



**HAL**  
open science

# Partenariat Irstea-Veolia : Pertes en eau : Introduction de la pression dans les indicateurs de performance : Rapport de synthèse de la première année d'étude

Eddy Renaud, Julie Pillot

## ► To cite this version:

Eddy Renaud, Julie Pillot. Partenariat Irstea-Veolia : Pertes en eau : Introduction de la pression dans les indicateurs de performance : Rapport de synthèse de la première année d'étude. [Rapport de recherche] irstea. 2012, pp.40. hal-02597885

**HAL Id: hal-02597885**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02597885>**

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.

# Partenariat Irstea-Véolia

## **Pertes en eau :** Introduction de la pression dans les indicateurs de performance

**Rapport de synthèse de la première année  
d'étude**

Novembre 2012

**Eddy RENAUD <sup>(1)</sup>**

**Julie PILLOT <sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Groupement de Bordeaux  
Unité de recherches REBX  
50, avenue de Verdun, Gazinet  
33612 Cestas cedex

## Table des matières

Liste des sigles, acronymes et abréviations.....	3
Liste des notations.....	4
Table des illustrations - Figures.....	6
Table des illustrations - Tableaux.....	7
I Présentation du projet.....	8
I.1 Introduction.....	8
I.2 Les limites des indicateurs de performance existants.....	8
I.2.1 Les indicateurs de pertes français.....	8
I.2.2 Les indicateurs de performance internationaux.....	10
I.3 Objectifs de la collaboration Irstea Bordeaux – Veolia Eau.....	12
I.4 Le développement d’un indicateur de performance globale.....	13
I.5 Secteurs hydrauliques étudiés.....	14
I.6 Documents produits dans le cadre de cette étude.....	15
II Synthèse des études réalisées.....	15
II.1 Définition d’un indicateur de pertes structurelles.....	15
II.1.1 Traitement des données d’étude.....	15
II.1.2 Principaux résultats.....	18
II.1.3 Approche du volume perdu basé sur la seule sectorisation.....	26
II.2 Définition d’un Indice de Réduction de la Pression, IRP.....	31
II.2.1 Modélisation de la réduction de pression.....	31
II.2.2 Estimation des pressions minimales à partir de la distribution des pressions.....	33
II.3 Evaluation des indicateurs.....	35
II.3.1 Evaluation de la pertinence de IPS et IRP.....	35
II.3.2 L’Indice Global de Pertes, IGP.....	36
III Suite et Perspectives de la collaboration (2013) :.....	39
III.1 Développement d’un applicatif de calcul utilisable avec Epanet.....	39
III.2 Etude et approfondissement des indicateurs à l’échelle du service.....	39
Bibliographie.....	40

## Liste des sigles, acronymes et abréviations

ACE	Analyse Coût Efficacité
CALL	Communaupole de Lens Liévin
CARL	Current Annual Real Losses
CASP	Current Average System Pressure
CMA	Coût Moyen Annuel d'investissement et de maintenance
GLI	Global Leakage Index
GLI <sup>E</sup>	Global Leakage Index Equivalent
IF <sub>BRT1</sub>	Indice de Fiabilité d'affectation des clients dont le n° de rue n'est pas renseigné
IF <sub>BRT2</sub>	Indice de fiabilité d'affectation des clients des rues à cheval
IF <sub>VMD</sub>	Indice de fiabilité des volumes mis en distribution
IGP	Indice Globale des Pertes
ILC	Indice Linéaire de Consommation
ILI	Infrastructure Leakage Index
ILI <sup>E</sup>	Infrastructure Leakage Index Equivalent
ILP	Indice Linéaire de Perte
ILVNC	Indice Linéaire des Volumes Non Comptés
IPS	Indice de pertes structurelles
IRP	Indice de réduction de la pression
Irstea	Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
IWA	International Water Association
MARP	Minimum Annual Reference Pressure
mCE	Mètre de Colonne d'Eau
PMI <sub>p</sub>	Pressure Management Index (pression de référence spécifiée en indice)
SEDIF	Syndicat des Eaux d'Ile de France
SIG	Système d'Information Géographique
UARL	Unavoidable Annual Real Losses
UARL <sup>E</sup>	Unavoidable Annual Real Losses Equivalent

## Liste des notations

$\phi_{\text{moy}}$	Diamètre moyen des canalisations	mm
brcht	branchement	
D	Densité d'abonnés	
$D_{\text{ref}}$	Nombre de branchements par longueur du réseau de distribution hors branchements	Nb/km
L	Longueur du réseau de distribution hors branchements	km
$L_b$	Linéaire de branchements	km
$l_i$	Linéaire de canalisation du secteur i	km
$L_{\text{pref}}$	Longueur des branchements de la voirie au compteur par nombre de branchements	km/brcht
$l_{\text{rue}}$	Linéaire de canalisation d'une rue	km
$l_{1/2}$	Demi-longueur d'un tronçon	km
$N_{\text{ab}}$	Nombre d'abonnés au service AEP	
$N_b$	Nombre de branchements	
$N_{\text{brue}}$	Nombre de branchements d'une rue	
$N_{\text{stab}}$	Nombre de stabilisateurs	
P	Pression moyenne journalière (de 01h à 00h)	mCE
$P_{10\%}$	1 <sup>er</sup> décile de la distribution des pressions moyennes journalières des nœuds du réseau	mCE
$P_{50\%}$	Médiane de la distribution des pressions moyennes journalières des nœuds du réseau	mCE
$P_{90\%}$	9 <sup>ème</sup> décile de la distribution des pressions moyennes journalières des nœuds du réseau	mCE
$P_{\text{critique}}$	Pression au point critique du réseau	mCE
$P_{\text{min}}$	Pression moyenne journalière minimale de la zone	mCE
$P_{\text{minéco}}$	Pression de rentabilité économique	mCE
$P_{\text{mintechnique}}$	Minimum de pression techniquement atteignable	mCE
$P_{\text{moypondérée}}$	Pression moyenne journalière pondérée par la demande	mCE
$P_{\text{t critique}}$	point (nœud) du réseau de plus faible pression	
$P_{\text{t limitant}}$	point (nœud) de la zone locale de plus faible pression	

R	Rendement du réseau	
$q_{\text{cnuit}}$	Débit moyen annuel de consommation nocturne	$\text{m}^3/\text{h}$
$q_{\text{max}}$	Débit de nuit hebdomadaire maximal	$\text{m}^3/\text{h}$
$q_{\text{normé}}$	Débit de nuit hebdomadaire normalisé	
$q_{\text{nuit}}$	Débit de nuit moyen annuel	$\text{m}^3/\text{h}$
$q_{\text{nuithebd}}$	Moyenne hebdomadaire des débits de nuit	$\text{m}^3/\text{h}$
$q_{\text{pnuit}}$	Débit moyen annuel de perte nocturne	$\text{m}^3/\text{h}$
$q_{\text{ref}}$	Débit de référence (= débit de nuit hebdomadaire minimal)	$\text{m}^3/\text{h}$
$T_b$	Taux de défaillances des branchements	Nombre de défaillances/km/an
$T_c$	Taux de défaillances des canalisations	Nombre de défaillances/km/an
$T_f$	Taux de fonte	%
$V_+$	Volume de nuit annualisé : $24 \times 365 \times q_{\text{nuit}}$	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{\text{ca}}$	Volume annuel consommé autorisé	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{\text{cc}}$	Volume annuel consommé comptabilisé	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{\text{cv}}$	Volume consommé volé	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_d$	Volume annuel mis en distribution	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{\text{exp}}$	Volume annuel exporté	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{\text{imp}}$	Volume annuel importé	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{\text{NC}}$	Volume annuel non compté	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_P$	Volume annuel de perte	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{P_{\text{nuit}}}$	Volume annuel de perte calculé à partir du débit de nuit	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{\text{prod}}$	Volume annuel produit	$\text{m}^3/\text{an}$
$V_{\text{sc}}$	Volume annuel issu du sous comptage des compteurs domestiques	$\text{m}^3/\text{an}$

## Table des illustrations - Figures

Figure 1: Usage combiné (ILI, PMI) [Trow,2009].....	12
Figure 2: Relation entre le nombre de branchements et le linéaire de réseau .....	19
Figure 3: Relation entre le nombre de branchements et le linéaire de réseau, secteurs <25 000 brcht .	20
Figure 4: Relation entre le nombre de branchements et le volume de perte.....	21
Figure 5: relation entre le nombre de branchements et le volume de perte, secteurs <25 000 brcht.....	21
Figure 6: Relation entre la pression moyenne pondérée et le volume de perte .....	22
Figure 7: Relation entre la pression moyenne pondérée et le volume de perte par branchement .....	22
Figure 8: Relation entre l'année de pose moyenne et le volume de perte par branchement .....	23
Figure 9:Relation entre le taux de défaillance sur canalisation et le volume de perte par branchement	23
Figure 10: Relation entre la présence de fonte et le volume de perte par branchement .....	24
Figure 11: Relation entre le diamètre moyen et le volume de perte par branchement .....	24
Figure 12 Volume nocturne et volume perdu obtenu par les consommations des clients.....	27
Figure 13 Comparaison des volumes perdus obtenus par sectorisation et par les consommations des clients .....	28
Figure 14:Volume perdu obtenu par sectorisation, en fonction de la pression moyenne du secteur.....	29
Figure 15: Courbes de répartition des débits moyens nocturnes hebdomadaires normés .....	30
Figure 16: Pression moyenne en fonction du nombre de stabilisateurs.....	33
Figure 17: Comparaison PMI et IRP .....	35
Figure 18: IPS en fonction de ILI.....	36
Figure 19: IGP en fonction de IRP- Données SEDIF.....	37
Figure 20: IGP en fonction de IPS - Données SEDIF .....	37
Figure 21: Valeurs de l'IRP en fonction du volume de perte par branchement- Données SEDIF.....	38

## Table des illustrations - Tableaux

Tableau 1 Hypothèses débit de fuite et rythme de réparation prises pour l'UARL .....	10
Tableau 2: Correspondances entre les systèmes d'indicateurs de pertes.....	14
Tableau 3: Terrains d'étude et intervenants .....	14
Tableau 4: Répartition de nos secteurs d'études selon les paramètres pression, densité, ILP et rendement.....	14
Tableau 5: Récapitulatif des sources des données utilisées.....	15
Tableau 6: Comparaison des méthodes d'affectation d'une rue à un secteur.....	16
Tableau 7 : Calcul du volume annuel mis en distribution pour chaque service .....	17
Tableau 8 : Evaluation du volume annuel consommé pour chaque service .....	17
Tableau 9: Variables étudiées et retenues pour le modèle du volume de perte [Le Glatin, 2011] .....	25
Tableau 10: Valeurs statistiques des coefficients, constante et R <sup>2</sup> du modèle [Le Glatin, 2011].....	25
Tableau 11: Significativité des variables après le premier test de régression .....	25
Tableau 12: P-value des variables utilisées dans le modèle du volume de perte, [Tangeaoui, 2012] ...	26
Tableau 13: Valeurs statistiques des coefficients et constante du modèle du volume de perte, [Tangeaoui, 2012] .....	26
Tableau 14: Modes de réduction de la pression .....	31
Tableau 15: Valeurs prises pour les paramètres du calcul du Coût Moyen Annuel de la régulation de pression.....	32
Tableau 16: Résultats de l'étude statistique de l'expression de P <sub>min</sub> technique et P <sub>min</sub> éco .....	34

## I Présentation du projet

### I.1 Introduction

La lutte contre les pertes en eau sur les réseaux d'eau potable nécessite une organisation en deux étapes :

- Un diagnostic de l'origine des pertes ;
- La mise en œuvre d'actions adaptées pour les réduire.

Il est donc important de se doter d'outils permettant à la fois de quantifier et de qualifier les volumes perdus selon la source.

La qualification et la quantification des pertes en eau peuvent, en première approche, se faire grâce à des indicateurs de performance. Il en existe plusieurs et ils varient selon les pays. Ainsi, les indicateurs français sont assez éloignés des standards internationaux promus par l'IWA (International Water Association) et répertoriés dans [Alegre et al., 2006].

Dans ce contexte, Irstea et Veolia se proposent de travailler ensemble à l'harmonisation des deux systèmes pour parvenir à l'élaboration d'indicateurs techniques « universels » permettant de :

- Identifier les principaux leviers d'amélioration de la performance ;
- Comparer les services entre eux ;
- Fixer des objectifs de performance cohérents au regard des caractéristiques des services.

[Sandraz A.C., 2012]

Les actions de lutte contre les fuites peuvent essentiellement porter sur deux aspects :

- Les infrastructures
- La pression

Concernant les infrastructures, l'attention se porte aujourd'hui largement sur les canalisations principales alors que l'expérience montre que les branchements particuliers sont à l'origine d'une part importante (voire prédominante) des pertes.

La pression a un impact sur le débit des fuites. En effet, une fuite peut être considérée comme un écoulement de l'eau par un orifice. Les règles de l'hydraulique (formule de Torricelli) établissent que la vitesse d'écoulement d'un fluide au travers d'un orifice dépend de la charge ou, en d'autres termes, que le débit dépend de la pression. La prise en compte des possibilités d'influer sur la pression est donc un élément important pour réduire les pertes.

Il en résulte que l'objectif central de la collaboration entre Irstea et Véolia est d'introduire la pression et le nombre de branchements dans le système d'indicateurs utilisé en France.

### I.2 Les limites des indicateurs de performance existants

*Les informations de ce paragraphe concernant les indicateurs sont tirées des fiches pratiques réalisées par Irstea pour le compte de l'ONEMA [Renaud et al., 2012].*

#### I.2.1 Les indicateurs de pertes français

En France, parmi les indicateurs réglementaires choisis par l'arrêté et le décret du 2 mai 2007 pour figurer dans le rapport annuel du Maire, trois concernent les pertes des réseaux d'eau potable. Ce sont:

- **Le rendement, noté R:**

$$R = \frac{V_{ca} + V_{exp}}{V_{prod} + V_{imp}}$$

Avec :

- $V_{ca}$ , Volume annuel consommé autorisé
- $V_{prod}$ , Volume annuel produit
- $V_{exp}$ , Volume annuel exporté (ou vendu)
- $V_{imp}$ , Volume annuel importé (ou acheté)

Cet indicateur ne reflète pas uniquement la performance du point de vue des pertes puisqu'il est très sensible aux consommations. Ceci est illustré par l'exemple proposé dans [Agence de l'eau Adour Garonne, 2005] et résumé comme suit:

Une entreprise consomme 8 000 m<sup>3</sup>/mois et le réseau urbain utilise 10 000 m<sup>3</sup>/mois.

- Quand l'entreprise fonctionne, il est produit 25 000 m<sup>3</sup>/mois, ce qui donne un rendement du réseau de  $\frac{8000+10000}{25000} = 0.72$ .
- Quand l'entreprise est fermée, la production est réduite à 25 000-8 000=17 000 m<sup>3</sup>/mois, le rendement est alors de  $\frac{10000}{17000} = 0.58$ .

Conclusion : Pour un même niveau de perte, le rendement varie en fonction de la consommation. Les variations de cet indicateur ne sont donc pas forcément représentatives des variations de performance du réseau.

- **L'Indice Linéaire de Perte en réseau, ILP**

$$ILP = \frac{V_d - V_{ca}}{L \times 365} = \frac{VP}{L \times 365} \text{ en (m}^3\text{/j.km)}$$

Avec:

- $V_d$ , Volume annuel mis en distribution
- $V_{ca}$ , Volume consommé autorisé
- $VP$ , Volume annuel de perte
- $L$ , Longueur du réseau de distribution hors branchements

Cet indicateur, contrairement au rendement, n'est pas affecté par les variations de la consommation. Il présente cependant d'importants inconvénients :

- Sa valeur dépend largement du caractère urbain ou rural du réseau. Ce dernier est en général évalué au moyen de l'Indice Linéaire de Consommation, ILC, ou de la densité d'abonnés,  $D$  ;
- Il existe une multitude de référentiels d'interprétation de l'ILP [Renaud, 2009]. Ainsi pour un couple (ILP, ILC) ou (ILP,  $D$ ), l'appréciation de la performance du réseau est très variable selon le système de référence utilisé ;
- Les référentiels étant établis par classe, cela génère des effets de seuil importants : Un ILP acceptable peut devenir mauvais si le réseau passe de la classe « urbain » à « semi urbain », sans que cela implique une dégradation de la performance ;
- Le volume consommé autorisé inclus des volumes estimés, non mesurés. Cela peut conduire à des différences d'appréciations d'un opérateur à un autre qui impactent la valeur de l'indicateur.

- **L'Indice Linéaire des Volumes Non Comptés, ILVNC**

$$ILVNC = \frac{V_d - V_{cc}}{L \times 365} = \frac{VNC}{L \times 365} \text{ en m}^3\text{/j.km}$$

Avec :

- Vd, Volume annuel mis en distribution
- Vcc, Volume annuel consommé comptabilisé
- VNC, Volume annuel non compté
- L, Longueur du réseau de distribution hors branchements

Cet indicateur est très proche de l'ILP. Par construction, la valeur d'ILVNC est supérieure à la valeur d'ILP. En effet, au-delà des pertes, les volumes non comptés incluent également les volumes de services et les consommations autorisés non comptés telles que l'utilisation des poteaux incendie ou des bouches de lavage. L'intérêt majeur d'ILVNC est que son calcul ne fait intervenir que des volumes mesurés (son évaluation est donc théoriquement indépendante de l'opérateur). L'inconvénient subséquent est que cet indicateur ne permet pas d'identifier les pertes parmi les volumes non comptés.

## I.2.2 Les indicateurs de performance internationaux

L'IWA recommande un certain nombre d'indicateurs pour caractériser les pertes d'un service d'eau [Alegre *et al*, 2006]. Parmi eux figure l'Infrastructure Leakage Index, ILI, dont l'usage combiné à l'indicateur Pressure Management Index, PMI, est proposé par [Trow, 2009].

- **Infrastructure Leakage Index (ILI)**

$$ILI = \frac{CARL}{UARL} = \frac{VP - (V_{cv} + V_{sc})}{P \times (18 \times L + 0.8 \times N_b + 25 \times L_b)}$$

- CARL, Current Annual Real Losses
- UARL, Unavoidable Annual Real Losses
- VP, Volume de perte
- Vcv, Volume consommé volé
- Vsc, Volume résultant du sous comptage des compteurs domestiques
- L, Longueur du réseau hors branchements, en km
- Nb, Nombre de branchements
- Lb, Longueur des branchements de la voirie au compteur, en km
- P, Pression moyenne de service, en mCE

Cet indicateur de performance évalue la gestion opérationnelle des pertes. C'est-à-dire qu'il repose sur l'idée qu'il existe un niveau minimal de pertes en dessous duquel il n'est pas économiquement envisageable de vouloir descendre. Ce seuil minimal, UARL, est déterminé dans le cas de réseaux en bon état et exploités dans les règles de l'art.

L'expression communément employée de l'UARL  $((18 \times L + 0.8 \times N_b + 25 \times L_b) \times P)$  [Lambert *et al*, 1999], repose sur les hypothèses du Tableau 1.

	<i>Fuites indétectables</i>	<i>Fuites apparentes</i>	<i>Fuites apparentes non détectées</i>
Conduites	20 l/km/h	0.124 réparation/km/an à 12 m <sup>3</sup> /h pendant 3 jours	0.006 réparation/km/an à 6 m <sup>3</sup> /h pendant 50 jours
Branchement partie publique	1.25 l/brcht/h	2.25 réparation/1000 brcht/an à 1.6 m <sup>3</sup> /h pendant 8 jours	0.75 réparation/1000 brcht/an à 1.6 m <sup>3</sup> /h pendant 100 jours
Branchement partie privée	0.5 l/brcht/h pour 15 m de longueur de branchements	1.5 réparation/1000 brcht/an à 1.6 m <sup>3</sup> /h pendant 9 jours	0.5 réparation/1000 brcht/an à 1.6 m <sup>3</sup> /h pendant 101 jours

Tableau 1 Hypothèses débit de fuite et rythme de réparation prises pour l'UARL

Cette formule, et les hypothèses prises pour l'établir, ne sont pas adaptées à tous les réseaux. Notamment, en ce qui concerne les réseaux à faible densité d'abonnés, l'expérience montre que les volumes de pertes observés peuvent être inférieurs à l'UARL ainsi calculé [Renaud, 2009].

- **Pressure Management Index (PMI)**

Cet indicateur de performance est le rapport entre la pression moyenne de service (CASP, Current Annual System Pressure) et la pression minimale annuelle de référence (MARF, Minimal Annual Reference Pressure) :

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

MARF est défini comme la pression minimale sur le service, majorée de 3 mCE. La pression minimale peut être soit la pression réglementaire, soit la pression contractuelle, ou bien encore la pression spécifiée par le gestionnaire du réseau.

Outre le fait qu'il nécessite une définition et une évaluation fiable de la pression moyenne de service (CASP), PMI présente l'inconvénient de prendre en compte au dénominateur une pression standard uniforme (CASP), alors même que les possibilités de réduction de la pression sont très dépendantes de la configuration du réseau.

- **Utilisation du couple (ILI, PMI)**

ILI et PMI font chacun référence à un levier différent de maîtrise des volumes perdus :

- **ILI** : Par la recherche active de fuites et le renouvellement du réseau, il est possible d'influer sur les pertes structurelles ;
- **PMI** : les pertes causées par une surpression des réseaux seront diminuées par une amélioration de la gestion de la pression.

C'est pourquoi, [Trow,2009] propose une utilisation conjointe des deux indicateurs telle que présentée dans la Figure 1.

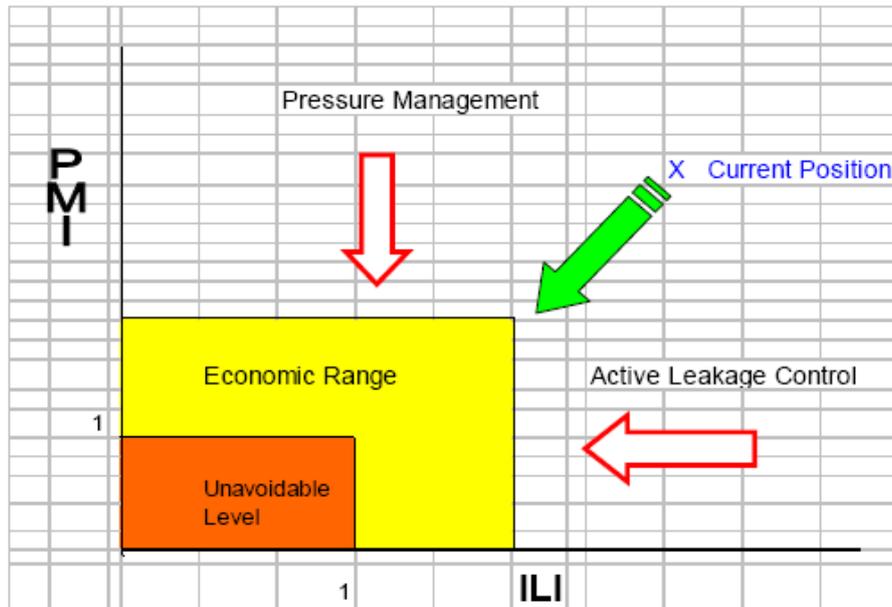


Figure 1: Usage combiné (ILI, PMI) [Trow,2009]

[Pearson et Trow, 2012] proposent la classification suivante :

- ILI < 1.5 et PMI < 2.5 : performance acceptable ;
- ILI > 1.5 et PMI < 2.5 : mise en place d'une recherche active de fuites ;
- ILI < 1.5 et PMI > 2.5 : mise en place de la gestion de pression ;
- ILI > 1.5 et PMI > 2.5 : mise en place d'une recherche active de fuites et d'une gestion de la pression.

### I.3 Objectifs de la collaboration Irstea Bordeaux – Veolia Eau

Il ressort de ce qui précède que la pression ne figure pas dans les indicateurs de performance français et que les indicateurs internationaux ne sont pas pleinement satisfaisants.

C'est dans ce contexte qu'une collaboration entre Irstea Bordeaux et la Direction Technique de Veolia Eau sur l'introduction de la pression de service et du nombre de branchements dans les indicateurs de performance a été décidée.

Cette collaboration a débutée en juillet 2011 pour une période de 1 an et comporte 3 phases :

- Phase 1 : Cadrage et recueil des données
  - o Définition et recueil des données nécessaires à l'étude
  - o Typologie des services et des secteurs
  - o Bilan des manques et recherche de solution pour les combler
- Phase 2 : Traitement et mise en forme des données
  - o Evaluation des volumes de pertes à différentes échelles spatiales et temporelles
  - o Evaluation du nombre de branchements
  - o Evaluation des pressions
- Phase 3 : Exploitation des données et conclusions

- Définition des indicateurs prenant en compte la pression et le nombre de branchements puis standardisation des calculs
- Calcul par secteur et analyse statistique
- Etude des liens entre indicateurs et caractéristiques structurelles
- Exploration de la notion de pression optimale d'un secteur

La collaboration a été prolongée par avenant au mois d'août 2012 pour un an. Cette prolongation permettra notamment de :

- Faciliter le calcul de la pression moyenne d'un réseau ou d'un secteur avec les logiciels Epanet et Porteau ;
- Calculer les pressions moyennes d'un grand nombre de services gérés par Veolia Eau et modélisés sous Epanet. Ainsi, de nouvelles données à l'échelle de réseaux entiers seront intégrées à l'étude. Ce calcul « en masse » permettra de remettre à l'épreuve les tendances observées sur les réseaux pilotes ;
- Intégrer les travaux d'Irstea sur la pression de référence dans le calcul de l'indicateur.

Le présent rapport présente l'ensemble des résultats obtenus dans la cadre de la première année de collaboration.

## I.4 Le développement d'un indicateur de performance globale

Suite aux travaux portant sur le couplage des indicateurs ILI et PMI [Trow,2009], [Renaud, 2010] propose une première version de l'indicateur de performance globale, défini comme le produit ILI x PMI. Des études précédentes ayant mis en évidence un impact prépondérant du nombre de branchements par rapport au linéaire de canalisations [Renaud, 2009], une expression approchée de UARL, notée UARL<sup>E</sup> et ne dépendant que du nombre de branchements, a été proposée (cf. Tableau 2).

Dans le cadre du projet Irstea-Véolia, l'objectif est de reformuler les indicateurs tout en conservant l'idée d'un indicateur de performance globale comprenant une composante « pression » et une composante « structurelle ». Le but est de faire intervenir un minimum de paramètres qui soient calculables pour la plupart des réseaux.

Le Tableau 2 synthétise les formulations de l'indicateur de performance globale et de ses composantes.

<i>Indicateur de performance</i>	<i>IWA</i>	<i>[Renaud, 2010]</i>	<i>Projet Irstea-Veolia</i>	<i>Commentaire</i>
<b>Pertes structurelles</b>	$ILI = \frac{CARL}{UARL}$	$ILI^E = \frac{CARL}{UARL^E}$ $UARL^E = P \times N_b \times \left( \frac{18}{D_{ref}} \right) + 0.8 + 25 \times L_{pref}$ $D_{ref} = 45 \text{ brcht/km}$ $L_{pref} = 0.008 \text{ km/brcht}$	$IPS = \frac{VP}{v_{ref} \times P \times N_b}$ $v_{ref} = \text{constante à déterminer}$	Le projet est de s'affranchir totalement d'UARL afin que l'indicateur soit applicable à tout type de réseau
<b>Gestion de la pression</b>	$PMI = \frac{CASP}{MARP}$	$PMI_{20} = \frac{P}{20 \text{ (mCE)}}$	$IRP = \frac{CASP}{P_{min}}$	Le travail porte sur la définition de la pression minimale de référence, pression technique

<i>Indicateur de performance</i>	<i>IWA</i>	<i>[Renaud, 2010]</i>	<i>Projet Irstea-Veolia</i>	<i>Commentaire</i>
				atteignable à l'échelle du secteur, ce qui n'est pas le cas de MARP
<b>Globale</b>	$GLI = ILI \times PMI$ $= \frac{CARL}{UARL_{MARP}}$	$GLI^E = ILI^E \times PMI_{20}$ $= \frac{CARL}{28 \times N_b}$	$IGP = IPS \times IRP$ $= \frac{VP}{V_{ref} \times P_{min} \times N_b}$	L'indicateur de performance globale doit nécessiter un minimum d'information

Tableau 2: Correspondances entre les systèmes d'indicateurs de pertes

## I.5 Secteurs hydrauliques étudiés

L'étude est basée sur les données disponibles de réseaux des collectivités dont l'exploitation est confiée à Véolia. Plusieurs intervenants ont participé à leur traitement (Tableau 3).

<i>Terrains étudiés</i>		<i>Traité par :</i>		
<i>Commune</i>	<i>Secteurs de travail/Secteurs total</i>	<i>M. LE GLATIN</i>	<i>N. TANGEAOUI</i>	<i>F.BEN HASSEN</i>
Communauté d'agglomération du Pays de Montbéliard (Montbéliard)	43/45	x		x
Ville de Saint-Lô (Saint-Lô)	8/16	x		
Commune de Saint-Chamond	0/20	x		
Syndicat de St jean d'Illac Martignas (St jean d'Illac)	5/7	x		
Communaupole de Lens Liévin (CALL)	17/92		x	x
Syndicat des Eaux d'Ile de France (SEDIF)	27/36		x	x

Tableau 3: Terrains d'étude et intervenants

Il est important de s'assurer que notre échantillon de secteurs d'étude est représentatif des diverses conditions d'exploitation des réseaux que l'on peut rencontrer. Le Tableau 4 présente la répartition des secteurs sur quatre paramètres [Sandraz, 2012].

<i>Répartition des secteurs</i>	<i>Pression moyenne (mCE)</i>	<i>Densité de branchements (brcht/km)</i>	<i>ILP m3/km/j</i>	<i>Rendements (%)</i>
<b>1<sup>ère</sup> décile</b>	38,4	15,3	2,0	53,7
<b>Médiane</b>	52,9	57,2	7,3	71,5
<b>9<sup>ème</sup> décile</b>	75,3	165,7	18,2	90,5

Tableau 4: Répartition de nos secteurs d'études selon les paramètres pression, densité, ILP et rendement

L'étude du panel des données disponibles pour cette analyse montre que notre échantillon est varié mais qu'il n'est pas homogène. En effet, les secteurs étudiés sont :

- plutôt urbains (densité de branchements > 50 brcht/km),
- avec une pression moyenne de secteur relativement élevée, entre 40 et 60 mCE,
- présentant des volumes de pertes par branchements assez importants.

## I.6 Documents produits dans le cadre de cette étude

Trois stages de fin d'études d'ingénieur ont été réalisés sur l'élaboration de ces indicateurs, à l'échelle du secteur.

Au sein de Véolia Eau, encadré par Anne Claire SANDRAZ :

- Le Glatin, M. (2011), Impact de la pression et des infrastructures sur les réseaux d'eau potable. Projet de fin d'études de l'ENSE3.
- Tangeaoui, N. (2012), Introduction de la pression et du nombre de branchements dans les indicateurs de performances caractérisant les pertes en eau d'un réseau. Projet de fin d'études de Polytech'Nice-Sofia.

Au sein d'Irstea, encadré par Eddy RENAUD :

- Ben Hassen, F. (2012), Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d'une zone de desserte d'un réseau d'alimentation en eau potable. Mémoire de Master de l'ENGEES.

La plupart des résultats présentés dans la suite sont issus de ces travaux.

## II Synthèse des études réalisées

### II.1 Définition d'un indicateur de pertes structurelles

#### II.1.1 Traitement des données d'étude

Les sources des données nécessaires à l'étude sont diverses, ce qui nécessite de les recouper entre elles (Tableau 5).

<i>Paramètre</i>	<i>Source</i>
Nombre de branchements	Base de Données clientèle
Volume consommé	Base de Données clientèle
Volume mis en distribution	Bilan de sectorisation
Secteur	SIG
Pression	Modèle hydraulique

Tableau 5: Récapitulatif des sources des données utilisées

Afin de gérer les manques et les incertitudes, il a fallu trier et valider les données, service par service (Tableau 6 et Tableau 7), pour travailler sur un échantillon de qualité et de fiabilité satisfaisantes.

#### II.1.1.1 L'affectation des clients aux branchements et aux secteurs.

Il s'agit d'obtenir le nombre de branchements par secteur et le volume consommé annuellement par secteur. Dans les cas où les clients et les branchements ne sont pas déjà affectés aux secteurs hydrauliques, l'adresse est l'élément permettant de rattacher les branchements et les consommations à un secteur. Cependant, l'adresse renseignée dans les bases de données n'étant pas toujours suffisante pour identifier le secteur, quelques règles ont été instaurées.

##### a) L'affectation d'un abonné à un branchement:

On considère qu'un numéro de voie correspond à un branchement unique. Deux clients ou plus possédant un numéro de voie identique seront donc associés à un seul branchement.

Si le numéro de voie n'est pas renseigné, le client compte pour un branchement supplémentaire. Le nombre de branchements peut ainsi s'écarter de la réalité, c'est pourquoi on définit un indice de fiabilité  $IF_{BRT1}$  :

$$IF_{BRT1} = \frac{\text{nombre de clients non liés à un numéro de rue}}{\text{nombre total de clients du secteur}}$$

b) L'affectation d'une rue à un secteur :

Une rue peut être à cheval sur plusieurs secteurs. Deux démarches ont été adoptées (Tableau 6):

	<b>M. LE GLATIN</b>	<b>N.TANGEOUI</b>
Méthode	<b>Cas par cas:</b> > n° de rue renseigné: Géo-localisation des clients > n° de rue non renseigné: Affectation au prorata du linéaire	<b>Prorata du linéaire de la rue:</b> Part des branchements de la rue ( $N_{brue}$ ) à cheval sur plusieurs secteurs, affectée au secteur $i$ au prorata du linéaire de la rue ( $l_i/l_{rue}$ )  $N_{bi} = \frac{N_{brue} \times l_i}{l_{rue}}$
Indice de fiabilité	$\frac{\text{nombre de clients sur des rues à cheval}}{\text{nombre total de clients du secteur}}$	$\frac{\text{Nombre de rues à cheval}}{\text{Nombre total des rues du secteur}}$

Tableau 6: Comparaison des méthodes d'affectation d'une rue à un secteur

L'indice de fiabilité associé permet d'éliminer les secteurs présentant une incertitude importante sur le nombre de branchements. Le seuil est fixé à  $IF_{BRT2} > 30\%$ .

### II.1.1.2 Le calcul des volumes mis en distribution

Le volume mis en distribution est la somme du volume produit et du volume importé, diminué du volume exporté. Il est mesuré par des compteurs qui bornent les secteurs.

Le traitement réalisé pour obtenir le volume mis en distribution dépend de la nature de la donnée disponible (Tableau 7).

<i>Service</i>	<i>Donnée disponible</i>	<i>Traitement pour obtenir les Volumes mis en distribution par secteur</i>
<b>SEDIF</b>	Volumes annuels entrée/sortie du secteur	Entrée - Sortie
<b>CALL</b>	Index journaliers des compteurs	a) index $j$ – index $j-1$ : Volume journalier par compteur b) équations de sectorisation: volume journalier par secteur c) Total sur l'année des volumes par secteur
<b>Montbéliard</b>	Volume journalier par compteur	a) Calcul du Volume moyen journalier avec les données brutes; b) Correction des jours sans valeur : attribution du Volume moyen; c) Volume total de l'année par compteur; d) Bilan de sectorisation.
<b>St Jean d'Illac</b>	Volume mis en distribution par jour et par secteur	Total sur l'année

<b>Saint Lô</b>	Volume mis en distribution par mois et par secteur	2 fois le total des volumes mensuels du 2 <sup>e</sup> semestre (car la consommation est connue uniquement sur le 2 <sup>e</sup> semestre)
-----------------	--	--

Tableau 7 : Calcul du volume annuel mis en distribution pour chaque service

Pour les services dont certaines valeurs sont corrigées lors du traitement (ex : Montbéliard), seuls les secteurs dont l'indice de fiabilité du volume mis en distribution est inférieur à 30% sont conservés pour l'étude:

$$IF_{VMD} = \frac{\text{nombre de valeurs corrigées}}{\text{nombre de valeurs totales}}$$

### II.1.1.3 L'évaluation des volumes consommés

Le format des données concernant la consommation d'eau par secteur est spécifique à chaque service et ceci conditionne la méthode d'estimation du volume consommé (Tableau 8).

<i>Service</i>	<i>Données disponibles</i>	<i>Traitements pour obtenir le Volume consommé</i>
<b>SEDIF</b>	Volumes annuels par commune et par réseau	Somme des consommations par secteur
<b>CALL</b>	B.D. clientèle: Volume consommé annuel par client + Adresse	a) Affectation des clients aux secteurs b) Somme des volumes consommés par les clients d'un même secteur
<b>Montbéliard</b>	B.D. clientèle: Volume consommé annuel par client + Adresse	a) Affectation des clients aux secteurs b) Somme des volumes consommés par les clients d'un même secteur
<b>St Jean d'Illac</b>	B.D. clientèle: Volume consommé annuel par client + Adresse	a) Affectation des clients aux secteurs b) Somme des volumes consommés par les clients d'un même secteur
<b>Saint Lô</b>	Volume mensuel consommé par secteur pour 2 <sup>e</sup> semestre 2010	2 fois le total des volumes mensuels consommés du 2 <sup>e</sup> semestre

Tableau 8 : Evaluation du volume annuel consommé pour chaque service

### II.1.1.4 Le calcul de la pression moyenne journalière

Parmi plusieurs méthodes d'évaluation de la pression moyenne d'un secteur proposées par [Sissoko, 2010], la méthode hydraulique est la plus adéquate pour cette étude.

À partir d'un modèle hydraulique calé sur des données de terrain (journée moyenne ou journée de pointe), on obtient la demande et la pression à chaque nœud  $i$  du réseau et à chaque pas de temps de la simulation. On calcule la pression moyenne sur la durée de la simulation à chaque nœud, notée  $P_i$ .

- Pression pondérée par la consommation (= demande)

$$P_{\text{moy pondérée}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \text{Consommation journalière}_i}{\sum_{i=1}^n \text{Consommation journalière}_i}$$

- Pression pondérée par le linéaire

A chaque nœud est attachée la demi-longueur  $l_{1/2}$  des tronçons qui le relient à ses nœuds voisins.

$$P_{\text{moypondérée}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times l_{1/2i}}{\sum_{i=1}^n l_{1/2i}}$$

## II.1.2 Principaux résultats

On cherche à lier le volume perdu aux caractéristiques structurelles du réseau. On suppose que le nombre de branchements et la pression ont un rôle prépondérant.

### Rappel :

- ✓ Le volume perdu est la différence entre le volume mis en distribution et le volume consommé (facturé).
- ✓ La pression est calculée par modélisation hydraulique avec pondération par la consommation.
- ✓ Le nombre de branchements du secteur est le résultat de la phase de traitement des données, détaillée au paragraphe précédent.

### II.1.2.1 Analyses uni-variées

#### a) Choix du Nombre de branchements plutôt que du Linéaire de canalisations

Le linéaire de réseau est un paramètre récurrent des indicateurs de performance existants car c'est une donnée facilement accessible et représentative de la taille du réseau.

Cependant, l'importance du réseau est liée à son utilisation, autant sinon plus, qu'à sa longueur physique. En effet, le nombre d'équipements du réseau et leurs sollicitations impactent également la performance du réseau.

C'est pourquoi nous nous intéressons au lien entre nombre de branchements et linéaire, c'est à dire à la densité de branchements.

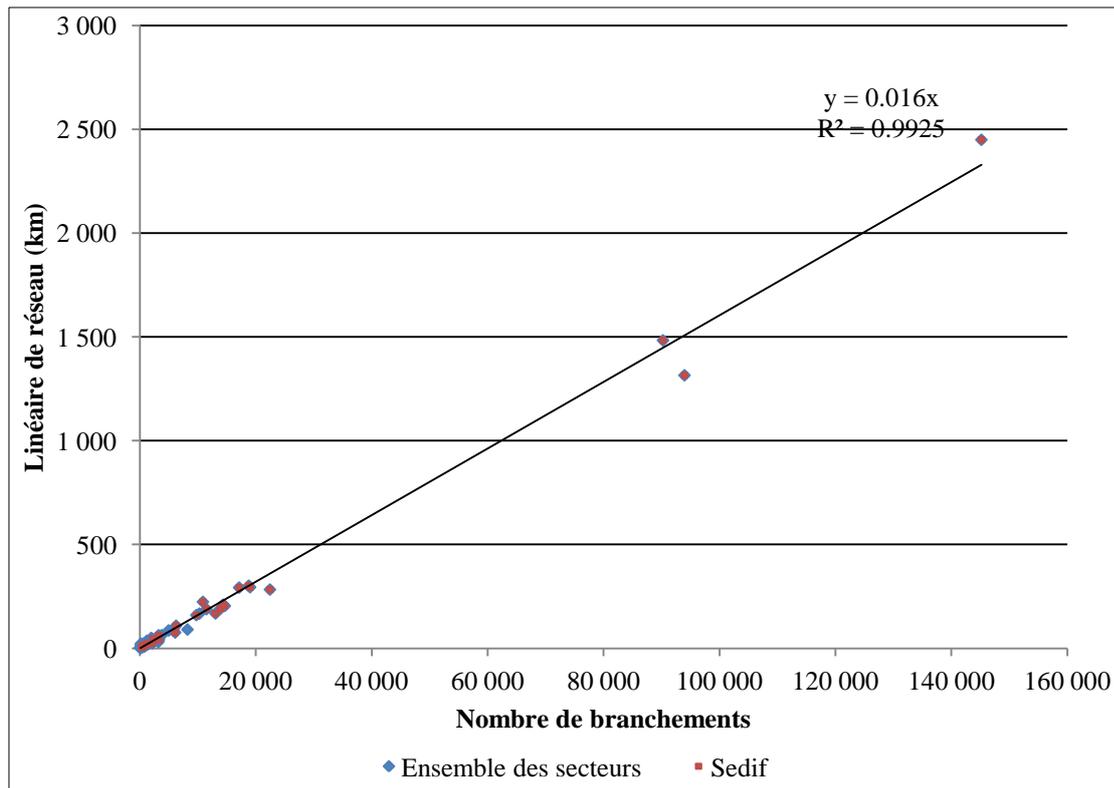


Figure 2: Relation entre le nombre de branchements et le linéaire de réseau

La Figure 2 montre que trois secteurs du SEDIF influencent fortement les résultats. La Figure 3 représente les mêmes paramètres en excluant ces trois secteurs.

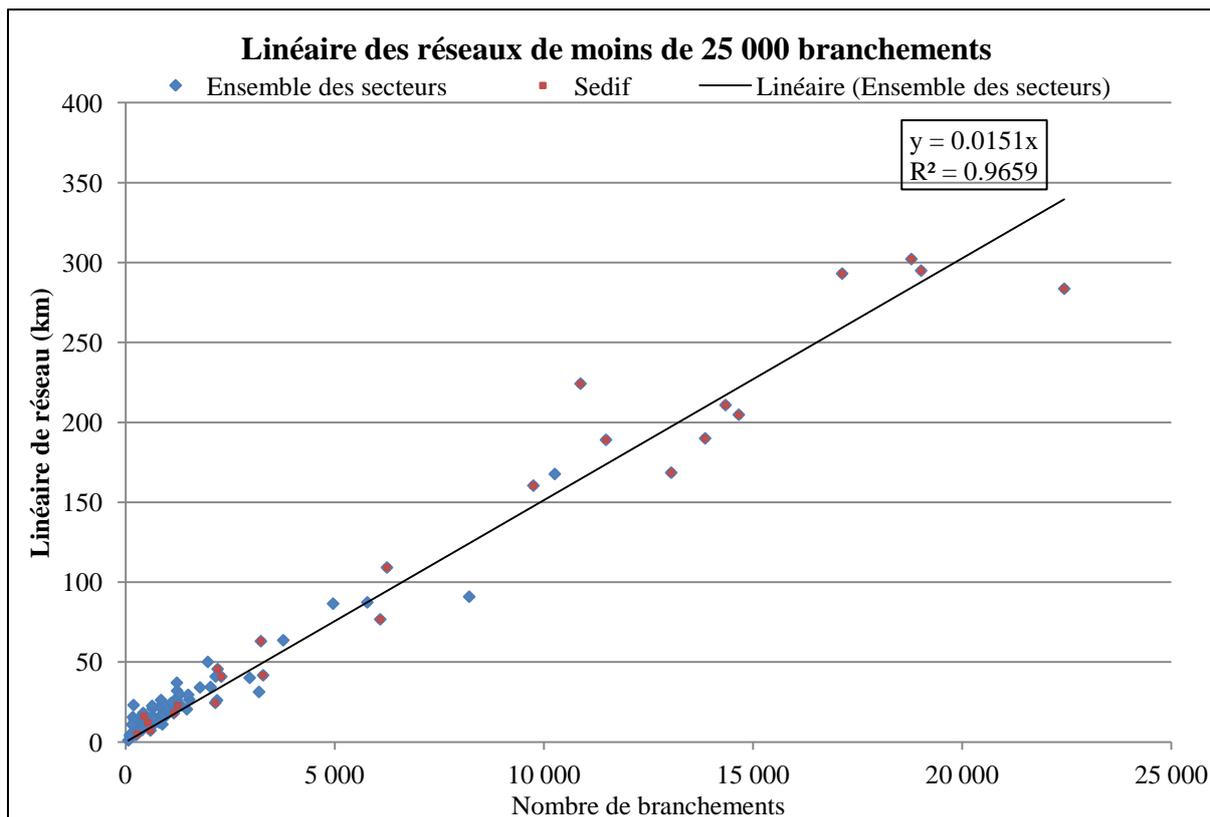


Figure 3: Relation entre le nombre de branchements et le linéaire de réseau, secteurs <25 000 brcht

On observe une forte corrélation entre les deux paramètres. De façon assez contradictoire, l'étude de la représentativité des terrains menée par [Sandraz, 2012] avait montré des densités de branchements variées. Une explication possible est que la variété des densités de branchements concerne essentiellement des secteurs de petite taille.

Compte tenu de la forte corrélation entre nombre de branchements et linéaire, étudier les liens du volume de perte avec l'un revient à l'étudier avec l'autre. Pour rester cohérent avec les résultats antérieurs à la présente étude, il a été choisi de privilégier le nombre de branchements.

b) L'influence du Nombre de branchements sur le Volume perdu

Nous nous intéressons donc à mettre en évidence la contribution du nombre de branchements au volume de perte (Figure 4 et Figure 5).

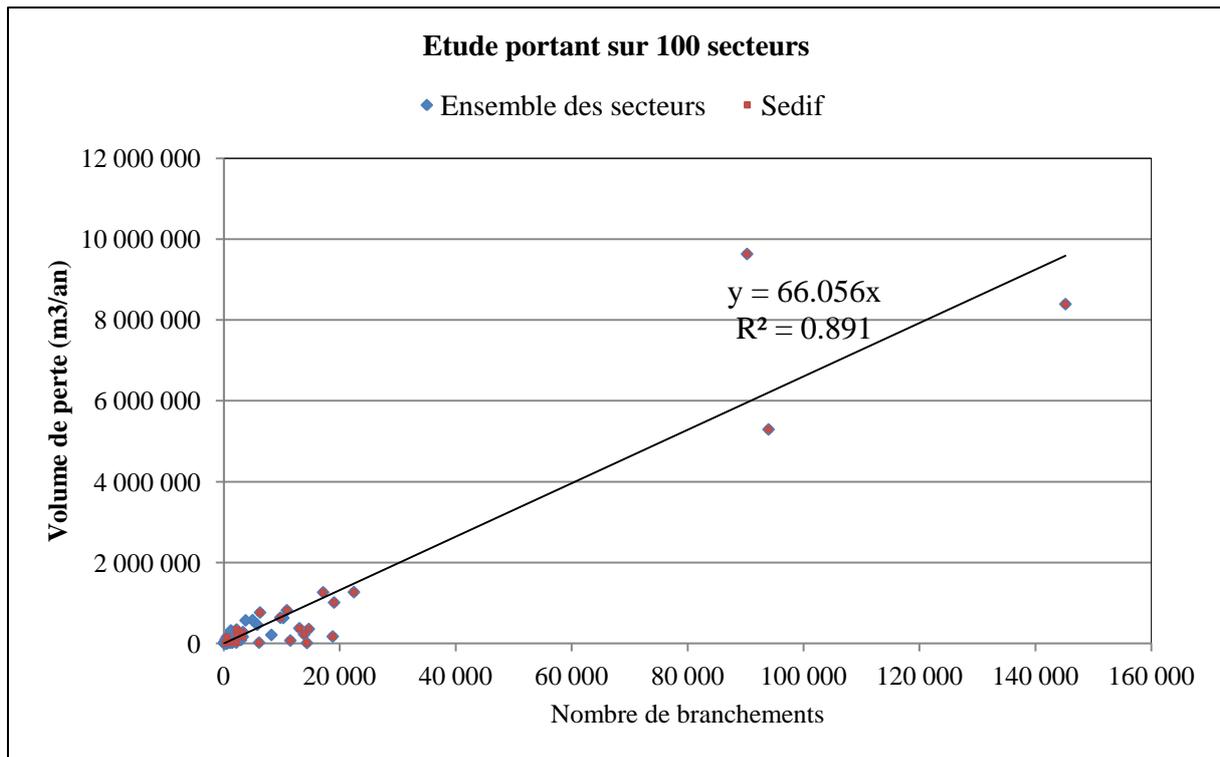


Figure 4: Relation entre le nombre de branchements et le volume de perte

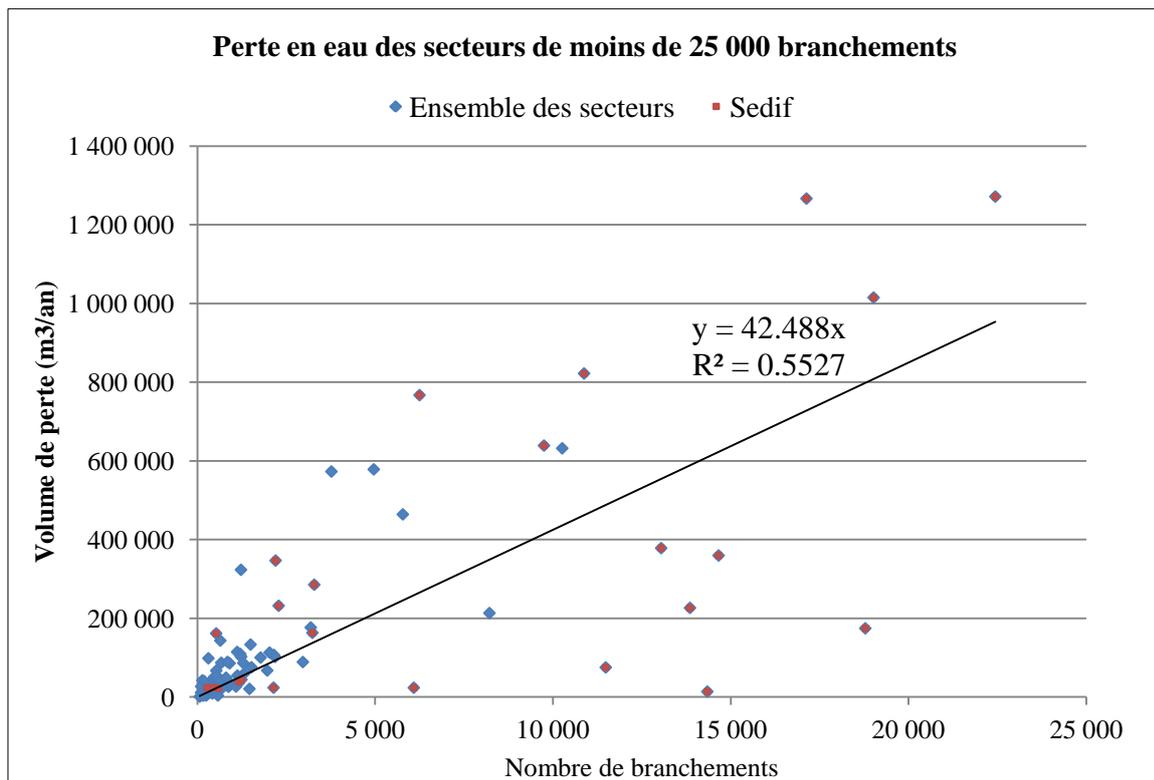


Figure 5: relation entre le nombre de branchements et le volume de perte, secteurs <25 000 brcht

Le nombre de branchements et le volume de pertes sont corrélés positivement. La valeur médiocre de la qualité d'ajustement ( $R^2$ ) de la courbe linéaire de tendance indique toutefois clairement que les branchements n'expliquent pas à eux seuls les volumes perdus.

c) Lien entre la pression moyenne de secteur et le volume perdu

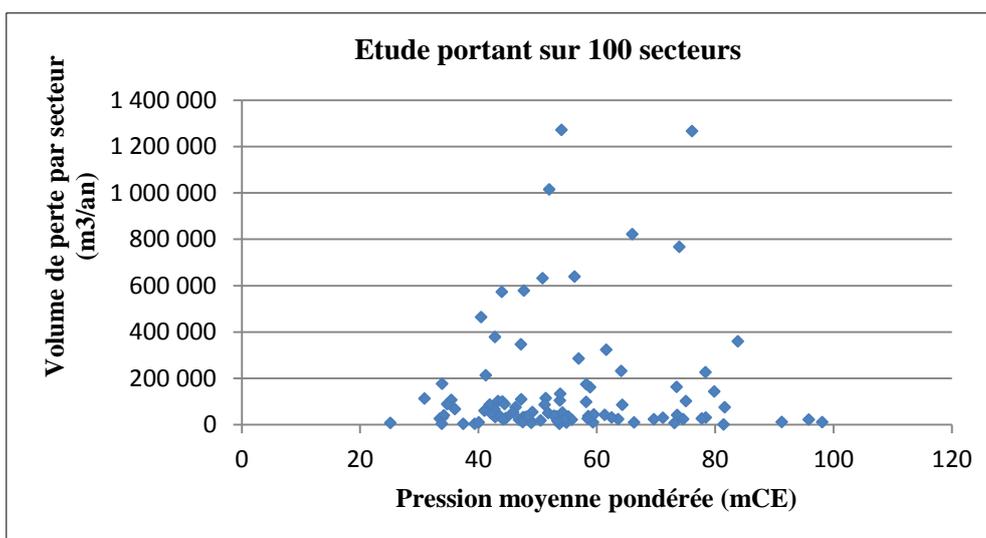


Figure 6: Relation entre la pression moyenne pondérée et le volume de perte

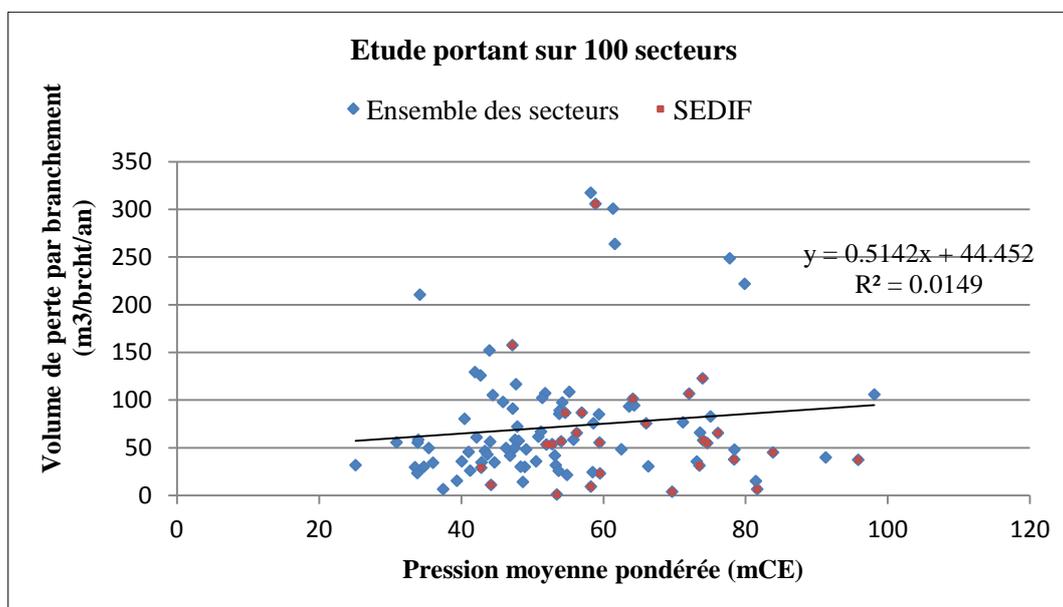


Figure 7: Relation entre la pression moyenne pondérée et le volume de perte par branchement

La pression moyenne pondérée par la demande du secteur n'a pas d'impact visible directement ni sur le volume de perte du secteur (Figure 6), ni sur le volume de perte par branchement (Figure 7).

d) Impact des caractéristiques du réseau sur le volume de perte

Contrairement aux idées reçues, il n'y a aucune corrélation directe entre le volume de pertes des réseaux étudiés et l'année de pose moyenne (Figure 8) ou le taux de défaillance des canalisations (Figure 9).

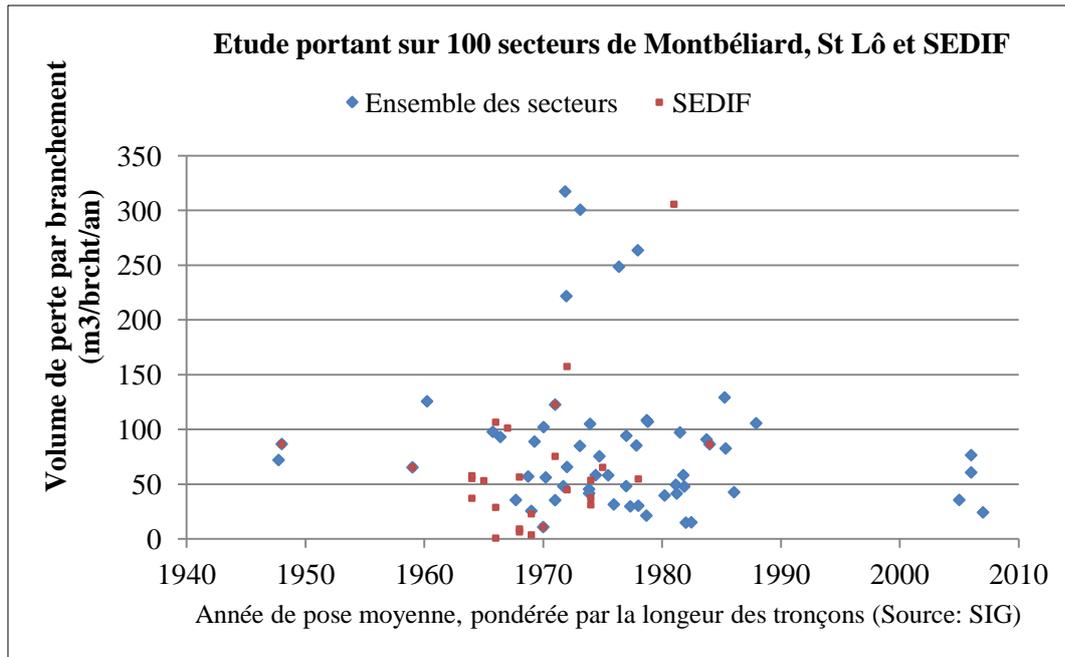


Figure 8: Relation entre l'année de pose moyenne et le volume de perte par branchement

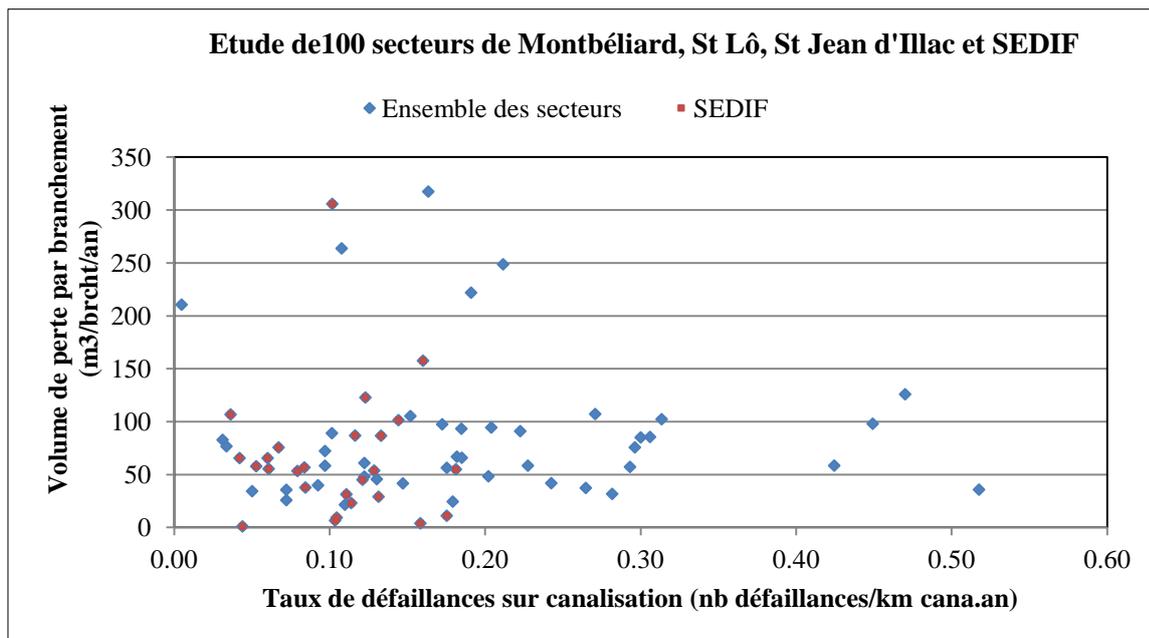


Figure 9: Relation entre le taux de défaillance sur canalisation et le volume de perte par branchement

De même, les volumes perdus ne sont significativement corrélés ni avec le pourcentage de linéaire en fonte (Figure 10), ni avec le diamètre moyen des canalisations (Figure 11).

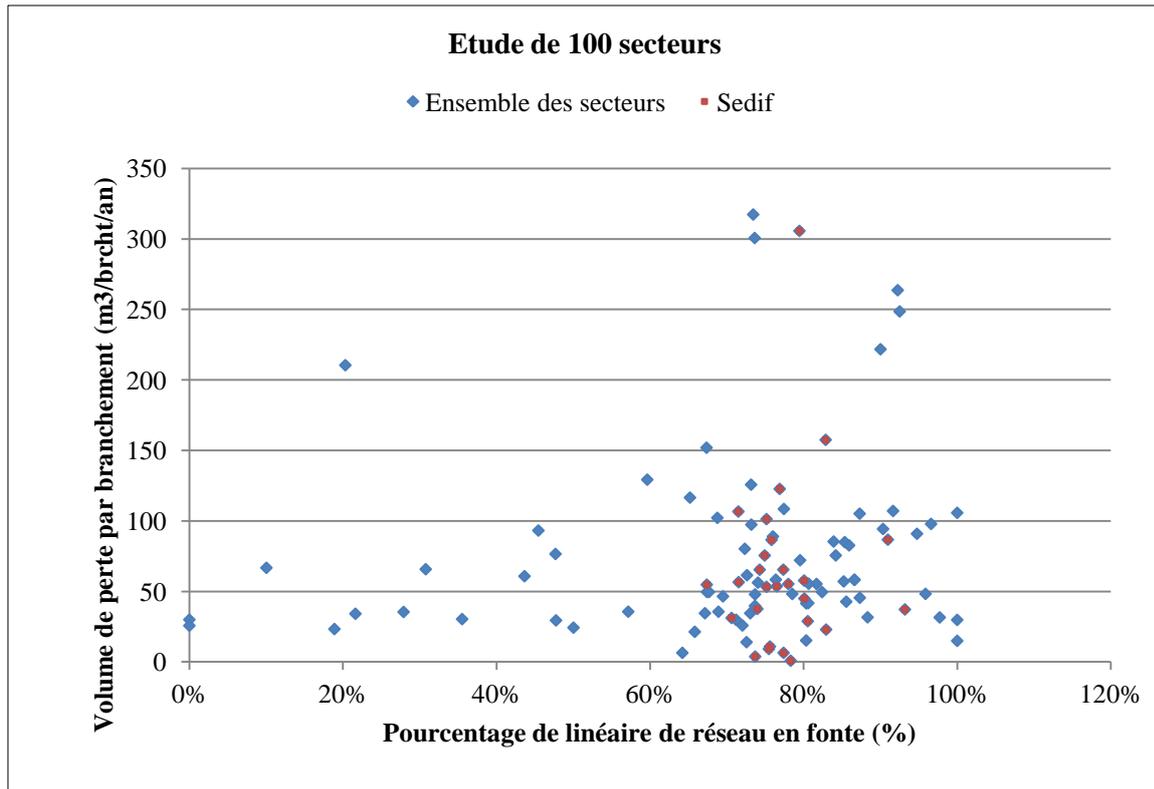


Figure 10: Relation entre la présence de fonte et le volume de perte par branchement

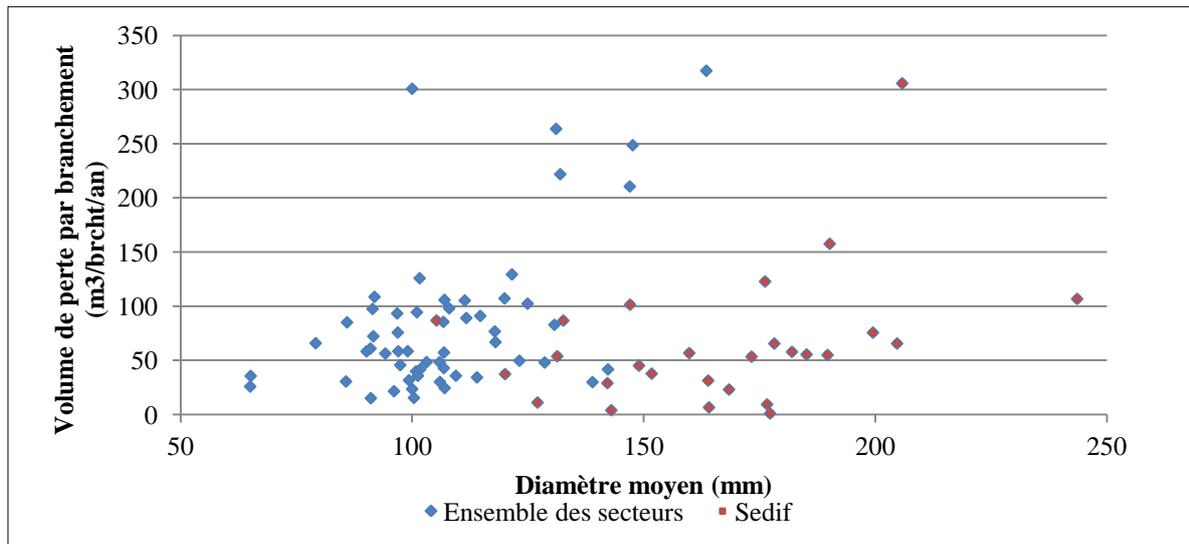


Figure 11: Relation entre le diamètre moyen et le volume de perte par branchement

### II.1.2.2 Modélisation du volume de perte

#### a) Modèle de M. LE GLATIN

L'ensemble des variables structurelles du réseau ont été étudiées dans des matrices de corrélation. Une méthode statistique de régression multiple a été employée pour déterminer les variables permettant de maximiser l'ajustement statistique ( $R^2$ ) du modèle aux données terrain (Tableau 9).

<i>Variables étudiées</i>	<i>Variables retenues</i>
Nombre de branchements, $N_b$	Nombre de branchements, $N_b$

<i>Variables étudiées</i>	<i>Variables retenues</i>
Pression moyenne (mCE), <b>P</b>	Pression moyenne (mCE), <b>P</b>
Diamètre moyen des canalisations (mm), $\phi_{\text{moy}}$	Diamètre moyen des canalisations (mm), $\phi_{\text{moy}}$
Taux de défaillances branchements (défaillance/km/an), <b>T<sub>b</sub></b>	Taux de défaillances branchements (défaillance/km/an), <b>T<sub>b</sub></b>
Taux de fonte (%), <b>T<sub>f</sub></b>	Taux de fonte (%), <b>T<sub>f</sub></b>
Linéaire de réseau (km), <b>L</b>	

Tableau 9: Variables étudiées et retenues pour le modèle du volume de perte [Le Glatin, 2011]

Finalement, le volume perdu peut être approché par l'expression suivante dont les coefficients sont dans le Tableau 10:

$$\text{Ln}(\text{VP}) = \text{Constante} + A \times \text{Ln}(N_b) + B \times \text{Ln}(P) + C \times \phi_{\text{moy}} + D \times T_b + E \times T_f$$

	A	B	C	D	E	Constante	R <sup>2</sup>	Nombre de valeurs utilisées dans l'étude
Tous secteurs	1,26	1,52	1,57	0,38	0,40	-11,34	0,64	90

Tableau 10: Valeurs statistiques des coefficients, constante et R<sup>2</sup> du modèle [Le Glatin, 2011]

### b) Modèle de N. TANGEAOU

La démarche est identique mais les variables étudiées sont différentes. Parmi les données disponibles des réseaux de cette partie de l'étude, seule l'année de pose moyenne ne satisfait pas au test statistique réalisé sur les volumes de perte des 5 réseaux étudiés (Tableau 12).

$$\text{Ln}(\text{VP}) = \text{Cte} + \alpha \cdot \text{Ln}(P) + \beta \cdot \text{Ln}(N_b) + \gamma \cdot (T_c) + \delta \cdot (\text{Année de pose moyenne})$$

Source	Valeur	Ecart-type	t	Pr >  t
Constante	15,982	24,315	0,657	0,512
Log Pression moyenne (mCE)	1,792	0,543	3,300	0,001
Log Nb branchements	0,929	0,084	11,084	< 0,0001
Taux de défaillance canalisation	2,714	0,970	2,799	0,006
Année de pose moyenne	-0,010	0,012	-0,791	<b>0,431</b>

Tableau 11: Significativité des variables après le premier test de régression

Les grandeurs conservées sont donc :

- Nombre de branchements,  $N_b$
- Pression moyenne (mCE),  $P$
- Taux de défaillances des canalisations (Nombre de défaillances/km/an),  $T_c$

Le linéaire et le nombre de branchements portent la même information (forte corrélation entre eux). Afin de ne pas biaiser le modèle, seul le nombre de branchements est donc conservé dans l'expression suivante du volume de perte:

$$\text{Ln}(\text{VP}) = \text{Cte} + \alpha \times \text{Ln}(P) + \beta \times \text{Ln}(N_b) + \gamma \times T_c$$

Les coefficients sont déterminés statistiquement pour les réseaux 1 et 3, après avoir vérifié que la p-value est satisfaisante (Tableau 12). On obtient R<sup>2</sup> ajusté=0,56 (Tableau 13).

Variable	Log( $N_b$ )	Log( $P$ )	$T_c$
P-value	< 0,0001	0,002	0,007

Tableau 12: P-value des variables utilisées dans le modèle du volume de perte, [Tangeaoui, 2012]

Coefficients	$\beta$	$\alpha$	$\gamma$	Cte
Valeurs	0,947	1,74	2,631	-3,157

Tableau 13: Valeurs statistiques des coefficients et constante du modèle du volume de perte, [Tangeaoui, 2012]

c) Modèle simplifié de A.C. Sandraz

L'analyse uni-variée des paramètres, autres que le nombre de branchements, avec le volume de perte n'a pas montré de lien significatif. Afin de garder le modèle le plus simple possible, seuls le nombre de branchements et la pression ont été conservés. Le choix d'utiliser la pression dans le modèle, malgré l'absence de corrélation forte avec le volume perdu, est dû à des expériences antérieures ayant montré qu'une réduction de pression entraîne une diminution du volume de fuites. De plus, il s'agit de la seule information « non structurelle » sur le réseau. La pression apporte donc des informations non redondantes au modèle.

$$VP = \text{Constante} \times P^\alpha \times N_b^\beta$$

Afin de déterminer les coefficients des variables et la constante, un travail statistique sur le logarithme du volume de perte est réalisé.

Le résultat de l'étude du modèle confirme le nombre de branchements comme étant la variable prépondérante dans l'explication du volume de perte. L'ajout de la pression dans le modèle permet de réduire la valeur de la constante mais le gain sur l'ajustement du modèle est faible.

L'expression finale est :

$$VP = 65 \times P^{0.3} \times N_b^{0.8}$$

$$R^2=0.59$$

### II.1.3 Approche du volume perdu basé sur la seule sectorisation

A ce stade d'avancement de l'étude, les résultats obtenus sur le lien entre la pression et les pertes sont peu concluants. On peut donc s'interroger sur la validité de nos estimations du volume de perte. Un des points faibles de la méthode précédemment utilisée est l'usage de deux sources d'information indépendantes (le fichier clientèle et la sectorisation). Le raccordement spatial (affectation des usagers aux secteurs) et la synchronisation temporelle (annualisation des volumes consommés) des données peuvent être entachés d'erreurs importantes.

Pour essayer de s'affranchir de ce problème, Irstea s'est proposé d'essayer d'évaluer les pertes en utilisant uniquement les données de la sectorisation. Ce travail a été réalisé avec les données de la Communauté d'Agglomération du pays de Montbéliard.

Pour évaluer le volume perdu on s'intéresse au débit nocturne, période durant laquelle la consommation est minimale. Cette méthode, qui présente l'avantage de mobiliser une source d'information unique, trouve ses limites dans l'évaluation de la consommation nocturne.

A partir de cette nouvelle approche, deux axes d'investigation ont été abordés :

- Julie Pillot s'est intéressé à la comparaison du volume annuel perdu par secteur estimé par les deux méthodes (Différence des volumes annuels distribués et consommés, Débit de nuit);
- Dikra Khedhaouiria s'est penchée sur l'analyse de la distribution des débits nocturnes moyens hebdomadaires et son lien éventuel avec la pression.

### II.1.3.1 Comparaison des estimations concurrentes du volume annuel perdu

Nous disposons des chroniques de débit de nuit, obtenues par la sectorisation, sur chacun des secteurs de la communauté d'Agglomération du pays de Montbéliard.

Le débit de nuit moyen annuel  $q_{nuit}$  est la somme de la consommation nocturne moyenne annuelle  $q_{c nuit}$  et des pertes nocturnes moyennes annuelles  $q_{p nuit}$ . On suppose que le débit de perte nocturne est équivalent au débit de perte en journée et à peu près constant. Le volume de perte peut donc être approché en multipliant le débit de perte nocturne horaire par le nombre d'heures de fonctionnement de l'année (soit 24 h pendant 365 j). On note  $V_+ = q_{nuit} \times 24 \times 365$  le volume de nuit annualisé, qui est supérieur au volume de perte car  $q_{nuit} = q_{c nuit} + q_{p nuit}$ .

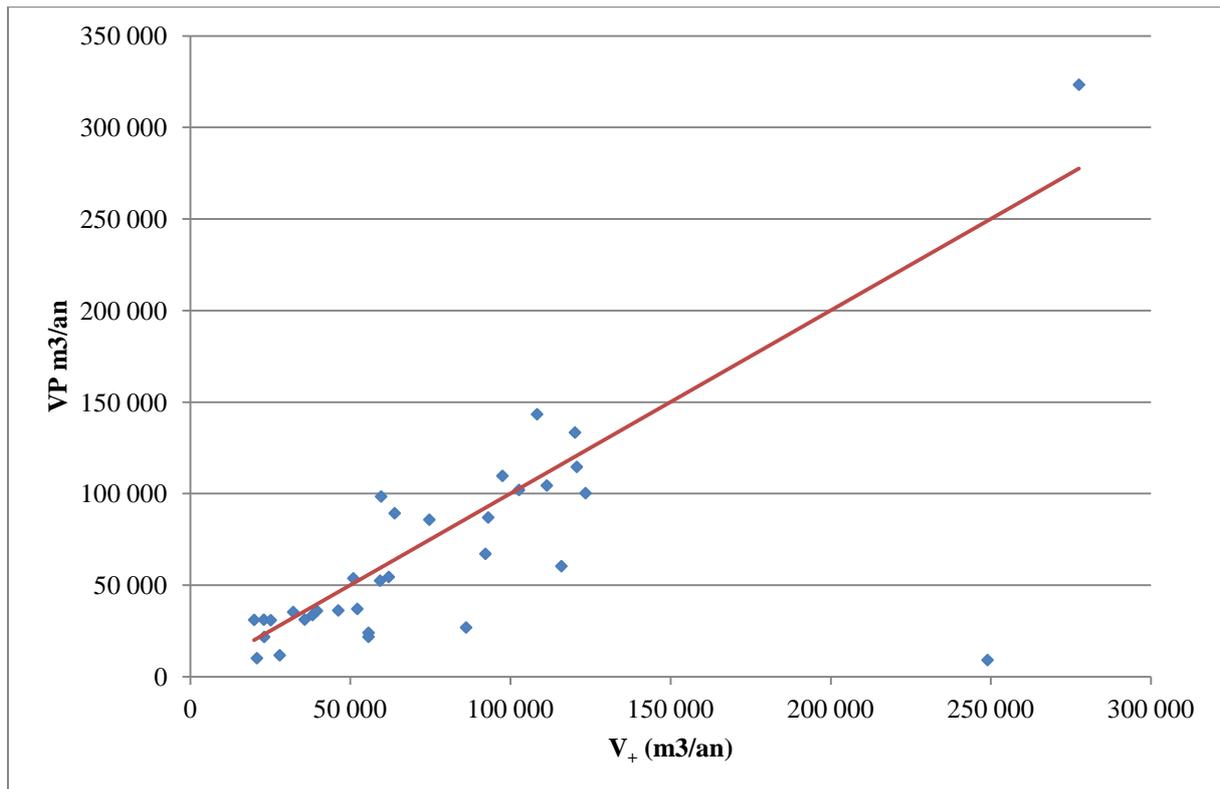


Figure 12 Volume nocturne et volume perdu obtenu par les consommations des clients

Logiquement, tous les points devraient être en dessous de la 1<sup>ère</sup> bissectrice, représentée en rouge sur la Figure 12. Lorsque ce n'est pas le cas, soit le volume de perte du secteur est surestimé, soit le débit de nuit est erroné. On constate ce problème pour un nombre important de secteurs.

Une deuxième approche est ensuite mise en place. Elle consiste à estimer le débit de consommation nocturne moyen  $q_{c nuit}$  en fonction du nombre d'abonnés afin de calculer par différence le volume de perte noté  $VP_{nuit}$ . [Farley, 2001] propose  $q_{c nuit} = \frac{1.7 \times N_{ab}}{1000}$  dont on déduit

$$VP_{nuit} = 24 \times 365 \times \left( q_{nuit} - \frac{1.7 \times N_{ab}}{1000} \right)$$

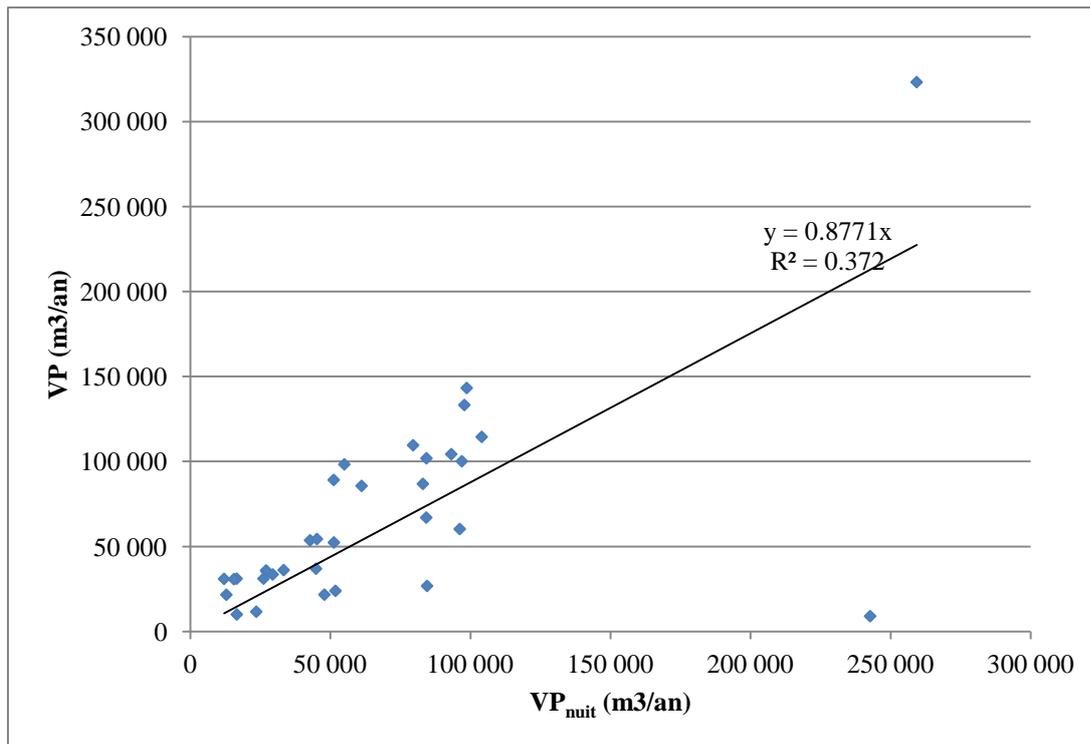


Figure 13 Comparaison des volumes perdus obtenus par sectorisation et par les consommations des clients

La Figure 13 représente VP en fonction de  $VP_{\text{nuit}}$ . La pente de la droite de régression linéaire passant par l'origine est sensiblement différente de 1 (0.88) et son ajustement est de piètre qualité. Cela nous conduit à émettre de sérieux doutes sur la fiabilité de nos estimations du volume de perte par l'une ou l'autre méthode.

De plus, les résultats sur le lien entre la pression moyenne d'un secteur et le volume de perte ne sont pas meilleurs avec  $VP_{\text{nuit}}$  qu'avec VP (Figure 14).

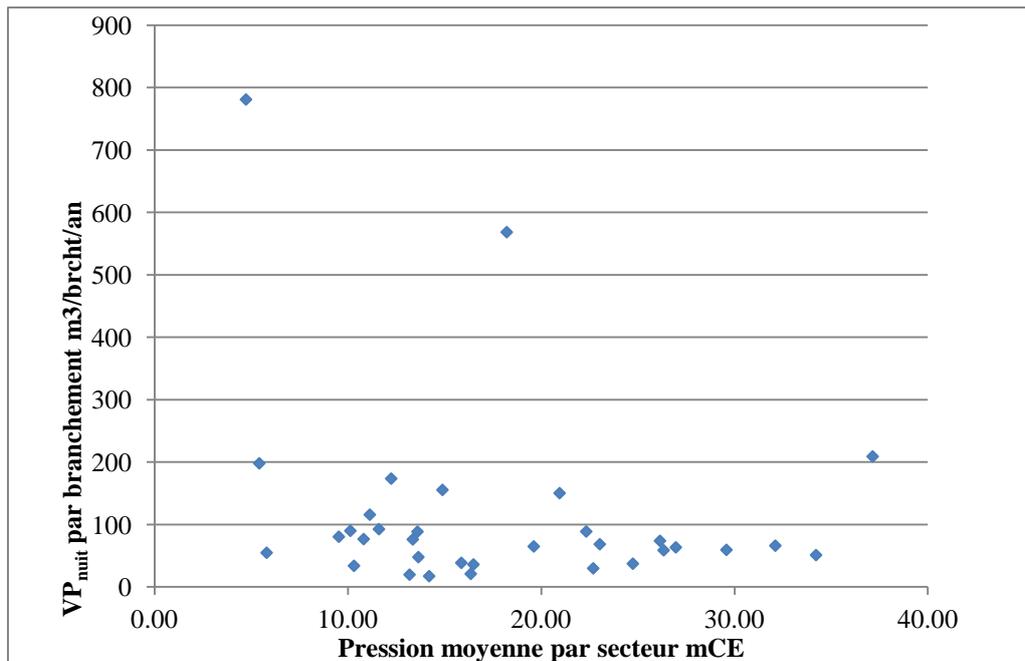


Figure 14: Volume perdu obtenu par sectorisation, en fonction de la pression moyenne du secteur

### II.1.3.2 Analyse de la distribution des débits moyens nocturnes hebdomadaires

Pour chaque secteur on évalue chaque semaine le débit nocturne moyen hebdomadaire  $q_{\text{nuithebd}}$ .

Le débit nocturne hebdomadaire minimal enregistré sur l'année, appelé débit de référence, est noté  $q_{\text{ref}}$ . Il correspond pour chaque secteur à un niveau minimum de fuites observé.

$q_{\text{max}}$  est, a contrario, le débit de nuit hebdomadaire maximal enregistré au cours de l'année.

Pour 21 secteurs de Montbéliard, le débit de nuit hebdomadaire est normalisé selon la formule

$$\text{suivante : } q_{\text{normé}} = \frac{q_{\text{nuithebd}} - q_{\text{ref}}}{q_{\text{max}} - q_{\text{ref}}}; q_{\text{normé}} \in [0, 1]$$

Les présupposés de l'analyse de la distribution des débits normés sont les suivants :

- A pression faible, on s'attend à ce qu'en cas de fuite le débit de nuit s'écarte progressivement de  $q_{\text{ref}}$  (ou  $q_{\text{normé}}$  s'écarte progressivement de 0). La courbe de répartition des débits normés doit donc être assez proche de la première bissectrice.
- A pression élevée, on suppose que les fuites atteignent vite des débits importants mais sont réparées rapidement. On s'attend donc à une courbe de répartition des débits de nuit normés avec deux paliers marqués à  $q_{\text{normé}} \approx 0$  et  $q_{\text{normé}} \approx 1$ .

Cependant, *in fine*, les courbes de répartition obtenues n'ont pas confirmé ces hypothèses (Figure 15).

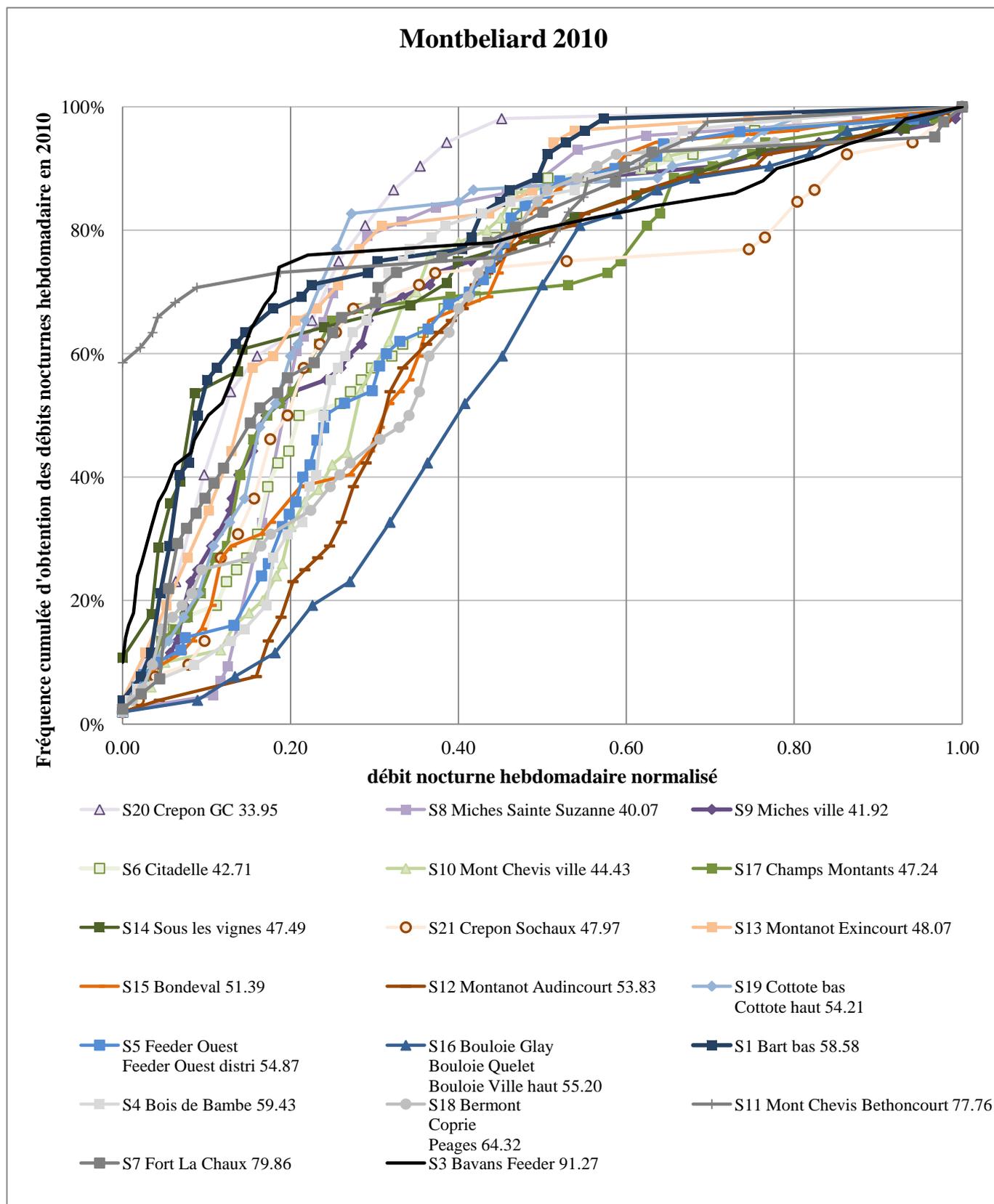


Figure 15: Courbes de répartition des débits moyens nocturnes hebdomadaires normés

Cette étude ne permet donc pas non plus de mettre en évidence un lien net entre la pression et les pertes.

## II.2 Définition d'un Indice de Réduction de la Pression, IRP

L'objectif est ici de déterminer une expression du potentiel de réduction de la pression sur une zone de desserte, en prenant en compte les contraintes technico-économiques d'exploitation.

Ce travail a été réalisé par Irstea [Ben Hassen, 2012] sur 10 secteurs répartis sur les réseaux du SEDIF, du Communauté de Lens Liévin (CALL) et de la Communauté d'Agglomération du Pays de Montbéliard. L'ensemble des données sont fournies par Véolia.

### II.2.1 Modélisation de la réduction de pression

La première étape de ce travail a consisté à utiliser des modèles hydrauliques SynerGEE et EPANET pour simuler des régulations de pression. Le but était d'observer le comportement des réseaux afin de définir une méthode de détermination des pressions minimales que l'on peut atteindre, sans mettre en danger le service.

#### II.2.1.1 Simulation de la régulation de pression d'un secteur

Les logiciels de modélisation hydraulique EPANET, SynerGEE et Porteau ont d'abord été testés. Ils présentent des spécificités d'utilisation et de calcul mais les résultats obtenus lorsque l'on introduit des appareils de régulation de pression sont comparables.

La méthode employée pour calculer la pression moyenne d'un secteur est basée sur la pression calculée par le modèle hydraulique pondérée par la consommation [Sissoko, 2010].

En pratique, il existe plusieurs techniques pour réduire la pression (Tableau 14).

Définitions :

- $P_{\text{critique}}$  : point (nœud) du réseau de plus faible pression ;
- $P_{\text{limitant}}$  : point de la zone locale de plus faible pression.

<i>Mode de réduction de la pression</i>	<i>Echelle</i>	<i>Point limitant le potentiel de réduction</i>	<i>Technologie adaptée</i>
<b>Réduction</b>	Globale	la pression minimale journalière à $P_{\text{critique}}$	Stabilisateur de pression aval.
	Localisée	la pression minimale journalière à $P_{\text{limitant}}$	Consigne : pression aval.
<b>Modulation</b>	Globale	l'amplitude de la variation de pression à $P_{\text{critique}}$	Stabilisateur de pression aval, asservit :
	Localisée	l'amplitude de la variation de pression à $P_{\text{limitant}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Au temps</li> <li>• Au débit</li> <li>• A la pression en un point du réseau (critique ou limitant)</li> </ul>

Tableau 14: Modes de réduction de la pression

Les possibilités de réduction de pression des secteurs étudiés ont été analysées de façon itérative. Une modélisation est réalisée à chaque ajout d'un élément de régulation afin d'en évaluer l'impact. La modification est validée si elle permet une réduction d'au moins 5 mCE de la pression moyenne journalière de la zone d'influence de l'appareil.

Il faut avoir conscience des éléments suivants :

- la méthode repose sur une modélisation (numérique) qui ne prend pas en compte les contraintes d'urbanisme telles que la présence d'immeubles pour lesquels la pression au nœud doit être supérieure à 2 bars pour assurer le service minimum.

- La solution optimale de régulation de la pression peut se faire au détriment de la sécurité de l’approvisionnement car elle peut conduire à isoler des zones (démaillage par ajout de vannes). Pour contourner ce problème, il faut définir un stabilisateur de pression aval « maître » et substituer aux vannes de sectionnement des stabilisateurs de pression aval « esclaves ».
- L’ensemble des équipements doivent pouvoir fonctionner simultanément. Cela suppose d’assurer :
  - Une perte de charge minimale pour l’ouverture de la vanne de 0.4 bar ;
  - Une vitesse d’écoulement optimale dans le stabilisateur : entre 3 et 5 m/s ;
  - Une ouverture des stabilisateurs avals d’environ 70% en condition normale de fonctionnement ;
  - Un double mode de fonctionnement du stabilisateur dans le cas d’une variation trop importante des débits (par exemple entre le jour et la nuit). Une solution est de mettre en série deux stabilisateurs avals de diamètres différents et avec des consignes différentes ;

### II.2.1.2 Mise en œuvre de la méthode Analyse Coût-Efficacité (ACE)

La méthode itérative de réduction de la pression du secteur pouvant être poussée très loin, la question se pose de savoir quel niveau de réduction retenir.

Une première solution consiste à définir un critère technico-économique. Il a été choisi d’utiliser un indicateur coût/efficacité exprimé en euros par m<sup>3</sup> d’eau économisé.

Afin d’estimer les volumes économisés en passant de la pression initiale à la pression minimisée  $P_{\min}$ , nous avons eu recours à la relation couramment utilisée qui exprime le lien entre débit de fuite et

pression [Thornton, 2003] : 
$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{N_1}$$

Avec  $Q_0$  et  $Q_1$  les volumes de fuites, aux pressions  $P_0$  et  $P_1$ , et  $N_1$  un exposant de fuite compris entre 0.5 et 2.5 qui dépend du contexte. Classiquement, en l’absence d’évaluation précise de  $N_1$ , on considère  $N_1=1$ , relation linéaire du débit de fuite et de la pression.

On calcule donc  $Q_1$  le volume de fuite à  $P_1$  puis  $Q_0-Q_1$ , les volumes d’eau économisés.

Cette grandeur représente l’efficacité de la solution.

On évalue ensuite le Coût Moyen Annuel (CMA) d’investissement et de maintenance des équipements de régulation de pression correspondant à  $P_{\min}$  :

$$CMA = (ds + dv) + (Is + Iv) \times \frac{a}{1 - (1 + a)^{-N}}$$

La définition des variables et les valeurs utilisées pour l’étude sont indiquées dans le Tableau 15.

Taux d’actualisation $a$	0,04
Investissement stabilisateur et chambre ( $Is$ ) €	9 000
Maintenance stabilisateur ( $ds$ ) €	350
Investissement vanne ( $Iv$ ) €	450
Maintenance vanne ( $dv$ ) €	0
Durée de vie ( $N$ ) ans	30

Tableau 15: Valeurs prises pour les paramètres du calcul du Coût Moyen Annuel de la régulation de pression

Le coût unitaire des volumes économisés entre deux simulations  $s-1$  et  $s$  est donc :  $\frac{CMA}{Q_{s-1} - Q_s}$  en €/m<sup>3</sup>.

Avec

$Q_{s-1}$ , volume annuel de pertes estimé pour la simulation s-1

$Q_s$ , volume annuel de pertes estimé pour la simulation s

Ces volumes sont déduits du volume annuel de pertes évalué en situation initiale en utilisant la relation volume / pression décrite plus haut.

On considère que l'on a atteint la solution optimisée lorsque pour l'itération suivante cette valeur dépasse le coût marginal de production (0.2-0.3 €/m<sup>3</sup>). Cette pression de rentabilité économique est appelée  $P_{minéco}$ .

### II.2.1.3 Détermination de la pression minimale techniquement atteignable

L'analyse des résultats obtenus sur les différents secteurs étudiés fait apparaître que la relation entre la pression moyenne pondérée et le nombre de stabilisateurs ajoutés pour atteindre cette pression à une tendance hyperbolique. Ainsi la pression minimum tend vers une limite, quand le nombre de stabilisateurs augmente.

En effet, en traçant pour chaque secteur la courbe  $P_{moypondéré}$  en fonction de  $\frac{1}{\text{Nombre de stabilisateurs} + 1}$  on obtient une régression linéaire avec un très bon ajustement aux données.

L'ordonnée à l'origine de cette régression linéaire est la limite vers laquelle tend la pression (Figure 16) que l'on appelle  $P_{mintechnique}$ .

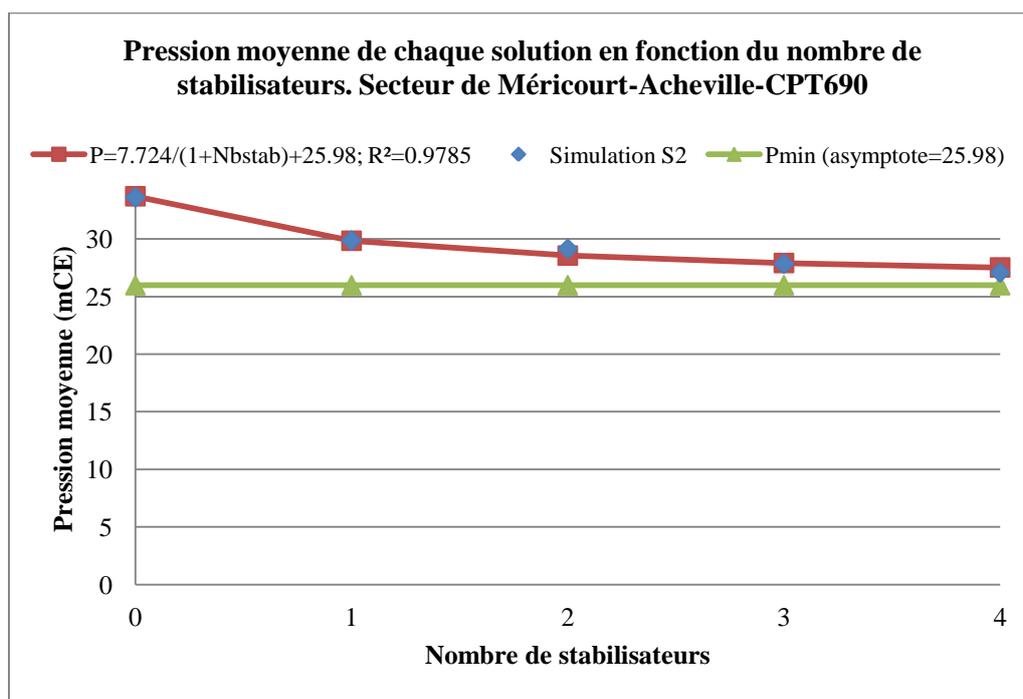


Figure 16: Pression moyenne en fonction du nombre de stabilisateurs

### II.2.2 Estimation des pressions minimales à partir de la distribution des pressions

La deuxième phase de cette étude est la recherche d'une méthode d'évaluation des pressions minimales permettant de se dispenser de l'étude hydraulique complète.

On cherche à exprimer  $P_{mintechnique}$  et  $P_{minéco}$  sans passer par la simulation d'ajout de stabilisateurs de pression au modèle.

On souhaite utiliser les informations fournies par l'étude de répartition dans le temps et l'espace des pressions, à savoir :

- La pression critique,  $P_{\text{critique}}$  : Pression minimale observée sur l'ensemble du secteur ;
- 1<sup>er</sup> décile ( $P_{10\%}$ ), médiane ( $P_{50\%}$ ), 9<sup>e</sup> décile ( $P_{90\%}$ ) de la distribution des pressions moyennes journalières à chaque nœud ;

Les principaux résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau 16.

Relations	<i>Régressions passant par l'origine</i>		<i>Régressions avec ordonnée à l'origine non nulle</i>	
	Equation	R <sup>2</sup>	Equation	R <sup>2</sup>
$P_{\text{moypond}} - P_{\text{minéco}} = f(P_{10\%} - 20)$	$y = 0,6036x$	0,80	$y = 0,6467x - 1,2924$	0,81
$P_{\text{moypond}} - P_{\text{mintechnique}} = f(P_{10\%} - 20)$	$y = 0,9031x$	0,86	$y = 0,8187x + 2,5251$	0,87
$P_{\text{moypond}} - P_{\text{minéco}} = f(P_{\text{critique}})$	$y = 0,8151x$	0,82	$y = 0,7327x - 6,7068$	0,91
$P_{\text{moypond}} - P_{\text{mintechnique}} = f(P_{\text{critique}})$	$y = 0,777x$	0,90	$y = 0,886x - 3,5487$	0,92

Tableau 16: Résultats de l'étude statistique de l'expression de  $P_{\text{mintechnique}}$  et  $P_{\text{minéco}}$

On constate des résultats équivalents avec  $P_{10\%} - 20$  et  $P_{\text{critique}}$ . Cependant le point critique du réseau peut être isolé et ne pas représenter l'ensemble du secteur. On retient finalement les expressions suivantes :

- La pression de rentabilité économique :  $P_{\text{minéco}} = P_{\text{moypond}} - 0,6 \times (P_{10\%} - 20)$
- Le minimum de pression techniquement atteignable :
  - ✓ Préférentiellement :  $P_{\text{mintechnique}} = P_{\text{moypond}} - 0,9 \times (P_{10\%} - 20)$
  - ✓ Si  $P_{10\%}$  indisponible :  $P_{\text{mintechnique}} = P_{\text{moypond}} - 0,8 \times P_{\text{critique}}$

## II.3 Evaluation des indicateurs

Dans le prolongement des travaux présentés précédemment, VDIF a appliqué les principaux résultats de l'étude sur les secteurs du SEDIF [Sandraz, 2012].

### II.3.1 Evaluation de la pertinence de IPS et IRP

Ont été calculés pour chaque secteur :

- Les minimums de pression  $P_{\text{minéco}}$ ,  $P_{\text{mintechnique}}$  ;
- La pression moyenne pondérée par la demande  $P_{\text{moypondérée}}$  ;
- $IRP = \frac{P_{\text{moy}}}{P_{\text{ref}}}$  avec  $P_{\text{ref}} = P_{\text{mintechnique}}$  ;

#### II.3.1.1 Comparaison de $PMI_{20}$ et de l'IRP

IRP est comparé avec  $PMI_{20}$  pour lequel la pression de référence est la pression standard de confort de 20 mCE (Figure 17).

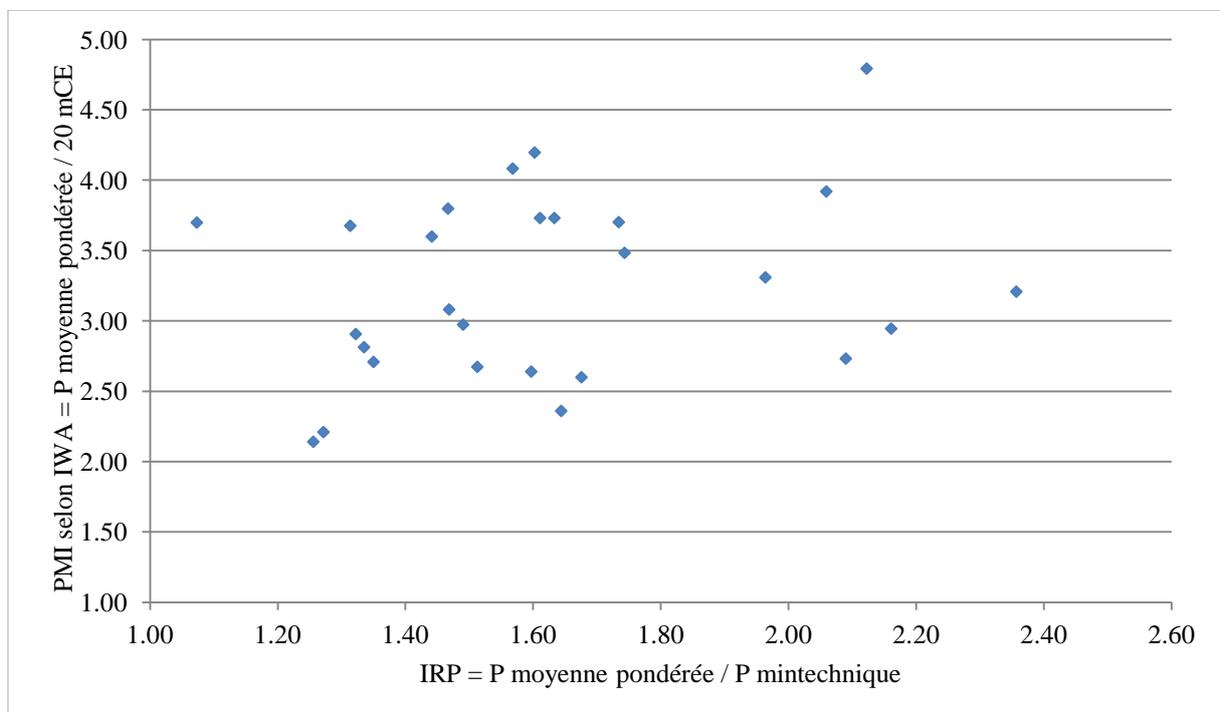


Figure 17: Comparaison PMI et IRP

Alors que  $PMI_{20}$  varie entre 2 et 5, l'IRP est compris entre 1 et 2.5 pour le même échantillon.

#### II.3.1.2 Comparaison de l'IPS et de l'ILI

Il s'agit de tester l'indicateur  $IPS = \frac{VP}{\alpha \times N_b \times P}$ , avec  $\alpha=1$  dans un premier temps et de le comparé à ILI (Figure 18).

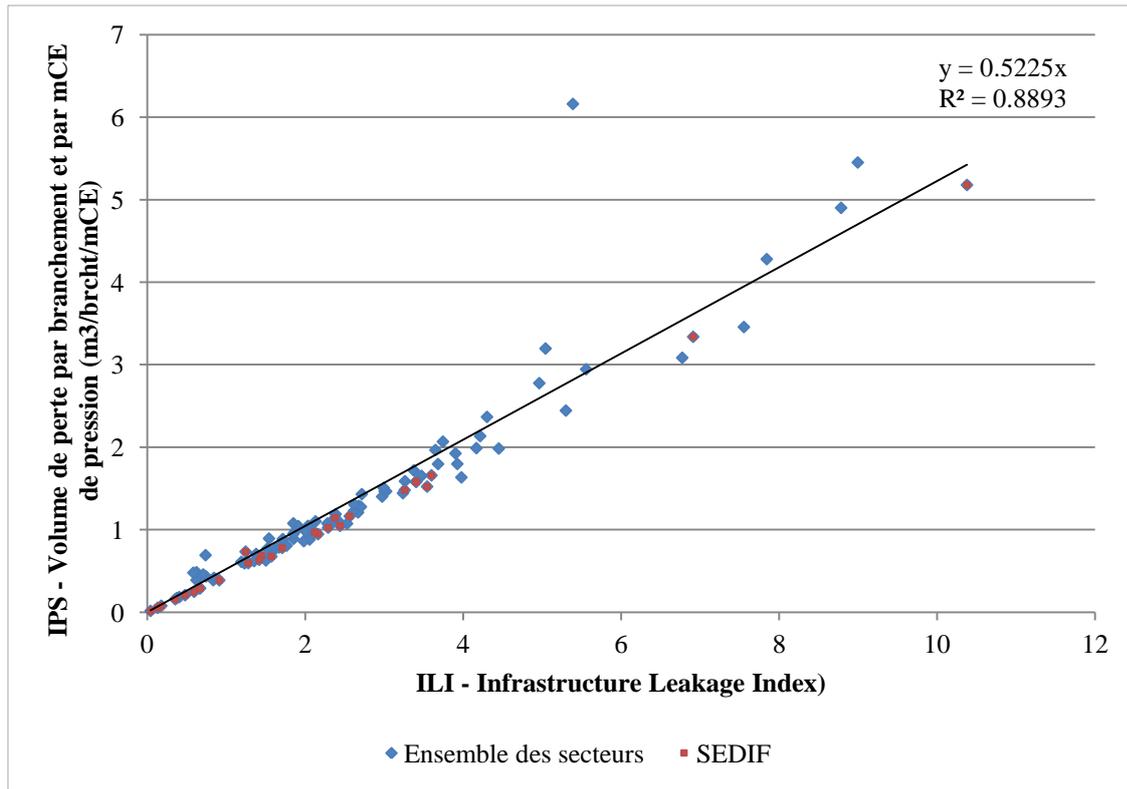


Figure 18: IPS en fonction de ILI

IPS et ILI sont très corrélés ( $IPS \approx 0.5 \times ILI$ ).

### II.3.2 L'Indice Global de Pertes, IGP

$$IGP = IRP \times IPS = \frac{VP}{N_b \times P_{\text{mintechnique}}}$$

La Figure 19 montre que IRP et IGP sont très peu corrélés tandis qu'à l'inverse, la Figure 20 nous montre un fort lien entre IPS et IGP.

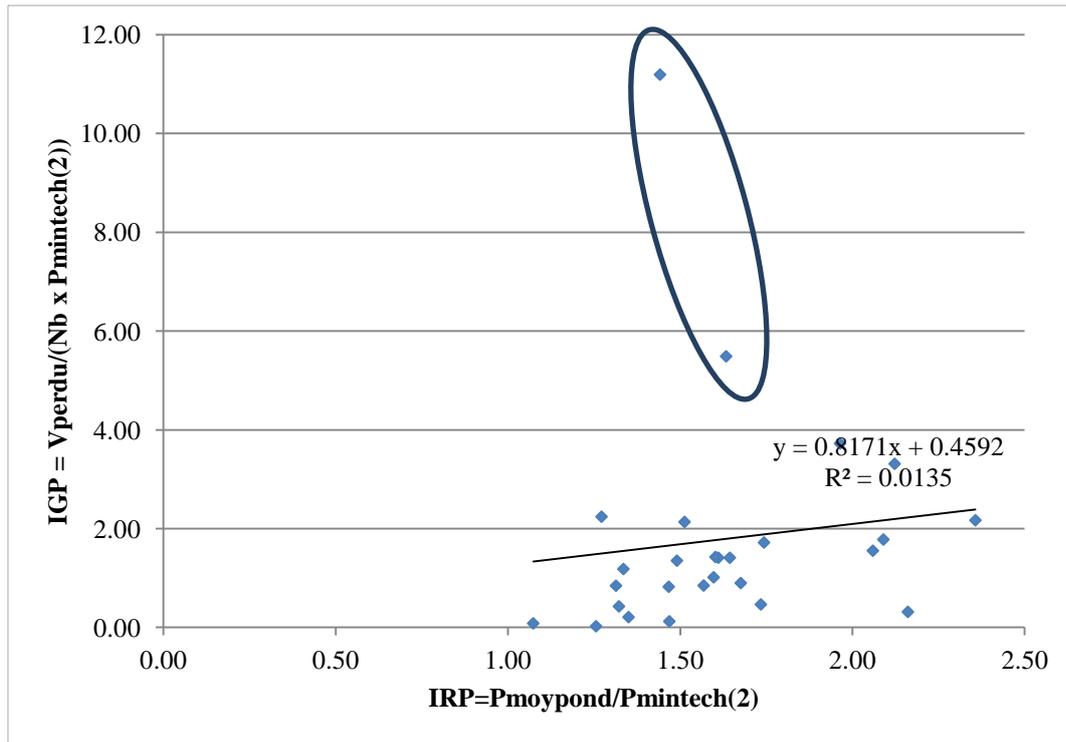


Figure 19: IGP en fonction de IRP- Données SEDIF

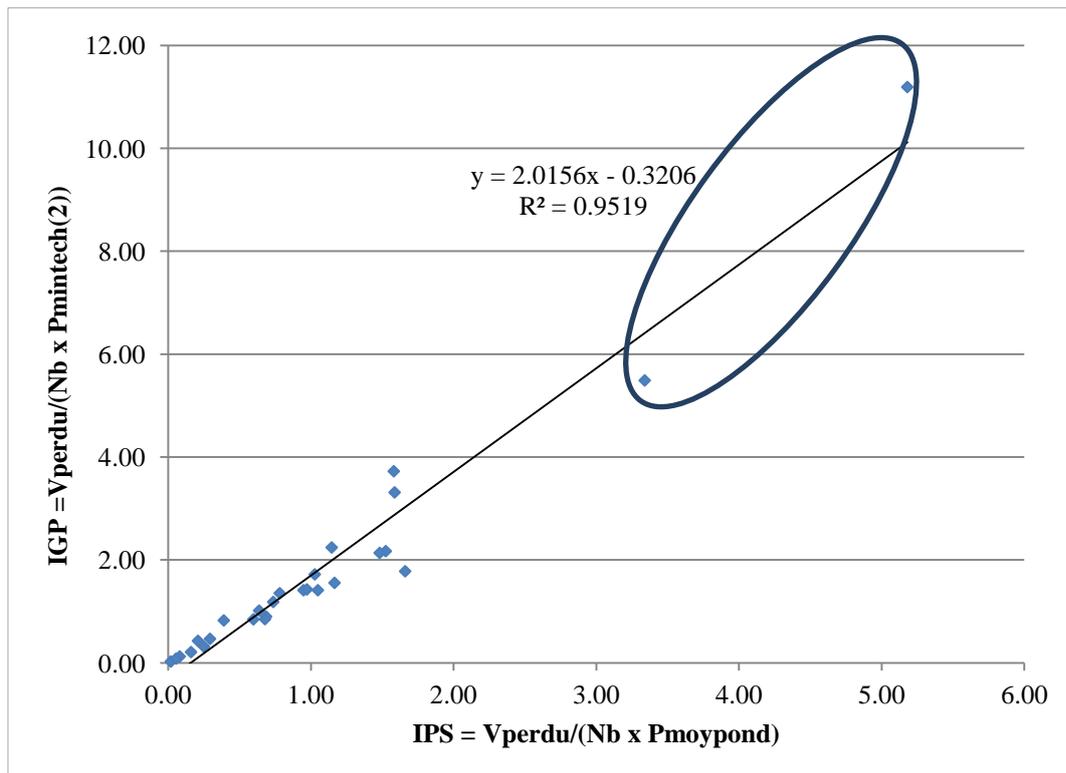


Figure 20: IGP en fonction de IPS - Données SEDIF

La Figure 21 montre que pour les secteurs du SEDIF, le volume perdu rapporté au nombre de branchements est très peu lié à l'IRP.

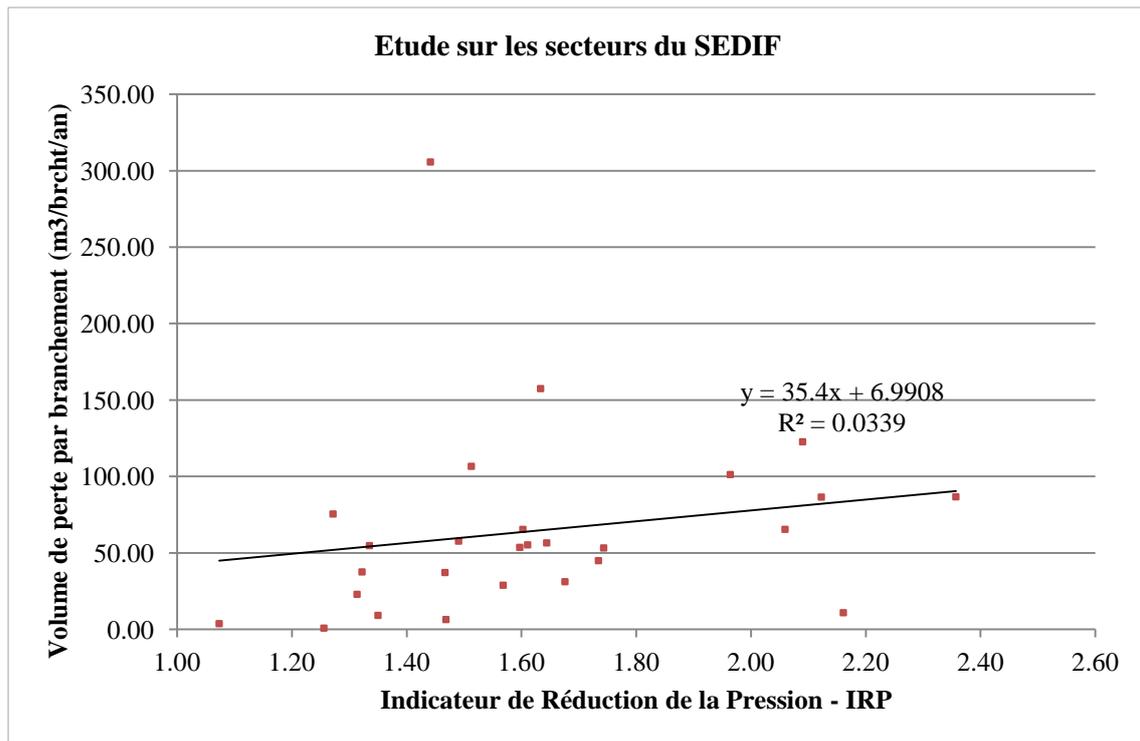


Figure 21: Valeurs de l'IRP en fonction du volume de perte par branchement- Données SEDIF

A ce stade de l'étude, même si l'on peut considérer que le système d'indicateurs que nous proposons (IRP, IPS) n'est pas plus mauvais que le système IWA (ILI, PMI), il n'en demeure pas moins que son intérêt pour conduire la lutte contre les pertes reste à démontrer, particulièrement pour ce concerne la prise en compte de la pression.

## III Suite et Perspectives de la collaboration (2013) :

### III.1 Développement d'un applicatif de calcul utilisable avec Epanet

Pour faciliter l'évaluation de la pression moyenne d'une zone, il est nécessaire d'automatiser les calculs faits à partir du modèle hydraulique. Un cahier des charges concernant un applicatif de calcul additionnel a été rédigé [Tangeaoui et Sandraz, 2012]. Il sera exécuté sur les fichiers .inp obtenus après simulation sous EPANET du modèle hydraulique.

Le nouveau code aura pour fonction:

- D'extraire la demande et la pression en chaque nœud et à chaque pas de temps ;
- De calculer la pression moyenne sur la durée de la simulation (une journée par exemple) à chaque nœud ;
- De calculer la demande totale sur la durée de la simulation ;
- D'affecter les nœuds à des secteurs : définition de nœuds « frontières » (=compteurs) et parcours de graphe permettant d'ajouter tous les éléments connexes au secteur jusqu'au nœud frontière;
- De calculer la pression moyenne pondérée par la demande et par le linéaire du service et des secteurs;
- De calculer la pression moyenne journalière au point critique, ainsi que la médiane et les premier et neuvième déciles de la distribution des pressions moyennes journalières du service/secteur ;

### III.2 Etude et approfondissement des indicateurs à l'échelle du service

Grâce à l'outil de calcul de la pression moyenne d'une zone, il sera possible de travailler à l'échelle du service sur un grand nombre de réseaux disposant de modèles hydrauliques EPANET.

L'intérêt du travail sur le service par rapport aux secteurs est une reproduction aisée de la démarche sur un nombre plus important de terrains d'étude, ainsi que, on l'espère, une évaluation plus robuste du volume de pertes (diminution des incertitudes dues à l'affectation des consommations aux secteurs et aux mesures des débits des secteurs).

Il est également prévu de tester d'autres variables explicatives selon les données disponibles, du type :

- casses,
- pourcentage de renouvellement des conduites,
- autres caractéristiques du réseau,

afin d'améliorer le modèle du volume de perte et de valider ou invalider les tendances observées à l'échelle du secteur.

## Bibliographie

AEAG, SMEGREG, OIEau (2005), Connaissance et maîtrise des pertes dans les réseaux d'eau potable. Agence de l'eau Adour Garonne. 89p.

Alegre H., Baptista J.M., Cabrera E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W. and Parena R. (2006), Performance Indicators for Water Supply Services. *IWA Publishing*. 289p.

Ben Hassen F. (2012), Caractérisation et évaluation de la pression moyenne minimale d'une zone de desserte d'un réseau d'alimentation en eau potable. Irstea, 52p.

Farley M. (2001), Leakage management and control. A best practice training manual. *World Health Organization*. Geneva, Switzerland. 162p.

Lambert A.O., Brown T.G., Takizawa M., Weimer D. (1999) A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems. *Aqua 48 (1999) 227-237*. IWA Publishing.

Le Glatin M. (2011), Impact de la pression et des infrastructures sur les réseaux d'eau potable. Véolia Eau. 50p.

Pearson D., Trow SW. (2012), Comparing Leakage Performance using the Frontier Approach, *IWA Water Loss Conference*. Manila, Philippines. 10p.

Renaud E. (2009), Valeurs de référence de l'indice linéaire de pertes des réseaux d'alimentation en eau potable. SMEGREG. 63p.

Renaud E. (2010), Towards a global performance indicator for losses from water supply systems. *IWA Water Loss Conference*. Sao Paolo, Brasil.

Renaud E., Khedhaouiria D., Clauzier M., Nafi A., Wittner C, Wery, C (2012), Réduction des fuites dans les réseaux d'alimentation en 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. ONEMA

Sandraz A.C. (2012), Pertes en eau : Introduction de la pression dans les indicateurs de performance. *Rapport final de VDIF à l'intention du SEDIF*. Document interne. Véolia Eau D'Ile de France.

Sissoko M. (2010), Maîtrise des pertes en eau potable : Méthode d'évaluation de la pression caractérisant une zone de desserte. Cem agref. 98p.

Tangeaoui N. (2012), Introduction de la pression et du nombre de branchements dans les indicateurs de performances caractérisant les pertes en eau d'un réseau. Véolia Eau. 54p.

Tangeaoui N, Sandraz A.C. (2012), L'automatisation du calcul de la pression moyenne par secteur sur Epanet. Document interne Véolia Eau

Thornton J. (2003), Managing leakage by managing pressure: a practical approach, *Water21*. IWA publishing. 2p.

Trow SW. (2009), Development of a pressure Management Index (PMI), *Water Loss Conference*. IWA Cape Town, South Africa.