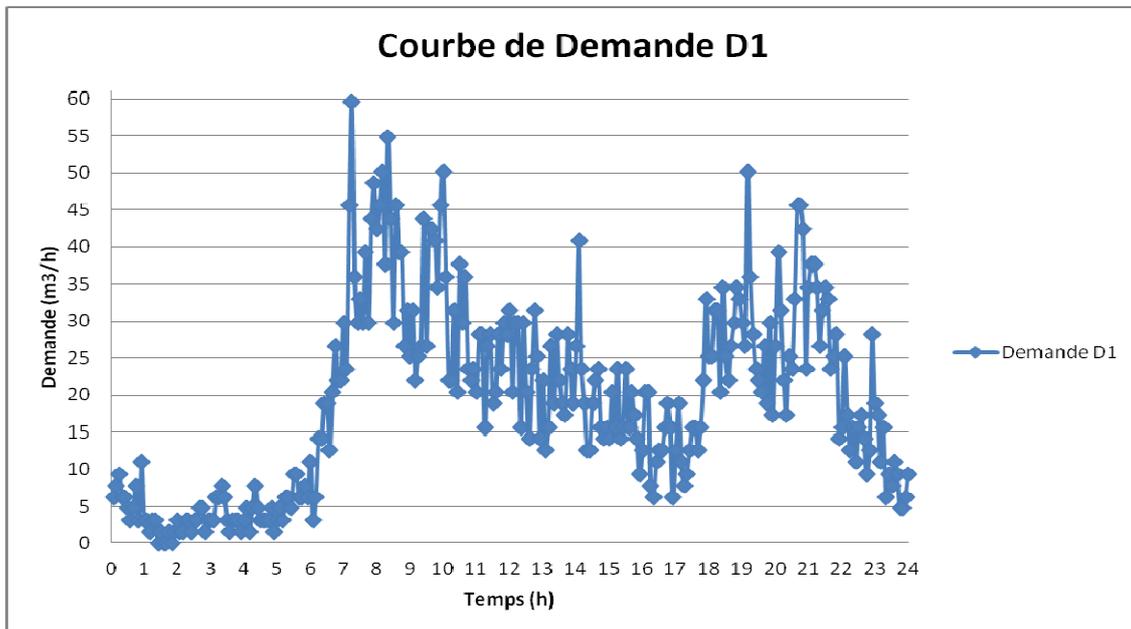


Figure 6 : Demande utilisée pour la simulation

La demande fixe D2 est égale à 60m³/h.

La courbe de consigne variable du stabilisateur S1, est une courbe en escalier donnant une consigne à chaque heure. Cette courbe est ainsi construite car le logiciel Epanet ne permet de faire varier les commandes des stabilisateurs qu'en entrant manuellement une règle de fonctionnement dans l'option « Commandes élaborées » (Figure 7).

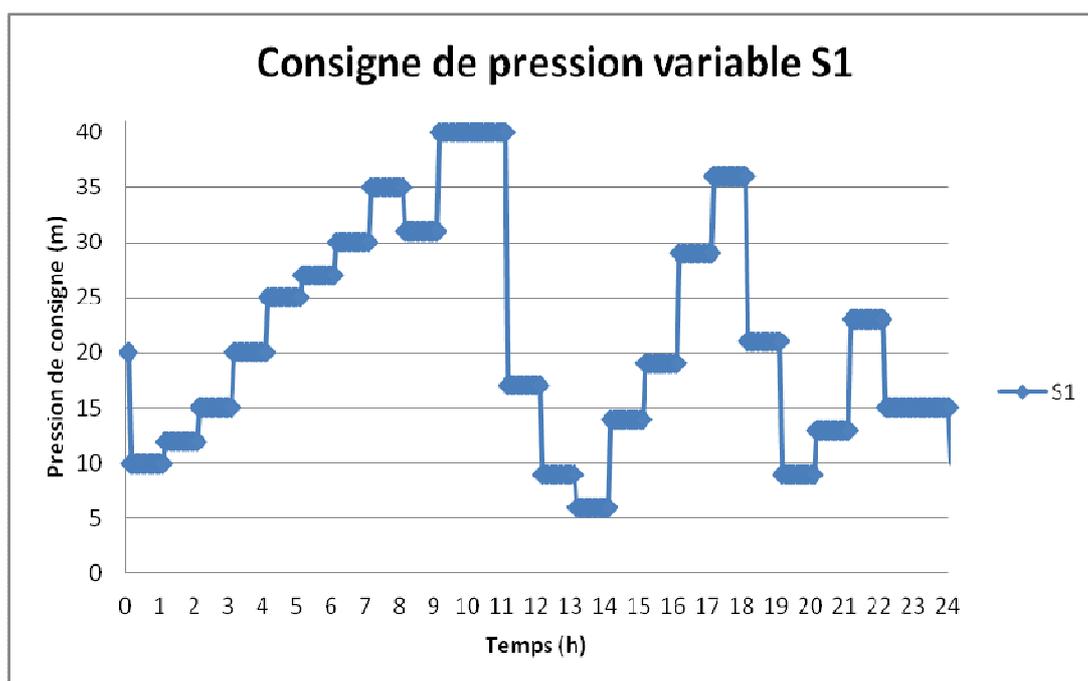


Figure 7 : Consigne de pression du stabilisateur

Dans chacune des simulations les trois inconnues suivantes sont recherchées

- La pression en N1
- La pression en N2
- Le débit dans T2
- Le débit dans T3

Remarques :

- Il faut noter qu'il y a un léger décalage dans les abscisses des trois logiciels. En effet si Epanet et SynerGEE donnent leurs résultats à partir de 00 :00 Porteau, lui, les donne à partir de 00 :02 :30. Synergee arrondit les pas de temps de telle manière qu'ils ne sont pas tout à fait égaux à 5 min. Porteau effectue son calcul au milieu du pas de temps alors qu'EPANET l'effectue au début.
- Lors de la modélisation du stabilisateur sous Porteau, l'option anti-retour a été sélectionnée afin d'avoir le même comportement que sur les autres logiciels
- Lors de la modélisation sous Synergee l'option « Enable constraint interchange for regulators » a été cochée, cela signifie que le modèle peut changer l'inconnue associée au stabilisateur (soit l'inconnue est la perte de charge correspondant à la pression de consigne ; soit l'inconnue est la pression si la vanne a atteint sa capacité d'ouverture max ou min).

b) Résultats

Il est intéressant de constater qu'Epanet et Porteau donnent des résultats tout à fait similaires, en revanche SynerGEE se démarque.

Lorsque la demande est constante, et la consigne variable, les trois logiciels donnent les mêmes résultats, comme le montre la Figure 8.

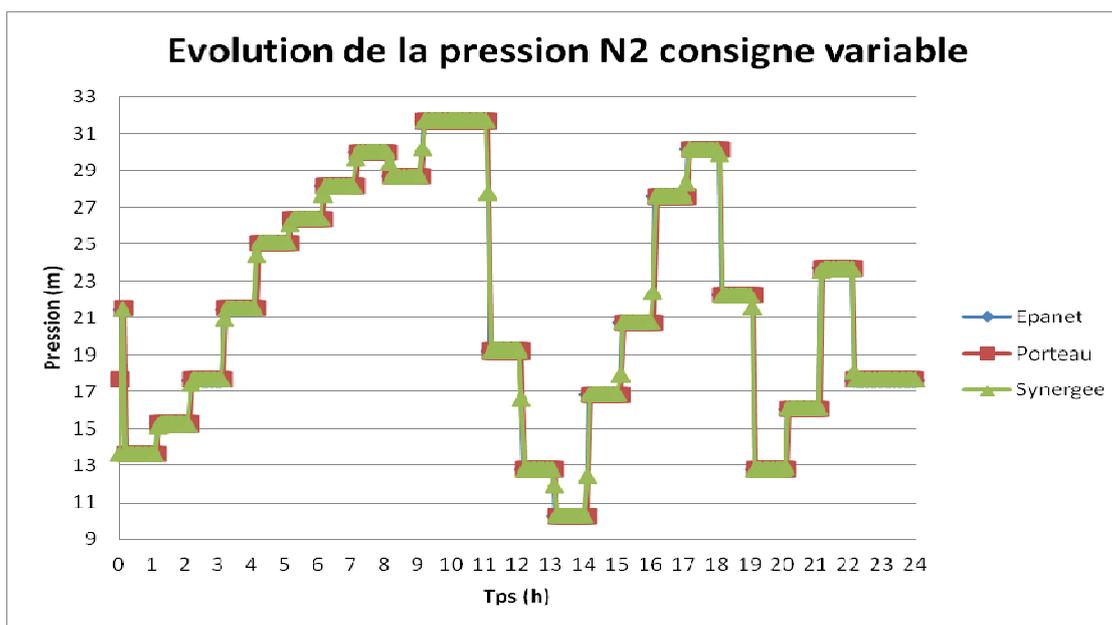


Figure 8 : Exemple de courbe, avec demande constante

Lorsque la demande est variable, et la consigne fixe, Synergiee semble avoir une tendance à « lisser » les résultats et à diminuer l'amplitude des courbes, que ce soit de débit ou de pression, comme en témoigne les deux agrandissements suivants (Figure 9 et Figure 10).

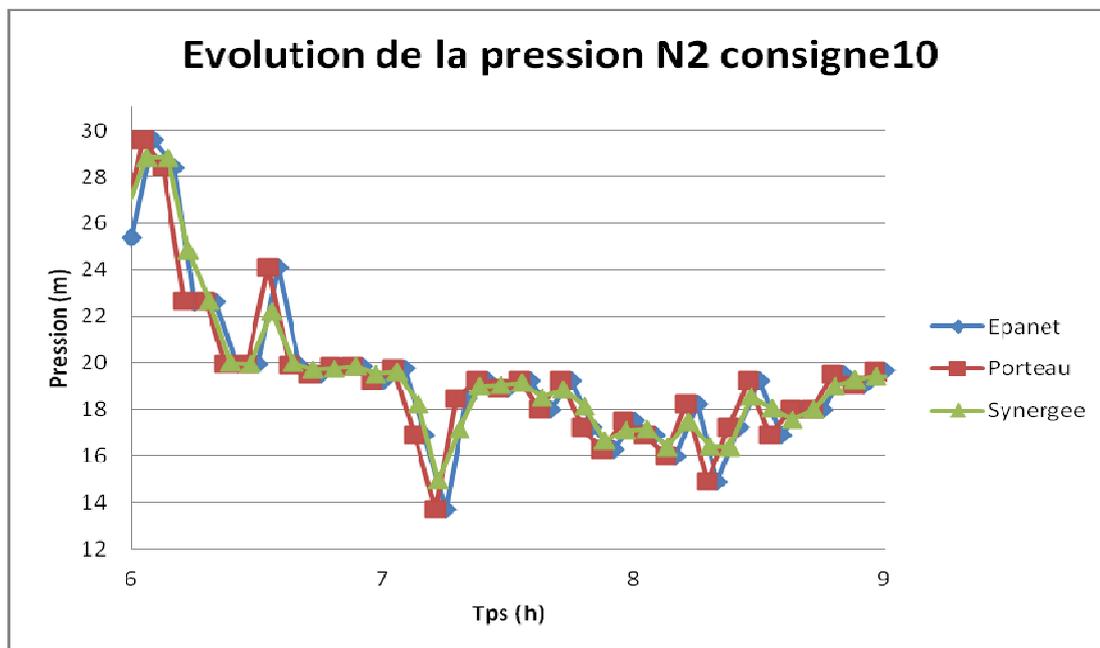


Figure 9 : Exemple de courbe comparative Epanet, Porteau, SynerGEE

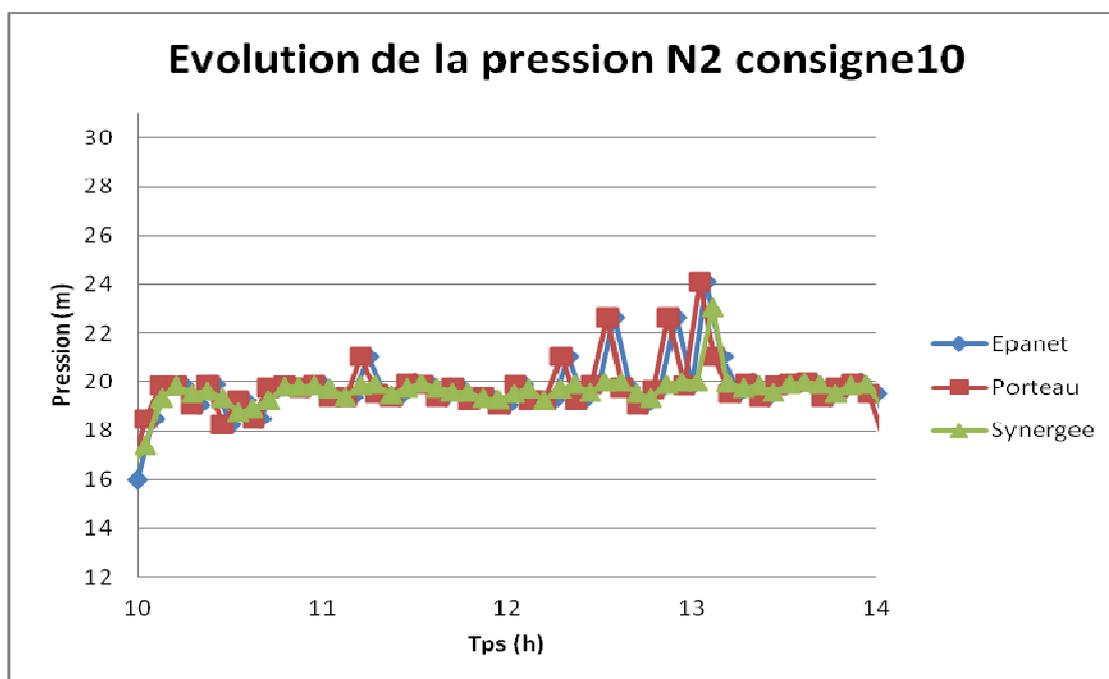


Figure 10 : Second exemple de courbe comparative Epanet, Porteau, SynerGEE

Il semblerait que ce phénomène soit plus marqué lorsque la demande augmente, ce qui nous a incités à vérifier si la différence de calcul provient de la manière dont sont modélisées les pertes de charge, et c'est pour cela que nous avons effectué une modélisation similaire sans stabilisateur (Figure 11).

III.2.2.2 Réseau sans stabilisateur

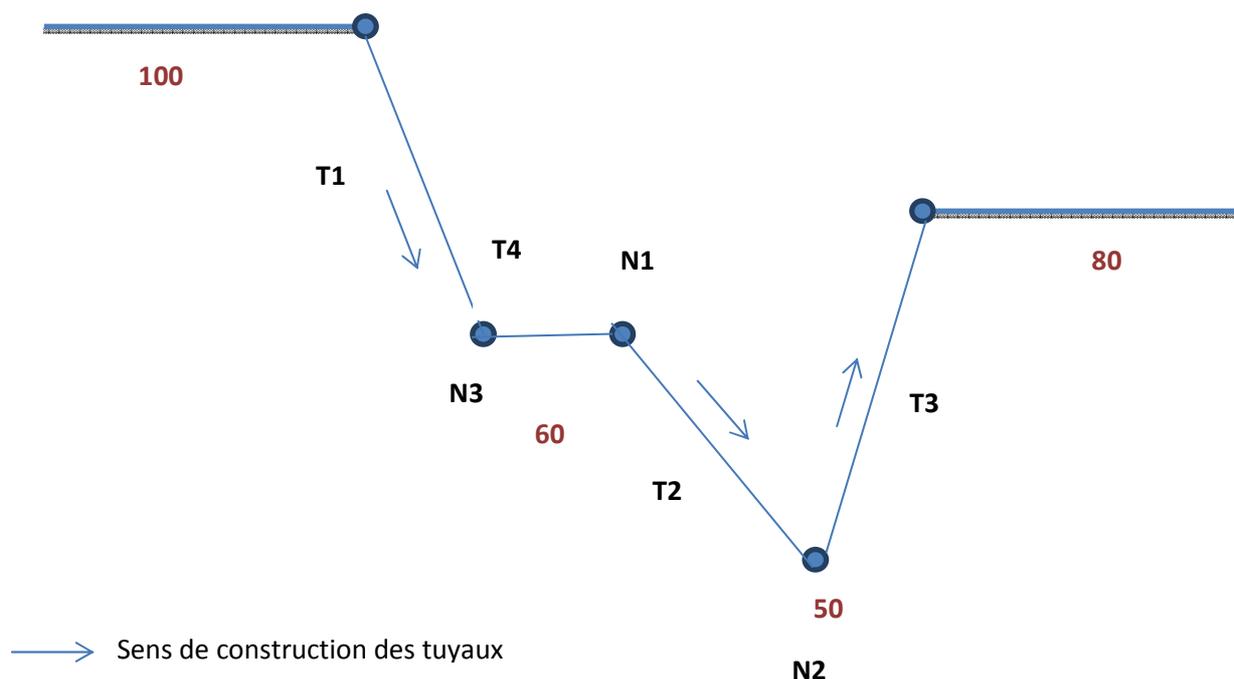


Figure 11 : Schéma du réseau sans stabilisateur

	N1	N2	N3	T1	T2	T3	T4
	Pression(m)	Pression(m)	Pression(m)	Débit (m3/h)	Débit (m3/h)	Débit (m3/h)	Débit (m3/h)
Epanet	40,000	47,770	40,000	22,280	22,280	22,280	22,280
Porteau	39,999	47,776	40,000	22,289	22,289	22,289	22,289
Synergiee	40,017	47,788	40,018	22,320	22,320	22,320	22,320

Tableau 1: Comparaison Epanet, Synergiee, Porteau sans stabilisateur

Les résultats (Tableau 1) font apparaître pour Synergiee des valeurs très légèrement différentes mais cela n'est pas suffisant pour expliquer les écarts obtenus dans la configuration avec stabilisateur de pression.

III.2.2.3 Conclusion

Comme nous avons pu le constater, Synergiee semble avoir une tendance à « lisser » les résultats et à diminuer l'amplitude des courbes, que ce soit de débit ou de pression. Le service d'assistance technique du logiciel consulté sur ces résultats n'a pas été en mesure de nous fournir une explication satisfaisante.

Pour l'instant, il ne nous est pas possible de conclure quant à l'origine de cette différence, néanmoins, les écarts restent somme toute limités, nous pouvons considérer que la nature du logiciel utilisé n'aura pas d'impact sensible sur nos résultats.

IV Méthodologie de détermination de Pmin

Afin de calculer la pression moyenne minimale de service, nous avons élaboré une méthode que nous avons ensuite appliquée sur dix secteurs.

Dans cette partie nous commencerons par présenter la méthode employée, la partie suivante présentera les études de cas. Un exemple détaillé de l'étude d'un secteur est présenté en Annexe 2

IV.1 Informations disponibles

Pour chaque secteur, nous disposons d'un modèle hydraulique, des plans de réseaux, de rapports annuels de délégataires, pour certains de données de sectorisation (volumes de pertes), de schémas de processus ainsi que de données dans un SIG.

Le modèle hydraulique est notre principale source d'information, il permet d'accéder à la fois aux données caractéristiques du secteur (altitudes, longueur de réseau, consommation), aux organes hydrauliques, ainsi qu'aux pressions aux nœuds de consommation.

IV.2 Indicateurs choisis

IV.2.1 Indicateurs descriptifs

Dans la mesure où l'on essaye de corrélérer la valeur de Pmin à des caractéristiques du secteur, on extrait des modèles hydrauliques les indicateurs descriptifs suivant :

- Altitude des nœuds de consommation
- Longueur de réseau
- Consommation totale journalière
- Nombre de nœuds de consommation du modèle

En complément, pour chaque solution proposée pour un des secteurs, on indique également les indicateurs suivants :

- Nombre de stabilisateurs posés
- Nombre de vannes posées

IV.2.2 Indicateurs de pression

Afin de diminuer la pression sur un secteur, on adopte une stratégie progressive en répondant successivement aux questions suivantes:

- Peut-on faire une réduction généralisée de pression, en posant directement un stabilisateur en sortie de réservoir ?
- Si oui, peut-on de plus faire une modulation généralisée sur tout le secteur?

- Que l'on ait pu ou pas réaliser une action à l'échelle du secteur entier, peut-on réduire sur une zone précise la pression ? (réduction localisée)
- Peut-on, en plus de cette réduction localisée, effectuer une modulation de pression ?

Dans le cas général, on pose comme règle qu'aucun point de consommation ne doit avoir une pression inférieure à 20 mce au cours de la journée, sauf si en un point elle est déjà inférieure à 20 mce. Dans un tel cas la règle est de ne pas aggraver la situation. Si une pression minimale est imposée sur le secteur, elle est adoptée lors de l'étude de cas.

Pour décrire le potentiel de diminution de la pression lié à chacune des actions citées ci-avant on utilise les indicateurs suivants :

- Réduction généralisée : pression minimale journalière du point critique
- Modulation générale : amplitude de la variation de pression au point critique après réduction
- Réduction locale : pression minimale du point limitant de la zone où l'on veut diminuer la pression
- Modulation locale : amplitude de la variation de pression du point limitant

Pour chaque solution, on calcule la pression moyenne pondérée par la consommation sur le secteur.

Enfin, on s'intéresse à la répartition des pressions, et à la répartition des écarts temporels de pression. La première est représentative de la manière dont les pressions sont réparties dans l'espace, et est un indicateur du potentiel de réduction à la fois globale et locale. La répartition des amplitudes de variation de pression est représentative de la répartition temporelle des pressions et est un indicateur du potentiel de modulation de pression sur la zone.

Ainsi, on spécifie pour chaque secteur les données suivantes :

- Premier décile de la distribution des pressions P10%
- Pression médiane P50%
- Neuvième décile de la distribution des pressions P90%
- Ecart entre P10% et P90%
- Premier décile de la distribution des écarts temporels deltaP10%
- Ecart temporel médian deltaP50%
- Neuvième décile de la distribution des écarts temporels deltaP90%
- Ecart entre deltaP10% et deltaP90%

IV.3 Méthodologie d'étude de cas

IV.3.1 Diagnostic

Pour chaque secteur nous faisons un diagnostic basé sur le modèle hydraulique dont nous disposons, permettant à la fois d'extraire un certain nombre de données et de comprendre comment fonctionne hydrauliquement le secteur.

Nous suivons donc les différents points listés ci-après.

- Description du secteur :

Le but ici est de comprendre comment s'organise le secteur, comment il est alimenté, sectorisé, s'il contient déjà des stabilisateurs. On liste donc les différents ouvrages présents, et on donne leurs caractéristiques : vanne, réservoir (courbe de charge, géométrie, vanne de remplissage et leur commande), pompes (courbe caractéristique, commandes), stabilisateur de pression (consigne). On extrait également des données telles que la longueur de réseau, le nombre de nœuds de consommation.

- Modèle hydraulique :

Dans la mesure où ces modèles seront amenés à servir à d'autres utilisateurs, il faut noter les éventuelles modifications apportées, ou bugs constatés.

- Consommations :

On essaye ici d'avoir une idée de la consommation sur le secteur. Pour cela on analyse les profils de consommation, on identifie les gros consommateurs, on repère l'heure du pic et des minimas de consommation, et on calcule la demande totale journalière (il faut alors bien avoir identifié les entrées et sorties du secteur).

- Altitudes :

Identifier les points hauts et bas permet de prévoir l'endroit où il sera utile de poser un stabilisateur. Pour cela on établit une carte des altitudes de la zone où l'on repère les pentes, les points hauts, les points bas, les zones de forte altitude et les zones de faible altitude.

- Répartition des débits :

Le but est de comprendre comment se dirige l'eau sur le secteur, afin de poser des ouvrages aux bons endroits. Repérer visuellement comment se dirige l'eau en période de faible et de forte consommation. Y a-t-il des chemins préférentiels de l'eau ? Si oui pourquoi et où.

- Etude des pressions :

Cette partie est la plus importante du diagnostic. Tout d'abord on peut commencer par faire une carte des pressions en période de faible et de forte consommation, puis repérer les zones de forte et de faible pression sur un schéma. On peut aussi simplement tracer un schéma des pressions minimales, ainsi on voit où se situent les points qui seront les points limitants ou points critiques. On peut ainsi commencer à réfléchir au mode d'action.

Ensuite on extrait du modèle les demandes à chaque pas de temps et en chaque nœud, et la pression en chaque nœud à chaque pas de temps. On peut alors construire une feuille de calcul où l'on calcule la pression moyenne pondérée par la consommation à l'échelle du secteur, les pressions maximales, minimales, les écarts temporels de pression en chaque

nœud et où l'on trace les courbes de répartition des pressions et des écarts temporels de pression. Attention, on ne s'intéresse ici qu'aux nœuds auxquels sont rattachées des consommations.

On peut alors en déduire les possibilités d'action sur la pression : réduction généralisée, locale, modulation, suivant les indicateurs spécifiés précédemment.

- Profil de charge :

On peut évaluer s'il y a des pertes de charges importantes sur la zone, déjà en regardant les écarts temporels de pression. Cependant le tracé de certains profils peut s'avérer utile, notamment entre le stabilisateur et le point critique/limitant.

IV.3.2 Proposition de solutions

Pour chaque secteur on modélise la pose successive de plusieurs appareils de régulation jusqu'à ce que l'on estime avoir atteint le potentiel maximal de réduction de pression avec un nombre raisonnable d'appareils.

Si l'on doit faire une réduction locale, il faut commencer par démailler la zone, les stabilisateurs étant conçus pour un sens d'écoulement bien précis. De plus, on peut jouer sur le parcours de l'eau afin de diminuer la pression.

Pour chaque secteur on propose des solutions « gigognes », c'est-à-dire qu'on commence par poser un stabilisateur (et les vannes de sectorisation nécessaires), puis on effectue un bilan de pression. Cette solution sera la solution 1. On se base sur la solution 1, et on rajoute un stabilisateur supplémentaire, puis on effectue un bilan de pression ; ceci est la solution 2... et ainsi de suite.

A chaque fois que l'on pense avoir trouvé une solution, un certain nombre de vérifications s'impose :

- ne pas poser un stabilisateur quand la différence de pression amont/aval est inférieure à 4 m
- regarder tous les minimas de pression et vérifier qu'aucun point de consommation ne se trouve en dessous de la limite fixée, 20m en général, ou autre si il existe une limite contractuelle.
- ne pas proposer de modulation de pression si la variation de pression au niveau du point critique a une amplitude inférieure à 5mce.
- vérifier si l'amplitude de pression constatée sur un secteur est due aux pertes de charge ou au marnage du réservoir s'il y en a un.

On arrête d'ajouter des appareils de régulation lorsque le gain local en pression devient inférieur à 5 m, ou lorsque la densité d'appareils devient trop importante.

IV.3.3 Limite de la méthode

La méthode étant numérique, elle ne peut pas prendre en compte toutes les données terrains. Notamment elle ne tient pas compte de la présence d'immeubles de grande hauteur qui exigeraient une pression supérieure à 2 bars. On suppose donc que ce type d'immeuble, s'il existe, est muni d'un supprimeur individuel.

De plus, cette méthode ne privilégie pas la sécurité d'approvisionnement, puisqu'elle peut amener à isoler certaines zones surpressées. Si cette méthode est suivie, et que l'on veut malgré tout garder une sécurité d'approvisionnement, la solution est de poser un stabilisateur de pression aval maître et de remplacer les vannes de sectionnement par des stabilisateurs de pression aval esclaves. Le maître doit imposer la charge la plus haute (adapter la consigne en fonction de son altitude par rapport aux autres), et les esclaves une plus basse. Ainsi en fonctionnement normal, les stabilisateurs esclaves sont fermés, et si la pression chute à l'aval, ils s'ouvrent, et la zone est alimentée.

V Etudes de cas

V.1 Présentation des terrains d'étude

Nous avons travaillé sur trois terrains d'étude fournis par Veolia.

V.1.1 Terrain 1

Ce terrain est modélisé sur SynerGEE, divisé en trois parties, la sectorisation, notamment le calcul des volumes de pertes est disponible [Le Glatin, 2011].

Les différents secteurs sont correctement répertoriés sur le modèle numérique, quelques messages d'erreurs apparaissent dus à la présence de courbes caractéristiques non assignées à des équipements hydrauliques, ou à des parties de réseau isolées. Ces parties de réseau sont des réseaux privés qui ont été probablement directement importés du SIG et déconnectés pour ne pas être pris en compte dans la simulation hydraulique. Du plus, on constate que le modèle n'a pas été nettoyé, plusieurs points isolés sont présents, probablement dus au transfert depuis le SIG.

V.1.2 Terrain 2

Le terrain 2 est lui aussi modélisé sur SynerGEE, et divisé en seize sous-modèles car trop important. Chaque modèle est un modèle profilé, cela signifie que les conditions aux limites sont fixées, et égales aux mesures effectuées pour un jour moyen.

Deux sous- modèles ont été utilisés pour l'étude. Dans le premier quelques points isolés ont des altitudes nulles, il s'agit probablement de nœuds artificiels créés pour les besoins du modèle.. Dans le second une pompe présente une instabilité qui revient à chaque pas de temps, mais elle ne se trouve pas précisément sur les secteurs étudiés par la suite.

Ce terrain est en zone urbaine dense, et il est probable que des immeubles hauts s'y trouvent. La sécurité d'approvisionnement est une priorité sur ce secteur, contractuellement l'exploitant doit une pression minimale de 22 mce si l'altitude est inférieure à 100m et 10 mce si l'altitude est supérieure à 100m.

V.1.3 Terrain 3

Le terrain 3 est lui modélisé sous EPANET. L'interface de ce logiciel ne permet pas d'extraire pour un ensemble de nœuds la pression à chaque pas de temps. Nous avons donc créé un

petit programme de post-traitement pour pouvoir extraire les pressions. Pour une raison mal identifiée à ce jour, l'extraction ne fonctionnait pas avec ce modèle, alors qu'elle fonctionne pour d'autres. Le modèle a probablement un problème de convergence.

Nous nous sommes donc davantage renseignés auprès des concepteurs de ce modèle. Ce modèle est issu de la réunion de plusieurs sous-modèles, et a été créé pour gérer un nouvel achat d'eau important. Ce n'est donc pas un modèle conçu pour faire du diagnostic, mais pour gérer les volumes d'eau transitant. L'exploitant a accepté de nous fournir les sous-modèles, mais ceux-ci n'étant pas à jour il a fallu les modifier pour qu'ils correspondent au modèle actuel.

V.2 Etude des secteurs

Nous avons appliqué la méthode présentée dans le chapitre IV à dix secteurs S1 à S10, et nous avons numéroté chaque solution de la manière suivante S1-0...S1-s, S1-0 correspondant au secteur initial.

Chaque étude de cas nous a permis de calculer ou d'extraire les indicateurs que nous souhaitons prendre en compte pour la détermination de Pmin. L'ensemble de ces indicateurs est donné dans le Tableau 2.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Pmoy pond	39,43	33,60	64,49	51,49	55,18	34,05	53,59	67,76	88,75	53,10
P10%	26,61	28,07	32,88	39,53	36,00	27,65	40,47	61,73	70,21	42,48
P50%	42,68	33,09	42,96	51,82	64,99	33,09	55,44	65,30	85,94	52,25
P90%	53,31	39,70	71,81	55,68	76,00	42,05	62,85	66,83	98,22	64,23
deltaP10%	1,10	3,20	0,08	0,22	0,03	1,31	6,05	0,15	0,09	0,29
deltaP50%	1,26	4,81	5,93	0,99	0,05	1,40	6,06	0,50	1,76	0,42
deltaP90%	1,60	5,58	6,56	1,17	0,08	1,41	25,51	0,54	2,96	0,53
Pmin critique	19,99	12,16	17,52	27,98	18,99	15,29	20,00	35,10	59,26	32,29
DeltaP critique	1,12	6,00	5,32	0,01	0,01	1,41	25,51	0,21	0,04	0,31
Nb nœuds conso	91	504	219	242	81	128	138	390	204	228
Longueur réseau	11 242	44 906	18 464	22 068	9 660	11 850	13 994	41 365	24 790	1 822
Demande totale	200	1 285	907	1 046	114	256	194	3 380	1 813	1 046
P90%-P10%	26,70	11,62	38,93	16,15	40,01	14,41	22,38	5,10	28,00	21,74
deltaP90%-deltaP10%	0,50	2,38	6,48	0,96	0,05	0,10	19,46	0,39	2,87	0,23

Tableau 2: indicateurs descriptifs S1 à S10

Pour chacun des secteurs et pour chacune des solutions nous avons calculé les pressions moyennes pondérées par la consommation qui se trouvent dans le Tableau 3.

	Pression moyenne pondérée par la consommation					
	Secteur initial	Solution1	Solution2	Solution3	Solution4	Solution5
S1	39,43	31,2				
S2	33,6	29,86	29,14	27,84	27,09	
S3	64,49	63,61	63,11	57,88	57,43	56,68
S4	51,49	38,26	33,06	32,36	31,84	31,54
S5	55,18	46,66	43,45	41,11		
S6	34,05	32,36	31,33			
S7	53,59	45,16	41,4	39,49	38,81	35,58
S8	67,76	54,76	48,77	46,9	42,05	
S9	88,75	51,75	46,35	43,91		
S10	53,1	42,97	39,23	36,98	34,53	

Tableau 3: Bilan des pressions moyennes pondérées par la consommation S1 à S10

V.3 Choix des solutions

V.3.1 Introduction

Pour chaque secteur la décision de s'arrêter au bout d'un certain nombre de solutions est une décision subjective.

Dans l'absolu on pourrait poser autant de stabilisateurs que l'on souhaite jusqu'à ce que la différence de pression amont/aval atteigne les limites de la technologie existante. Cependant, on se rend compte qu'au bout d'un certain nombre de solutions, la pose d'un stabilisateur n'est plus très efficace, et que le secteur commence à être « saturé ».

Pour arrêter un choix entre les différentes solutions envisagées pour chaque secteur, un critère de décision est nécessaire.

Pour proposer une alternative au « bon sens de l'ingénieur », nous envisageons un critère technico-économique, basé sur l'évaluation du coût du m³ économisé grâce à la méthode d'analyse coût efficacité, ACE. [SMEGREG, 2011]

Nous nous proposons dans le paragraphe qui suit de prendre un secteur exemple et de lui appliquer la méthode ACE. Nous présenterons ensuite les résultats de cette méthode pour l'ensemble des secteurs.

L'ensemble de la méthode est détaillée en Annexe 3

V.3.2 Exemple d'application de la méthode ACE

Nous choisissons comme exemple le secteur S4.

V.3.2.1 Evaluation des volumes économisés

Nous commençons tout d'abord par calculer les volumes d'eau économisés par chaque solution par rapport à S4-0, et également par rapport à la solution précédente.

Pour ce faire, nous utilisons la formule exposée au paragraphe II.1 qui permet de calculer les volumes de pertes d'une solution grâce à sa pression moyenne pondérée, la pression

moyenne pondérée de la solution précédente et le volume de perte de la solution précédente. Nous prenons $N=1$. Les volumes de pertes initiales sont issus selon le cas de [Le Glatin, 2011] ou [Tangeaoui, 2012].

Par soustraction nous calculons ensuite les volumes économisés.

Le Tableau 4 récapitule les volumes calculés pour chaque solution.

	Pmoy pondérée conso	Volume de pertes m3	Volume économisés p/r à s-(s-1) m3	Vol éco p/r à S0
S4-0	51,49	114 560	0	0
S4-1	38,26	85 111	29 449	29 449
S4-2	33,06	73 559	11 552	41 001
S4-3	32,36	71 997	1 562	42 563
S4-4	31,84	70 835	1 162	43 725
S4-5	31,54	70 160	676	44 400

Tableau 4: Volume économisés secteur S4

V.3.2.2 Evaluation du coût

Nous cherchons ensuite à évaluer le coût de chaque solution, pour cela nous utilisons la notion de coût moyen annuel (CMA) [Rozan, 2010]:

$$CMA = d + I \frac{a}{1 - (1 + a)^{-N}}$$

Avec

d = dépenses de fonctionnement annuelles

N = durée de vie prévisionnelle de l'investissement

I = investissement réalisé

a = taux d'actualisation

Le Tableau 5 récapitule l'ensemble des valeurs utilisées pour le calcul du CMA (l'ensemble des justifications se situe dans l'Annexe 3)

Taux d'actualisation	0,04
Investissement stabilisateur et chambre €	9 000
Maintenance stabilisateur €	350
Investissement vanne €	450
Maintenance vanne €	0
Durée de vie (ans)	30

Tableau 5: Valeurs prises pour le calcul du CMA

Dans le cas du secteur S4 deux stabilisateurs sont déjà présents sur la zone, la première solution correspond à la baisse de la consigne de ces deux stabilisateurs. On compte donc

en investissement deux maintenances de stabilisateur, qui correspondent aux changements de consigne faits au départ.

Le Tableau 6 récapitule l'ensemble des calculs de CMA effectués :

	Coût d'investissement €	Coût annuel de fonctionnement €	CMA €	CMA s - CMA s-1
S4-0	0	0	0,00	0,000
S4-1	700	0	40,48	40,48
S4-2	11 950,	350	1 041,07	1 000,59
S4-3	20 950	700	1 911,54	870,47
S4-4	30 400	1 050	2 808,04	896,49
S4-5	39 850	1 400	3 704,53	896,49

Tableau 6: Résultats CMA secteur S4

V.3.2.3 Calcul du ratio coût efficacité

Enfin, on calcule le prix des volumes économisés à la fois par rapport au secteur initial S4-0 et par rapport à la solution précédente. On fixe comme règle que dès que le prix du m³ économisé en plus s'écarte de la fourchette 0,20 €, 0,30 € on s'arrête. Cette fourchette correspond à l'ordre de grandeur d'un coût marginal de production courant sur les terrains étudiés.

	Ratio €/m3 éco en plus	Ratio €/m3 éco p/r à S0
S4-0	0,000	0,000
S4-1	0,001	0,001
S4-2	0,087	0,025
S4-3	0,557	0,045
S4-4	0,772	0,064
S4-5	1,327	0,083

Tableau 7: Ration coût efficacité S4

Ici on choisit donc la solution 2. On a alors Pminéco = 33.06 mce.

V.3.3 Résultats pour l'ensemble des secteurs

Le résultat de la méthode ACE est le choix d'une pression minimale économique que nous appelons Pminéco. Nous avons appliqué cette méthode à l'ensemble de nos terrains à l'exception de quatre secteurs pour lesquels les volumes de pertes n'étaient pas disponibles. Pour ceux là nous avons choisi Pminéco correspondant à la solution qui permet de réduire la pression à un coût acceptable.

Pour la suite de l'étude nous utiliserons Pminéco, qui correspond à la pression minimale atteignable si l'on prend en compte les contraintes technico-économiques. Cependant nous utiliserons également la pression minimale atteinte pour chaque secteur, Pminmin.

Le Tableau 8 présente les ratios coût efficacité par rapport au secteur initial, le Tableau 9 récapitule quant à lui les ratios coûts efficacité calculés pour les m³ additionnels, enfin le Tableau 10 donne les solutions retenues grâce au critère économique.

	Ratio coût/efficacité par rapport au secteur initial				
	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
S1					
S2	0,13	0,22	0,26	0,32	
S3	0,76	0,96	0,30	0,37	0,42
S4	0,00	0,03	0,04	0,06	0,08
S5	0,01	0,12	0,20		
S6	0,60	0,73			
S7	0,27	0,37	0,48	0,60	0,62
S8					
S9					
S10					

Tableau 8: Ratio €/m³ de tous les secteurs par rapport au secteur initial

	Ratio coût/efficacité par rapport à S (s-1) €/m ³				
	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
S1					
S2	0,13	0,68	0,41	0,71	
S3	0,76	1,30	0,13	1,44	0,88
S4	0,00	0,09	0,56	0,77	1,33
S5	0,01	0,42	0,58		
S6	0,60	0,96			
S7	0,27	0,61	1,13	3,25	0,71
S8					
S9					
S10					

Tableau 9: Ratio €/m³ calculés pour les m³ additionnels

Secteur	Solution retenue	Pminéco (m)	Ratio coût efficacité global €/m3
S1	S1-1	31,20	
S2	S2-1	29,86	0,13
S3	S3-3	57,88	0,30
S4	S4-2	33,06	0,03
S5	S5-1	46,66	0,01
S6	S6-0	34,05	0,00
S7	S7-1	45,16	0,27
S8	S8-2	48,77	
S9	S9-1	51,75	
S10	S10-1	42,97	

Tableau 10: Solution retenue par l'application du critère économique

V.3.4 Calcul de la pression moyenne minimale limite

L'analyse des résultats montre que la baisse de pression occasionnée par les stabilisateurs ajoutés au cours de la démarche a tendance à être décroissante (Figure 12). La pression minimale moyenne d'un secteur semble donc avoir une limite que nous appellerons Pminlimite

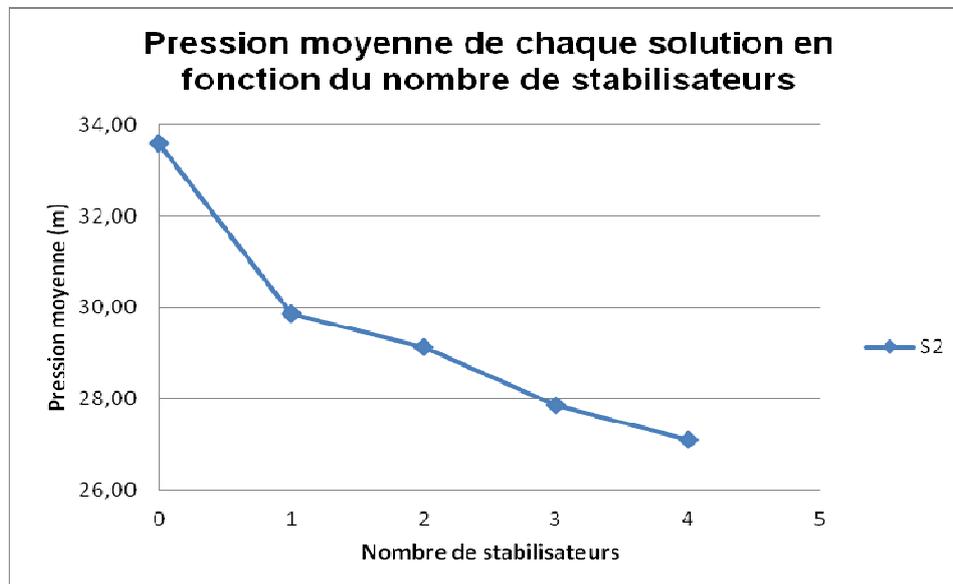


Figure 12: Pression moyenne en fonction du nombre de stabilisateurs pour le secteur S2

Pour vérifier cette propriété, pour chacun des secteurs nous avons représenté graphiquement la pression moyenne de chaque solution en fonction de $1/(\text{nombre de stabilisateur}+1)$ puis tracé la droite de régression linéaire (Figure 13).

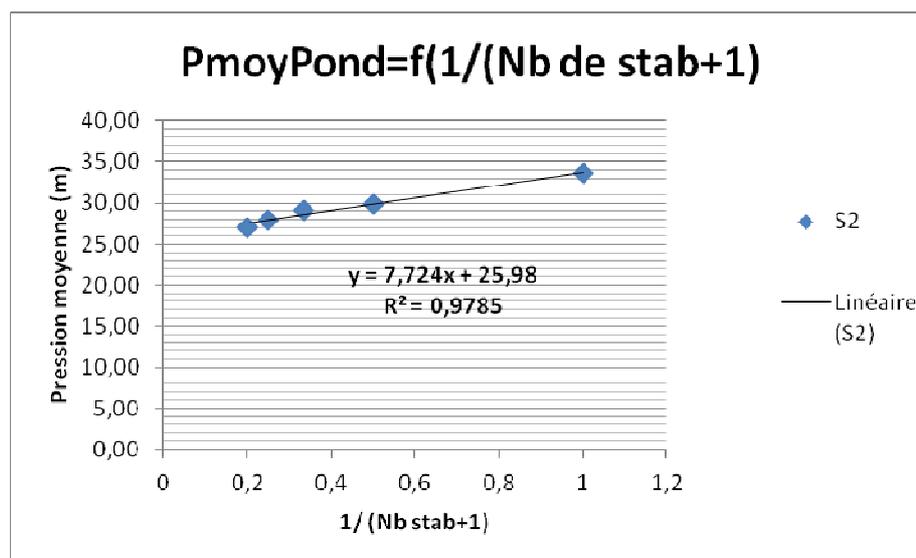


Figure 13: Pression moyenne en fonction de 1/(Nombre stabilisateurs+1) secteur S2

Pour chacun des secteurs la régression a donné de bons résultats avec des valeurs élevées du R^2 (La qualité d'ajustement de la régression est d'autant meilleure que R^2 est proche de 1).

Sur la base de ces résultats nous avons considéré que la valeur de l'ordonnée à l'origine de la droite de régression (qui correspondrait à une infinité de stabilisateurs) constitue une valeur de la pression en dessous de laquelle on ne peut descendre en appliquant la méthode que nous avons mise en œuvre : Pminlimite. Le Tableau 11 récapitule les pressions caractéristiques pour chacun des secteurs. :

	Pmoypond	Pmin éco	Pminmin	PminLimite
S1	39,43	31,20	31,20	22,98
S2	33,60	29,86	27,09	25,98
S3	64,49	57,88	56,68	55,46
S4	51,49	33,06	31,54	29,56
S5	55,18	46,66	41,11	38,92
S6	34,05	34,05	31,33	30,19
S7	53,59	45,16	35,58	34,19
S8	67,76	48,77	42,05	37,21
S9	88,75	51,75	43,91	40,28
S10	53,10	42,97	34,53	33,06

Tableau 11: Pressions caractéristiques de chacun des secteurs

VI Analyse des données calculées et extraites

Le but est maintenant de trouver une relation simple entre les caractéristiques et indicateurs du secteur initial et Pminéo, Pminmin ainsi que Pminlimite.

Nous chercherons donc des relations linéaires entre les différentes variables.

VI.1 Corrélation entre les caractéristiques du secteur initial

Dans un premier temps nous nous intéressons aux liens unissant les variables du secteur initial entre elles. Certaines données extraites ou calculées n'étant finalement pas pertinentes nous ne les utiliserons pas par la suite. Le Tableau 12 donne la matrice de corrélation entre les éléments descriptifs des secteurs initiaux.

	P10%	P50%	P90%	deltaP50%	P critique	Pmoy pond
P10%	1,00	0,89	0,76	-0,26	0,92	0,88
P50%	0,89	1,00	0,90	-0,33	0,85	0,88
P90%	0,76	0,90	1,00	-0,13	0,77	0,94
deltaP50%	-0,26	-0,33	-0,13	1,00	-0,36	-0,06
P critique	0,92	0,85	0,77	-0,36	1,00	0,84
Pmoy pond	0,88	0,88	0,94	-0,06	0,84	1,00

Tableau 12: matrice de corrélation d'éléments descriptifs des secteurs initiaux

Comme cela était prévisible, les données sont fortement corrélées entre elles, à l'exception de deltaP50% qui est peu corrélé.

On note que P10% et Pcritique sont très corrélées. Contrairement à ce que l'on aurait pu supposer Pmoy est quant à lui davantage lié à P90% qu'à P50%.

VI.2 Corrélations entre données de base et Pminéco, Pminmin, Pminlimite

On s'intéresse à présent aux liens linéaires éventuels qui existeraient entre les variables descriptives du secteur et les pressions calculées (Tableau 13).

	Pmin éco	Pminmin	Pmin limite	Pmoy pond	P10%	P50%	P90%	P critique
Pmin éco	1,00	0,94	0,93	0,82	0,56	0,59	0,80	0,42
Pminmin	0,94	1,00	0,97	0,71	0,37	0,41	0,70	0,27
Pmin limite	0,93	0,97	1,00	0,66	0,31	0,33	0,63	0,20
Pmoy pond	0,82	0,71	0,66	1,00	0,88	0,88	0,94	0,84
P10%	0,56	0,37	0,31	0,88	1,00	0,89	0,76	0,92
P50%	0,59	0,41	0,33	0,88	0,89	1,00	0,90	0,85
P90%	0,80	0,70	0,63	0,94	0,76	0,90	1,00	0,77
P critique	0,42	0,27	0,20	0,84	0,92	0,85	0,77	1,00

Tableau 13: Matrice de corrélation liant les éléments descriptifs et Pminéco, Pminmin, Pminlimite

Les trois pressions calculées sont corrélées entre elles, et sont également corrélées à la pression moyenne. En revanche elles sont peu liées aux autres caractéristiques, c'est pour cela que nous essaierons par la suite de les corréler à des indicateurs un peu plus complexes.

VI.3 Corrélations entre indicateurs élaborés et éléments descriptifs des secteurs

Nous effectuons une matrice de corrélation en incluant à présent les indicateurs suivants :

- Pcritique -20 (la diminution de 20 mce est en lien avec la pression minimum requise chez l'utilisateur)
- P10%-20 (même remarque)
- Pmoypond-Pminéco
- Pmoypond-Pminmin
- Pmoypond-Pminlimite
- Pmoypond/Pminéco
- Pmoypond/Pminmin
- Pmoypond/Pminlimite

Les quotients ne donnent pas de résultats probants, c'est pour cela que nous ne présenterons pas les coefficients de corrélations associés.

Le Tableau 14 présente un extrait de la matrice de corrélation calculée :

	Pmoypond - Pminéco	Pmoypond - Pminmin	Pmoypond - Pminlimite	Pcritique - 20	P10% - 20
Pmin éco	0,39	0,46	0,41	0,42	0,56
Pminmin	0,28	0,27	0,25	0,27	0,37
Pmin limite	0,20	0,21	0,15	0,20	0,31
Pmoy pond	0,85	0,87	0,84	0,84	0,88
P10%	0,90	0,95	0,93	0,92	1,00
P50%	0,87	0,93	0,92	0,85	0,89
P90%	0,77	0,80	0,78	0,77	0,76
P critique	0,95	0,96	0,96	1,00	0,92
Pmoypond - Pminéco	1,00	0,97	0,97	0,95	0,90
Pmoypond - Pminmin	0,97	1,00	0,98	0,96	0,95
Pmoypond - Pminlimite	0,97	0,98	1,00	0,96	0,93
Pcritique - 20	0,95	0,96	0,96	1,00	0,92
P10% - 20	0,90	0,95	0,93	0,92	1,00

Tableau 14: Matrice de corrélation liant les indicateurs et les données descriptives (extrait)

On voit apparaître ici plusieurs corrélations fortes entre les nouveaux indicateurs et les données de base.

Nous avons donc tracé les nuages de points correspondants, et les droites de régression linéaire associées.

Nous retenons six configurations (Tableau 15) dont deux exemples figurent ci-après (Figure 14 et Figure 15)

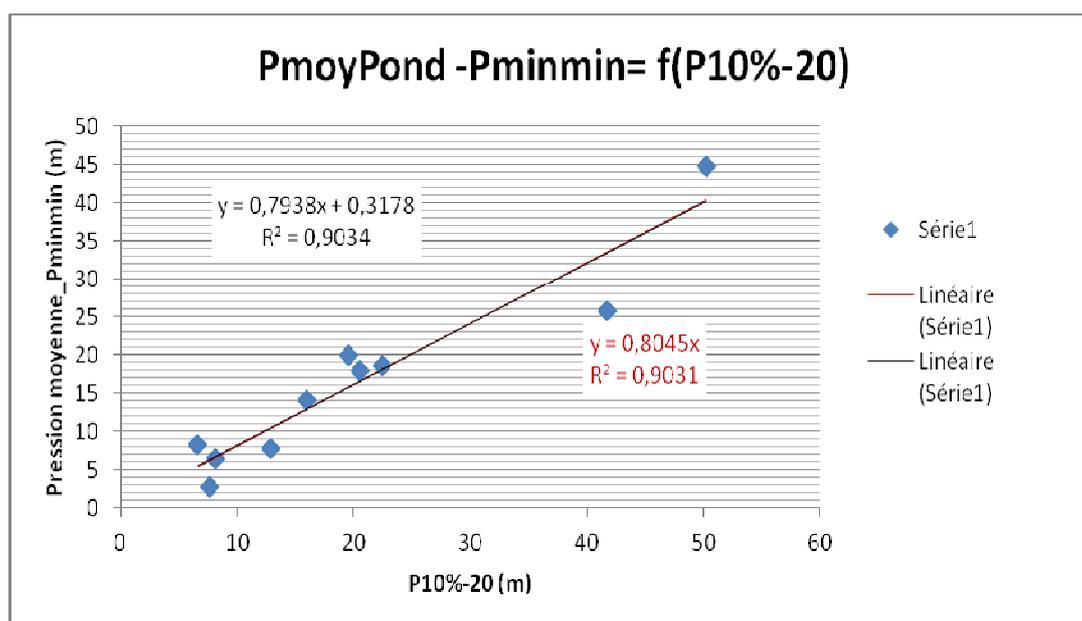


Figure 14: Pmoypond-Pminmin=f(P10%-20)

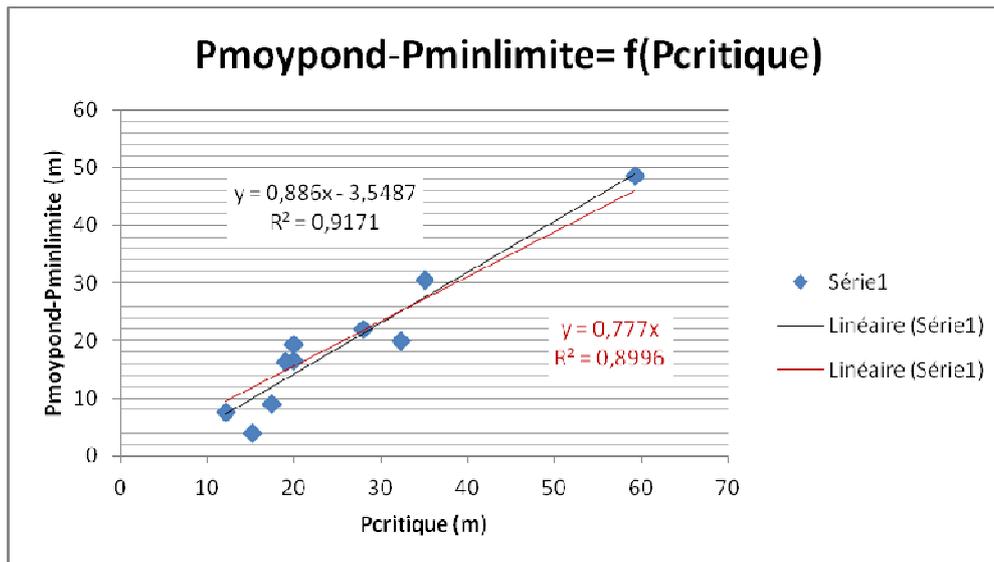


Figure 15: $P_{moypond}-P_{minlimite}=f(P_{critique})$

Relation	Régressions passant par l'origine		Régressions avec ordonnée à l'origine non nulle	
	Equation	R ²	Equation	R ²
$P_{moypond}-P_{minéco}= f(P10\%-20)$	$y=0,6036x$	0,80	$y= 0,6467x-1,2924$	0,81
$P_{moypond}-P_{minmin}= f(P10\%-20)$	$y=0,8045x$	0,90	$y=0,7938x+0,3178$	0,90
$P_{moypond}-P_{minlimite}=f(P10\%-20)$	$y=0,9031x$	0,86	$y=0,8187x+2,5251$	0,87
$P_{moypond}-P_{minéco}= f(P_{critique})$	$y=0,8151x$	0,82	$y=0,7327x-6,7068$	0,91
$P_{moypond}-P_{minmin}= f(P_{critique})$	$y=0,6851x$	0,88	$Y=0,8452x-5,213$	0,92
$P_{moypond}-P_{minlimite}= f(P_{critique})$	$y=0,777x$	0,90	$y=0,886x-3,5487$	0,92

Tableau 15 : Bilan des relations, équations et R² après analyse des données

VI.4 Estimation des pressions minimales à partir des pressions caractéristiques

Les trois Pressions minimales définies peuvent être approchées linéairement avec un bon R² à partir de Pmoy et de P10% ou Pcritique.

Cependant, l'utilisation P10% paraît plus judicieuse, car il peut arriver que le point critique soit isolé du reste du secteur et il y a donc plus de risque que la valeur de sa pression représente mal le reste du secteur.

On peut néanmoins utiliser en première approximation Pmoypond et Pcritique notamment pour rechercher la limite de pression atteignable :

$$P_{minlimite} = P_{moypond} - 0,8 \times P_{critique}$$

Dans un second temps, si l'on dispose de la donnée P10% on peut alors estimer à la fois la pression limite atteignable et la pression minimale de rentabilité économique :

$$P_{minéco} = P_{moypond} - 0,6 \times (P10\%-20)$$

$$P_{minlimite} = P_{moypond} - 0,9 \times (P10\%-20)$$

VII Conclusion

VII.1.1 Bilan

Le travail réalisé s'est fixé pour objectif central de déterminer quelle est la pression moyenne minimum d'une zone qui peut-être raisonnablement atteinte dans le but de limiter les pertes.

Dans un premier temps un état de l'art concernant l'utilisation des stabilisateurs de pression aval a permis d'avoir une vision plus claire des techniques et technologies existantes en matière de régulation de pression.

Ensuite, une étude comparative de la façon dont les logiciels de modélisation hydraulique EPANET, SynerGEE et PORTEAU modélisent les vannes de régulation de pression nous a permis de mettre en évidence que les résultats délivrés par PORTEAU et EPANET sont très similaires tandis que ceux donnés par SynerGEE sont sensiblement différents. Les écarts sont cependant d'une faible ampleur ce qui nous permet de conclure que la nature du logiciel utilisé n'aura pas un impact déterminant sur les résultats recherchés. .

Nous avons ensuite sélectionné dix secteurs parmi trois terrains proposés par Veolia sur lesquels nous avons pu mettre en œuvre notre méthode de recherche de la pression moyenne minimum. Cette méthode basée sur les modèles hydrauliques existants vise à simuler des actions successives de régulation de la pression qui consistent à mettre en place des vannes de régulation et à démailler localement le réseau. La pression moyenne ainsi obtenue a été notée **Pminmin** Cette méthode itérative faisant intervenir un critère d'arrêt subjectif basé le « bon sens de l'ingénieur » il nous a semblé nécessaire de rechercher un critère plus objectif.

Ceci nous a conduits à proposer d'arrêter un choix entre les différentes solutions possibles grâce à un critère technico-économique. Ce critère se base sur un ratio coût / efficacité permettant d'évaluer à la fois le prix du m³ économisé grâce à la solution s, et le prix du m³ additionnel économisé entre s et s+1. Ces deux prix sont ensuite comparés au coût marginal de production d'un m³ sur le secteur étudié. Ce critère permet de savoir à partir de combien d'ouvrages posés le m³ économisé devient plus cher que le m³ produit, et nous a permis de déterminer **Pminéco**.

Ensuite, l'analyse des résultats obtenus a mis en évidence une décroissance des gains en termes de diminution de pression à chaque itération de la méthode. Ce constat nous a conduits à rechercher une limite théorique lorsque le nombre d'appareils de régulation devient très grand. Après avoir exprimé la pression en fonction de l'inverse du nombre de stabilisateurs nous avons pu établir des régressions linaires dont la qualité d'ajustement a confirmé notre intuition. Ceci nous a permis de déterminer pour chaque secteur une pression minimum limite que nous avons notée **Pminlimite**.

Fort de ces résultats nous avons ensuite étudié les liens entre ces différentes pressions minima et des indicateurs représentatifs de la distribution des pressions des secteurs. L'objectif de cette opération a été de rechercher un moyen simple d'évaluer la pression minimum d'un secteur sans avoir à mettre en œuvre les simulations avec les modèles hydrauliques qui peuvent être longues et complexes.

Finalement nous aboutissons à trois relations :

$$(1) P_{minlimite} = P_{moypond} - 0,8 \times P_{critique}$$

$$(2) P_{minéco} = P_{moypond} - 0,6 \times (P_{10\%} - 20)$$

(3) $P_{\text{minilimite}} = P_{\text{moypond}} - 0,9 \times (P_{10\%} - 20)$

P_{moypond} est la pression moyenne du secteur, P_{critique} la pression minimum au point critique (c'est-à-dire le point du secteur qui connaît la pression la plus faible de la zone) et $P_{10\%}$ est la valeur du premier décile de la distribution des pressions. La valeur 20 mce correspond à la pression minimum requise chez l'utilisateur.

Nous préconisons de n'utiliser (1^o) que lorsque $P_{10\%}$ ne peut être calculé car, dans certains cas, le point critique peut être atypique et très peu représentatif du reste du secteur.

VII.1.2 Perspectives

Ce travail a permis d'obtenir des résultats très encourageants puisque que, comme nous le supposions au départ, un lien a pu être établi entre les pressions minima d'une zone et des indicateurs simples caractérisant la distribution des pressions de cette zone.

Toutefois, compte tenu de la complexité de la méthode mise en œuvre pour déterminer les pressions minima d'une zone (simulation sur modèle hydraulique) seuls dix secteurs ont pu être étudiés ce qui constitue un échantillon somme toute limité. Il est donc souhaitable de valider les résultats sur d'autres secteurs.

Par construction l'indicateur $P_{\text{minéco}}$ est très lié au contexte de service, ainsi, même si sur les secteurs étudiés, compte tenu d'hypothèses identiques de coûts, une bonne corrélation avec les indicateurs de la distribution a pu être trouvée, il nous semble que cet indicateur présente surtout un intérêt à l'échelle du service. Il est peu approprié pour une comparaison des secteurs ou des services entre eux.

A l'échelle du service ou du secteur, $P_{\text{minéco}}$ nous semble pouvoir être un bon outil d'aide à la décision pour peu que les calculs de coût des installations, de coût marginal de production ou de coût de substitution des volumes perdus soient réalistes. La technique d'évaluation des volumes économisés reste très théorique et sa confrontation à la réalité en vue de son amélioration nous semble un axe important d'étude pour l'avenir.

L'indicateur $P_{\text{minilimite}}$ nous semble plus universel et donc mieux approprié pour intervenir au sein du calcul d'un indicateur de performance prenant en compte la pression de service. Il sera donc utile à l'avenir de vérifier que la propriété qui permet son évaluation (l'existence d'une limite) est vérifiée sur la plupart des secteurs. Les formules approchées permettant son approximation doivent également être mises à l'épreuve d'un nombre plus important de secteurs sur des terrains représentant des contextes variés.

Bibliographie

ALEGRE Helena, BAPTISTA Jaime Melo, Jr. CABRERA Enrique, CUBILLO Francisco, DUARTE Patricia, HIRNER Wolfram, MERKEL Wolf, et PARENA Renato. **Performance Indicators for Water Supply Services**. IWA publishing, Second Edition, 2006. 289p

AUBIN Céline. **Etude du potentiel des actions de réduction des fuites des réseaux d'eau potable**. Mémoire d'ingénieur, Grenoble INP ENSE3, 2011. 58p.

BAYARD Société. Documentation technique. **Stabilisateur de pression aval « Monostab » DN 40 à 200-Série F2 10**. 2012 a. 2p.

BAYARD Société. Documentation technique. **Vanne de Régulation « Hydrobloc » DN50 à 1000 Serie K**. 2012 b. 20p

BAYARD Société. Notice. **Gestion de la pression. Enjeux et Perspectives**. 2012 c. 4p

BAYARD Société. Power Point, **Présentation Solutions Vanne Modulation Pression**. 2012 d. 17 diapositives.

Centre du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts. **Documentation Porteau 3, Guide d'utilisateur** [en ligne] CEMAGREF, 2011 [consulté le 12/03/2012] http://porteau.cemagref.fr/porteau_3/Telechargement/GuideUtilisateurPorteau.pdf

CLA-VAL Société. Documentation technique. **Automatic Control Valves CLA-VAL 90-01**. 2012 a. 40p.

CLA-VAL Société. Documentation technique. **Réducteur de pression à action directe AQUA 80-960A**. 2012 b. 3p.

CLA-VAL Société. Présentation Power Point. **La modulation de pression**. 2012 c. 32 diapositives.

FARLEY Malcom, WYETH Gary, MD.GHAZALI Zainuddin Bin, Istandar Arie, et SINGH Sher. **The manager's non-revue water Handbook. A guide to understanding water losses**. Niels van DIJK, RAKSAKULTHAI Vivian, KIRKWOOD Elisabeth, 2008. 98p.

Générale des Eaux. **EPANET 2.0 Simulation Hydraulique et Qualité pour les Réseaux d'Eau sous Pression. Manuel d'utilisateur Version Française**, 2003. 222p.

GUILLAUME Jean Paul. Présentation power point. **Régulation des fluides sous pression**. 2012. 14 diapositives.

GRIMSON Mark, SCHLESINGER Victor, DUQUE Alejandro, BAHIA Eugene. **How to boost the performance of Pressure Reducing Valves without breaking the budget. Acte du colloque Waterloss (Manille;26-29 février 2012)**. 11p.

LE GLATIN Mathieu. **Impact de la pression et des infrastructures sur les réseaux d'eau potable**. Mémoire d'ingénieur. Grenoble INP ENSE3, 2011. 48p.

LKHALIDI Mohammed. **Normalisation de la pression dans le réseau de distribution d'eau potable du Grand Casablanca**. Mémoire d'ingénieur, ENGEES, Janvier 2008. 121p.

MOREAU Jean Marie Georges. **Réguler la pression. Réduire les pertes. Protéger le réseau**. Pressure Management. Général Water Savings, 2007. 55p

PILLER Olivier, et BREMOND Bernard. **Modeling of Pressure Régulating Devices : A problem now solved**. Cemagref Edition, 2001. 10p.

RAMAROJAONA Bakoarilala Ramaniraka. **Régulation de pression sur le réseau d'eau potable de la Communauté d'Agglomération d'Evry Centre Essonne. Impact sur le rendement de réseau et les coûts d'exploitation**. Mémoire d'ingénieur, ENGEES, 2009. 133p.

RENAUD Eddy. **Toward a global performance indicator for losses from water supply systems**. Cemagref Edition, 2009.11p.

RENAUD Eddy, KHEDHAOUIRIA Dikra, CLAUZIER Marion, NAFI Amir, WITTNER Christophe, WEREY Caty. **Réduction des fuites dans les réseaux d'alimentation d'eau potable. Systèmes d'indicateurs et méthodologies pour la définition, la conduite et l'évaluation des politiques de lutte contre les fuites dans les réseaux d'eau potable. Fiches pratiques**. Non publié, Version Avril 2012, 66p.

ROZAN Anne. **Support de cours. Economie**, 2010. 61p.

SANDRAZ Anne-Claire. Notice. **La gestion des pressions**, 2012. 6p.

Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau de la Gironde. **SAGE Nappes profondes de Gironde. Analyse économique sur la période 2003-2008**. SMEGREG, 2011. 71p.

SISSOKO Mamadou. **Maîtrise des pertes en eau potable. Méthode d'évaluation de la pression caractérisant une zone desserte**. Mémoire Mastère Spécialisé Eau Potable et Assainissement de l'ENGEES, 2010. 98p.

STONER SOFTWARE. **SynerGEE Water 4.6.0.User Guide**.GL Noble Denton, 2011. 1624p.

TANGEAOUI Nabil. Fichier Excel, **Traitement de données par ZD** .2012.

THORNTON Julian. **Managing leakage by managing pressure : a practical approach**. IWA publishing. 2003. 2p.

TROW S.W. **.Development of a Pressure Management Index**. Actes du colloque Waterloss, Cape Town, 26-29 avril 2009.

TROW S.W. et PAYNE A. **. Intelligent Pressure Management. A new development for Monitoring and Control of Water Distribution Systems**. 2009. 302 p.

Annexes

VIII Annexe 1 : Etat de l'art sur l'utilisation des stabilisateurs de pression aval pour réguler la pression des réseaux d'Adduction en Eau Potable

VIII.1 Préambule

VIII.1.1 Définitions

On utilisera l'expression « régulation de pression » pour désigner la mise en œuvre de dispositifs spécifiquement destinés à modifier la pression d'une zone de desserte en eau. Au sein de la régulation de pression on distinguera la « réduction de pression » qui vise à réduire la pression d'une zone selon une consigne stable dans le temps (supérieur à un jour) et la « modulation de pression » qui vise à adapter la pression en fonction d'un paramètre potentiellement variable dans un temps inférieur à la journée.

Sur un secteur on peut appliquer une régulation généralisée, c'est-à-dire contrôler la pression de l'ensemble du secteur, ou effectuer une régulation localisée, c'est-à-dire isoler une zone de forte pression (par exemple avec des vannes de sectionnement) et contrôler la pression uniquement sur cette zone.

VIII.1.2 Technologies utilisées

Dans le domaine de la réduction de pression, trois grandes technologies peuvent être utilisées :

- Les pompes à vitesse variable
- Les vannes à opercule perforé
- Les stabilisateurs de pression aval

Les deux premières technologies restent une exception, c'est pour cela que nous nous intéresserons en priorité aux stabilisateurs de pression aval [Guillaume Jean-Paul, 2012].

Les informations techniques du présent document sont basées sur le matériel de régulation de pression proposé par CLA-VAL [CLA-VAL, 2012 a ; CLA-VAL, 2012 b ; CLA-VAL, 2012 c] RAMUS et BAYARD [Bayard, 2012 a ; Bayard, 2012 b ; Bayard, 2012 c ; Bayard, 2012 d] qui sont les principaux fabricants présents sur le marché français.

VIII.2 Principes de fonctionnement du stabilisateur aval

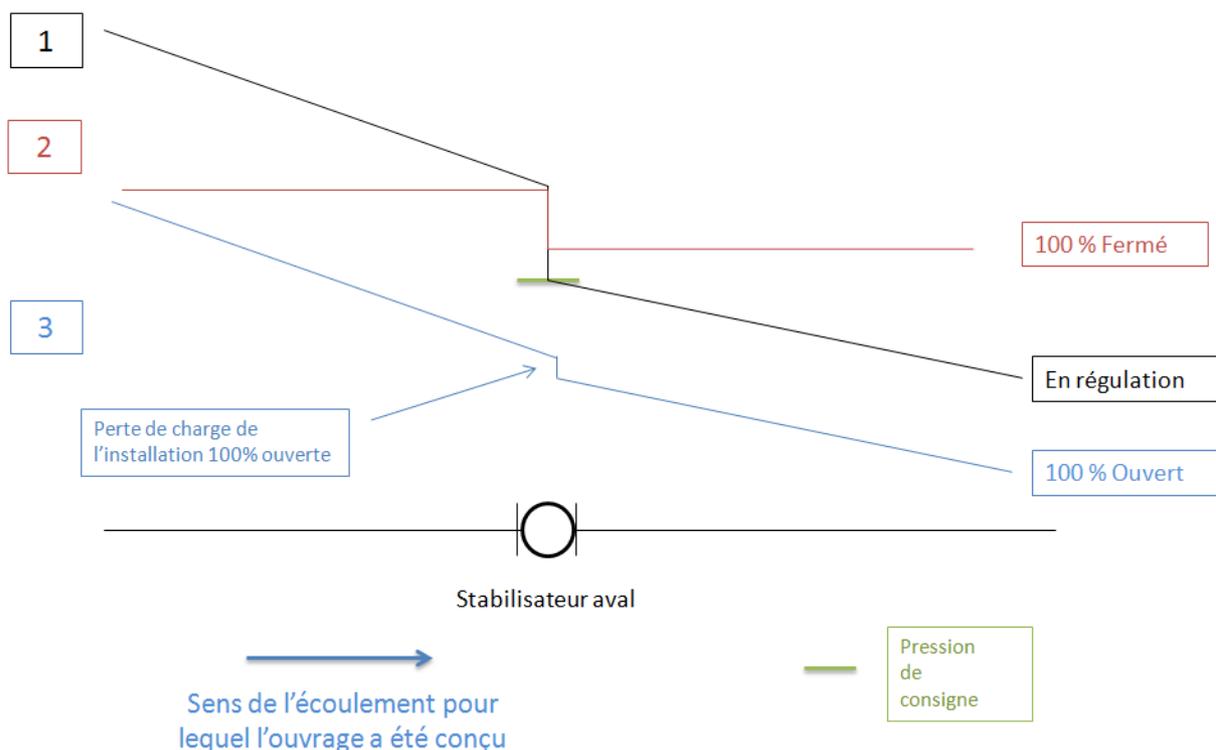
VIII.2.1 Fonction du stabilisateur de pression aval

Un stabilisateur de pression aval est une vanne, qui ajuste son degré d'ouverture pour créer une perte de charge qui abaisse la pression dans le but de respecter une consigne de pression fixe à son aval.

Dans la pratique, certains stabilisateurs sont munis d'un système anti-retour, et d'autres non. Cette technologie est conçue pour fonctionner selon un sens d'écoulement de l'eau unique, nous considérerons donc, pour clarifier les choses, que le stabilisateur aval est muni d'un clapet anti-retour, ainsi, dans le cas où la pression aval est supérieure à la pression amont, le clapet se ferme et il n'y a pas de circulation de l'eau.

Si la pression amont est supérieure à la pression aval, trois cas se présentent (Figure 16) :

- 1 La pression amont est supérieure à la pression de consigne, et il n'y a pas de contre pression aval supérieure à la pression de consigne.
- 2 La pression amont est supérieure à la pression de consigne, et il y a une contre pression aval est supérieure à la pression de consigne.
- 3 La pression amont est inférieure à la pression de consigne.



En fonctionnement normal, on se trouve dans la situation 1 et la pression aval se régule autour d'une valeur pré-réglée, qui ne varie que si l'on change la consigne de fonctionnement de l'ouvrage.

VIII.2.2 Différents types de stabilisateurs

Il existe deux grands types de vannes stabilisatrices de pression aval :

- les vannes à régulation mécanique ;
- et les vannes à régulation hydraulique.

VIII.2.2.1 Vannes à régulation mécanique



Figure 17 : Vanne à régulation mécanique Bayard « Monostab série F2 10 »

Ce type de vanne est proposé par chacun des constructeurs :

- Bayard : « Monostab », série F2 10 (Figure 17)
- Cla-Val : Aqua 80-960 A
- Ramus : REDAR RL

Le rôle de cette vanne est de réduire et de maintenir la pression d'un réseau à partir d'une conduite à pression plus élevée, quelles que soient les variations de la pression amont et du débit demandé.

La vanne est composée de (Figure 18) :

- Un corps de vanne séparé en 2 parties (Amont et Aval) divisé par une cloison qui comporte une ouverture, le siège ;
- Un chapeau contenant un ressort de tarage ;
- Un équipement mobile de fermeture avec une membrane à déroulement : pièce de commande, clapet compensé, axe de guidage.

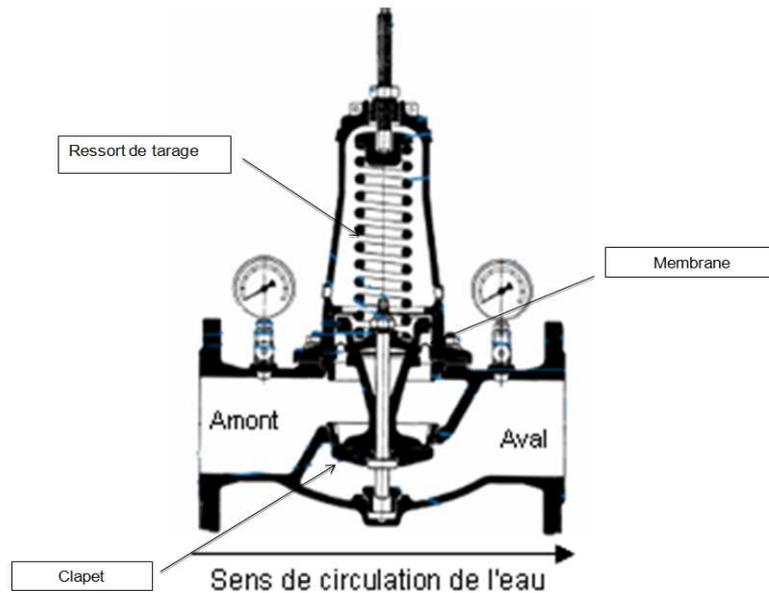


Figure 18 : Vue en coupe d'une vanne à régulation mécanique

La pression amont n'a pas d'incidence sur cette vanne. En effet la surface active de la membrane et celle du clapet soumises à la pression amont sont équivalentes (Figure 19).

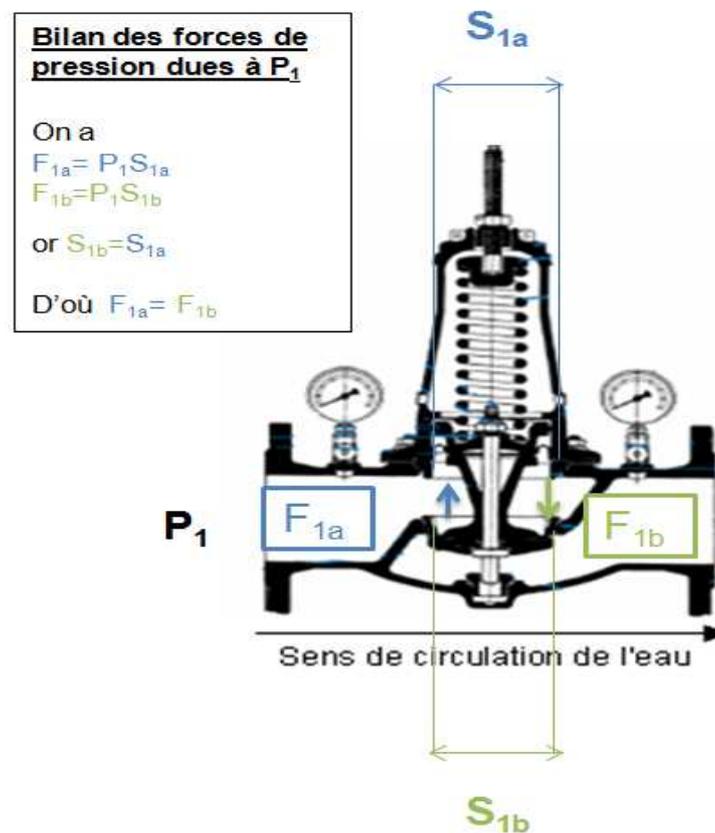


Figure 19 : Vanne à régulation mécanique : Equilibre des forces liées à la pression amont

Soit :

- P_c = Pression de consigne de la vanne
- F_R = force exercée par le ressort
- $F_R = P_c S$
- F_2 = force exercée par la pression aval
- $F_2 = P_2 S$

Si :

- $F_R > F_2$ vanne ouverte en régulation
- $F_R < F_2$ vanne fermée
- $F_R = F_2$ vanne fermée, à l'équilibre

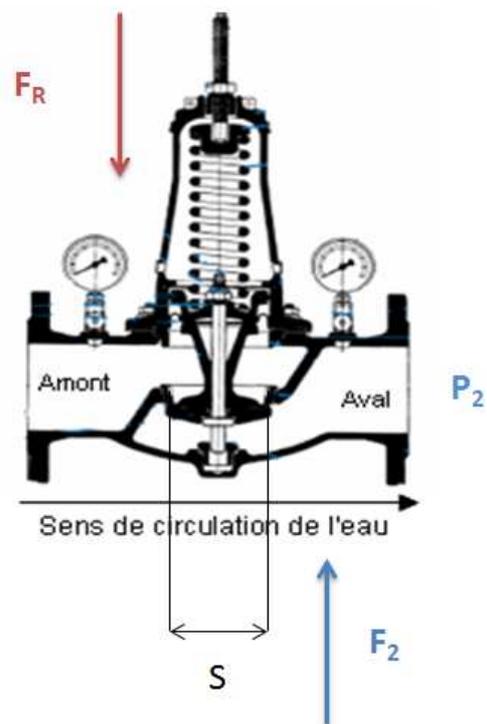


Figure 20 : Vanne à régulation mécanique : Action des forces liées au ressort et à la pression aval

L'effet de la pression aval P_2 au-dessous du clapet est compensé par la compression réglable du ressort (Figure 20).

Quand P_2 tend à devenir inférieure à la pression de réglage, l'effort du ressort devient prépondérant et l'équipage mobile descend. La section de passage de l'eau augmente, les pertes de charges sont diminuées : la pression aval augmente donc jusqu'à la valeur de la pression de réglage.

A l'inverse, si P_2 tend à augmenter, l'effort exercé au-dessous du clapet est supérieur à l'effort du ressort. L'équipement se ferme, limitant la section de passage de l'eau, la pression à l'aval commence donc à diminuer.

Les caractéristiques dépendent des constructeurs, cependant on peut citer la notice du constructeur Bayard, qui donne comme ordre de grandeur de la précision 0,4bar +5%Pression Aval Régulée.

VIII.2.2.2 Vanne à régulation hydraulique

Les noms commerciaux des vannes à régulation hydraulique sont les suivants :

- Bayard : vanne Hydrobloc
- Cla-Val : 90-01 et 91_01 si option anti-retour
- Ramus : vanne de régulation multistab

Cette vanne a le même rôle que la vanne précédemment décrite, mais son fonctionnement est assuré par un pilote hydraulique.

Ces vannes sont équipées d'un circuit pilote hydraulique et d'une vanne de base (Figure 21).

La vanne de base est composée de :

- Un corps de vanne divisé en 2 parties (A et B) séparées par une cloison qui comporte une ouverture, le siège
- Un chapeau
- Un équipage mobile de fermeture avec une membrane : pièce de commande, ressort de compensation, axe de guidage

Le chapeau et la membrane constituent et délimitent la chambre de contrôle de la vanne (C).

Le circuit hydraulique de commande de la vanne (appelé circuit pilote) est composé de :

- Tubulures
- Un diaphragme sur sa tubulure amont
- Un pilote sur la tubulure aval
- Une liaison avec la chambre de contrôle
- Dans le cas d'une stabilisation amont, une tubulure de prise de pression amont

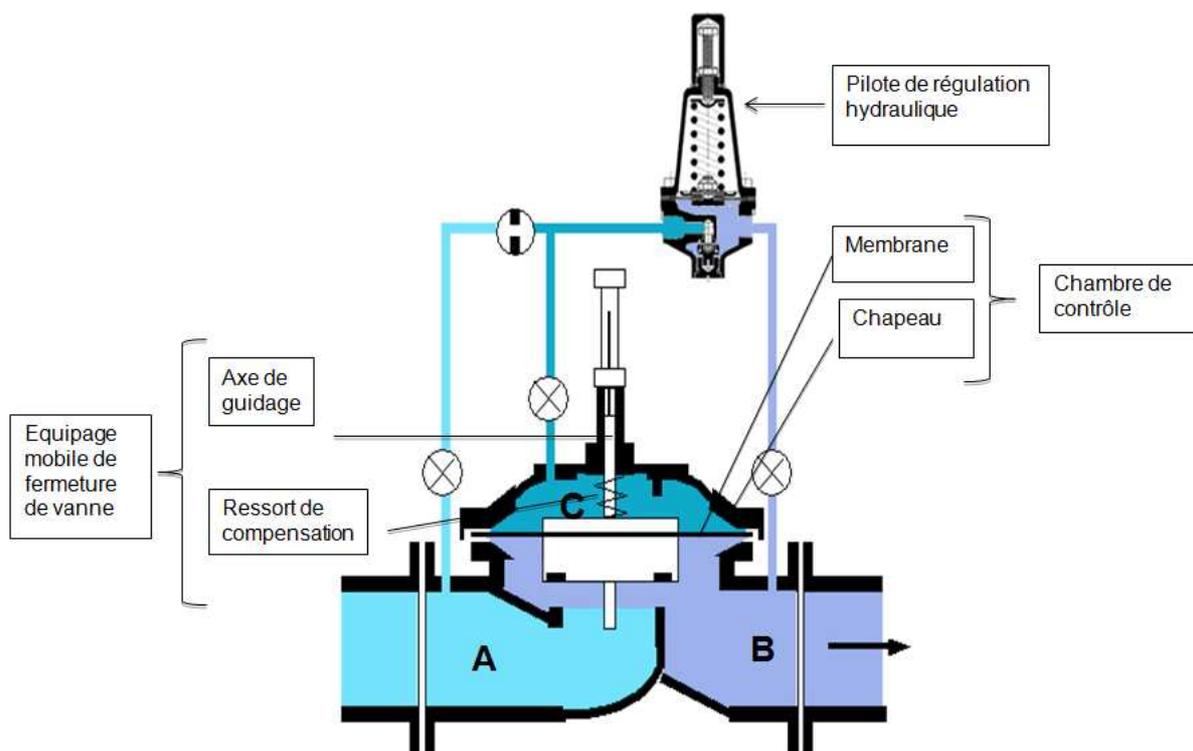


Figure 21 : Vanne à régulation hydraulique Bayard « Hydrobloc »

Le pilote de la vanne de stabilisation aval est similaire dans son principe de fonctionnement à la vanne de régulation mécanique présentée dans la partie précédente.

La vanne reproduit les mouvements du pilote.

Soit (cf. Figure 22 et Figure 23)

P_1 la pression amont

P_{ch} la pression dans la chambre de la vanne

P_2 la pression aval

P_{cons} la pression de consigne

S_2 la surface de la membrane étanche de la vanne

S_1 la surface de l'ouverture amont du corps de la vanne

J_D la perte de charge singulière due au diaphragme

J_P la perte de charge singulière générée par le pilote

J_V la perte de charge singulière générée par la vanne

q le débit circulant dans la tubulure du pilote

Q_{tot} le débit transitant dans la vanne

F_{RV} la force exercée par le ressort de la vanne sur l'équipage mobile de la vanne

F_1 la force exercée par la pression amont sur l'équipage mobile de la vanne

F_2 la force exercée par la pression aval sur l'équipage mobile de la vanne

F_{CH} la force exercée par la pression de la chambre sur l'équipage mobile de la vanne

f_2 la force exercée par la pression aval sur l'équipage mobile du pilote

f_{RP} la force exercée par le ressort du pilote sur l'équipage mobile du pilote.

On se place dans le cas où $P_1 \geq P_2$ et on estime que tous les composants ont la même altitude.

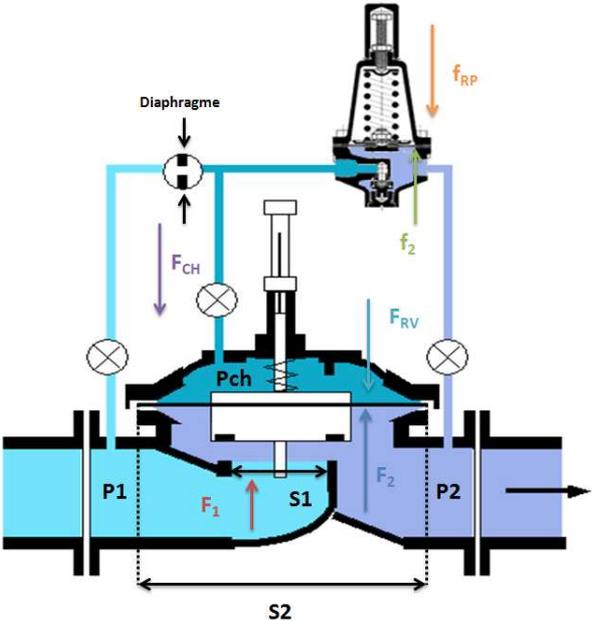


Figure 22: Vanne à régulation hydraulique, forces en jeu

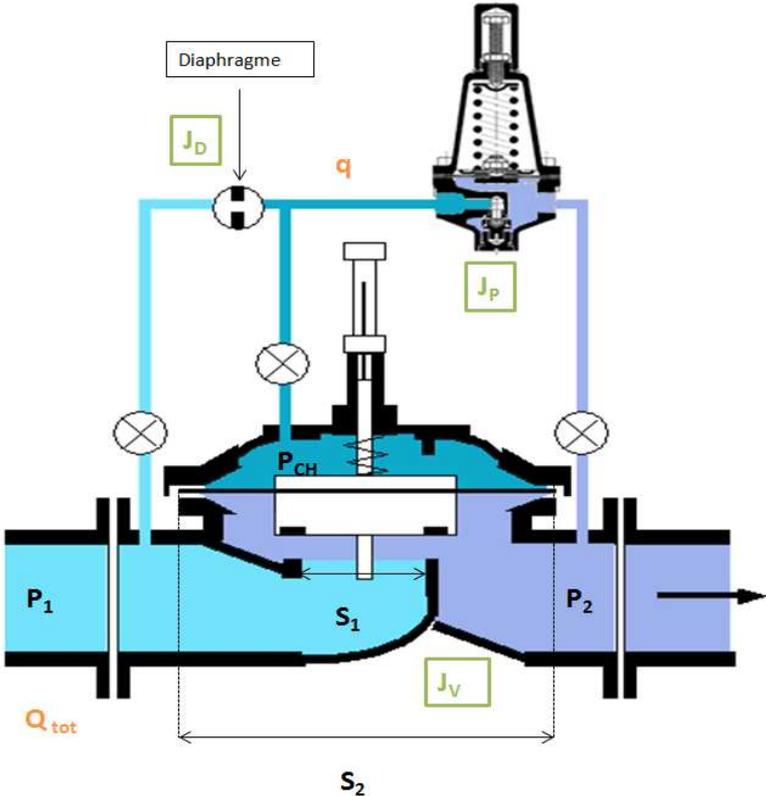


Figure 23 : Vanne à régulation hydraulique : Débits et pertes de charge

Le bilan des forces ΔF s'exerçant de bas en haut sur l'équipage mobile est le suivant :

$$\Delta F = F1 + F2 - Fch + Frv$$

$$\Delta F = P_1 S_1 + P_2 (S_2 - S_1) - P_{ch} S_2 - F_{rv} \quad (1)$$

De plus on a les relations suivantes entre les pressions:

$$P_{CH} = P_1 - J_D \quad (2)$$

$$P_2 = P_1 - J_V \quad (3)$$

$$P_1 = P_2 + J_P + J_D \quad (4)$$

$$P_{CH} = P_2 + J_P \quad (5)$$

a) Pression aval supérieure à la pression de consigne

La tension du ressort du pilote est réglée pour que dans un tel cas le pilote soit fermé. Il n'y a pas de débit dans la tubulure, on a donc

$$q = 0 \text{ et donc } J_D = 0 \text{ et donc d'après (2) } P_1 = P_{CH}$$

L'équilibre (1) s'écrit donc :

$$\Delta F = P_1 S_1 + P_2 (S_2 - S_1) - P_1 S_2 - F_{RV}$$

$$\Delta F = (P_1 - P_2)(S_1 - S_2) - F_{RV}$$

Or $S_2 > S_1$ donc $\Delta F < 0$

Les forces descendantes sont supérieures aux forces montantes : la vanne se ferme.

b) Pressions amont et aval inférieures à la pression de consigne

La pression aval étant inférieure à la consigne le pilote est totalement ouvert, l'eau circule dans la tubulure.

On peut estimer que la perte de charge J_P due au pilote totalement ouvert est négligeable face aux charges en jeu, soit d'après (5) $P_{CH} = P_2 + \varepsilon$.

L'équilibre (1) s'écrit alors:

$$\Delta F = P_1 S_1 + P_2 (S_2 - S_1) - P_2 S_2 - F_{RV}$$

$$\Delta F = S_1 (P_1 - P_2) - F_{RV}$$

A l'équilibre $\Delta F = 0$ donc $P_1 - P_2 = F_{RV} / S_1$, l'appareil mobile s'ouvre pour générer la perte de charge correspondante.

De part la conception du ressort, F_{RV} est petite (le ressort n'est là que pour assister le mouvement de l'appareil mobile) la vanne est donc largement ouverte.

c) La pression amont est supérieure à la consigne

On est dans la situation où il n'y a pas de contre pression aval supérieure à la consigne (sinon la vanne est fermée, cf. supra).

On considère une situation à l'équilibre ($\Delta F = 0$)

Supposons que Q_{tot} augmente

Alors J_v augmente, d'après (3) P_2 diminue f_2 diminue, le pilote s'ouvre, q augmente à son tour, en conséquence J_D augmente.

D'après (2) P_{CH} diminue, F_{ch} diminue, alors l'équipage mobile remonte. de telle sorte que J_v diminue et P_2 augmente pour retrouver la pression de consigne..

Quand Q_{tot} diminue un raisonnement analogue permet de montrer que l'équipage mobile descend pour ajuster la perte de charge à la consigne.

La précision des vannes hydrauliques est estimée à $\pm 5\%$ de la pression aval souhaitée (cf catalogue Bayard).

VIII.2.2.3 Domaines d'application des vannes mécaniques et hydrauliques

La vanne mécanique de réduction de pression aval et la vanne hydraulique de stabilisation de pression aval ont la même fonction. Le choix entre l'une ou l'autre de ces technologies prendra en compte les éléments suivants :

- la vanne mécanique a un plus grand encombrement et n'existe que jusqu'au diamètre 200 mm (au-delà, la taille du ressort nécessaire serait trop importante) ;
- le fonctionnement de la vanne mécanique est plus simple, c'est un appareil plus robuste ;
- la vanne hydraulique est polyvalente, sa fonction peut évoluer au cours du temps. En effet, il suffira pour cela de remplacer le circuit pilote. Une vanne mécanique devra être intégralement remplacée si une nouvelle fonctionnalité (ex : stabilisation de pression amont) doit être ajoutée ;
- la vanne mécanique génère moins de perte de charge que la vanne hydraulique ;
- la vanne hydraulique a une meilleure précision.

VIII.3 Conception et exploitation d'une installation de régulation de pression

VIII.3.1 Eléments de dimensionnement des stabilisateurs aval

Le dimensionnement d'une vanne de régulation nécessite une bonne précision sur les données relatives à ses conditions de fonctionnement. Une erreur de donnée peut amener à un choix erroné et donc au dysfonctionnement du matériel et peut entraîner de graves conséquences sur le réseau.

Qu'il s'agisse d'une vanne à régulation mécanique, ou hydraulique, le principe du dimensionnement est le même.

Afin de donner un exemple de pré-dimensionnement nous nous baserons sur le catalogue du constructeur Bayard, et sur les diagrammes et tableaux du corps de vanne du type XG, le plus utilisé.

VIII.3.1.1 Données nécessaires

Les données nécessaires pour le pré-dimensionnement d'un stabilisateur de pression aval sont :

- le débit minimum transitant (m³/h),
- le débit maximum transitant (m³/h),
- le débit exceptionnel transitant (généralement 60m³/h, débit réglementaire d'un poteau d'incendie)
- la pression amont maximum (bar)
- la pression amont minimum (bar)
- la pression aval régulée (bar)

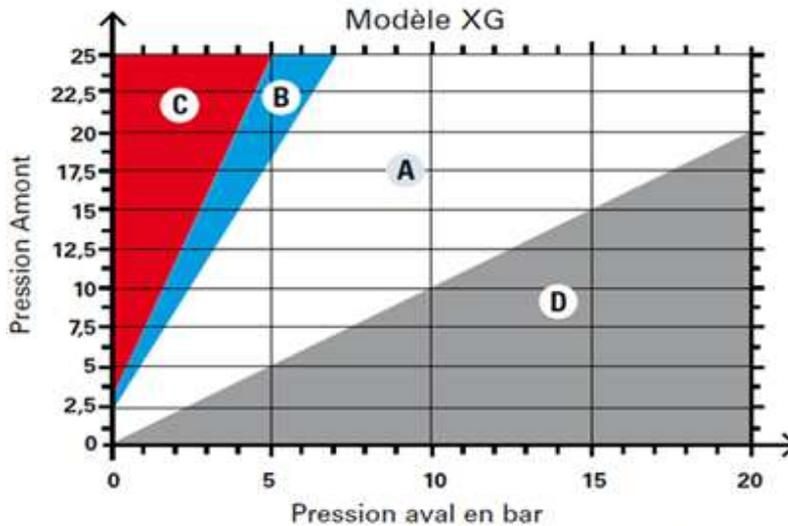
VIII.3.1.2 Prise en compte du phénomène de cavitation

La cavitation est un phénomène qui se produit lorsque les conditions de pression et de température provoquent un changement de phase, l'eau passe alors à l'état gazeux. Dans notre cas, à température constante, la cavitation intervient quand la pression passe localement en dessous de la pression de vapeur saturante, ce qui provoque la formation de bulles d'eau gazeuse. Ce phénomène est préjudiciable aux stabilisateurs puisqu'il attaque la fonte et provoque une usure prématurée de l'appareil (Figure 24).



Figure 24 : Élément d'appareil mobile ayant subi le phénomène de cavitation

Il faut donc vérifier que les conditions de pression ne favorisent pas ce phénomène. En pratique, on utilise un diagramme sur lequel on reporte un point dont les coordonnées sont les pressions aval (x) et amont (y) de l'appareil (Figure 25).



Ce diagramme permet de vérifier les conditions de fonctionnement de l'appareil.

- **Zone A :** Conditions hors cavitation.
- **Zone B :** Zone d'utilisation sévère. Prévoir un équipement mobile renforcé KV003
- **Zone C :** Zone de cavitation. Prévoir un kit anti cavitation ACD040 ou des appareils en cascade. En cas de pression aval inférieure à 1 bar, un dispositif d'entrée d'air peut être envisagé, (nous consulter).
- **Zone D :** Zone impossible, pression amont inférieure à pression aval.

Figure 25 : Diagramme de contrôle du phénomène de cavitation

Le risque de cavitation est élevé lorsque la perte de charge que doit générer l'appareil est importante (pression amont élevée et pression aval faible).

VIII.3.1.3 Choix du diamètre

Pour déterminer le diamètre de la vanne de régulation on introduit la grandeur KV qui est le débit pour lequel la vanne à pleine ouverture provoque une perte de charge de 1 bar.

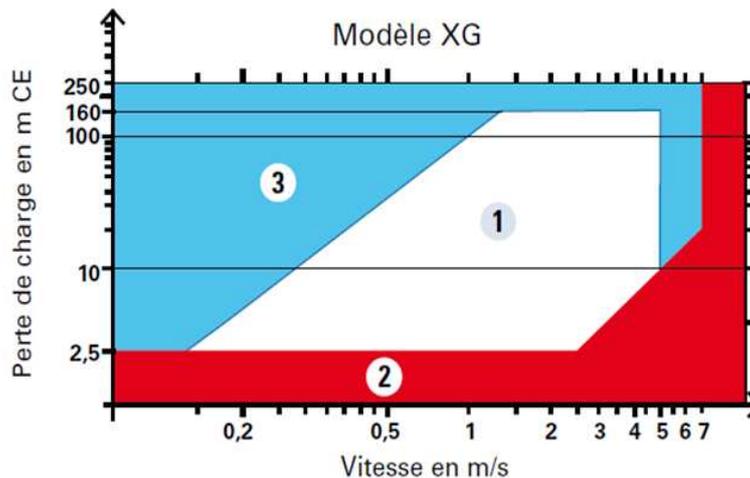
Le diamètre de la vanne est encadré par deux valeurs qui sont déterminées de la façon suivante :

- Le diamètre minimum de la vanne est le plus petit diamètre permettant de faire passer le débit maximum de pointe en créant une perte de charge inférieure à 1 bar, c'est dire le plus petit diamètre pour lequel $Q_{\max} < K_v$.
- Le diamètre maximum est le plus grand diamètre pour lequel, générer une perte de charge de 1 bar au débit minimum ne nécessite pas un taux d'ouverture de la vanne inférieur à 15 %. En d'autres termes on tolère une ouverture minimale de la vanne de 15% de son ouverture totale.

Une fois un diamètre commercial choisi au sein de la place définie ci-dessus, une première vérification s'impose, celle des vitesses transitant dans la vanne. On considère que les conditions de vitesse optimales sont : $3\text{m.s}^{-1} < v < 5 \text{ m.s}^{-1}$. Dans des conditions exceptionnelles de débit (type débit incendie) v ne doit pas dépasser 7m.s^{-1} (Figure 26).

Diagrammes de fonctionnement

Ce diagramme facilite le choix du diamètre connaissant la pression différentielle Δp et la vitesse VE dans la section d'entrée.

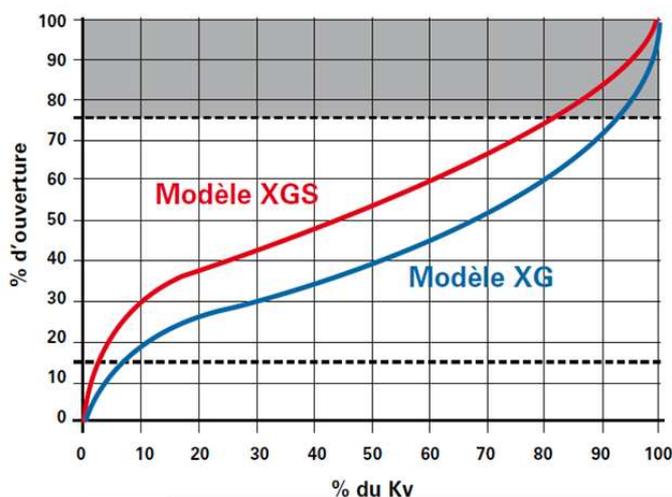


- **Zone 1** : Conditions optimales d'utilisation.
- **Zone 2** : Zone à éviter (nous consulter).
- **Zone 3** : Fonctionnement possible mais à éviter en régime permanent (nous consulter).

Figure 26 : Diagramme de contrôle des vitesses

Il convient ensuite de vérifier que la vanne s'ouvre à 70% dans des conditions normales d'utilisation. La marge de 15 à 30% permet d'accepter un débit exceptionnel ponctuel qui pourrait se manifester en une courte période (Figure 27).

Diagramme pourcentage du Kv en fonction du pourcentage d'ouverture



- Entre 15 et 75% d'ouverture :
Fonctionnement optimal de la vanne dans les conditions normales d'utilisation.
- En dessous de 15% d'ouverture :
La qualité de la régulation reste excellente, notamment grâce au dispositif SPD (jusqu'au DN 150), mais la vanne est soumise à un régime de fonctionnement sévère qui peut induire des vibrations et du bruit. La vanne est probablement surdimensionnée.
- Au dessus de 75% d'ouverture :
La régulation est moins performante car la différentielle de pression devient très faible. La vanne est lente à réagir, elle est probablement sous-dimensionnée. Cependant, cette plage est utilisable en mode "tout ou rien", comme par exemple pour des applications de remplissage de réservoirs.

Figure 27 : Diagramme de contrôle des taux d'ouverture

VIII.3.2 Limites d'utilisation et solutions techniques

VIII.3.2.1 Condition d'ouverture de la vanne

La vanne ayant un poids, il faut un différentiel de pression minimum pour pouvoir l'ouvrir. La valeur pour les vannes Hydrobloc de type XG est 0,4bar. C'est une valeur minimale, importante pour que le mécanisme d'obturation de la vanne de base puisse se mettre en mouvement ascendant et descendant.

VIII.3.2.2 Cavitation

Si les conditions de pression sont trop critiques, et ne permettent pas d'installer une vanne (même en ajoutant un dispositif dissipatif d'énergie anti-cavitation), il est possible de poser deux stabilisateurs de pression aval en série, afin de diviser la réduction de pression en deux paliers.

VIII.3.2.3 Ecarts de débits importants

Si l'écart entre les débits transitant par exemple le jour et la nuit est trop important, il est envisageable de monter deux stabilisateurs de diamètre différent en parallèle. Le stabilisateur de petit diamètre est réglé avec une consigne de pression la plus haute, ainsi c'est lui qui fonctionne pour les faibles débits (le stabilisateur de diamètre plus important ayant une consigne plus faible, il reste fermé). Lorsqu'un débit important est appelé, le stabilisateur de petit diamètre s'ouvre en entier et occasionne une perte de charge qui devient importante de telle sorte que la pression aval baisse au-dessous de la consigne d'ouverture du second stabilisateur.

VIII.3.2.4 Protection incendie

Un élément important à prendre en compte lorsque l'on veut faire de la régulation de pression est la contrainte de protection incendie. Si elle est présente, il faut garantir un débit minimum (le plus souvent 60 m³/h à 1bar de pression aux poteaux incendie), que le stabilisateur peut dans certains cas contrarier.

Deux cas sont à envisager :

1. La perte de charge singulière créée par le stabilisateur à pleine ouverture ne permet pas de satisfaire la sécurité incendie (en général stabilisateur de petit diamètre)
2. La pression de consigne du stabilisateur est trop basse pour permettre de délivrer le débit compte tenu des pertes de charge engendrées par le tronçon aval.

Le premier cas peut se résoudre avec la même solution que pour les écarts de débit importants évoqués précédemment, c'est-à-dire l'installation de deux stabilisateurs de diamètres différents.

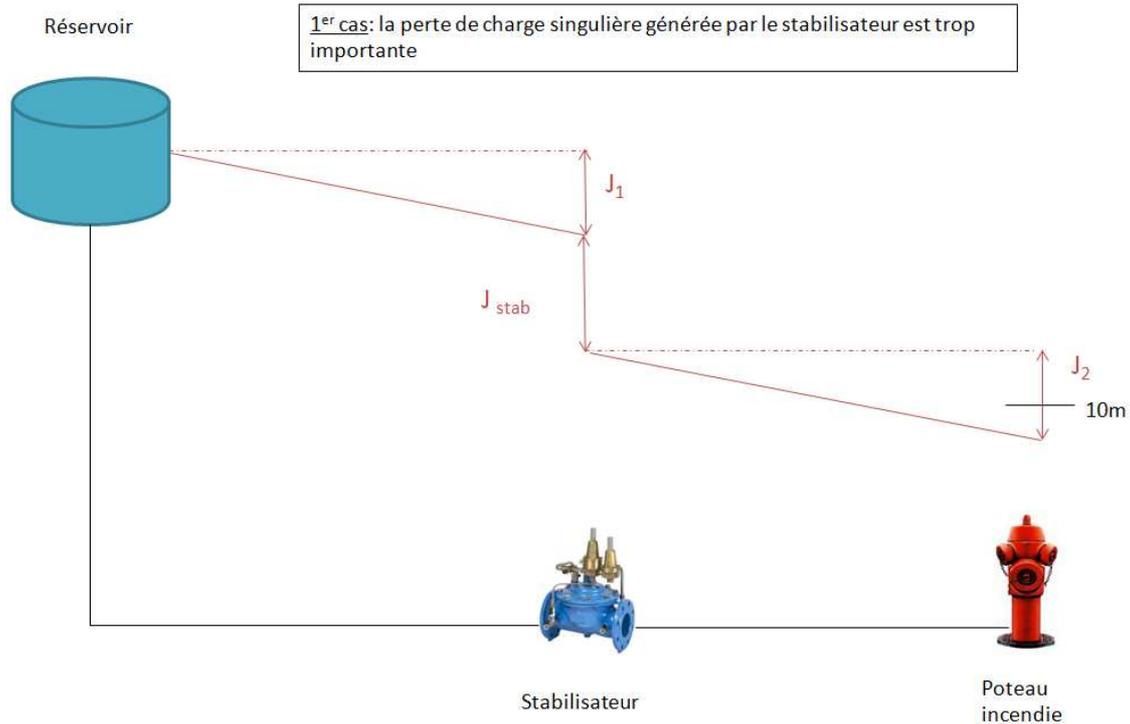


Figure 28 : Impact de la perte de charge du stabilisateur sur le débit incendie

Dans le second cas, il n'y a pas d'autre choix que de changer la consigne du stabilisateur. Certains appareils permettent d'effectuer un changement automatique de consigne en cas de débit important (hydrostab aval à consigne de pression bi-étagée chez Bayard),.

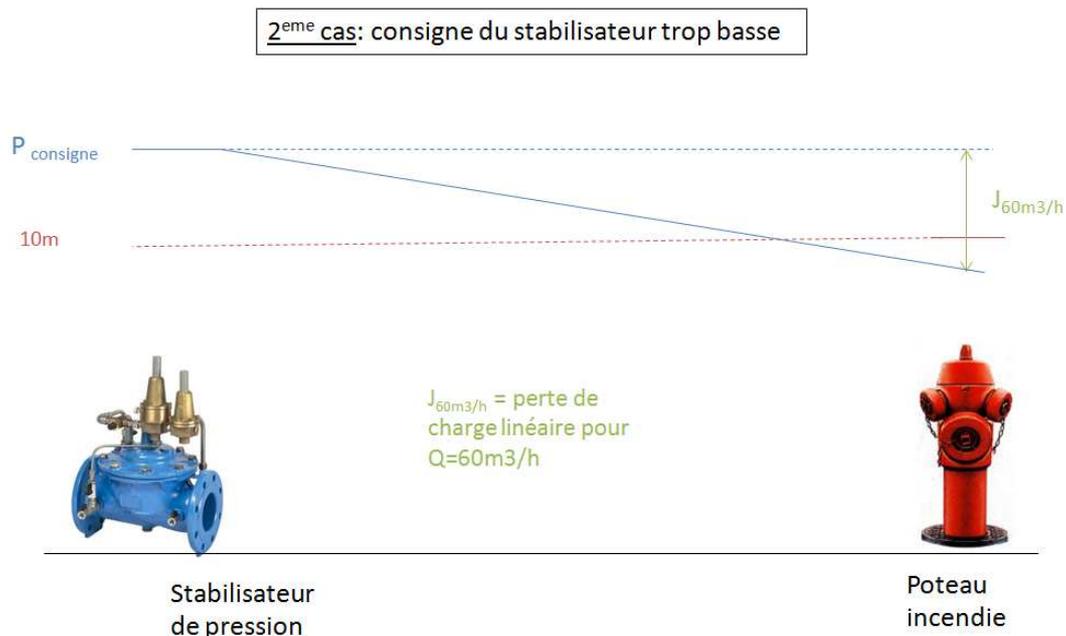


Figure 29 : Impact de la consigne du stabilisateur sur le débit incendie

VIII.3.3 Réalisation d'une installation de régulation de pression

VIII.3.3.1 Conseils d'installation

Les conseils indiqués ci-après sont largement issus du catalogue Cla-Val et d'un acte du colloque Water Loss 2012 [Grimson *et al.*, 2012]

a1) Installation

En premier lieu il est conseillé de prévoir une longueur droite de tuyau avant et après la vanne, la longueur aval étant plus importante afin de permettre au courant de se stabiliser après passage dans le régulateur.

Bien qu'elle fonctionne dans tous les sens il est conseillé pour des raisons d'entretien, d'installer la vanne de base horizontalement et chapeau vers le haut.

Une flèche située sur le corps de vanne indique le sens d'écoulement afin de ne pas monter la vanne à l'envers.

Il faut éviter au maximum l'air dans le stabilisateur. En effet ce fluide étant compressible, sa présence créera des variations de pression chaotiques et la régulation sera complètement biaisée. Il est donc très important de purger le système lors de son montage et après toute maintenance. De plus, il vaut mieux purger la conduite amont avant installation de la vanne afin d'éviter la présence de corps étranger.

a2) Montage

La vanne de régulation est de préférence installée dans une chambre de vanne, enterrée si le climat risque de faire geler les conduites. Afin de pouvoir effectuer de la maintenance, il convient de disposer une vanne de sectionnement à l'amont et à l'aval de la vanne.

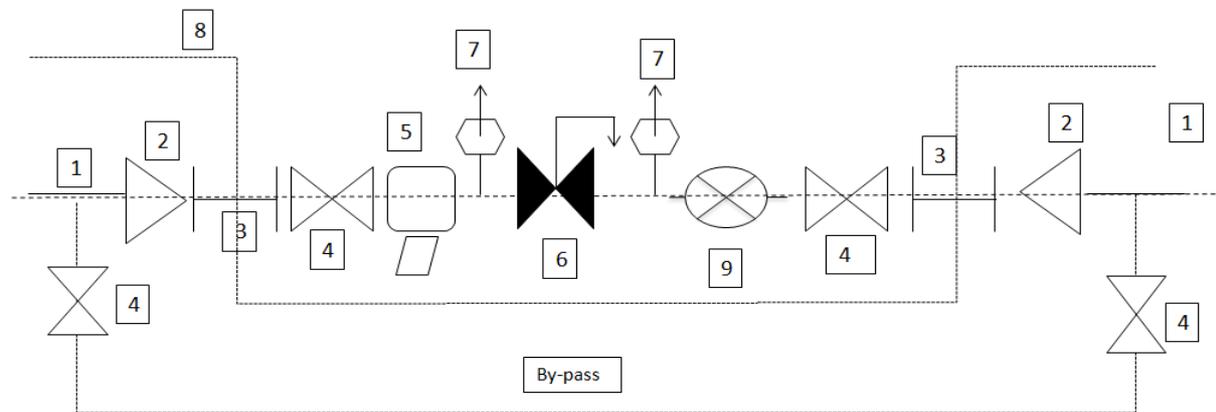
Il faut particulièrement être vigilant à l'air dans le système pilote. En effet, il constitue le point haut du système et l'air a tendance à s'y accumuler. Très peu d'études sur l'air dans les vannes ont été réalisées, cependant il semblerait qu'il soit très efficace de monter une ventouse en amont de la vanne stabilisatrice. A l'aval de la vanne, il peut être également intéressant de positionner une vanne laissant échapper l'air en cas de remplissage du tuyau, et laissant entrer l'air en cas de vidange de celui-ci. Cette vanne permet également d'évacuer l'air formé par la vanne elle-même : en effet, la vanne jouant sur la pression, c'est un phénomène qui peut arriver, tout dépend de la température. Il est particulièrement intéressant de l'installer si la chambre contient plusieurs vannes. En cas extrême il est possible d'installer une petite ventouse sur le chapeau de la vanne, mais si l'installation est bien conçue, cela n'est pas nécessaire.

Enfin, afin d'éviter la présence de corps étranger dans la vanne, un filtre est également disposé en amont. Cependant, quand l'eau est particulièrement chargée, les filtres nécessitent beaucoup de maintenance. Le plus simple, afin d'augmenter la durée du cycle de lavage des filtres est de monter en parallèle deux filtres ; de plus lorsque l'un est démonté pour être nettoyé, la vanne reste en fonction. Le mieux est de surdimensionner les filtres afin d'augmenter la surface de filtration et de monter avant et après deux manomètres afin de mesurer le colmatage.

Généralement des cônes de réduction sont nécessaires car le plus souvent, un stabilisateur bien dimensionné a un diamètre inférieur à celui de la canalisation.

Le schéma type d'installation ci-après (Figure 30) a été établi à partir de celui proposé par [Ramarojaona, 2009] complété par une purge d'air à l'amont, un débitmètre et un by-pass.

Chambre de vanne type en petit diamètre



Légende :

- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1- Conduite du réseau | 5-Boîte à boue |
| 2-Cône | 6-Stabilisateur de pression |
| 3-Manchette d'ancrage | 7-Ventouse |
| 4-Robinet vanne papillon | 8-Chambre de régulation |
| | 9-Compteur |

Figure 30 : Schéma d'installation d'une vanne de régulation

VIII.3.3.2 Maintenance

Les trois tableaux suivants (Tableau 16, Tableau 17, Tableau 18) récapitulent les maintenances à effectuer sur les vannes à pilote hydraulique ainsi que les fréquences d'entretien. Ils sont tirés des notices Bayard.

Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d'une zone de desserte d'un réseau AEP

PERIODE	FREQUENCE	OPERATIONS	MODE OPERATOIRE	COMMENTAIRES
Période de démarrage (1 ^{ère} année)	Après la mise en service, puis tous les trois mois	Contrôle et nettoyage du filtre principal	Se rapporter à la notice du filtre utilisé	Le nettoyage suppose généralement un arrêt d'eau
		Contrôle et nettoyage filtre circuit pilote	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné	Cette phase permet d'ajuster, pour la suite de l'exploitation, la fréquence de cette opération essentielle
Période de marche normale (années suivantes)	Au minimum 1 fois / an et après chaque remise en service suite à une coupure d'eau	Contrôle et nettoyage du filtre principal	Se rapporter à la notice du filtre utilisé	Le nettoyage suppose généralement un arrêt d'eau
		Contrôle et nettoyage filtre circuit pilote	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné	
		Contrôle visuel du circuit pilote (absence de fuites)		En cas de fuite, même minime, procéder à la réparation
		Purge du circuit pilote et de la chambre supérieure	Purger la chambre supérieure par le purgeur situé sur l'indicateur de position, ainsi que les pilotes qui disposent d'un purgeur	Attention : Refermer le purgeur dès qu'il ne sort plus d'air
		Nettoyage simplifié du ralentisseur	Créer, si possible, un appel de débit à l'aval. Desserrer le ralentisseur –sens inverse horloge- en comptant le nombre de tours. Resserrer en revenant à la position initiale	Cette opération s'effectue sans arrêt de la régulation
		Vérification du bon fonctionnement de la vanne de base	Fermer le robinet aval du circuit pilote et vérifier que la vanne de base commence à se fermer Fermer le robinet d'isolement de chambre et ouvrir le purgeur de la vanne. Vérifier que la vanne s'ouvre	Cette opération peut s'effectuer sans arrêt de la régulation Cette opération transfère la pression à l'aval. Il est conseillé d'ouvrir un poteau ou une vidange à proximité pour amortir le phénomène
Vérification du bon fonctionnement de la régulation (Hydrostab aval, Hydrolimiteur de débit...)	Augmenter le débit appelé, en ouvrant une vidange ou un poteau d'incendie. Vérifier que la pression aval reste constante ou que le débit ne dépasse pas la valeur de consigne			

Tableau 16: Entretien annuel d'une vanne de régulation

PERIODE	FREQUENCE	OPERATIONS	MODE OPERATOIRE	COMMENTAIRES
Période de marche normale	1 fois tous les 3 à 4 ans, en fonction du type de régulation et des conditions de service	Vérification du siège de la vanne de base	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage de l'équipage mobile	Le siège ne doit pas présenter de rayures (érosion), ni de défaut de planéité (abrasion)
		Vérification de la membrane de la vanne de base	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage de l'équipage mobile	La membrane ne doit pas être percée, présenter de craquelures ni de zones dures
		Vérification du clapet de la vanne de base	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage de l'équipage mobile	Le clapet ne doit pas présenter de défaut pouvant empêcher la fermeture étanche
		Vérification de la tige principale de la vanne de base	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage de l'équipage mobile	La tige ne doit pas présenter de rayure ni d'entartrage. Nettoyer si nécessaire
		Nettoyage du ralentisseur	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage du ralentisseur Nettoyer à l'eau ou à l'air comprimé	Cette opération peut s'effectuer sans coupure de la distribution
		Vérification de la membrane du pilote	Isoler le circuit pilote en fermant les vannes du circuit et démonter le pilote	La membrane ne doit pas être percée, présenter de craquelures ni de zones dures
		Vérification du clapet du pilote	Isoler le circuit pilote en fermant les vannes du circuit et démonter le pilote	Le clapet ne doit pas présenter de défaut pouvant empêcher la fermeture étanche
		Vérification du circuit pilote	Isoler le circuit pilote en fermant les vannes du circuit Démonter les raccords et vérifier l'état des filetages et des portées d'étanchéité	Attention : le démontage des éléments du circuit pilote peut entraîner des défauts d'étanchéité. Remonter les raccords en utilisant de la Loctite faible 542 sur les filets extérieurs et intérieurs

Tableau 17: Entretien quadriennal d'une vanne de régulation

PERIODE	FREQUENCE	OPERATIONS	MODE OPERATOIRE	COMMENTAIRES
Période de marche normale	Entre 4 et 8 ans	Changement du clapet de la vanne de base	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage de l'équipage mobile	Il est conseillé, lors du changement du clapet, de procéder au changement de la membrane et des joints toriques de tige (kit d'entretien)
	Entre 4 et 8 ans	Changement de la membrane de la vanne de base	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage de l'équipage mobile	Il est conseillé, lors du changement de la membrane, de procéder au changement du clapet et des joints toriques de tige (kit d'entretien)
	Entre 7 et 10 ans	Changement du siège de la vanne de base	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage du siège	
		Changement de l'équipage mobile de la vanne de base	Se rapporter à la notice W 04 003 ou à la notice de l'appareil concerné pour le démontage de l'équipage mobile	En cas de fonctionnement en zone de cavitation, remplacer l'équipage mobile standard par un équipage mobile anti-cavitation
	Tous les cinq ans	Changement du clapet du pilote	Isoler le circuit pilote Démonter le pilote	Il est conseillé, lors du changement du clapet, de procéder au changement de la membrane et des joints toriques de tige (kit d'entretien)
	Tous les cinq ans	Changement de la membrane du pilote	Isoler le circuit pilote Démonter le pilote	Il est conseillé, lors du changement du clapet, de procéder au changement de la membrane et des joints toriques de tige (kit d'entretien)
	Tous les dix ans	Changement du pilote complet	Isoler le circuit pilote Démonter le pilote	Lors du changement de pilote, il est conseillé de procéder à la vérification ou au changement du kit tubes et raccords du circuit
	Entre 5 et 10 ans	Changement du circuit pilote	Isoler le circuit pilote en fermant les vannes du circuit Démonter les raccords et vérifier l'état des filetages et des portées d'étanchéité	Attention : le démontage des éléments du circuit pilote peut entraîner des défauts d'étanchéité Remonter les raccords en utilisant de la Loctite faible 542 sur les filets extérieurs et intérieurs

Tableau 18:Entretien décennal d'une vanne de régulation

VIII.4 La modulation de pression

VIII.4.1 Principe de la modulation de pression

La modulation de pression est une solution qui permet d'adapter la pression aux variations de pertes de charge dans le réseau [Sandraz, 2012].

En effet, la pression en un point du réseau est égale à la pression statique moins les pertes de charge générées par le réseau :

$$P = P_{\text{statique}} - J$$

Or les pertes de charge augmentent avec le débit, ainsi la pression varie de façon inverse à la demande.

Lorsque la demande est maximale (en général, le jour), les pertes de charge sont élevées et la pression chez l'utilisateur est minimale, quand la demande est minimale (en général la nuit), les pertes de charges sont faibles et les pressions plus importantes. La modulation de pression a donc pour objectif d'ajuster la pression aux variations de pertes de charge.

En pratique, pour mettre en œuvre une modulation de pression, on s'intéresse aux conditions de pression d'un point critique du réseau, c'est-à-dire un des points où les pressions en pointe sont les plus faibles (Lorsque qu'un tel point ne concerne qu'une sous partie du réseau nous avons choisi de le nommer « point limitant » de la zone). Ensuite la pression de consigne du stabilisateur de pression est ajustée pour que la pression au point critique reste proche du minimum requis pour assurer la qualité du service.

La modulation de pression est d'autant plus efficace que les variations journalières de pression au point critique sont importantes. C'est le cas notamment pour des réseaux qui ne sont pas surdimensionnés et pour lesquels les variations de la demande sont importantes.

Les diagrammes suivants (Figure 31, Figure 32, Figure 33, Figure 34) sont issus de [Trow and Payne, 2009]

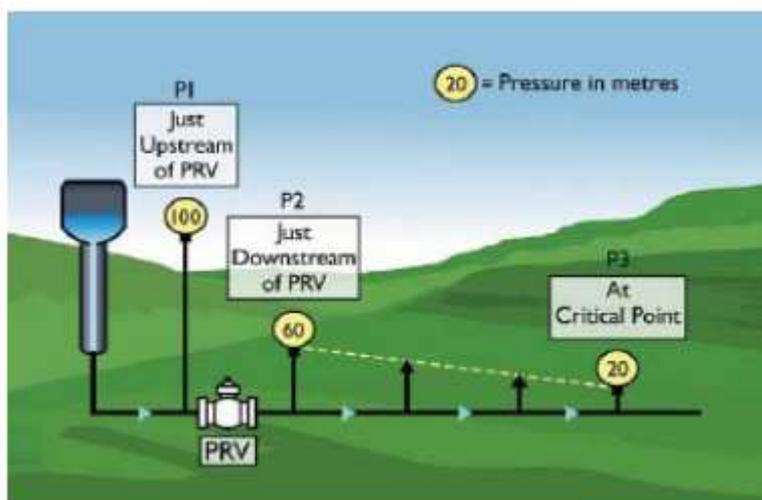


Figure 31 : Pressions en période de pointe

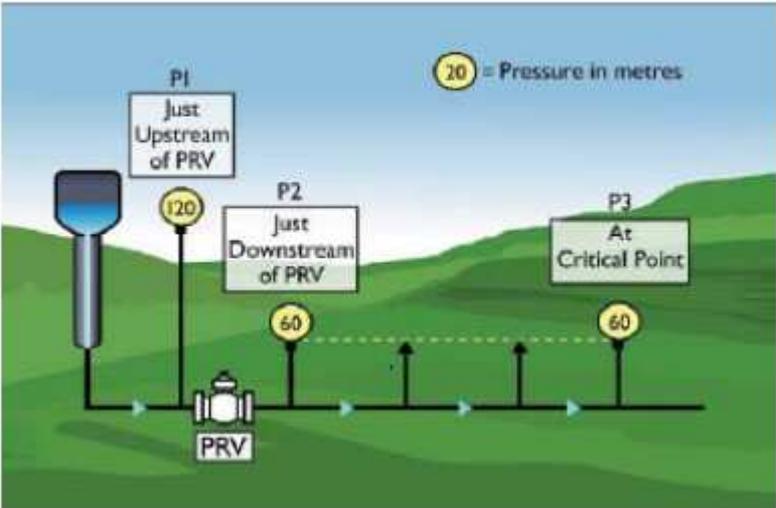


Figure 32 : Pressions de nuit

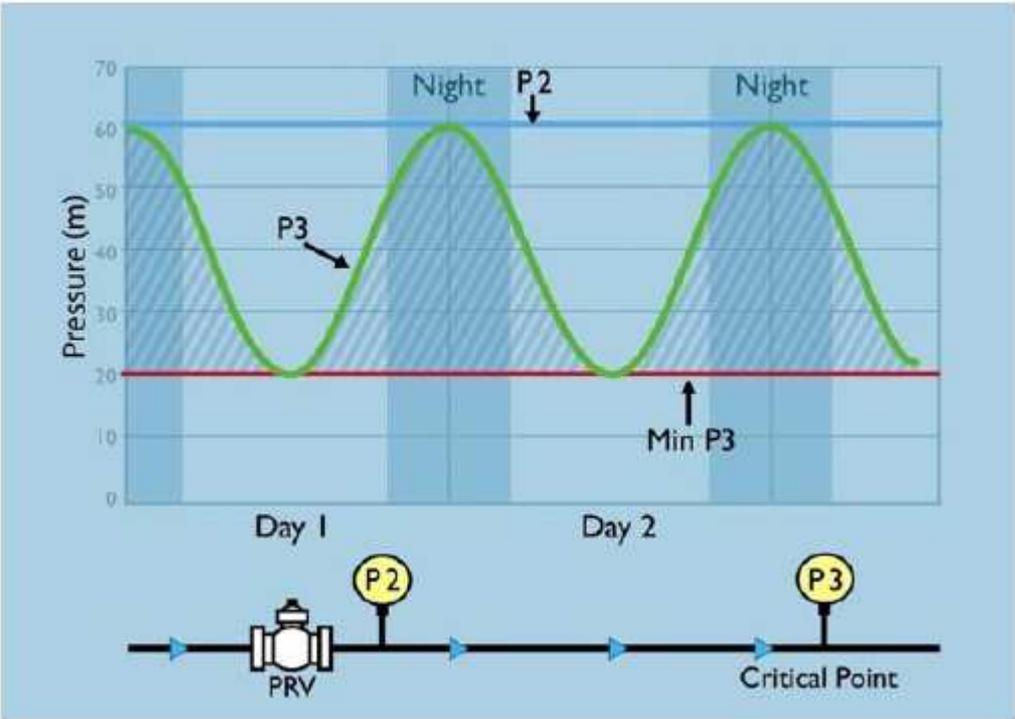


Figure 33 : Stabilisateur avec consigne fixe

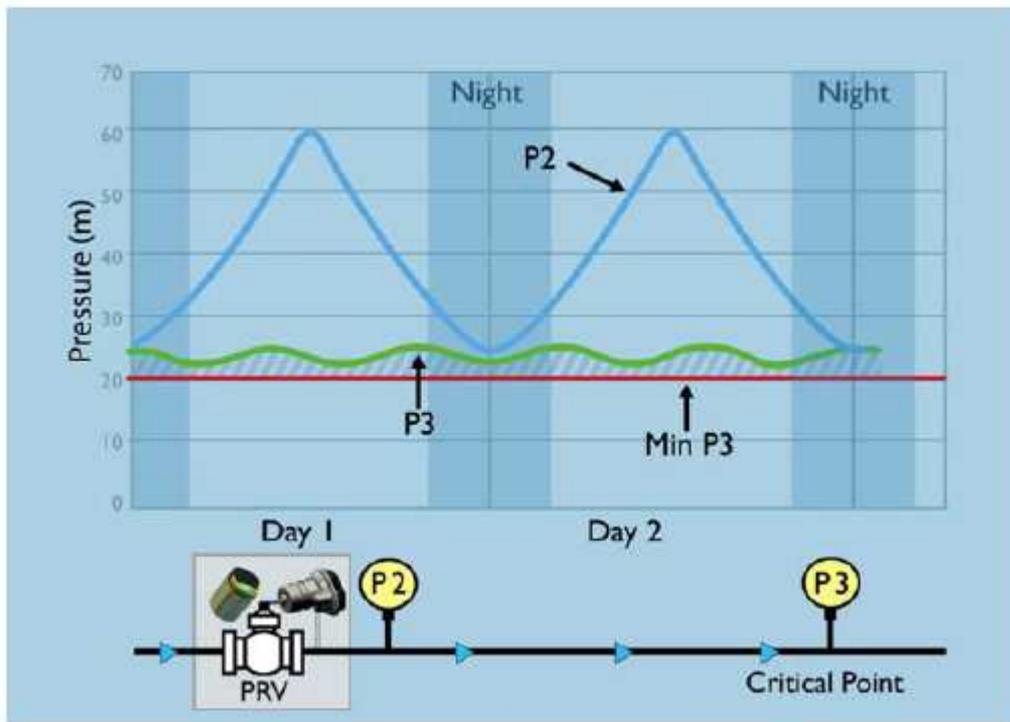


Figure 34 : Stabilisateur avec consigne modulée

VIII.4.2 Technologies de la modulation de pression

Les vannes de modulation de pression sont des stabilisateurs de pression aval à régulation hydraulique auxquels on rajoute une commande.

L'asservissement de la commande peut être de trois types :

- Asservissement horaire commandé par une horloge (souvent une consigne de jour et une consigne de nuit) ;
- Asservissement au débit, la consigne est corrigée en fonction du débit mesuré au niveau de stabilisateur ;
- Asservissement à la pression mesurée en un point du réseau (souvent un point critique).

Plusieurs technologies permettent de moduler la consigne de la vanne de régulation en fonction de la commande. Les principales familles sont :

1. La commande électronique par action sur la tension du ressort du pilote (Figure 35) ;
2. La commande par électrovannes de pilotes multiples (Figure 36) ;
3. La commande hydraulique par compensateur (Figure 37).

Les illustrations des types de commande sont issues de la documentation fournie par Bayard.



Figure 35 : Modulation par action sur la tension du ressort

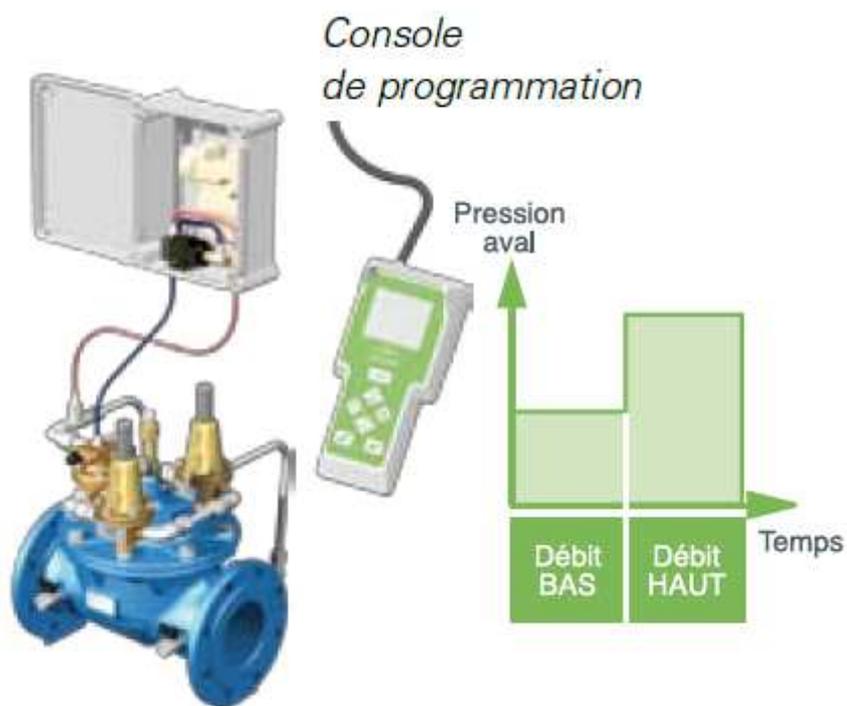


Figure 36 : Modulation par électrovanne et double pilote

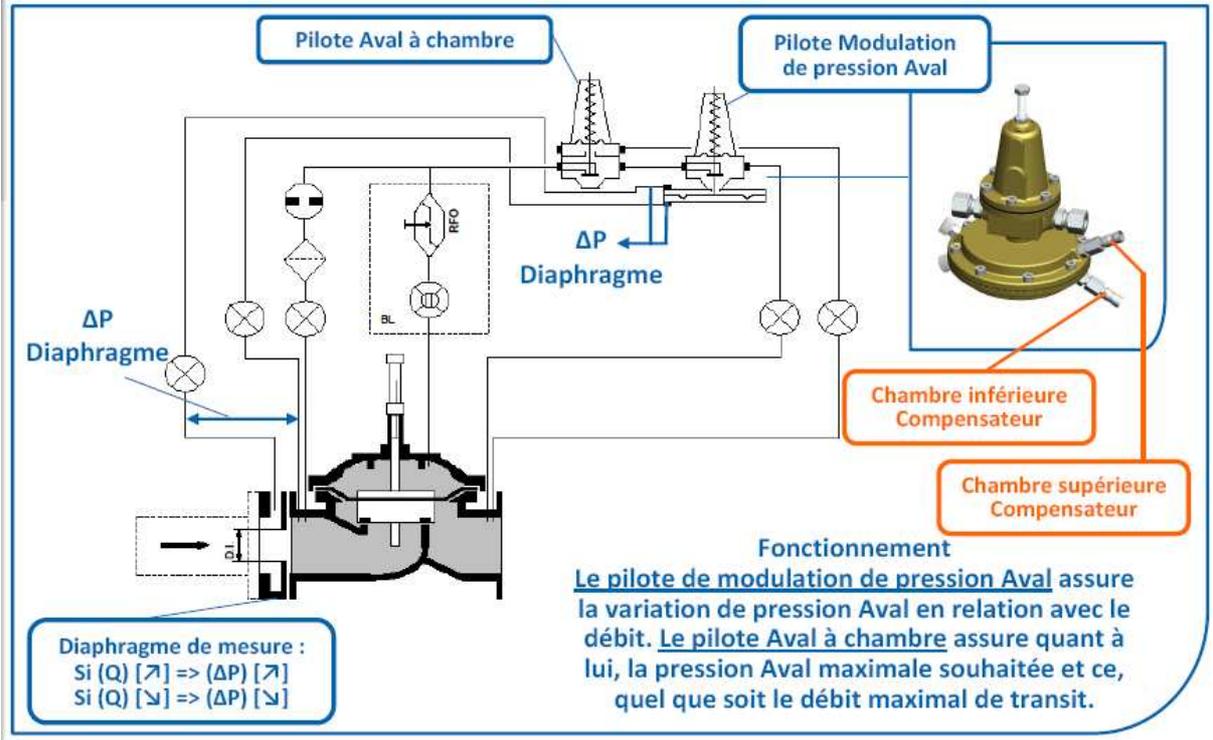


Figure 37 : Modulation hydraulique par compensateur

IX Annexe 2 : Exemple d'étude de cas , Secteur S3

IX.1 Diagnostic du secteur

IX.1.1 Description du secteur

Ce secteur est situé dans la partie Est due T1, et comprend trois sous-secteurs B. C. et P. qui ont été regroupés lors de la sectorisation [Le Glatin, 2010] pour pallier aux erreurs de comptage constatées.

Ce secteur est délimité par des vannes fermées, et des compteurs. Il est alimenté via le réservoir de C.lui-même alimenté par une pompe reliée au Feeder Est.

Il comporte 219 nœuds de consommation, pour une longueur totale de réseau de 18 464m. La demande moyenne journalière s'établit à 907 m³.

Au centre de ce secteur se trouve le secteur de Ch., non pris en compte dans l'étude de cas (Figure 41 : Schéma du secteur BCP).

IX.1.1.1 Vannes

Elles sont au nombre de 8:

VAN_0630Valv : fermée, délimite C./Ch.

VAN_125 : fermée, délimite C./Ch.

VAN_507964 : fermée délimite C., et le piquage alimentant le réservoir sur Feeder Est

VAN_143 : fermée, délimite B. et Ch.

VAN_507965 : fermée, délimite C. et Ch.

TVA_C. : permet d'isoler le réservoir, en coupant son alimentation

VAN_115 : fermée, délimite C./Ch.

VAN_81 : fermée, délimite P. et Ch.

IX.1.1.2 Stabilisateurs

Au nombre de 2 :

REG_89 : pression de consigne 30 m, se trouve sur B..

Ce stabilisateur est modélisé comme un stabilisateur amont, car le nœud de contrôle se trouve en amont de l'ouvrage. Cependant après analyse des résultats fournis par le modèle, on se rend compte que l'appareil est représenté à contre-courant. Si l'on garde le même nœud de contrôle et que l'on rectifie le sens de montage, il s'agit alors d'un stabilisateur aval.

REG_503643 : Stabilisateur de pression aval réglé à une pression de consigne de 35 m, régule l'entrée de P..

IX.1.1.3 Compteurs

Ils sont au nombre de 3

CPT_105 : mesure de débit d'entrée dans le secteur Ch.

CPT-DIS_C._E.-C. : Mesure ce qui sort du réservoir de C.

CPT_503641 : limite C./P., mesure ce qui entre sur P.

IX.1.1.4 Réservoir

Le radier du réservoir est à une altitude de 407,16m, c'est une cuve cylindrique de diamètre 11.60m avec un trop plein situé à 8.60. Aucune courbe d'asservissement de la charge n'a été entrée, cependant le niveau d' 'eau en début de simulation est 2.52m .Il est alimenté par la pompe SRP_E..

La courbe suivante (Figure 38) représente l'évolution du niveau d'eau dans le réservoir sur 24h, le marnage du réservoir est de 5.25m :

Niveau d'eau Réservoir C

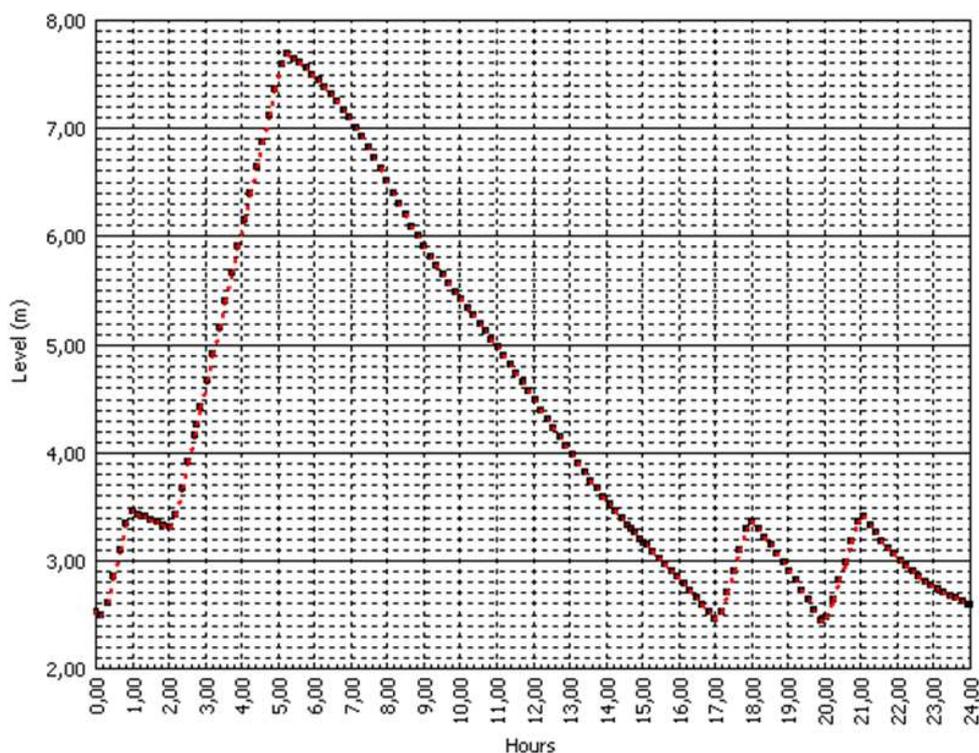


Figure 38 : Niveau d'eau dans le réservoir de C.

IX.1.1.5 Pompe de remplissage de la bêche

Cette pompe (SRP_E.) alimente le réservoir de C..

Ces caractéristiques sont :

- Vitesse nominale : En marche = 1800 rpm, A l'arrêt = 0 rpm
- Pas de données de calage
- Caractéristique de pompe : SRP_P_GR1_provisoire (Figure 39)

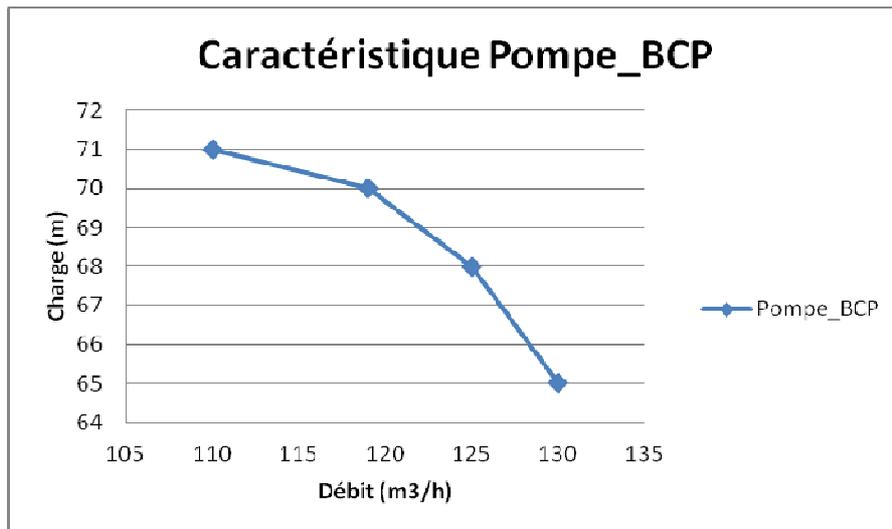


Figure 39 : Caractéristique de la pompe SRP P. GR1 provisoire

Elle est asservie sur le niveau d'eau dans le réservoir avec deux courbes de fonctionnement: (Figure 40)

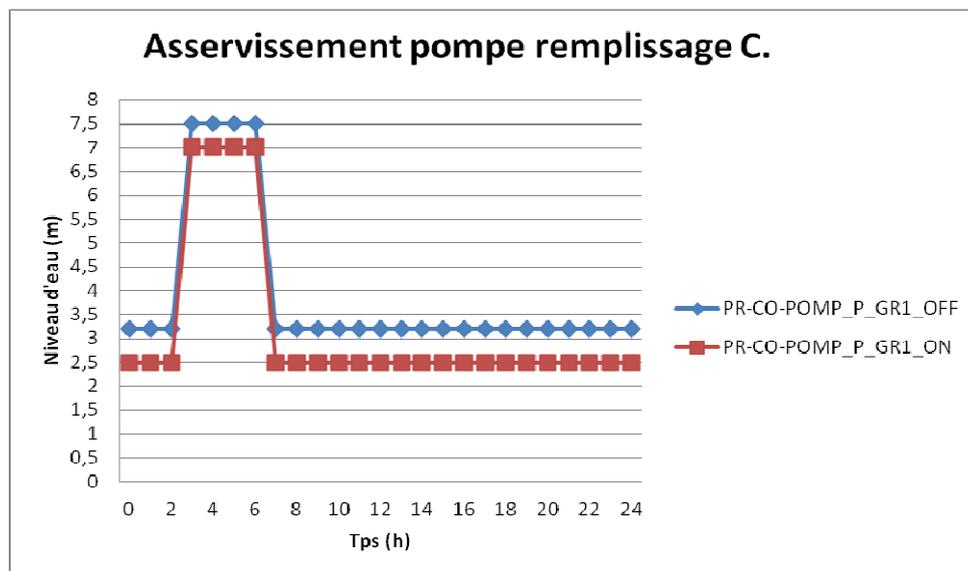


Figure 40 : Courbe d'asservissement de la pompe SRP P. GR1 provisoire

Cet asservissement permet au niveau de réservoir de rester constamment entre deux niveaux d'eau, et de se remplir la nuit.

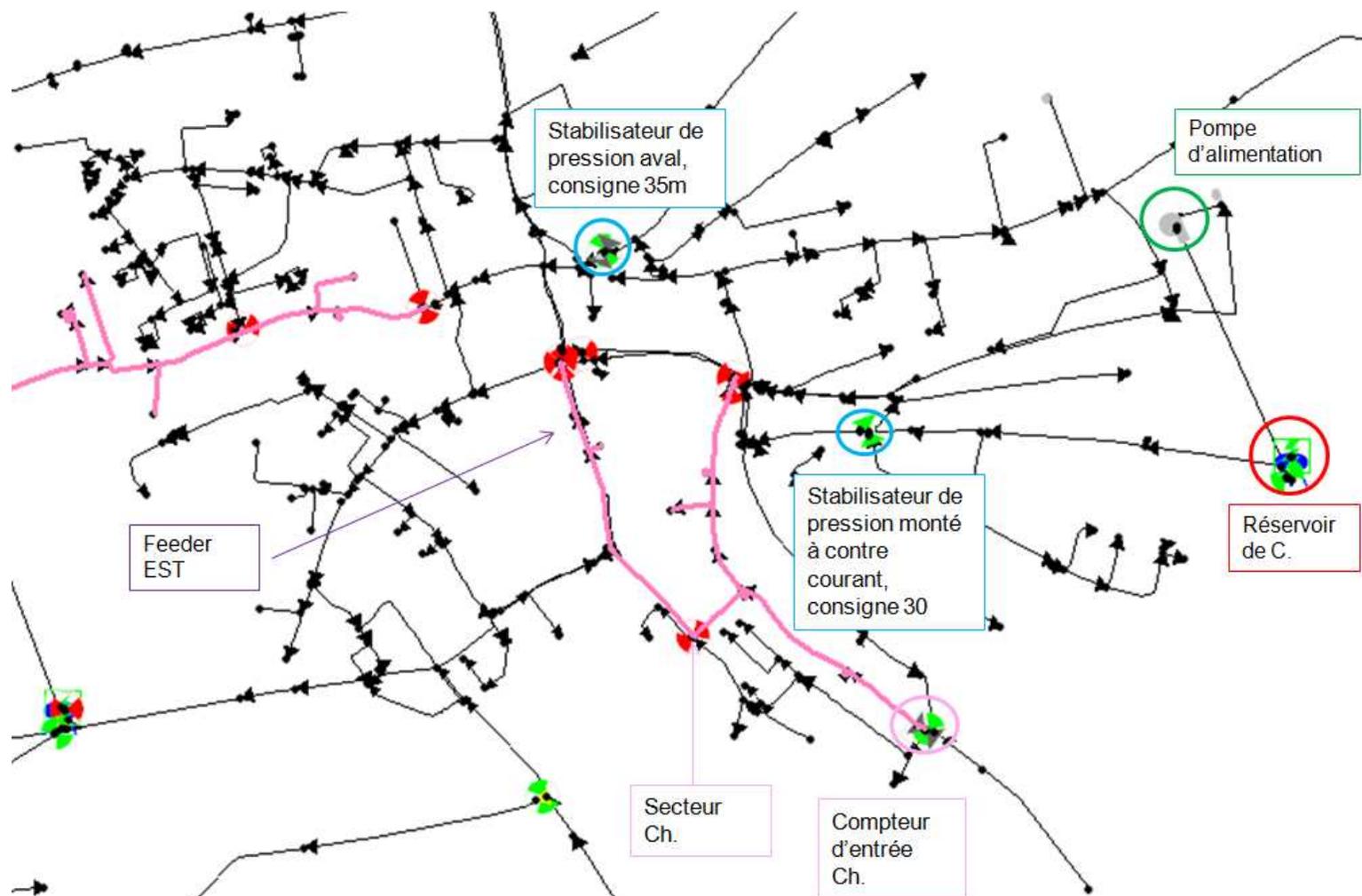


Figure 41 : Schéma du secteur BCP

IX.1.2 Modèle hydraulique

IX.1.2.1 Modèle complet

Le modèle hydraulique est le modèle Est. Lorsque l'on effectue une simulation, 10 messages d'erreurs apparaissent.

2 nous signalent que deux courbes de références ont été entrées, mais n'ont pas été assignées à un équipement du modèle : co-ve_co. et co-vh_four..

8 nous signalent que des nœuds du modèle sont isolés, ou plutôt que l'intégralité du modèle n'est pas interconnecté. La liste est la suivante :SEL-0018-PRIV, SEL-0019-PRIV, VIE-0005-PRIV, MA375, MA484, MA786, MA787, MA1863.

Les 4 premiers et le dernier de la liste correspondent à une partie du réseau privé, qui est juste répertoriée sur la carte, mais n'interagit pas avec le reste du modèle.

MA484 MA786 MA787 appartiennent à une partie du réseau qui a été déconnectée par le modélisateur avec la mention : A relever.

Ces anomalies ne perturbant pas les calculs, nous proposons de garder le modèle tel quel ainsi que la date de simulation qui est le 23/12/2009.

Sur le secteur étudié, deux nœuds sont déconnectés du reste du réseau MA1259 et PI_ETU_75. Comme les autres nœuds déconnectés, il s'agit de résidus de l'import depuis un SIG.

D'autre part, le sens du stabilisateur REG_89 est en sens inverse de circulation de l'eau, on inverse donc le sens de ce stabilisateur en gardant ses caractéristiques.

IX.1.2.2 Consommation

La demande totale du secteur est 907 m³/j. Tous les nœuds de consommation ont le profil DOMESTIQUE (Figure 42).

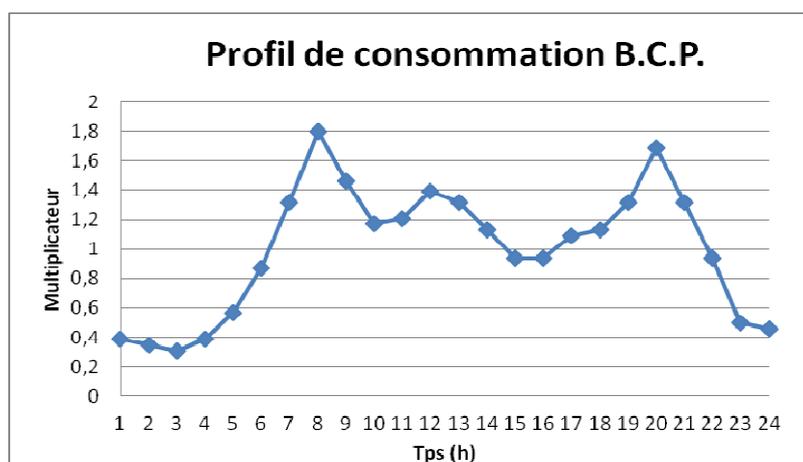


Figure 42 : Profil de consommation DOMESTIQUE

La plupart des consommateurs ont un débit de base de l'ordre du 100e voir du 1000e de m³/h cependant 4 consommateurs se distinguent par une consommation plus importante (Tableau 19).

Nœuds	Demande de base m ³ /h
MA1032	-9,568
ETU-0058-COPR	-9,550
ETU-0048-COPR	-4,307
ETU-0040-COPR	-4,307

Tableau 19 : Demande des consommateurs les plus importants du secteur B. C. P.

IX.1.3 Altitudes

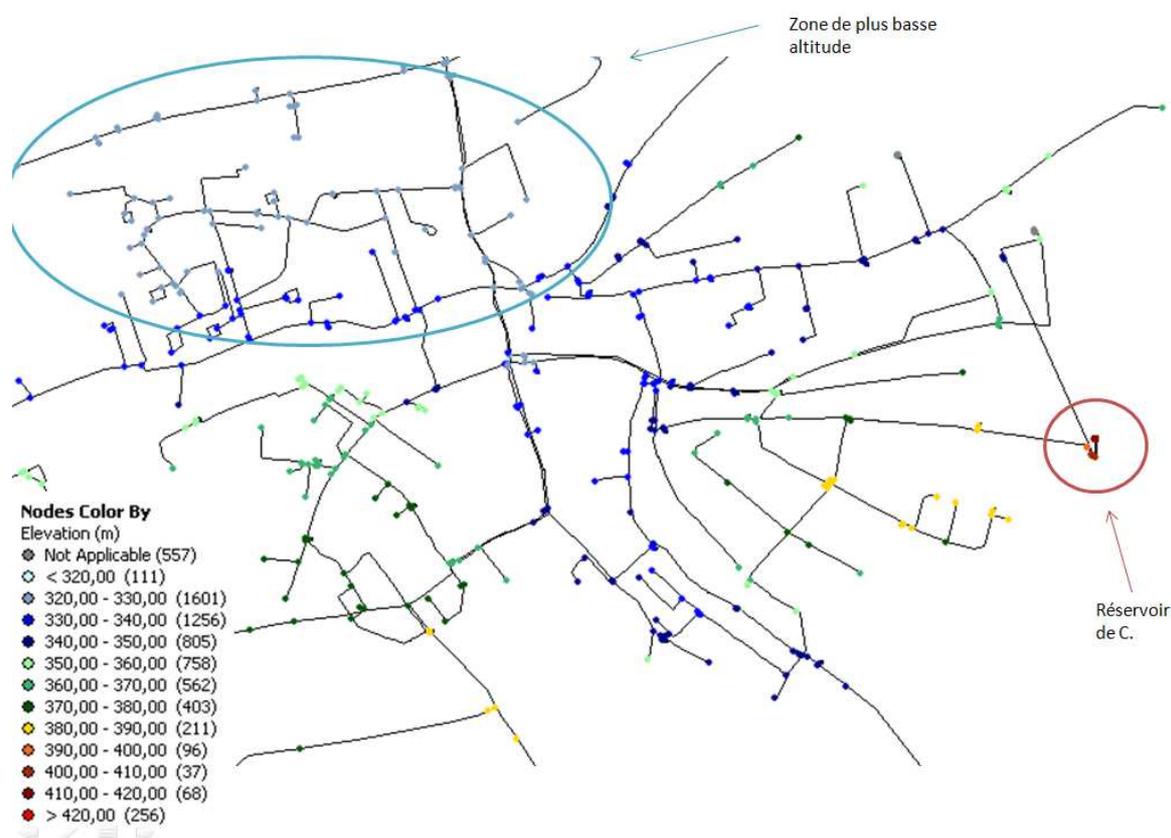


Figure 43 : Altitude du secteur B. C. P.

L'altitude moyenne du secteur est 349.65m, la plus haute altitude correspond au réservoir qui culmine à 407.15m et la plus basse se situe à 324 m (Figure 43).

IX.1.4 Répartition des débits

Comme le montre l'évolution du niveau d'eau dans le réservoir (Figure 38), le secteur subit principalement deux régimes hydrauliques liés au remplissage et la vidange de ce dernier.

Les deux pics de consommations à 8h et 20h peuvent aussi avoir de l'influence sur la répartition des débits, notamment étant donné la présence de consommateurs plus importants que les autres.

Les deux cartes situées ci-après (Figure 44, Figure 45) permettent de visualiser la répartition des débits et l'ordre de grandeur de ceux-ci.

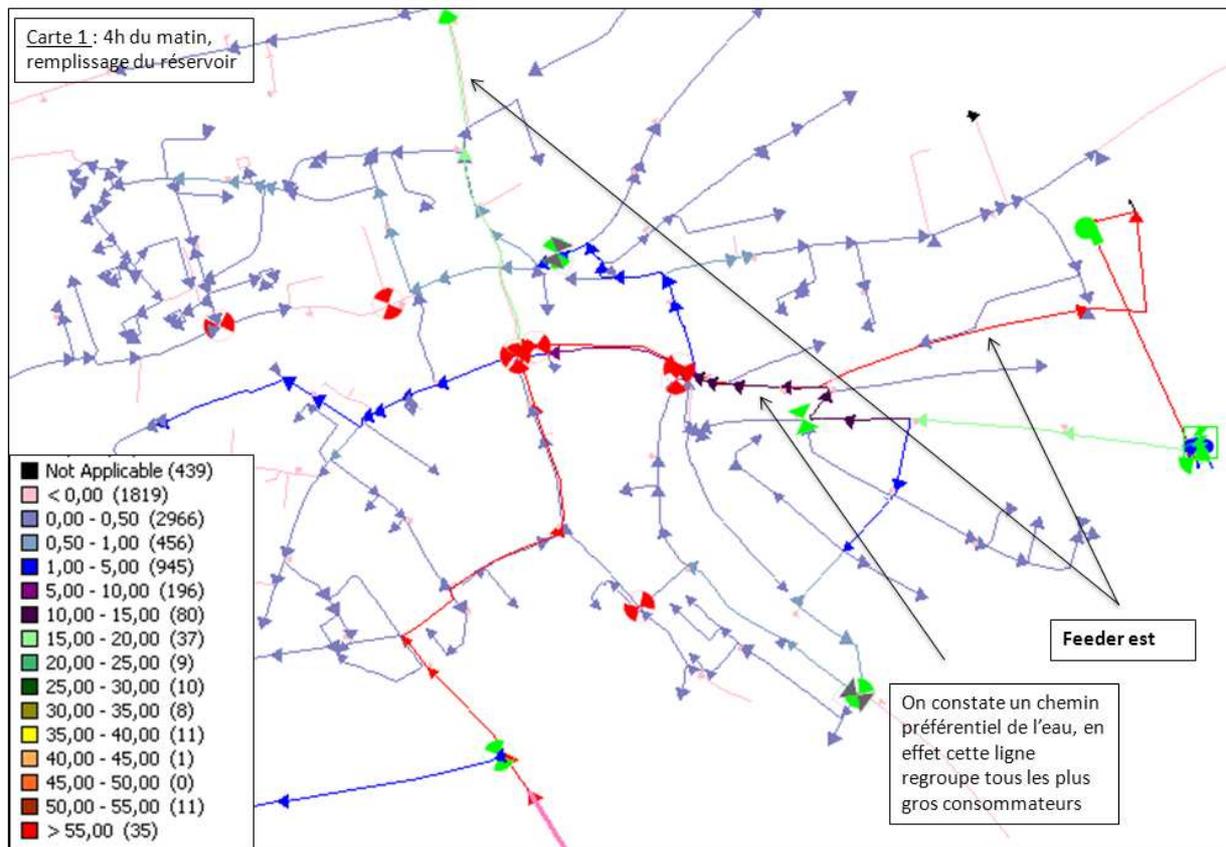


Figure 44 : Cartes des débits à 4h du matin – B. C. P.

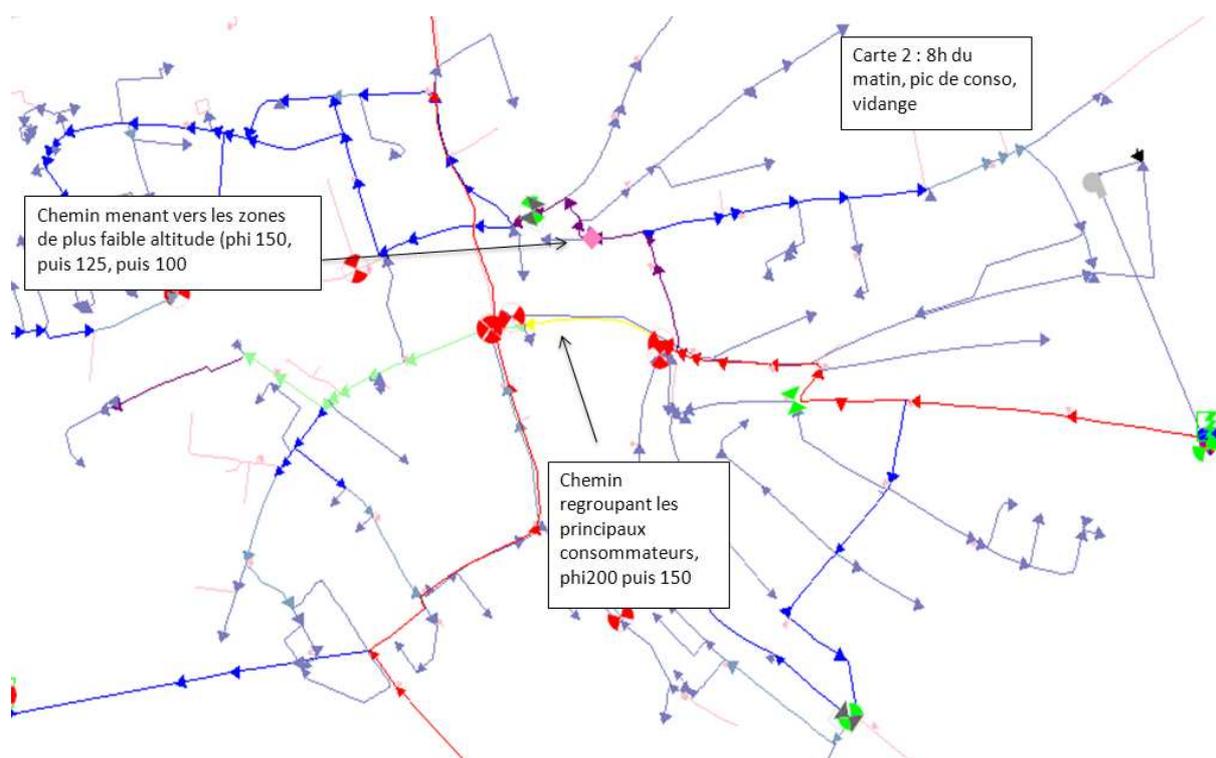


Figure 45 : Cartes des débits à 8h – B.C . P.

IX.1.5 Profils de charge

Pour mieux cerner le fonctionnement du secteur, il semble intéressant de tracer deux profils.

Le premier, part du réservoir et suit un tracé où sont présents les plus gros consommateurs de ce secteur (Figure 46)

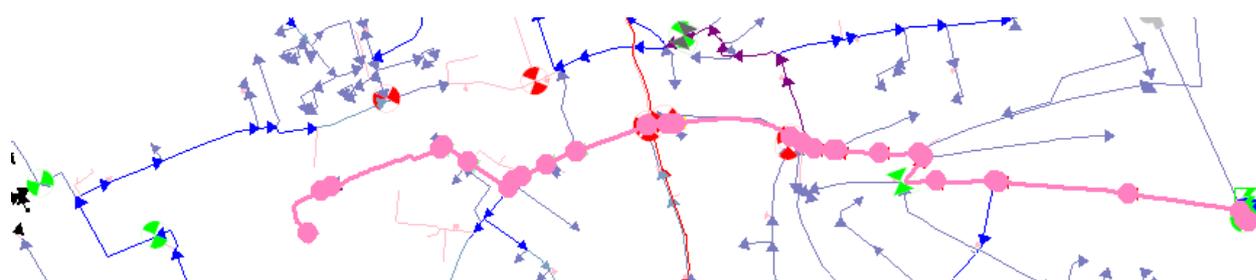


Figure 46 : Schéma du profil de charge n°1

Le second, part du réservoir et rejoint le point le plus bas du secteur (Figure 47)

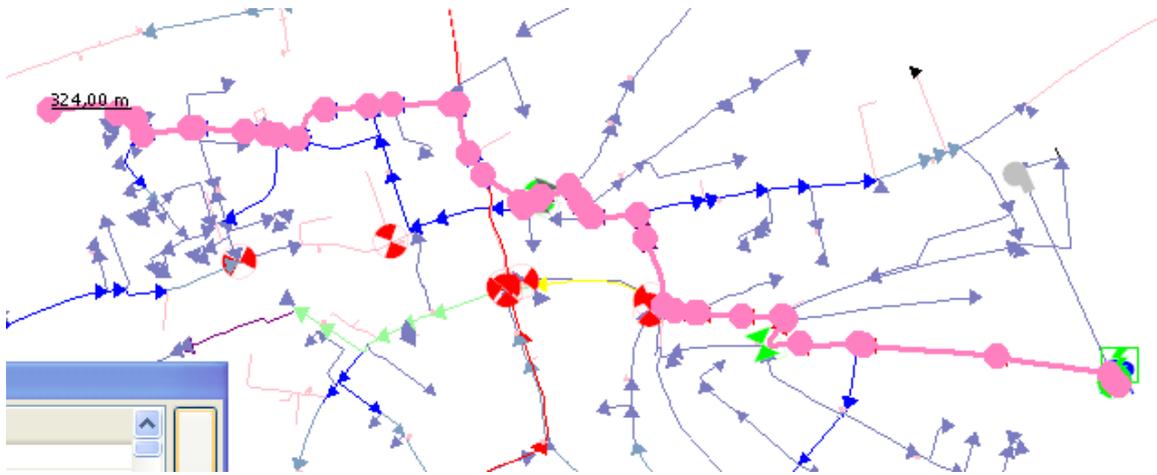


Figure 47 : Schéma du profil de charge n2

On trace ces deux profils de charge à l'heure de pointe, afin d'évaluer l'amplitude maximum des pertes de charge (Figure 49, Figure 48).

Profil en long gros consommateurs n°1

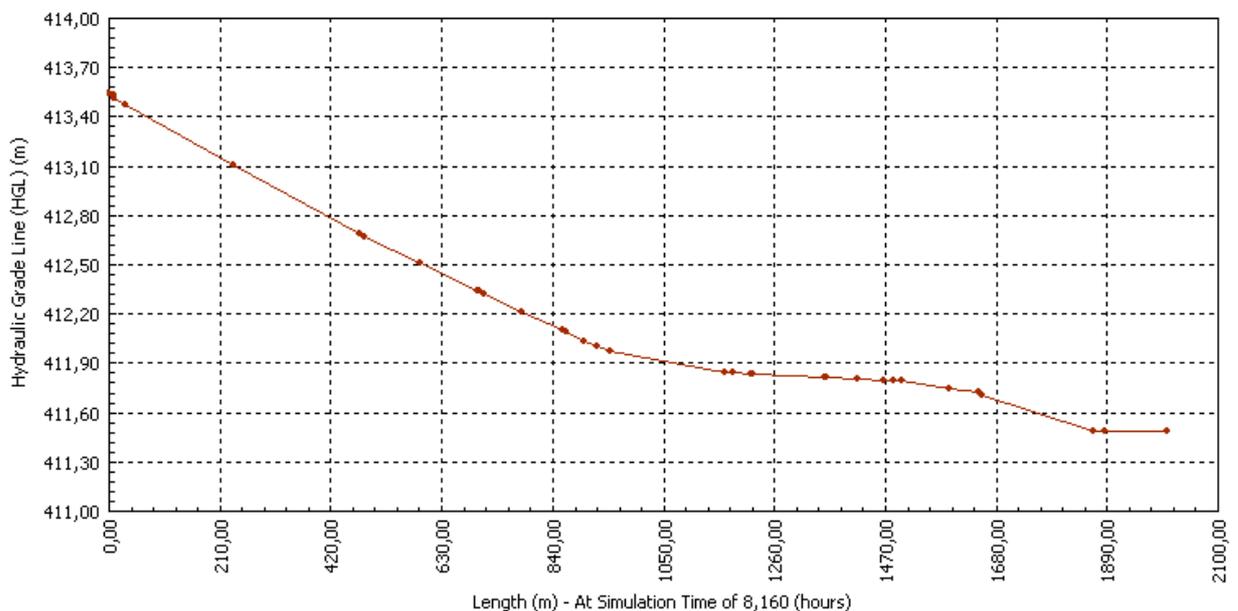


Figure 48 : Pertes de charge le long du profil n°1

On voit que l'on perd très peu de charge le long du profil N°1 qui pourtant regroupe les consommateurs les plus importants.

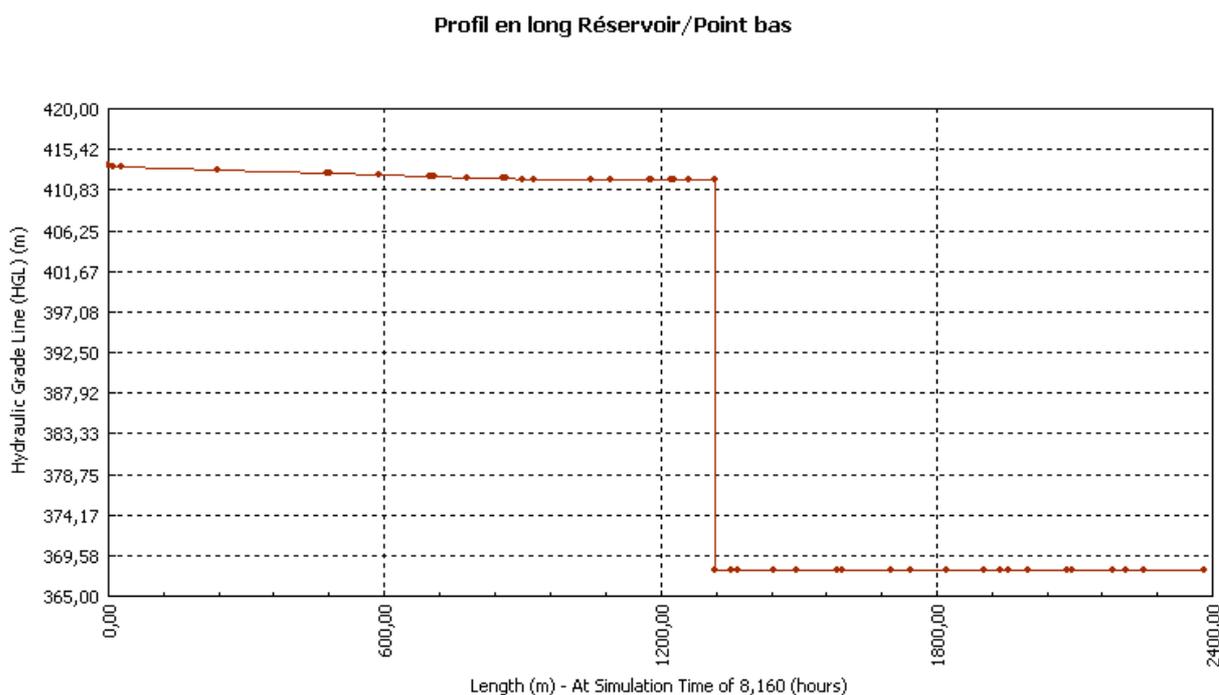


Figure 49 : Pertes de charge le long du profil n°2

Ici encore, le long du Profil 'n°2, hormis la brusque perte de charges due à la présence d'un stabilisateur de pression aval, les pertes de charges dans le réseau restent faibles.

IX.1.6 Etude des pressions

IX.1.6.1 Répartition des pressions

Sur le secteur étudié, la pression moyenne pondérée par la consommation est égale à 64.49 mce.

Parmi les nœuds du secteur la pression moyenne journalière minimale rencontrée est 4.25 mce (il s'agit d'un nœud sans consommateur) et la maximale s'élève à 80.77 mce. En ce qui concerne la variation temporelle des pressions, le ΔP minimal est 0,003 mce et le maximal est 6,781 mce.

Le point critique du secteur à une pression minimale de 17,52 mce, ce qui signifie qu'on ne peut faire une réduction généralisée ou une modulation généralisée sur ce secteur.

Ce constat est renforcé par la présence au préalable de deux stabilisateurs de pression, qui suggèrent plutôt une régulation locale de pression.

Les courbes de répartition suivantes montrent la répartition spatiale des pressions (Figure 50), puis la répartition des écarts temporels de pression (Figure 51).

Tandis qu'une partie du secteur à des ΔP très faibles, une autre en a quant à elle, de plus élevés, de l'ordre de 6 mce. Il y a 153 nœuds de consommations dont le ΔP dépasse les 5 mce. Toutefois, l'analyse de la situation montre que ces variations sont essentiellement dues au marnage du réservoir et non aux pertes de charge dans le réseau.

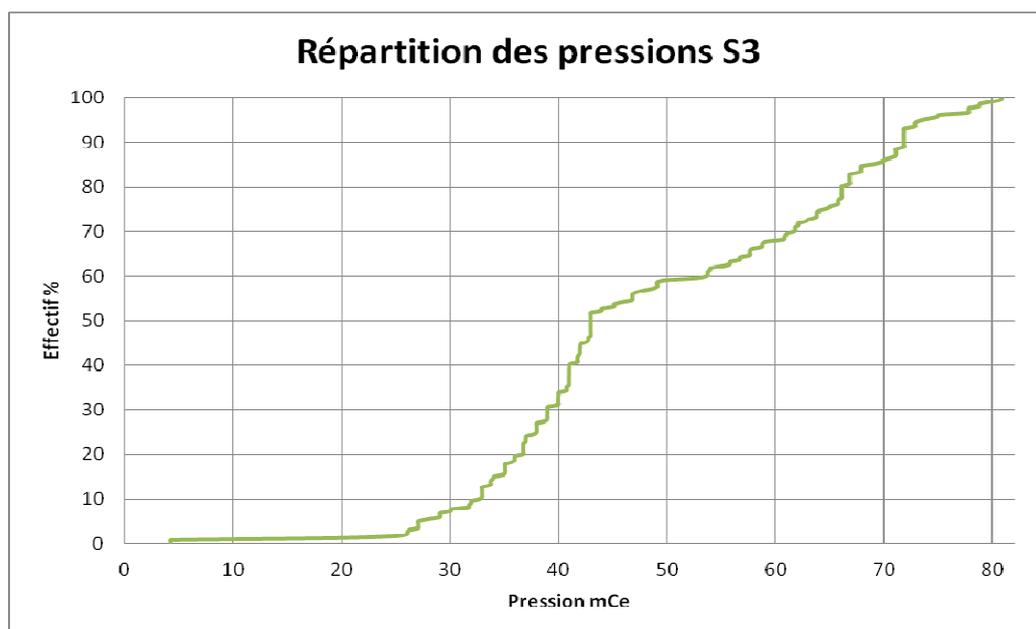


Figure 50 : Répartition des Pressions – B. C. P.

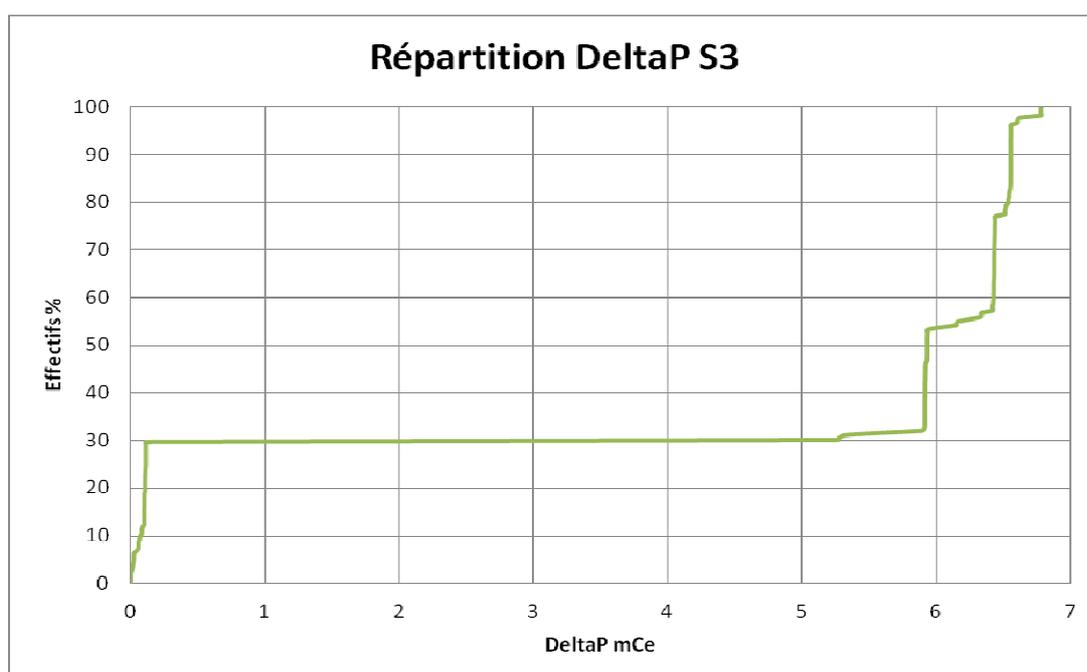


Figure 51 : Répartition des écarts temporels de pression – B. C. P.

Une analyse visuelle de la répartition spatiale des pressions permet d'identifier 4 zones de pressions (Figure 52).

IX.1.6.2 Stabilisateurs de pression existants

Dans la mesure où deux stabilisateurs se trouvent déjà sur la zone, la première action possible est d'abaisser leur consigne de fonctionnement.

L'analyse de leurs zones d'influence permet de déterminer les points limitants qui leur sont associés.

Pour REG_89: la pression minimale du point limitant est 29 mce ce qui permet une réduction locale de 9 mce, donc une consigne de pression du stabilisateur de pression aval de 21 mce (30 - 9).

REG_503643 : la pression minimale du point limitant est 28 mce, ce qui permet une réduction locale de 8 mce, d'où une consigne de stabilisateur de 27 mce (35 – 8).

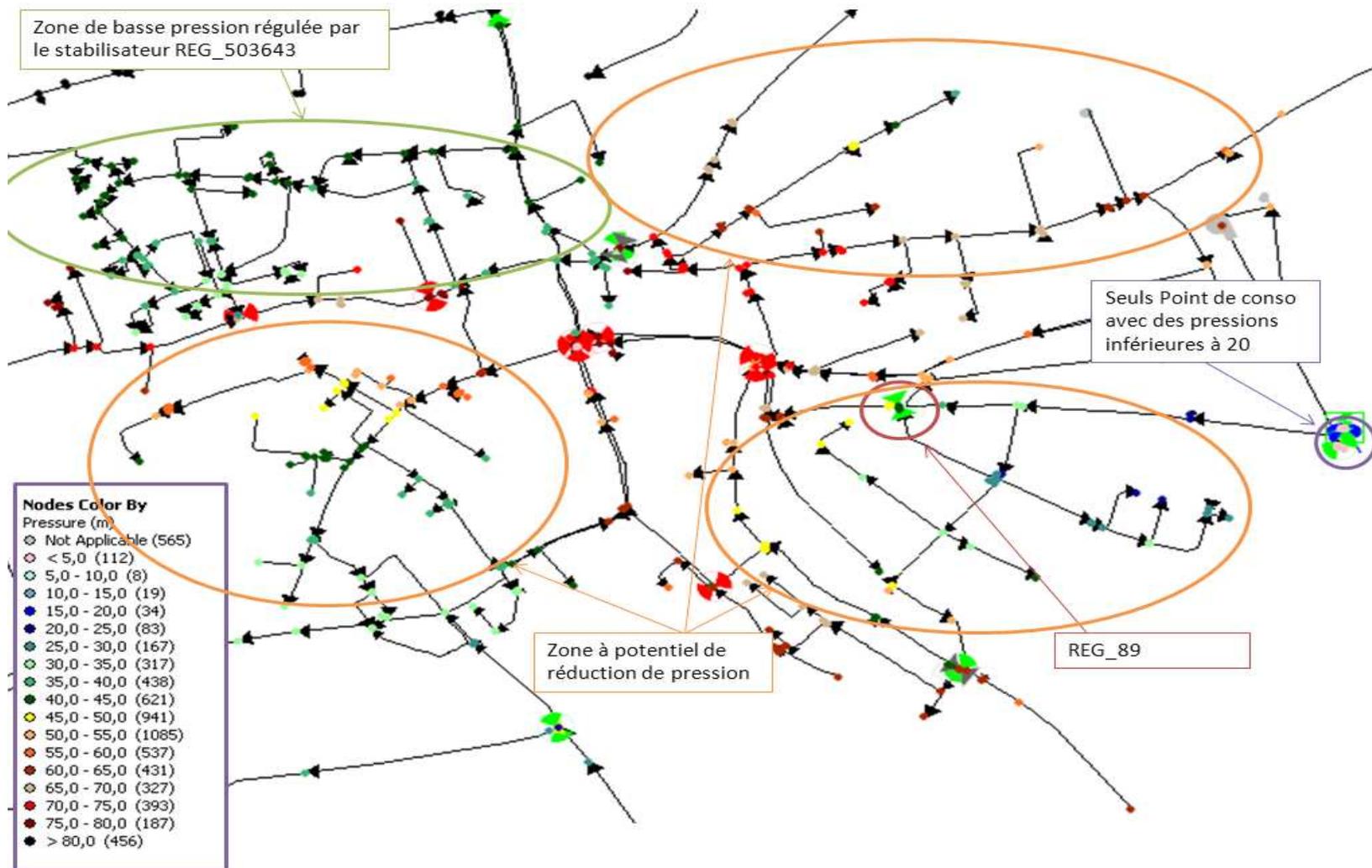


Figure 52 : Carte des zones de pression B. C. P.

IX.2 Solutions proposées

Au regard des pressions et des caractéristiques de la zone, l'action choisie est d'effectuer dans un premier temps une réduction locale, puis de voir si l'on peut avancer davantage en effectuant une modulation de pression locale.

IX.2.1 Solution S3-1

Dans un premier temps, on commence par abaisser la consigne des deux stabilisateurs présents sur la zone.

Comme indiqué précédemment nous pouvons abaisser respectivement de 9 et 8m.

Une fois cette réduction réalisée, pour évaluer l'intérêt d'une modulation de la pression, nous regardons l'écart entre pression maximale et pression minimale aux points limitants.

Pour REG_503643, le point limitant après réduction a une pression minimale de 19,89 mce et son deltaP est 0.10 mce..

De même, pour REG_89 la pression minimale du point limitant est 19.99 mce, et la variation de pression de 0.0027 soit 0.

Aucune modulation n'est envisageable pour cette solution.

IX.2.2 Solution S3-2

Pour réduire la pression sur une des trois zones identifiées (en bas à gauche sur la Figure 51) on prévoit un premier stabilisateur sur l'antenne du bas : REG_2.

On applique toujours la même méthode, ici le point limitant a une pression minimale de 29 mce, donc on peut réduire globalement la zone de 9 mce. On pose donc un stabilisateur à l'entrée de la zone avec une consigne adaptée (31 mce). L'écart entre la pression amont et la pression de consigne du stabilisateur est 9 mce. Après réduction la variation de pression au niveau du point limitant est 0.0025, donc pas de modulation.

IX.2.3 Solution S3-3

Sur la même zone, on s'intéresse à l'antenne du haut. Le point limitant a une pression de 39.73 mce ce qui permet 20 mce de réduction. On pose donc un second stabilisateur dont la consigne est 27mce avec un différentiel par rapport à la pression amont de 20mce. Après réduction, le deltaP du point limitant est 0.3 mce.

IX.2.4 Solution S3-4

On décide ici de réduire la pression sur la zone où se situe REG_89, et on ajoute un stabilisateur un peu en aval de celui-ci. Ici c'est le point situé juste à l'aval du stabilisateur qui est limitant, car c'est un point de consommation. On fixe donc la consigne du stabilisateur à 20 mce, et la variation du point limitant est nulle. La différence pression amont pression de consigne au niveau du stabilisateur est 26,80mce.

IX.2.5 Solution S3-5

Pour finir, on pose un stabilisateur sur la dernière zone de pression, sur l'antenne principale. Le point limitant à une pression minimale de 45,15mce, donc on peut diminuer de 25 mce la pression de la zone. La consigne du stabilisateur est de 44 mce avec une pression amont de 69,19 mce.

On s'arrête à cette solution, et on dresse tout d'abord un bilan de pression des différentes solutions, avant de chiffrer leur coût et de calculer le ratio coût bénéfique de chacune des solutions.

IX.3 Bilan des solutions proposées

IX.3.1 Bilan en pression

Le Tableau 20 récapitule les indicateurs de pression calculés pour les différentes solutions :

	Secteur							Point critique		
	Pmoy pondérée conso	P10%	P50%	P90%	DeltaP10%	DeltaP50%	DeltaP90%	Pmin	Pmoy	DeltaP
S3-0	64,49	32,88	42,96	71,81	0,08	5,93	6,56	17,52	19,40	5,32
S3-1	63,61	27,07	40,73	71,81	0,03	5,93	6,56	17,52	19,40	5,32
S3-2	63,11	25,00	35,08	71,81	0,00	5,92	6,51	17,52	19,40	5,32
S3-3	57,88	24,98	34,96	71,81	0,00	2,78	6,44	17,52	19,40	5,32
S3-4	57,43	24,96	34,96	71,81	0,00	0,11	6,44	17,52	19,40	5,32
S3-5	56,68	24,96	34,91	65,77	0,00	0,10	6,43	17,52	19,40	5,32

Tableau 20 : Récapitulatif des indicateurs de pression calculés pour le secteur B. C. P.

Finalement, en ajoutant 4 stabilisateurs, on arrive à diminuer la pression moyenne du secteur de 9 mce.

Les deux courbes suivantes (Figure 53, Figure 54) représentent respectivement la répartition des pressions et des écarts temporels de pression pour chacune des solutions.

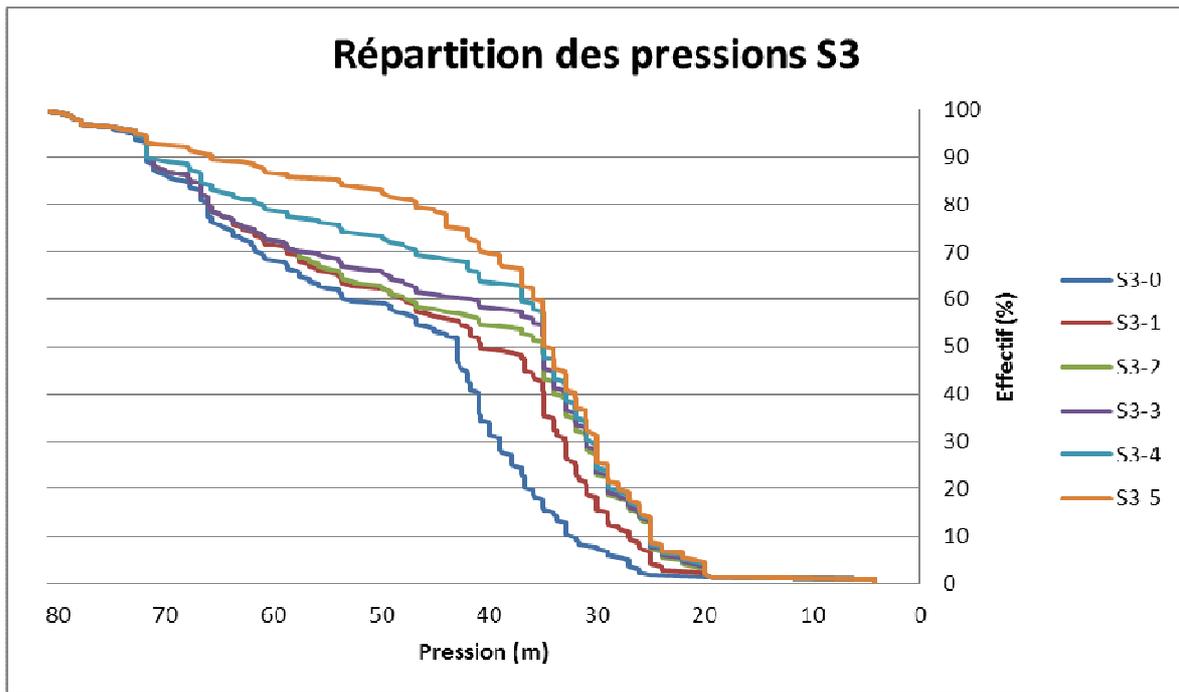


Figure 53 : Répartition des pressions B. C. P.

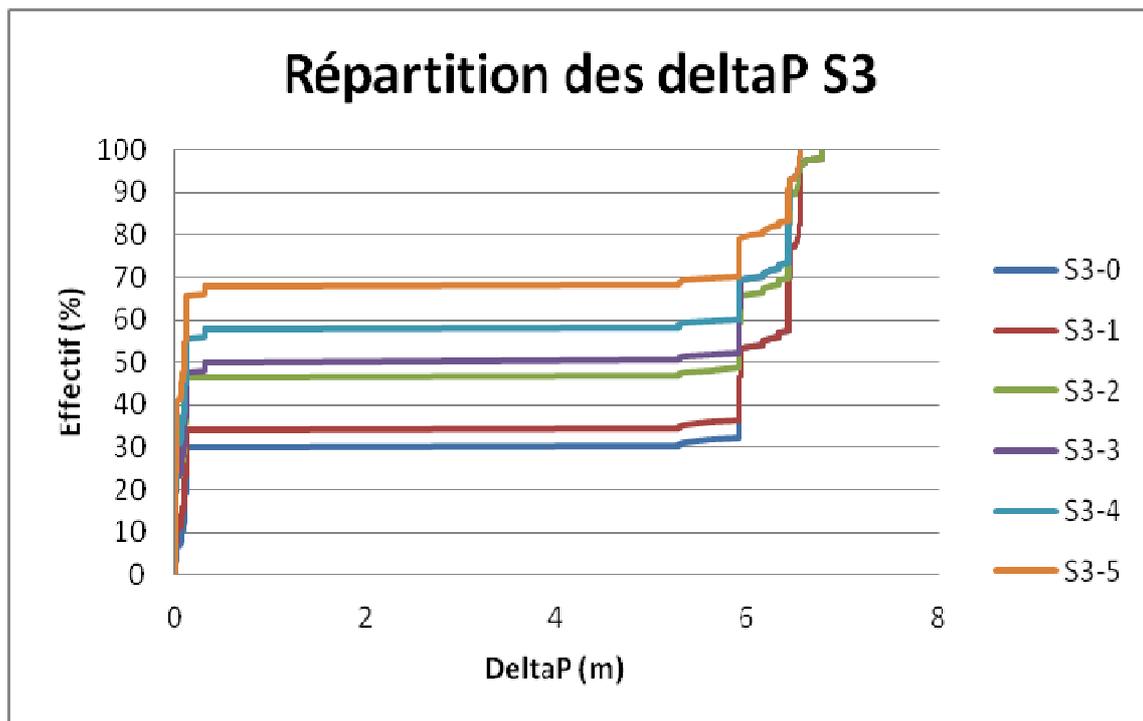


Figure 54: : Répartition des écarts temporels de pression B. C. P.

IX.3.2 Bilan en volume d'eau économisés

Nous disposons du volume de pertes de l'année 2010 [Le Glatin, 2010], ainsi que les pressions moyennes pondérées des différentes solutions ; nous utilisons donc la formule habituellement employée [Thornton, 2003] :

$$\frac{L1}{L0} = \left(\frac{P1}{P0} \right)^{N1}$$

Avec :

L0 et P0 : les valeurs avant la réduction de la pression

L1 et P1 : les valeurs après la réduction de la pression

On prend N1= 1, et on calcule à la fois le volume d'eau économisé par rapport à S3-0 le secteur initial, et aussi celui économisé par rapport à la solution antérieure S3-(s-1) (Tableau 21)

	Pmoy pondérée conso	Volume de pertes m3	Volume économisé p/r à S3-(s-1) m3	Vol éco p/r à S3-0
S3-0	64,49	85 717	0,	0,00
S3-1	63,61	84 550	1 167	1 167
S3-2	63,11	83 881	669	1 836
S3-3	57,88	76 935	6 946	8 782
S3-4	57,43	76 329	606	9 388
S3-5	56,68	75 335	994	10 382

Tableau 21 : Récapitulatif des volumes économisés par solution S3

Les volumes économisés commencent à être significatifs à partir de la solution 3.

Pour trancher sur la solution à employer, nous allons calculer le ratio coût efficacité de chaque solution.

IX.3.3 Bilan en terme de ratio coût efficacité

IX.3.3.1 Evaluation des coûts

On applique la méthode ACE présentée dans l'Annexe 3. Concernant les appareils existants, il est choisi de prendre en compte le coût d'une maintenance pour changer la consigne du stabilisateur REG_503643, et dans le prix d'un stabilisateur neuf pour remplacer REP_89 (en raison d'une modification importante des conditions de fonctionnement).

On calcule non seulement le CMA de chaque solution, mais en plus la différence des CMA entre la solution s+1 et la solution s afin de connaître les coûts générés en plus à chaque solution (Tableau 22).

	Coût d'investissement €	Coût annuel de fonctionnement €	CMA €	CMA s -CMA s-1 en €
S3-0	0	0	0	0
S3-1	9 350	350	891	891
S3-2	18 350	700	1 761	870
S3-3	27 350	1 050	2 632	870
S3-4	36 350	1 400	3 502	870
S3-5	45 350	1 750	4 373	870

Tableau 22 : Bilan des CMA en € de chacune des solutions de B. C. P.

IX.3.3.2 Calcul du ratio coût efficacité

On calcule ensuite le ratio coût efficacité de chaque solution en prenant comme référence S3-0 et également le prix du m³ supplémentaire économisé en plus par rapport à la solution précédente S3-(s-1) (Tableau 23).

	Ratio €/m3 éco p/r à S3-(s-1)	Ratio €/m3 éco p/r à S0
S3-0	0	0
S3-1	0,76	0,76
S3-2	1,30	0,96
S3-3	0,13	0,30
S3-4	1,44	0,37
S3-5	0,88	0,42

Tableau 23 : Ratio coût efficacité B. C. P.

Ici la solution retenue est la solution S3-3 qui est optimum en terme de ratio coût efficacité.

On peut alors dire que pour ce secteur :

Pmin éco = 57.88mce

Pminmin= 56.68 mce

IX.3.4 Recherche de Pminlimite secteur S3

Le calcul du ratio coût efficacité permet de voir que sur ce secteur les solutions S3-1 et S3-2 sont des solutions intermédiaires, et que l'investissement devient judicieux à partir de la solution S3-3.

De même, en terme de réduction des pressions, la diminution est significative à partir de S3-3. Nous décidons donc de n'utiliser que S3-0, S3_3, S3-4 et S3-5 pour chercher Pminlimite.

Nous traçons donc le graphique représentant la pression moyenne de chaque solution en fonction de 1/(Nombre de stab+1) et nous obtenons le graphique suivant

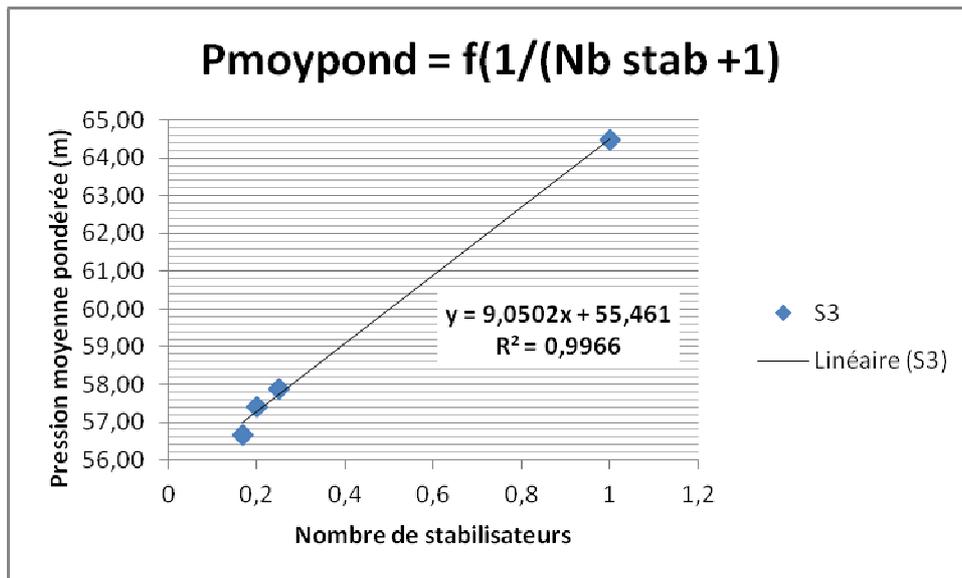


Figure 55 : S3 - Pression moyenne en fonction de 1/(Nombre de stabilisateurs+1)

Si le nombre de stabilisateurs tends vers l'infini la pression moyenne pondérée par la consommation limite est 55,46mce.

En conclusion :

Pmin éco = 57.88mce

Pminmin= 56.68 mce

Pminlimite = 55,46m

X Annexe 3 : Elaboration d'un critère économique pour le choix d'une solution de régulation de pression

Au cours des études faites sur les différents secteurs, nous nous sommes rendus compte qu'il est généralement possible de poursuivre la démarche de réduction de la pression en installant toujours davantage d'appareils de régulation.

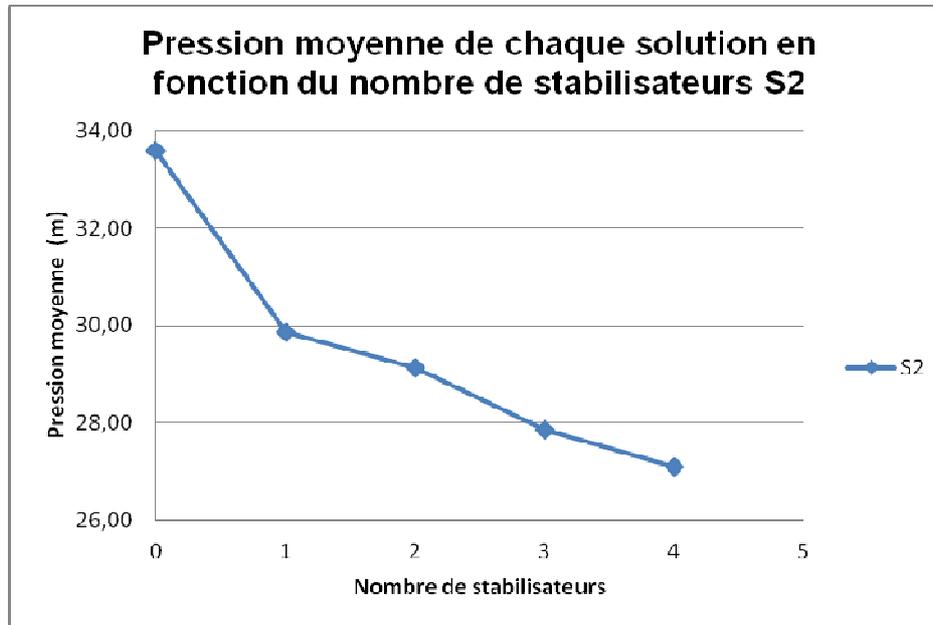


Figure 56: Pression moyenne secteur S2 en fonction du nombre de stabilisateurs

Ainsi, pour finalement arrêter un choix entre les différentes solutions envisagées, il est nécessaire de se fixer un critère de décision.

Nous nous proposons donc un critère technico-économique, basé sur l'évaluation du coût du m³ économisé grâce à la méthode d'analyse coût efficacité, ACE.

X.1 Généralités sur l'ACE

Cette technique d'aide à la décision est largement utilisée, et la description qui suit est tirée de l'analyse économique réalisée en Juillet 2011 par le SMEGREG (Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde) pour le SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau) nappe profonde [SMEGREG, 2011]

L'analyse coût-efficacité (ACE) est définie comme une « technique d'aide au jugement basée sur la comparaison de plusieurs interventions en terme d'effet obtenu et de coût de mise en œuvre ». C'est un outil d'aide à la décision qui a pour but d'identifier, d'un point de vue économique et financier, la voie la plus efficace pour atteindre un objectif prédéterminé.

L'ACE permet donc de comparer différentes alternatives et de déterminer laquelle est susceptible de donner un résultat optimal pour le coût le moins élevé possible.

Elle s'appuie sur la comparaison de ratios de coût par unité de résultat. Ici, nous nous appuyerons sur le coût par m³ d'eau économisé.

Il est important de noter que l'ACE va se concentrer sur l'effet principal souhaité et sur les montants financiers dépensés pour atteindre cet effet. Un tel type d'analyse va alors convenir à des

programmes ayant un objectif principal clairement défini (ce qui est le cas ici), et où l'on peut mesurer de manière quantitative l'effet obtenu.

Cette analyse peut être conduite à la fois rétrospectivement, pour évaluer l'efficacité d'une mesure déjà mise en œuvre, ou de manière prospective pour choisir entre deux projets.

Comme tous les outils, cette méthode présente des inconvénients et des avantages qui sont résumés dans le Tableau 24.

Atouts	Inconvénients
<p>Outil de communication clair en direction des élus, qui ramène les résultats obtenus à un indicateur quantifiable unique.</p> <p>Peut être utilisé ex-ante pour comparer les différentes mesures qui pourraient être mises en place, ou ex-post pour évaluer l'efficacité des actions.</p> <p>Visibilité de l'efficace d'une intervention</p>	<p>Se concentre uniquement sur l'effet principal (nécessité d'un objectif clair et précis).</p> <p>Obligation d'une estimation quantitative de l'effet.</p> <p>Besoin d'au moins une référence pour effectuer une comparaison.</p>

Tableau 24 : Atouts et inconvénient de l'analyse coût efficacité

L'analyse coût-efficacité est pratiquée en 5 étapes :

- Référentiel : détermination de l'objectif principal.
- Calcul du coût : détermination (par calcul ou recherche de données) du coût de la (des) mesure(s) mise(s) en place.
- Estimation de l'impact : détermination des résultats obtenus.
- Calcul du ratio coût-efficacité : Coût par unité d'effet obtenu. Plus le ratio est faible, meilleure est l'efficace.
- Comparaison : choisir une référence de comparaison à l'extérieur ou à l'intérieur du programme.

X.2 Application de la méthode à la régulation de pression

X.2.1 Choix du référentiel

La régulation de pression peut être mise en œuvre pour poursuivre deux objectifs principaux :

- Economiser l'eau perdue, à la fois dans un souci de préservation de la ressource, et d'économie d'argent
- Economiser les installations, et éviter de les soumettre à de fortes pressions ou à de fortes variations de pression

Le second objectif est difficilement quantifiable, en revanche le premier peut être évalué en ayant recours à la formulation donnant le débit de fuite en fonction de la pression de service [Thornton, 2003].

L'objectif principal qui sera donc utilisé pour cette méthode est l'économie d'eau.

X.2.2 Calcul du coût

L'ACE suppose une évaluation des coûts d'investissement et d'exploitation de chaque projet, afin de les comparer. Nous proposons de les évaluer en utilisant un coût moyen annuel, CMA. Pour cela on répartit équitablement l'investissement réalisé sur la durée de vie des installations, en tenant compte de l'actualisation, et on ajoute à ce calcul les coûts annuels d'exploitation [Rozan, 2010].

$$CMA = d + I \frac{a}{1 - (1 + a)^{-N}}$$

Avec

d= dépenses de fonctionnement annuelles

N= durée de vie prévisionnelle de l'investissement

I= investissement réalisé

a = taux d'actualisation

X.2.2.1 Durée de vie prévisionnelle

La partie génie civil et robinetterie n'ont pas la même durée de vie, cependant dans un souci de simplification, on prend comme hypothèse que toute l'installation à une durée de vie de 30 ans, choix cohérent avec les durées d'amortissement indicatives définies dans l'Annexe 3 de l'arrêté du 12 août 1991.

X.2.2.2 Taux d'actualisation

La formule utilisée par le Centre d'analyse stratégique (ancien Commissariat général au Plan) est la suivante :

Pour $t \leq 30$: $r_t = 0,04$

Pour $t > 30$: $r_t = \sqrt[5]{1,04^t 1,02^{t-30}} - 1$

Nous choisissons donc un taux égal à 4%.

X.2.2.3 Coûts d'investissement et d'exploitation

Pour chacun des secteurs, nous avons réduit la pression en posant des stabilisateurs et en démaillant le réseau.

Cela signifie que pour évaluer les coûts de chacune des solutions envisagées, il faut à la fois envisager l'investissement réalisé pour installer les stabilisateurs, les vannes, les ouvrages de génie civil et les coûts de maintenance de ces appareils.

On évalue ici le prix total d'une installation prise pour référence, qui comprend à la fois le prix de la chambre de vanne et des équipements hydrauliques. Il est à noter que le prix de ce type d'installation est très variable en fonction de la zone de pose, du diamètre des installations, des exigences du maître d'ouvrage... Nous prendrons donc des prix estimatifs basés sur des dires d'experts, mais dans le cadre d'un projet, la réalisation d'une estimation plus poussée est nécessaire (Tableau 25, Tableau 26).

Un exemple de devis détaillé, de calcul d'encombrement et un schéma détaillé d'installation type en DN300 sont proposés par [Ramarojaona, 2009].

Coûts DN100		Durée de vie (ans)/Fréquence
Stabilisateur aval		
Investissement €		
Installation = robinetterie + capteurs+ tps passé	5000	30
Génie Civil	4000	30
Maintenance €		
Achat kit + déplacement+ intervention	350	1

Tableau 25 : Coûts d'un stabilisateur DN100 installé dans une chambre de vannes

Coûts DN100		Durée de vie (ans)/Fréquence
Vanne de sectionnement		
Investissement €		
Installation=robinetterie + tps passé	450	30
Maintenance €		
Déplacement+intervention	0	1

Tableau 26 : Coûts d'une vanne de sectionnement DN100 installée sous bouche à clef

X.2.3 Estimation de l'impact

Comme nous l'avons précisé précédemment, l'impact est ici mesuré en termes de volumes d'eau économisée.

Afin d'évaluer ces volumes, on utilise la formule usuelle reliant les volumes de pertes L et la pression moyenne de service P [Thornton, 2003]

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N1}$$

Avec L_0 et P_0 sont les valeurs respectivement du volume de pertes et de la pression moyenne avant réduction de la pression, L_1 et P_1 en sont les valeurs après la réduction de pression.

Il est à noter que la valeur de N1 dépend des caractéristiques du secteur, en l'absence de données de calage nous prendrons N1=1, qui est la valeur usuellement retenue dans un tel cas.

Les volumes de pertes en situation actuelle sont tirés de [Le Glatin, 2011] et [Tangaoui, 2012].

X.2.4 Calcul du ratio coût efficacité

Les solutions techniques sont conçues de façon incrémentales, c'est-à-dire que la solution n+1 comporte l'ensemble des équipements de la solution auxquels sont ajoutés des équipements supplémentaires.

Le ratio que nous choisissons est le rapport entre le coût moyen annuel des équipements supplémentaires de la solution et le volume supplémentaire d'eau économisé par rapport à la solution précédente.

Le ratio coût efficacité de la solution n+1 s'exprime comme suit :

$$R_n^{n+1} = \frac{(d_{n+1} - d_n) + (I_{n+1} - I_n) \frac{a}{1 - (1 + a)^{-N}}}{L_n - L_{n-1}}$$

L'unité de ce ratio sera donc l'euro par m³.

X.2.5 Référence de comparaison

Le ratio coût efficacité donnera un prix du m³ économisé qui doit être comparé avec une référence.

Ainsi deux optiques peuvent être envisagées, une approche purement économique, et une approche intégrant une dimension environnementale.

La première consiste à comparer le prix du m³ économisé grâce à la solution proposée au coût marginal de production d'un m³ d'eau sur le secteur étudié. Après discussion avec les exploitants et en intégrant la redevance prélèvement de l'Agence de l'Eau, le coût marginal de production moyen est considéré de l'ordre de 0,20 € sur les secteurs étudiés.

Dans la seconde approche, si l'on considère que les économies d'eau sont liées à un impératif environnemental, il convient de comparer nos ratios coût/efficacité à d'autres solutions d'économie de la ressource.

A partir des données issues de l'étude du SMEGREG [SMEGREG, 2011] et de durées de vie établies en cohérence avec les durées d'amortissement indicatives définies dans l'Annexe 3 de l'arrêté du 12 août 1991 relatif à l'approbation des plans comptables du secteur public, nous avons calculé selon notre méthode le ratio coût efficacité de différentes solutions alternatives d'économies d'eau (Tableau 27).

Elles se divisent en deux catégories : les solutions d'économie pure (installations de compteurs, installations de technologies moins consommatrices...) et celles où l'on substitue à une ressource rare une ressource abondante :

	Kit hydro-économe	Substitution eau industrielle	Substitution eaux souterraines 1	Substitution eaux souterraines 2	Substitution eau de garonne traitée	Rationalisation des usages municipaux (Mérignac)
Coût d'Investissement €	50	22 170 000	4 063 790	38 000 000	30 000 000	50 000
Durée de vie	10	40	50	50	30	10
Coût annuel de fonctionnement €	0	100 000	50 000	983 000	1 330 000	35000
Coût Moyen Annuel	6,16	1 220 106	239 170	275 191	3 064 903	41164
Volume Economisé	30	1400 000	2 000 000	9 500 000	9 500 000	70 000
R €/m3	0,21	0,87	0,12	0,29	0,32	0,59

Tableau 27 : Ratios coût efficacité de mesures d'économie d'eau ou de substitution de ressource



Direction générale
Parc de Tourvoie
BP 44 - 92163 Antony cedex
Tél. 01 40 96 61 21
Fax 01 40 96 62 25
www.cemagref.fr