

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

Rapport final

Eddy RENAUD¹, Dikra KHEDHAOUIRIA¹, Marion CLAUZIER¹, Amir NAFI²,
Christophe WITTNER² et Caty WEREY²

(1) Irstea Bordeaux

(2) UMR Geste ENGEES/Irstea

Avril 2012

Contexte de programmation et de réalisation

La lutte contre les pertes d'eau potable dans les réseaux de distribution est un enjeu considérable sur les territoires qui connaissent des problèmes de ressources. La loi du 29 juin 2010 portant engagement national pour l'environnement (Grenelle II) comporte des dispositions incitatives modulées en fonction des taux de pertes. L'amélioration de la connaissance des phénomènes physiques à l'origine des fuites et l'étude d'indicateurs sont nécessaires pour évaluer les réductions de pertes possibles et les enjeux financiers qui en découlent. Ces questions ont donné lieu à la présente étude qui s'est déroulée sur 3 ans de 2009 à 2011.

Les auteurs

Eddy RENAUD (1)

Ingénieur

eddy.renaud@irstea.fr

Dikra KHEDHAOUIRIA (1)

Ingénieur

dikra.khedhaouiria@irstea.fr

Marion CLAUZIER (1)

Ingénieur

marion.clauzier@irstea.fr

Amir NAFI (2)

Ingénieur

amir.nafi@engees.unistra.fr

Caty WEREY (2)

Ingénieur

caty.werey@engees.unistra.fr

Christophe WITTNER (2)

Ingénieur

christophe.wittner@engees.unistra.fr

(1) Irstea – Groupement de Bordeaux

50 avenue de Verdun, Gazinet 33612 CESTAS Cedex

(2) ENGEES – UMR Geste ENGEES/Irstea

1, quai Koch BP 61039 67070 STRASBOURG

Les correspondants

Onema

Stéphane Garnaud, Direction de l'Action Scientifique et Technique, stephane.garnaud@onema.fr

Pascal Maugis, Direction de l'Action Scientifique et Technique, pascal.maugis@onema.fr

Sylvain Rotillon, Direction de la Connaissance et de l'Information sur l'Eau, sylvain.rotillon@onema.fr

Emilie Bulleryal, Direction de la Connaissance et de l'Information sur l'Eau, emilie.bulleryal@onema.fr

Irstea

Eddy Renaud, Irstea BORDEAUX, eddy.renaud@irstea.fr

Amir Nafi UMR Geste STRASBOURG, amir.nafi@engees.unistra.fr

Caty Werey, UMR Geste STRASBOURG, caty.werey@engees.unistra.fr

Christophe Wittner, UMR Geste STRASBOURG, christophe.wittner@engees.unistra.fr

Droits d'usage :	Accès libre
Couverture géographique :	France
Niveau géographique :	National
Niveau de lecture :	Professionnels, experts
Nature de la ressource :	Document

0 CONTEXTE**1 NOTIONS DE BASE**

FICHE 1-1 VOLUMES DU RESEAU ET INDICATEURS DE PERTES

FICHE 1-2 REPRESENTATION DES FUITES

FICHE 1-3 CALCUL D'INCERTITUDES - APPLICATION AUX VOLUMES ET AUX INDICATEURS DE PERTES

2 SECTORISATION

FICHE 2-1 PRINCIPE DE LA SECTORISATION

FICHE 2-2 DEBITS DE LA SECTORISATION

FICHE 2-3 EVALUATION DE LA PRESSION D'UNE ZONE DE DESSERTE

FICHE 2-4 EVALUATION DE LA CONSOMMATION NOCTURNE

FICHE 2-5 INDICATEURS STRUCTURELS ET DE PERTES

FICHE 2-6 AFFECTATION DES ABONNES AUX SECTEURS

3 PLAN D'ACTION

FICHE 3-1 ACTIONS DE LUTTE CONTRE LES FUITES

FICHE 3-2 RECHERCHE ACTIVE

FICHE 3-3 MODULATION DE PRESSION

FICHE 3-4 RENOUVELLEMENT

4 ASPECTS ECONOMIQUES ET FINANCIERS

FICHE 4-1 STRATEGIES FINANCIERES GLISSEES POUR LE RENOUVELLEMENT DES RESEAUX

FICHE 4-2 FINANCEMENT DU RENOUVELLEMENT ET INTERCOMMUNALITE

FICHE 4-3 PRISE EN COMPTE DE L'ANTICIPATION DES INVESTISSEMENTS DANS LE COUT DES PERTES EN EAU

FICHE 4-4 EVALUATION DU COUT MARGINAL ECONOMIQUE JUSTIFIANT LA RECHERCHE DE FUITES

BIBLIOGRAPHIE

Enjeux

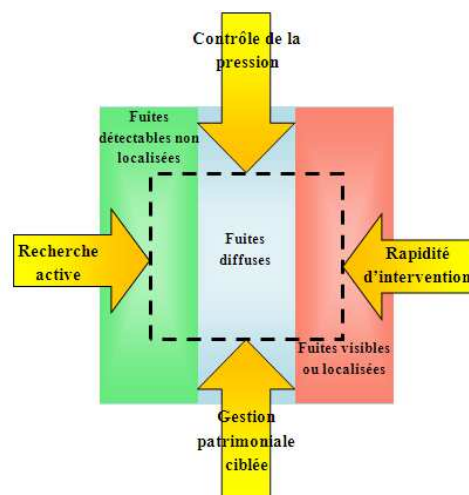
La lutte contre les pertes d'eau potable dans les réseaux de distribution est un enjeu considérable sur les territoires qui connaissent des problèmes de ressources. La loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (Grenelle II) prévoit dans son article 161 que « *Lorsque le taux de perte en eau du réseau s'avère supérieur à un taux fixé par décret selon les caractéristiques du service et de la ressource, les services publics de distribution d'eau établissent, avant la fin du second exercice suivant l'exercice pour lequel le dépassement a été constaté, un plan d'actions comprenant, s'il y a lieu, un projet de programme pluriannuel de travaux d'amélioration du réseau.* ».

Dans le cadre de la préparation de ce texte et dans l'objectif de faciliter sa mise en œuvre, en concertation avec le ministère chargé de l'écologie, l'Onema a confié à Irtsea (ancien Cemagref) une étude portant sur la réduction des fuites dans les réseaux d'eau potable.

En France, le suivi de la performance des réseaux d'eau potable en matière de pertes a été consacré par la réglementation relative au rapport sur la qualité et le prix du service (RPQS) prévue par les articles L.2224-5 et D.2224-1 à D.2224-3 du Code Général des Collectivités Territoriales (CGCT). Elle prévoit le suivi annuel de trois indicateurs de performance mesurant le niveau de pertes du réseau. Le plus communément utilisé est le rendement, rapport des volumes consommés aux volumes introduits dans le réseau. Le suivi des évolutions de cet indicateur à différentes

échelles permet de sensibiliser les décideurs sur le niveau et l'évolution des pertes mais il ne permet pas de répondre à plusieurs questions légitimes :

- Le niveau de perte constaté correspond-il ou non à une performance acceptable eu égard au contexte et aux caractéristiques de la zone considérée ?
- Quelles actions permettraient d'améliorer le niveau de perte et dans quelles proportions ?
- Quel serait l'impact financier d'un plan d'actions mis en œuvre pour atteindre un objectif de performance ?



Etude

L'étude menée par Irtsea (ancien Cemagref) de 2009 à 2011 a eu pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces interrogations. Elle a associé les équipes de l'unité Réseaux Épuration et Qualité des Eaux de Bordeaux (REBX, axe de recherche NETWATER) et celles de l'UMR Geste de Strasbourg. Elle s'est appuyée sur des investigations de terrain menées plus particulièrement en collaboration avec le SIAEP de Coulounieix Razac (24) et son exploitant, SAUR, ainsi qu'avec le Syndicat Départemental d'Eau et d'Assainissement du Bas Rhin.

Les travaux réalisés concernent principalement quatre domaines :

- des notions de base avec une analyse des indicateurs utilisés en France et à l'étranger, la proposition d'un modèle de représentation des fuites et une application des calculs d'incertitudes aux grandeurs utilisées dans le domaine des pertes ;
- la sectorisation des réseaux, avec la proposition de méthodes allant de la conception jusqu'aux multiples

utilisations de cet outil qui occupe une place centrale dans la maîtrise des pertes ;

- le plan d'actions à mettre en œuvre pour lutter contre les pertes avec un examen des principales familles d'action et de leur mise en œuvre ;
- et, les aspects économiques et financiers où sont abordé les stratégies glissées de financement du renouvellement, les apports de l'intercommunalité, la prise en compte de l'anticipation des investissements dans le coût des pertes et la détermination du coût des pertes justifiant la recherche des fuites.

Il a été choisi de formaliser les résultats obtenus sous forme de fiches thématiques. L'ambition est de constituer un recueil de fiches cohérent permettant d'aborder la question de la réduction des fuites dans les réseaux d'eau potable dans son ensemble tout en autorisant une utilisation isolée des fiches. Chacune d'elle traite de façon autonome une question particulière. Cette forme devrait également faciliter les mises à jour et les enrichissements à venir du document.

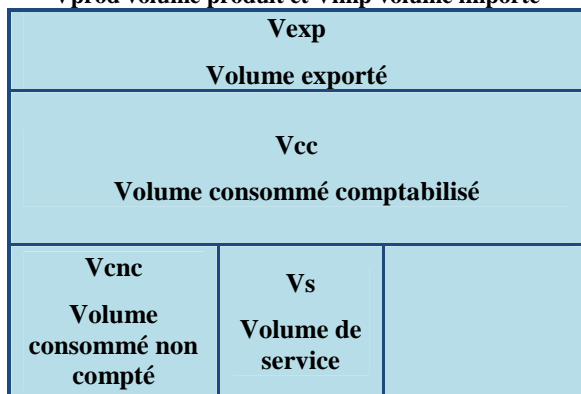
Volumes du réseau et indicateurs de pertes

Par essence, les pertes des réseaux d'eau potable ne sont pas directement mesurables. Ainsi, pour en évaluer l'importance, des indicateurs sont mis en place. La présente fiche met en évidence les volumes qui entrent en jeu dans le bilan annuel d'un réseau et les principaux indicateurs de pertes connus.

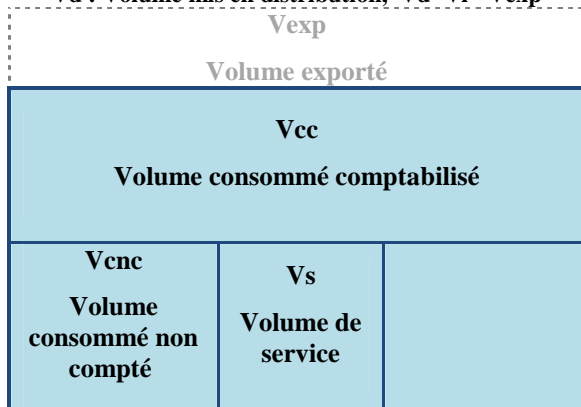
Volumes du réseau AEP

Pour établir le bilan annuel du fonctionnement d'un réseau d'eau potable, il est nécessaire de distinguer les différents volumes qui entrent en jeu en fonction de leur nature ou de leur destination. Ces volumes résultent de comptages, d'estimations ou sont obtenus par différence. Dans les diagrammes ci-après, l'ensemble de la surface représente le volume annuel introduit dans le réseau et la zone bleutée le volume concerné par la légende.

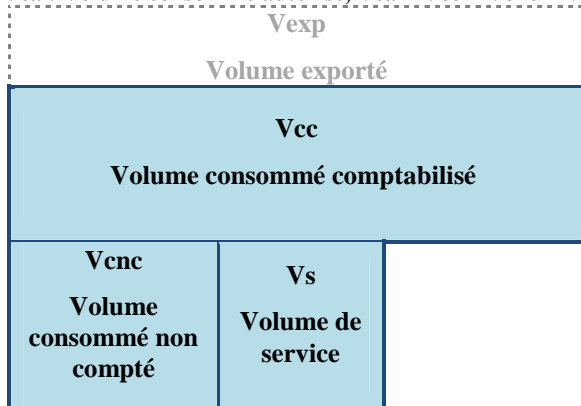
Vi : Volume introduit dans le réseau, $V_i = V_{\text{prod}} + V_{\text{imp}}$ avec
Vprod volume produit et Vimp volume importé



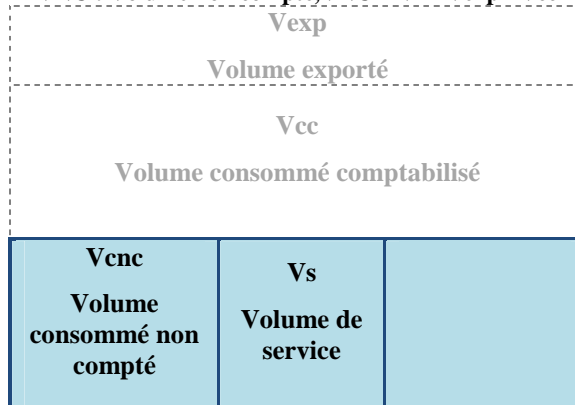
Vd : Volume mis en distribution, $V_d = V_i - V_{\text{exp}}$



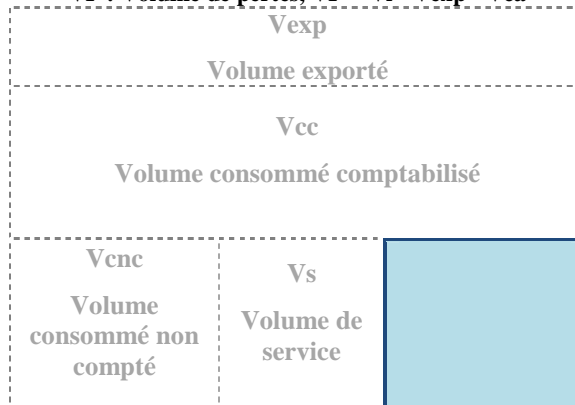
Vca : Volume consommé autorisé, $V_{ca} = V_{cc} + V_{cnc} + V_s$



VNC : Volume non compté, $V_{nc} = V_i - V_{\text{exp}} - V_{cc}$



VP : Volume de pertes, $V_P = V_i - V_{\text{exp}} - V_{ca}$



Indicateurs annuels de pertes, RPQS

En France, la réglementation sur le Rapport sur le Prix et la Qualité du Service (RPQS)¹ prévoit trois indicateurs de pertes :

- le rendement du réseau de distribution, R ;
- l'indice linéaire des volumes non comptés, ILVNC ;
- et, l'indice linéaire de pertes en réseau, ILP.

Rendement du réseau, R

« Le rendement du réseau est obtenu en faisant le rapport entre, d'une part, le volume consommé autorisé augmenté des volumes vendus à d'autres services publics d'eau potable et, d'autre part, le volume produit augmenté des volumes achetés à d'autres services publics d'eau potable. Le volume consommateurs sans comptage et le volume de service du réseau sont ajoutés au volume comptabilisé pour calculer le volume consommé autorisé. Le rendement est exprimé en pourcentage. »

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

- 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)

Indice linéaire des volumes non comptés, ILVNC

« L'indice linéaire des volumes non comptés est égal au volume journalier non compté par kilomètre de réseau (hors linéaires de branchements). Le volume non compté est la différence entre le volume mis en distribution et le volume comptabilisé. L'indice est exprimé en $m^3/km/jour$. »

$$ILVNC = \frac{V_d - V_{cc}}{365 \times L} = \frac{VNC}{365 \times L}$$

- V_d , Volume annuel mis en distribution
- V_{cc} , Volume annuel consommé comptabilisé
- VNC , Volume annuel Non Compté
- L , Longueur du réseau de distribution hors branchements

Indice linéaire de pertes en réseau, ILP

« L'indice linéaire de pertes en réseau est égal au volume perdu dans les réseaux par jour et par kilomètre de réseau (hors linéaires de branchements). Cette perte est calculée par différence entre le volume mis en distribution et le volume consommé autorisé. Il est exprimé en $m^3/km/jour$. »

$$ILP = \frac{V_d - V_{ca}}{365 \times L} = \frac{VP}{365 \times L}$$

- V_d , Volume annuel distribué
- V_{ca} , Volume annuel consommé autorisé
- VP , Volume annuel de Pertes
- L , Longueur du réseau de distribution hors branchements

¹ : RAPPORT SUR LE PRIX ET LA QUALITE DU SERVICE, INTUITE PAR L'ARTICLE L.2224-5 DU CGCT. LES INDICATEURS SONT ENONCES DANS LES ANNEXES V ET VI AUX ARTICLES D.2224-1 A D.2224-3 DU CGCT, 2007.

Indicateurs annuels de pertes, IWA

Au niveau international, l'*International Water Association* (IWA) préconise une batterie d'indicateurs pour mesurer la performance des services d'alimentation en eau potable². Parmi d'autres, deux indicateurs de pertes sont préconisés :

- *Water losses per connection* (pertes par branchement) ;
- *Infrastructure Leakage Index, ILI* (indice de fuites structurelles).

Water losses per connection

Water losses per connection, traduisible par « pertes annuelles par branchement » rapporte le volume annuel de pertes défini pour l'ILP français, au nombre de branchements du réseau. Il est exprimé en m³ par branchement et par an. Son utilisation est préconisée lorsque la densité de branchement (nombre de branchement rapporté au linéaire des canalisations principales) est supérieure à 20 branchements par kilomètre ; dans le cas contraire, l'équivalent de l'ILP est préconisé (en m³ par an et par kilomètre).

$$WLC = \frac{VP}{Nb}$$

- *WLC*, *Water losses per connection*
- *VP*, Volume de pertes
- *Nb*, Nombre de branchements

Infrastructure Leakage Index, ILI

Infrastructure Leakage Index (ILI) qui peut être traduit par « indice de fuites structurelles » est un indicateur de performance adimensionnel défini comme le rapport entre CARL et UARL (tels qu'ils sont définis ci-après et après conversion dans la même unité). Il est largement utilisé à l'échelle internationale depuis plus de 10 ans pour évaluer le niveau de pertes des réseaux d'eau potable.

Par définition, ILI doit avoir une valeur supérieure ou égale à 1. Plus la valeur de ILI est proche de 1, plus le

niveau des pertes réelles est proche des pertes incompressibles donc meilleure est la performance.

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

- *CARL*, *Current Annual Real Losses*
- *UARL*, *Unavoidable Annual Real Losses*

• Unavoidable Annual Real Losses, UARL

Le concept d'Unavoidable Annual Real Losses (UARL) que l'on peut traduire par « pertes réelles annuelles incompressibles » découle de travaux menés notamment par Allan Lambert³.

L'hypothèse centrale de ce concept est de considérer que pour tout réseau en bon état et exploité dans les règles de l'art, il existe un seuil minimal de pertes en dessous duquel on ne peut descendre dans des conditions économiquement acceptables.

Allan Lambert propose une méthode d'évaluation de l'UARL d'un réseau en fonction de la longueur des canalisations principales, du nombre et de la longueur des branchements et de la pression moyenne de service.

Hypothèses :

- Infrastructures en bon état
- Politique active de recherche des fuites
- Réparation rapide des casses et fuites
- Pression : 50 mètres de colonne d'eau (mce)

$$UARL = (18 \times Lm + 0.8 \times Nc + 25 \times Lp) \times P$$

- *Uarl*, litres/jour
- *Lm*, Longueur du réseau hors branchements, km
- *Nc*, Nombre de branchements
- *Lp*, Longueur des branchements de la voirie au compteur, km
- *P*, Pression moyenne de service, mce

• Current Annual Real Losses, CARL

Current Annual Real Losses (CARL) peut être traduit par « pertes réelles annuelles ». L'évaluation de CARL dans le respect des standards préconisés par l'IWA diffère de l'évaluation des pertes intervenant dans le calcul de l'ILP. L'équation suivante approche les « pertes réelles annuelles » avec des volumes au sens de la réglementation française.

$$VP - (V_{cv} + V_{sc}) = CARL$$

- *VP*, Volume de Pertes
- *Vcv*, Volume consommé volé
- *Nc*, Nombre de branchements
- *Vsc*, Volume résultant du sous-comptage des compteurs domestiques

² : ALEGRE, H., BAPTISTA, J. M., CABRERA JR., E., CUBILLO, F., DUARTE, P., HIRNER, W., MERKEL, W., PARENA, R. (2006). *PERFORMANCE INDICATORS FOR WATER SUPPLY SERVICES*. 289 p.

³ : LAMBERT A.O., BROWN T.G., TAKIZAWA M., WEIMER D. (1999) *A REVIEW OF PERFORMANCE INDICATORS FOR REAL LOSSES FROM WATER SUPPLY SYSTEMS*. AQUA – IWA PUBLISHING.

Autres indicateurs

Une étude menée par Irtsea (ancien Cemagref) pour le compte du Syndicat Mixte d'Etudes pour la Gestion de la Ressource en Eau du département de la Gironde (SMEGREG) a montré⁴ que l'Indice Linéaire des Volumes Non-Comptés (ILVNC) est très fortement lié à la densité d'abonnés D (Nombre d'abonnés par rapport au linéaire du réseau). La relation issue de régressions linéaires passant par l'origine, bâties sur de nombreuses données collectées à l'échelle nationale et agrégées par classe est la suivante : $ILVNC = 0.150 \times D$

Cette étude a par ailleurs montré que pour les services ayant une densité d'abonnés faible, les pertes incompressibles sont, en moyenne, supérieures aux pertes réellement constatées ce qui permet de conclure que la méthode IWA d'évaluation des pertes incompressibles n'est pas pertinente pour les services ruraux français.

Exprimer l'indice linéaire de pertes en fonction de la densité d'abonnés revient à rapporter le volume de perte au nombre d'abonnés. Un nouvel indicateur de pertes est alors défini : l'Indice de Pertes par Abonnés (IPA), exprimé en m³ par abonné et par jour, il permet de réaliser une première appréciation du niveau de perte indépendamment des autres caractéristiques du réseau.

$$IPA = \frac{VP}{365 \times Na}$$

- IPA, Indice de pertes par abonné
- VP, le Volume de Perte
- Na, le nombre d'abonnés

Un référentiel de l'IPA a été proposé pour les réseaux français dont la densité d'abonnés n'excède pas 45 abonnés par kilomètre.

Référentiel basé sur les valeurs d'IPA applicable aux services ruraux et intermédiaires

Niveau de pertes faible	$IPA \leq 0.08$
Niveau de pertes modéré	$0.08 < IPA \leq 0.15$
Niveau de pertes élevé	$0.15 < IPA \leq 0.29$
Niveau de pertes très élevé	$0.29 < IPA$

Remarque : les volumes utilisés sont entachés d'erreurs de mesure ou d'estimation qui vont se répercuter sur les indicateurs de pertes. Pour interpréter correctement les valeurs des indicateurs la quantification des erreurs est nécessaire. Cette étape est réalisée par le biais du calcul d'incertitude exposé dans la fiche 1-3. Les incertitudes permettent de poser un intervalle dans lequel les valeurs des indicateurs sont valides pour un niveau de confiance préalablement choisi.

Eddy RENAUD, Dikra KHEDHAOUIRIA & MARION CLAUZIER
 IRSTEA BORDEAUX, 50 Av de Verdun, Gazinet
 33612 CESTAS Cedex
 e-mail contact : eddy.renaud@irstea.fr

Représentation des fuites

Les fuites se manifestent sous des formes variées allant du simple suintement au jaillissement spectaculaire. Il est donc nécessaire de définir une représentation qui permette de classer les fuites afin d'être en mesure de mettre en place les moyens d'actions adéquats pour diminuer leur impact.

Les fuites se manifestent sur les différents organes du réseau :

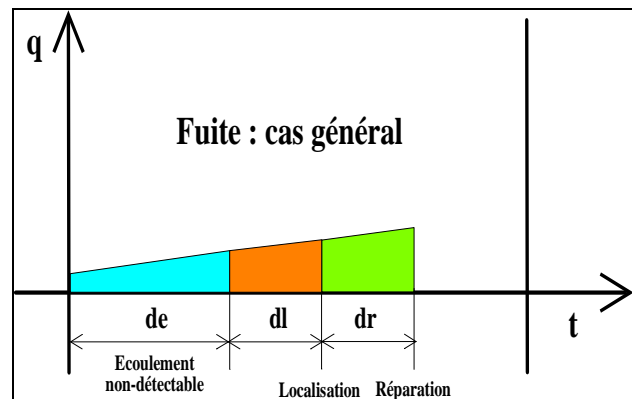
- les canalisations et leurs accessoires ;
- et, les branchements particuliers.

Il peut être considéré que chaque fuite passe successivement par les trois états.

Trois grandes familles de fuites peuvent être distinguées, par débit de fuite croissant :

- les fuites diffuses, ce sont des fuites qui ne peuvent pas être localisées avec les techniques courantes du fait de leur faible débit ;
- les fuites détectables non-visibles, ce sont des fuites non-visibles que l'on peut détecter avec les moyens usuels d'investigation ;
- et, les fuites visibles, ce sont des fuites dont la présence est visible en surface (écoulement, excavation, etc.).

Représentation d'une fuite



Le volume de fuite sur un territoire donné pour une période choisie, peut être schématiquement exprimé selon la formulation suivante :

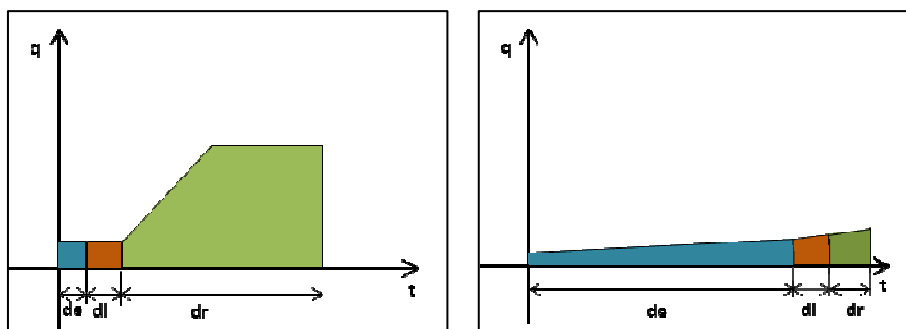
$$V_{\text{fuites}} = \sum_{i=1}^n V_i(q_i(t), de_i, dl_i, dr_i)$$

- V_{fuites} , Volume global des fuites ;
- V_i , Volume de la $i^{\text{ème}}$ fuite ;
- n , Nombre de fuites (canalisations et branchements) ;
- $q_i(t)$, Débit instantané de la $i^{\text{ème}}$ fuite ;
- de_i , Durée d'écoulement non détectable de la fuite ;
- dl_i , Durée nécessaire à la localisation de la fuite dès lors qu'elle est détectable ;
- dr_i , Durée nécessaire à la réparation de la fuite après sa localisation.

Cette formulation permet de mettre en évidence les leviers sur lesquels il va être possible de jouer pour réduire le volume de pertes :

- n , le nombre de fuites pourra être limité en rénovant le réseau et en limitant les stress hydrauliques ;
- $q_i(t)$, le débit de fuite peut être réduit en limitant la pression ;
- de_i , la durée d'écoulement non détectable est tributaire de la performance des technologies de recherche utilisées ;
- dl_i , la durée du seuil de détection à la localisation dépend de l'effort de recherche réalisé ;
- dr_i , la durée nécessaire à la réparation dépend des moyens mis en œuvre par l'exploitant pour réparer vite.

Il est à noter que les valeurs des débits et durées peuvent être très variables d'une fuite à une autre. Par exemple, une casse provoquée par un coup de bélier pourra avoir des valeurs de de_i et dl_i quasiment nulles et un débit très important tandis qu'à l'inverse, le suintement d'un joint pourra avoir une valeur de de_i de plusieurs années avec un débit très faible. Ces cas extrêmes sont illustrés dans les figures ci-dessous.



Calcul d'incertitudes – Applications aux volumes et aux indicateurs de pertes

Le calcul d'incertitudes est une étape importante dans la mise en place des éléments de comptages (Fiche 2-1) et dans l'analyse des indicateurs de pertes (Fiche 1-2 et 2-5). Il assure une vision plus complète des résultats obtenus en prenant en compte les erreurs de mesure, et améliore ainsi la fiabilité d'analyse des résultats obtenus.

Lorsque des données issues d'appareil de mesure sont utilisées, il est nécessaire de quantifier la fiabilité des résultats délivrés. En effet, les mesures fournies par les appareils ne sont pas exactes. Elles peuvent être entachées d'erreur dues aux instruments. La notion d'incertitude est alors introduite, elle intervient après le calcul des composantes de l'erreur et des corrections qui leurs sont alors appliquées, elle représente le doute sur la manière dont le résultat de mesure représente correctement la valeur de la grandeur mesurée. La norme **NF ENV 13005**¹ est le guide pour l'expression des incertitudes de mesure.

- Notations conventionnelles

Mesurage	Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur
Y	Grandeur à mesurer (mesurande)
y	Estimation de la grandeur (donnée par les appareils)
u_i	Incertitude-type due à la source d'incertitude i
u_c	Incertitude-type composée
U	Incertitude élargie
$\frac{U(y)}{y}$	Incertitude relative élargie de y

Remarque : u correspondant à *uncertainty* en anglais

L'incertitude caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées à la grandeur à mesurer. L'incertitude tient compte des erreurs aléatoires et des erreurs systématiques non maîtrisées.

Selon la norme, le calcul d'incertitude complet passe par le calcul de plusieurs incertitudes :

- 1) Le calcul de « l'incertitude-type », il exprime l'incertitude du mesurage d'un dispositif de mesure sous la forme d'un écart-type. L'incertitude-type a la même unité que la grandeur à mesurer.
- 2) Le calcul de « l'incertitude-type composée », il s'agit de l'incertitude-type du résultat de mesurage lorsque ce dernier fait intervenir plusieurs variables d'entrée. Cette incertitude est obtenue par composition mathématique.
- 3) Le calcul de « l'incertitude élargie », il s'agit de définir un intervalle de confiance au sein duquel on a une certaine probabilité de trouver la valeur vraie de la grandeur Y. L'incertitude élargie U est obtenue en multipliant l'incertitude-type par un facteur k appelé facteur d'élargissement.

1) L'incertitude-type

Deux méthodes permettent de calculer l'incertitude-type de y, lorsque ce dernier est obtenu directement par la mesure :

- Evaluation de type A : une série de mesure est disponible. Le traitement de l'incertitude se fait par analyse statistique.
- Evaluation de type B : la mesure est unique. L'évaluation de l'incertitude s'appuie sur les informations fournies par le constructeur de l'appareil de mesure ou sur un jugement fondé à partir de toutes les informations disponibles au sujet de la variabilité possible de la mesure.

2) L'incertitude-type composée

On se place dans le cas où Y est obtenu à partir de plusieurs grandeurs d'entrées X_i . Les grandeurs estimées, y et x_i , sont liées par la fonction f :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

L'incertitude-type de y est alors donnée par le théorème de propagation de l'incertitude-type, avec l'hypothèse d'indépendance des mesures :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

De façon pratique, lorsque les fonctions sont des sommes (addition, soustraction) ou des produits (multiplication, division), les incertitudes-types composées sont respectivement données par les équations suivantes :

$$\text{Si } y = \sum_{i=1}^n x_i \text{ alors } u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n u^2(x_i)$$

$$\text{Si } y = \prod_{i=1}^n x_i \text{ alors } \left(\frac{u_c(y)}{y} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2$$

3) L'incertitude élargie

Pour définir un intervalle au sein duquel la valeur de la grandeur mesurée se situe avec une certaine probabilité, on a recours au facteur d'élargissement k , qui permet de définir l'incertitude élargie selon la relation suivante :

$$|U(y) = k \times u(y)|$$

En général, pour les phénomènes physiques, on considère que l'erreur aléatoire suit une loi normale, ainsi k est assimilable au coefficient de Student, il dépend de la taille de l'échantillon et du niveau de confiance choisi. En général, on considère le niveau de confiance de 95 % pour lequel $k = 1.96$, communément arrondi à 2. Pour les autres niveaux de confiance, il faut se référer à la table de Student, dont une extraction pour quelques niveaux de confiance est donnée dans le tableau ci-après. Si y est le résultat de la mesure, alors la valeur vraie Y (inconnue), se trouve dans l'intervalle de confiance suivant :



Extrait de la table de Student : valeurs de k en fonction du niveau de confiance pour la loi normale

Niveau de confiance (%)	Facteur d'élargissement k
68.27	1
90	1.645
95	1.960
95.45	2
99	2.576
99.73	3

Application aux secteurs

Dans les comptages de sectorisation, chaque mesure fait l'objet d'une mesure unique directe, il s'agira donc d'évaluation de type B. L'information disponible est généralement la précision supposée des appareils, p_i , communiqué par le constructeur ou attribué à l'instrument à dire d'expert. La précision est considérée comme étant délivrée avec un intervalle de confiance de 95 %. Cette méthode est utilisée en l'absence d'autre méthode opérationnelle (échantillonnage, étalonnage, ...).

Notations :

- q_s : débit horaire du secteur S ;
- q_i : débit horaire des instruments de mesure intervenant dans le bilan de q_s ;
- N : nombre de comptage intervenant dans l'évaluation de q_s ;
- p_i : précision supposée des appareils.

L'expression littérale du débit horaire du secteur S vaut :

$$q_s = \sum_{i=1}^{i=N} q_i$$

Les incertitudes-types

La grandeur mesurée dépend de plusieurs grandeurs d'entrée. Il faut donc procéder comme suit :

➤ Incertitude-type des sources d'entrée :

L'incertitude-type de chaque entrée q_i est déterminée à l'aide de la précision à dire d'expert, p_i , supposée établie avec un coefficient d'élargissement de 2 :

$$u(q_i) = q_i \times \frac{p_i}{2}$$

➤ Incertitude-type composée :

La relation entre les grandeurs d'entrée et la grandeur à mesurer est une somme, donc pour le secteur S :

$$u_c^2(q_s) = \sum_{i=1}^N u^2(q_i) \quad \text{Soit avec } p_i : u_c^2(q_s) = \sum_{i=1}^N \left(q_i \times \frac{p_i}{2} \right)^2$$

L'incertitude élargie ou incertitude à dire d'expert

On suppose que l'erreur aléatoire suit une loi normale, pour un niveau de confiance de 95 %, l'incertitude élargie est la suivante :

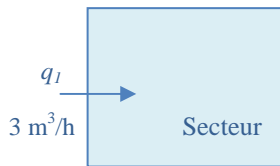
$$|U(q_s) = 2 \times u_c(q_s)|$$

Soit en tenant compte de la précision :

$$|U(q_s) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (q_i \times p_i)^2}|$$

APPLICATION NUMERIQUE

Les exemples suivants illustrent deux cas de calcul d'incertitude sur un secteur. Le premier est un cas simple avec une seule entrée de débit (q_1) et le second cas, plus complexe, prend une entrée (q_1) et une sortie de débit (q_2).

✓ **Cas 1 :**

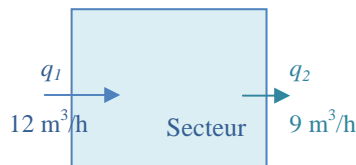
Données :
 $q_1 = 3 \text{ m}^3/\text{h}$
 $p_1 = 2 \%$

Calcul d'incertitudes :

$$q_{s1} = q_1 = 3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Incertitude élargie et relative :

$$\begin{cases} U(q_{s1}) = \sqrt{(3 \times 0.02)^2} = 0.06 \text{ m}^3 / \text{h} \\ \frac{U(q_{s1})}{q_{s1}} = 3\% \end{cases}$$

✓ **Cas 2 :**

Données :
 $q_1 = 12 \text{ m}^3/\text{h}$
 $q_2 = 9 \text{ m}^3/\text{h}$
 $p_1 = 2 \%$
 $p_2 = 2 \%$

Calcul d'incertitudes :

$$q_s = q_1 - q_2 = 12 - 9 = 3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Incertitude composée, élargie et relative :

$$\begin{cases} u_c(q_s) = \sqrt{(12 \times \frac{0.02}{2})^2 + (-9 \times \frac{0.02}{2})^2} = 0.15 \text{ m}^3 / \text{h} \\ U(q_s) = 0.15 \times 2 = 0.3 \text{ m}^3 / \text{h} \\ \frac{U(q_s)}{q_s} = 10\% \end{cases}$$

Remarque : l'application met en évidence l'impact du nombre de comptages et des débits transitant dans un secteur. En effet, les deux secteurs ont un même débit et utilisent les mêmes technologies mais, du fait de leur configuration hydraulique, les valeurs de l'incertitude de mesure du débit sont très différentes. Ceci démontre l'intérêt d'estimer au cas par cas, pour tous les pas de temps, et dans toutes les configurations possibles, l'incertitude de mesure pour s'assurer de la pertinence des débits nocturnes mesurés.

Application aux indicateurs de pertes

Le calcul des incertitudes est ici appliqué au rendement R et à l'Indice Linéaire de Pertes, ILP , la méthodologie est transposable aux autres indicateurs. Les volumes mis en jeu dans les secteurs sont :

- V_{prod} , Volume annuel produit ;
- V_{imp} , Volume annuel importé (ou acheté) ;
- V_{exp} , Volume annuel exporté (ou vendu) ;
- V_{ca} , Volume annuel consommé autorisé ;
- V_d , Volume annuel distribué qui correspond à la somme de V_{prod} et V_{imp} auquel on soustrait V_{exp} .

L'incertitude sur le rendement

Le rendement est donné par la formule suivante :

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

En utilisant les règles de composition de l'incertitude (rapport et somme), alors :

$$\begin{aligned} \left(\frac{u_c(R)}{R} \right)^2 &= \left(\frac{u(V_{ca} + V_{exp})}{(V_{ca} + V_{exp})} \right)^2 + \left(\frac{u(V_{prod} + V_{imp})}{(V_{prod} + V_{imp})} \right)^2 \\ \Rightarrow \left(\frac{u_c(R)}{R} \right)^2 &= \frac{u^2(V_{ca}) + u^2(V_{exp})}{(V_{ca} + V_{exp})^2} + \frac{u^2(V_{prod}) + u^2(V_{imp})}{(V_{prod} + V_{imp})^2} \end{aligned}$$

Donc :

$$\frac{u_c(R)}{R} = \sqrt{\frac{u^2(V_{ca}) + u^2(V_{exp})}{(V_{ca} + V_{exp})^2} + \frac{u^2(V_{prod}) + u^2(V_{imp})}{(V_{prod} + V_{imp})^2}}$$

L'incertitude sur l'ILP

L'Indice Linéaire de Pertes est donné par la formule suivante :

$$ILP = \frac{V_d - V_{ca}}{365 \times L} = \frac{V_{prod} + V_{imp} - V_{exp} - V_{ca}}{365 \times L}$$

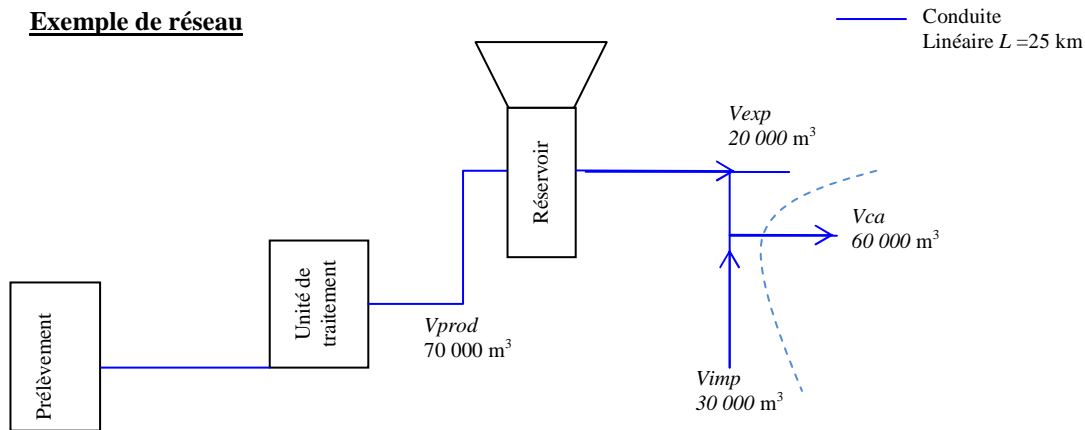
En utilisant les règles de composition des incertitudes (rapport et somme), alors :

$$\begin{aligned} \left(\frac{u_c(ILP)}{ILP} \right)^2 &= \left(\frac{u(V_{prod} + V_{imp} - V_{exp} - V_{ca})}{(V_{prod} + V_{imp} - V_{exp} - V_{ca})} \right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L} \right)^2 \\ \Rightarrow \left(\frac{u_c(ILP)}{ILP} \right)^2 &= \left(\frac{u^2(V_{prod}) + u^2(V_{imp}) + u^2(V_{exp}) + u^2(V_{ca})}{(V_{prod} + V_{imp} - V_{exp} - V_{ca})^2} \right) + \frac{u^2(L)}{L^2} \end{aligned}$$

Donc :

$$\frac{u_c(ILP)}{ILP} = \sqrt{\left(\frac{u^2(V_{prod}) + u^2(V_{imp}) + u^2(V_{exp}) + u^2(V_{ca})}{(V_{prod} + V_{imp} - V_{exp} - V_{ca})^2} \right) + \frac{u^2(L)}{L^2}}$$

APPLICATION NUMERIQUE

Exemple de réseau✓ **Calcul d'incertitude**

Le coefficient d'élargissement k est pris égal à 2.

Hypothèses : les incertitudes relatives sont supposées prendre les valeurs du tableau suivant :

$\frac{U(V_{prod})}{V_{prod}} = 4\%$	donc	$\frac{u(V_{prod})}{V_{prod}} = 2\%$	et	$u(V_{prod}) = 1400 \text{ m}^3$	$\frac{U(V_{ca})}{V_{ca}} = 1\%$	donc	$\frac{u(V_{ca})}{V_{ca}} = 0.5\%$	et	$u(V_{ca}) = 300 \text{ m}^3$
$\frac{U(V_{imp})}{V_{imp}} = 2\%$	donc	$\frac{u(V_{imp})}{V_{imp}} = 1\%$	et	$u(V_{imp}) = 300 \text{ m}^3$	$\frac{U(L)}{L} = 5\%$	donc	$\frac{u(L)}{L} = 2.5\%$	et	$u(L) = 0.063 \text{ km}$
$\frac{U(V_{exp})}{V_{exp}} = 3\%$	donc	$\frac{u(V_{exp})}{V_{exp}} = 1.5\%$	et	$u(V_{exp}) = 300 \text{ m}^3$					

Calcul de l'incertitude sur le Rendement :

Pour un rendement $R = 80\%$

✓ **Incertitude-type :**

$$\frac{u_c^2(R)}{R^2} = \frac{u^2(V_{ca}) + u^2(V_{exp})}{(V_{ca} + V_{exp})^2} + \frac{u^2(V_{prod}) + u^2(V_{imp})}{(V_{prod} + V_{imp})^2}$$

D'après les hypothèses, on obtient :

$$\frac{u_c^2(R)}{R^2} = \frac{300^2 + 300^2}{80000^2} + \frac{1400^2 + 300^2}{100000^2} = 0.023$$

$$\Rightarrow u_c(R) = \sqrt{(80\%)^2 \times 0.023\%} = 1.22\%$$

✓ **Incertitude élargie :**

Pour un niveau de confiance à 95%, $k = 2$

$$\begin{cases} U(R) = 2 \times u_c(R) = 2.44\% \\ \frac{U(R)}{R} = \frac{2.44\%}{80\%} = 3.05\% \end{cases}$$

Donc le rendement varie de la façon suivante :

$$77.56\% \leq R \leq 82.44\%$$

Calcul de l'incertitude sur l'ILP :

Pour un Indice linéaire de pertes $ILP = 2.19 \text{ m}^3/\text{km.jour}$

✓ **Incertitude-type :**

$$\frac{u_c^2(ILP)}{ILP^2} = \frac{u^2(V_{prod}) + u^2(V_{imp}) + u^2(V_{exp}) + u^2(V_{ca})}{(V_{prod} + V_{imp} - V_{exp} - V_{ca})^2} + \frac{u^2(L)}{L^2}$$

D'après les hypothèses, on obtient :

$$\frac{u_c^2(ILP)}{ILP^2} = \frac{1400^2 + 300^2 + 300^2 + 300^2}{(70000 + 30000 - 20000 - 60000)^2} + \frac{0.063^2}{25^2} = 0.56$$

$$\Rightarrow u_c(ILP) = \sqrt{2.19^2 \times 0.56\%} = 0.16 \text{ m}^3 / \text{km.jour}$$

✓ **Incertitude élargie :**

Pour un niveau de confiance à 95%, $k = 2$

$$\begin{cases} U(ILP) = 2 \times 0.16 = 0.32 \text{ m}^3 / \text{km.jour} \\ \frac{U(ILP)}{ILP} = \frac{0.32}{2.19} = 15\% \end{cases}$$

Donc l'ILP varie de la façon suivante :

$$1.87 \leq ILP \leq 2.51$$

Remarque : Cet exemple illustre que, de façon générale, ILP est connu avec une incertitude relative beaucoup plus grande que le rendement (ici, presque 5 fois plus grande).

Principe de la sectorisation

Dans une perspective de réduction des fuites dans les réseaux d'eau potable, les informations annuelles à l'échelle du service ne suffisent pas. La sectorisation offre la possibilité d'obtenir des données à des échelles spatiales et temporelles plus fines, ce qui facilite la recherche et la localisation des fuites et permet une hiérarchisation des actions à mettre en œuvre.

La sectorisation consiste à diviser le réseau d'AEP en plusieurs « sous-réseaux » appelés secteurs pour lesquels le suivi des débits mis en distribution est effectué par comptage des débits entrants et sortants. Les systèmes

Conception des secteurs

Physiquement, un secteur est une sous-partie connexe du réseau délimitée par :

- des extrémités d'antennes ;
- des vannes fermées ;
- des comptages.

Toutes les communications ouvertes avec les ouvrages (stations de pompage, réservoirs, ...) et avec des secteurs voisins doivent être équipées de comptage. Lorsque l'eau peut potentiellement circuler dans les deux sens, les comptages doivent être à double sens. Les éventuels ouvrages de stockage interne au secteur (bâches de reprises par exemple) doivent également être équipés de comptages.

La conception d'une sectorisation doit composer avec des aspirations contradictoires. Le désir d'obtenir un niveau fin de pré-localisation des fuites incite à multiplier les secteurs. A l'inverse, la volonté de disposer d'un système aisé à exploiter et d'un coût raisonnable incite à limiter le nombre d'appareils de mesure et donc de secteurs. Pour arbitrer ce compromis, il convient de prendre en compte deux contraintes incontournables¹ :

– La configuration hydraulique du réseau : la configuration des secteurs doit prendre en compte les infrastructures (réservoirs, stations de pompage). Elle est contrainte par la délimitation des UDI (Unités De Distribution) et des zones de pression. La sectorisation peut parfois conduire à des modifications du

récents sont entièrement télé-gérés et permettent un rapatriement et un stockage des mesures en continu avec des pas de temps horaires voir infra horaires.

fonctionnement hydraulique du réseau (démaillage notamment), il faut alors s'assurer que la nouvelle configuration peut en permanence satisfaire les objectifs du service.

– La mesurabilité du débit de nuit : les appareils de comptage (compteurs et débitmètres) mesurent les volumes avec une certaine précision. Dans certains cas, notamment lorsque le débit du secteur est calculé à partir de plusieurs comptages, l'incertitude d'évaluation du débit du secteur peut être considérable tandis que le débit nocturne à mesurer est d'autant plus faible que le secteur est petit. Il convient donc d'adapter la taille du secteur pour que le débit nocturne soit mesurable. Usuellement, pour satisfaire cette contrainte, le nombre d'usagers des secteurs est compris entre 500 et 3 000.

Au-delà de ces contraintes, la sectorisation doit tendre à satisfaire :

- L'homogénéité des secteurs : pour faciliter l'interprétation des indicateurs et la compréhension de leurs évolutions ;
- L'adaptabilité aux évolutions : en vue de créer ou modifier des secteurs en raison des évolutions de la demande sans tout remettre en cause ;
- La facilité d'exploitation : les systèmes mis en place doivent répondre à une logique commune et être compatibles entre eux, leur complexité doit être proportionnée aux capacités du service ;
- Un coût modéré.

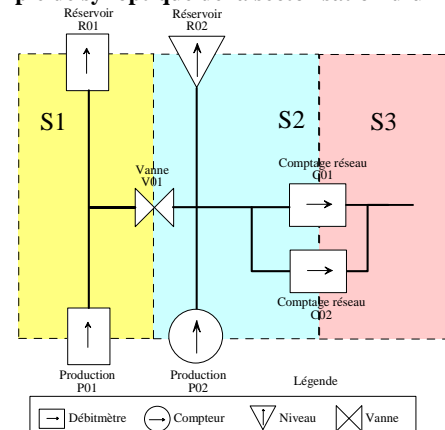
Représentation des secteurs

Synoptiques

Les secteurs sont représentés schématiquement par les synoptiques (cf. figure ci-contre) afin de mettre en évidence les communications entre les secteurs et éviter ainsi les erreurs dans les équations bilans. Pour construire le synoptique, il est proposé de :

- Distinguer les types de comptage, débitmètre, compteur ou mesure de niveau ;
- Représenter par une flèche le sens conventionnel positif de comptage ;
- Représenter en partie basse les productions avec un débit entrant dans le réseau ;
- Représenter en partie haute les stockages avec un débit sortant du réseau ;
- Nommer chaque secteur et chaque comptage par un identifiant court et sans équivoque.

Exemple de synoptique de la sectorisation d'un réseau



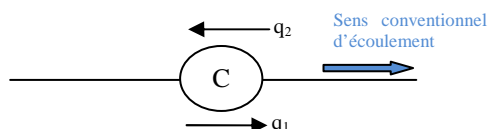
Les synoptiques peuvent également être traduits sous forme matricielle.

Matrices de comptage

La matrice de comptage permet de construire les équations bilan des secteurs sans ambiguïté et d'en vérifier la cohérence. Deux versions de matrices sont possibles suivant le choix de représentations des comptages à doubles sens.

• Choix de représentations des comptages à double sens

Soit C, le comptage à double sens et q_1 , q_2 les débits transitant à travers le comptage, comme illustré dans la figure ci-dessous.



Les deux façons de représenter le débit au compteur C sont énoncées par les conventions suivantes :

– **Convention 1** : le comptage est représenté par une seule variable q qui est la différence entre les débits q_1 et q_2 et peut donc être positive ou négative (cf. Matrice de comptage avec la convention 1) ;

– **Convention 2** : le comptage est représenté par deux variables, q_1 et q_2 dont les valeurs sont positives ou nulles (cf. Matrice de comptage avec la convention 2).

En se référant aux sens conventionnels définis dans le synoptique, les comptages sont affectés aux secteurs avec la valeur +1 pour les débits entrant et -1 pour les débits sortant.

• Composition de la matrice

La matrice de comptage comporte une colonne pour chaque secteur et une ligne pour chaque comptage. La matrice contient également une colonne « TEST », chaque cellule (ligne i , colonne « TEST ») est la somme des valeurs de la $i^{\text{ème}}$ ligne. Ces cellules prennent les valeurs suivantes :

– Les comptages correspondant à des productions doivent avoir la valeur +1 ;

– Les comptages entre secteurs ont une valeur nulle ;

– Avec la convention 1, les stockages prennent la valeur -1 ;

– Avec la convention 2, la valeur est -1 dans le sens remplissage et +1 dans le sens vidange.

La colonne « TEST » correspond par ailleurs à la formulation du débit de l'ensemble du service.

• Matrice avec la convention 1

La matrice suivante illustre le cas où les comptages du synoptique ne sont représentés que par une seule variable.

Matrice de comptage avec la convention 1

		SECTEURS			Test
		S1	S2	S3	
COMPTAGES	P01	1			1
	P02		1		1
	R01	-1			-1
	R02		-1		-1
	C01		-1	1	0
	C02		-1	1	0

Avec la convention 1, la formulation des bilans des secteurs est donnée par les équations suivantes :

- $[S1] = [P01] - [R01]$
- $[S2] = [P02] - [R02] - [C01] - [C02]$
- $[S3] = [C01] + [C02]$

• Matrice avec la convention 2

Dans le cas de la convention 2, on considère les comptages du synoptique et on adopte les notations suivantes pour la mise en place de la matrice de comptages :

– Pour les réservoirs, le nom du comptage est complété par -v pour les débits mesurés dans le sens de la vidange du réservoir et par -r pour les débits mesurés dans le sens du remplissage du réservoir ;

– Pour les comptages en distribution, le nom du comptage situé entre les secteurs x et y est complété par -xv y (x vers y) pour les débits mesurés lorsque le secteur S_x alimente le secteur S_y .

Matrice de comptage avec la convention 2

		SECTEURS			Test
		S1	S2	S3	
COMPTAGES	P01	1			1
	P02		1		1
	R01 -v	1			1
	R01 -r	-1			-1
	R02 -v		1		1
	R02 -r		-1		-1
	C01 -2v3		-1	1	0
	C01 -3v2		1	-1	0
	C02 -2v3		-1	1	0
	C02 -3v2		1	-1	0

Avec la convention 2, la formulation des bilans des secteurs est donnée par les équations suivantes :

- $[S1] = [P01] + ([R01-v] - [R01-r])$
- $[S2] = [P02] + ([R02-v] - [R02-r]) + ([C01-3v2] - [C01-2v3]) + ([C02-3v2] - [C02-2v3])$
- $[S3] = ([C01-2v3] - [C01-3v2]) + ([C02-2v3] - [C02-3v2])$

Débits de la sectorisation

La sectorisation permet d'obtenir des données brutes de volumes ou de débits transitant à chaque comptage. Pour exploiter les informations à l'échelle du secteur, il est nécessaire d'appliquer des traitements aux données brutes. Une méthodologie est proposée qui permet le calcul des débits des secteurs, aussi bien pour le court terme (débit horaire et journalier) que pour le long terme (débit hebdomadaire et annuel), et comporte des traitements adaptés afin de s'affranchir des erreurs de manipulations et de transmissions de données.

Compte tenu de la faiblesse des débits à mesurer en période nocturne, le pas de temps horaire est souvent un bon compromis pour ménager la fiabilité des données et la finesse des analyses.

L'obtention du débit horaire à l'échelle du secteur nécessite le respect des règles suivantes :

- Les horloges des comptages sont synchronisées ;
- Le nombre de chiffres significatifs avec lequel est restituée la mesure doit être cohérent avec la précision de la mesure. Il faut au minimum une précision au dixième de m³/h (0.1 m³/h), quand le matériel l'autorise, une valeur délivrée au centième de m³/h (0.01 m³/h) est souhaitable.

Des mesures effectuées à l'heure pile facilitent l'exploitation des données. Pour permettre son affectation aisée à la journée concernée, le débit mesuré en fin de journée doit

être considéré comme le débit du jour j à 24 heures plutôt que comme celui du jour j+1 à 0 heure.

L'archivage et le stockage peuvent se faire sous la forme suivante :

Date heure minute seconde	Identifiant du comptage
JJ/MM/AAAA hh:mm:ss	Débit horaire du comptage (m ³ /h)
...	...

Pour chaque secteur, des débits horaires, journaliers hebdomadaires et annuels sont calculés à partir des données brutes issues des comptages.

L'exploitation des données met en œuvre plusieurs étapes successives.

ETAPE 1 : traitement préalable

La transmission des données débitométriques par chaque instrument de mesure peut prendre deux formes ; soit des index volumétriques, soit des volumes horaires. L'obtention du débit horaire des comptages, à partir de ces données, nécessite un traitement en une ou deux étapes, suivant les cas.

1) S'assurer de la continuité chronologique des index ou des volumes horaires et de la régularité des pas de temps. Par exemple, pour un pas de temps horaire vérifier qu'il n'y ait ni heure manquante ni pas de temps infra-horaire. Cette

étape conditionne le calcul des débits horaires et donc tous les autres débits en aval du traitement.

2) Si la donnée est sous forme d'index, calculer le volume ou le débit horaire par différence d'index entre deux pas de temps horaires consécutifs. Si la donnée est sous forme de volume horaire, cette étape n'est pas nécessaire.

Remarque : l'étape 1 est importante car la transmission des données par les appareils de mesure est sujette à des perturbations.

ETAPE 2 : calcul des débits horaires

Les débits horaires sont calculés pour chaque secteur. Si un des compteurs du secteur présente une absence de données le jour j à l'heure h alors le débit horaire correspondant du secteur n'est pas calculé (cf. condition de calcul du débit horaire).

Condition de calcul du débit horaire

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{jh}(i) = n$$

$\lambda_{jh}(i)$ vaut 1 si la donnée du comptage i est présente à l'heure h et vaut 0 sinon. Lorsque la somme des λ_{jh} vaut n alors tous les compteurs présentent une valeur le jour j à l'heure h et le débit horaire est calculé.

Débit horaire

$$q_{hj} = \sum_{i=1}^n q_{hj}(C_i) \times \lambda_{jh}(i)$$

Volume écoulé durant la période d'une heure précédant l'heure h, le jour j du secteur, composé de n compteurs C_i .

ETAPE 3 : calcul des débits journaliers, nocturnes et minimum nocturnes

1) Débit moyen journalier

$$Q_{moy_j} = \frac{\sum_{h=1}^{24} q_{jh} \times \lambda_{jh}}{\sum_{h=1}^{24} \lambda_{jh}}$$

Volume horaire moyen sur la période de 0 h à 24 h, le jour j en m³/h
 λ_{jh} vaut 1 si la donnée est présente à l'heure h et vaut 0 sinon.

2) Débit nocturne

$$Q_{nuit_j} = \frac{\sum_{h=2}^5 q_{jh} \times \lambda_{jh}}{\sum_{h=2}^5 \lambda_{jh}}$$

Moyenne des volumes horaires mesurés à 2 h, 3h, 4h et 5 h pour le jour j en m³/h
 λ_{jh} vaut 1 si la donnée est présente à l'heure h et vaut 0 sinon.

3) Débit minimum

$$Q_{min_j} = \min(q_{jh})_{h \in [2-5]}$$

Valeur minimum des volumes horaires mesurés à 2 h, 3h, 4h et 5 h pour le jour j en m³/h

ETAPE 4 : filtre sur les débits

Un système de filtre sur les débits a été mis en place pour écarter les débits négatifs et les débits nocturnes supérieurs aux débits moyens journaliers.

Système de filtre sur les différents débits journaliers

- 1) $Q_{moy_j} > 0$
 2) $Q_{nuit_j} > 0$
 3) $\frac{Q_{nuit_j}}{Q_{moy_j}} < 1$
- Positivité des débits
- Débit de nuit inférieur au débit moyen journalier

Ces filtres permettent de déterminer la valeur de la fonction de validité de la valeur journalière λ_j :

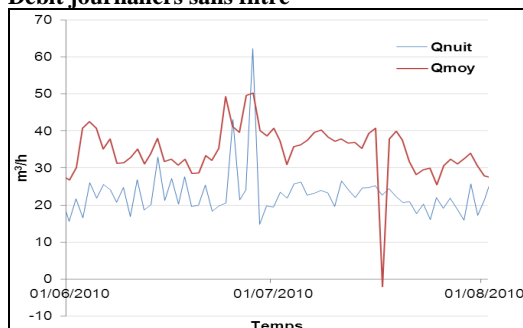
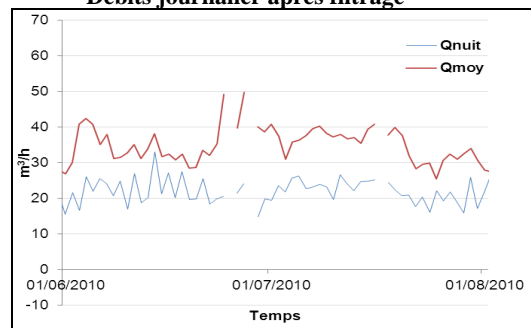
- Si 1), 2) et 3) sont simultanément vérifiées alors les débits journaliers sont conservés ;
- Sinon ils sont invalidés $\lambda_j = 0$.

Remarque : il est admis que les débits journaliers sont plus importants que les débits nocturnes car durant la nuit la consommation est très réduite. Cependant, le cas contraire n'est pas à exclure, des consommations nocturnes exceptionnelles et/ou particulières peuvent gonfler le débit nocturne de façon à ce qu'il dépasse le débit moyen journalier. Il s'agit ici de cas particuliers qui n'ont pas été intégrés dans le système de filtre.

Le tableau et les graphiques suivant illustrent le système de filtre.

Exemple de données filtrées

Q_{moy_j}	Q_{nuit_j}	$\frac{Q_{nuit_j}}{Q_{moy_j}}$	λ_j
-2.3	1.2	-0.52	0
3.6	7	1.9	0
2.64	1.52	0.57	1
2.9	-0.9	-0.31	0

Débit journaliers sans filtre**Débits journalier après filtrage**

ETAPE 5 : calcul des débits hebdomadaires

Les données journalières sont désormais « propres », le calcul des débits hebdomadaires est alors possible. L'expérience a montré que l'analyse annuelle ou inter-mensuelle des secteurs est plus facile avec des débits hebdomadaires, car cela permet de s'affranchir du caractère chaotique des consommations.

Deux débits hebdomadaires sont calculés, ils correspondent à la moyenne des débits moyens journaliers et nocturnes sur une semaine.

Les traitements antérieurs ayant éliminés les débits aberrants, certaines semaines se retrouvent donc avec moins de 7 jours de débits renseignés. Pour que les débits hebdomadaires aient une certaine pertinence, il a été choisi de garder les semaines avec au moins 4 jours, condition exprimée par l'encadré correspondant. Les équations suivantes traduisent le calcul des débits hebdomadaires.

Condition

$$\sum_{j \in \text{semaine}} \lambda_j \geq 4$$

Volume horaire moyen nocturne sur une semaine en m³/h

Sur une semaine donnée :

- Si la condition est vérifiée alors le débit hebdomadaire est calculé,
- Sinon la semaine est considérée sans donnée hebdomadaire.

Débit moyen hebdomadaire

$$Q_{moy}(s) = \frac{\sum_{j \in \text{semaine}} Q_{moy_j} \times \lambda_j}{\sum_{j \in \text{semaine}} \lambda_j}$$

Volume horaire moyen sur une semaine en m³/h

λ_{jh} vaut 1 si la donnée est présente à l'heure h et vaut 0 sinon.

Débit nocturne hebdomadaire

$$Q_{nuit}(s) = \frac{\sum_{j \in \text{semaine}} Q_{nuit_j} \times \lambda_j}{\sum_{j \in \text{semaine}} \lambda_j}$$

Volume horaire moyen nocturne sur une semaine en m³/h

λ_{jh} vaut 1 si la donnée est présente à l'heure h et vaut 0 sinon.

ETAPE 6 : calcul des débits annuels

Enfin, l'ultime étape consiste à calculer les débits annuels. Ces débits sont aux nombres de trois et sont utiles pour le suivi de long terme. Les jours j de l'année an varient de 1 à 365 ou 366.

Débit nocturne annuel

$$Q_{nuit}(an) = \frac{\sum_{j \in an} Q_{nuit_j} \times \lambda_j}{\sum_{j \in an} \lambda_j}$$

Débit moyen des débits nocturnes hebdomadaires sur l'année en m³/h
 λ_{jh} vaut 1 si la donnée est présente à l'heure h et vaut 0 sinon.

Débit de référence

$$Q_{nuit_{ref}} = \min(Q_{nuit(s)})_{s \in an}$$

Débit minimum des débits nocturnes hebdomadaires sur l'année en m³/h

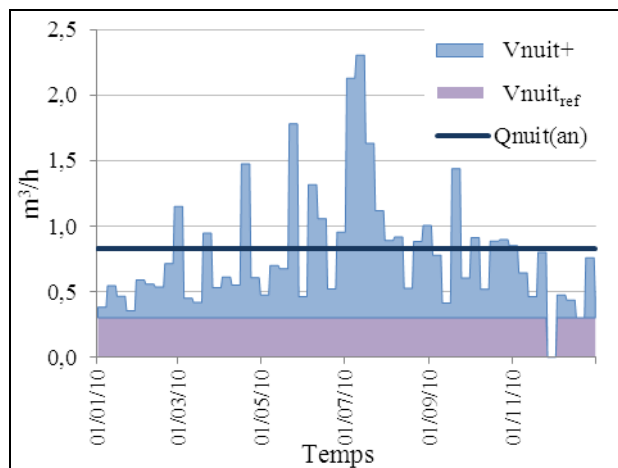
Débit moyen annuel

$$Q_{moy}(an) = \frac{\sum_{j \in an} Q_{moy_j} \times \lambda_j}{\sum_{j \in an} \lambda_j}$$

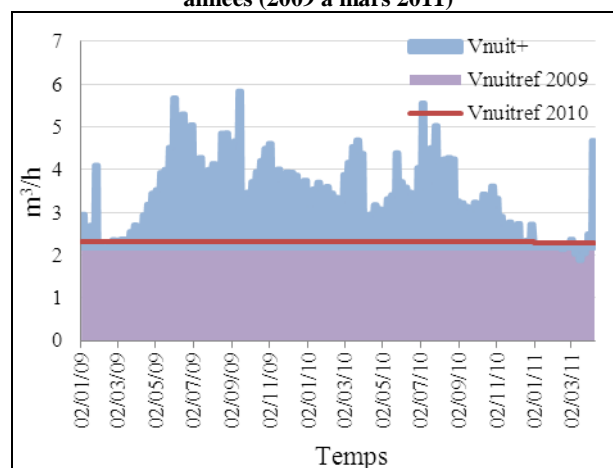
Débit moyen des débits moyens journaliers sur l'année en m³/h
 λ_{jh} vaut 1 si la donnée est présente à l'heure h et vaut 0 sinon.

Les figures ci-après illustrent les débits en question sur deux périodes différentes. Le volume de nuit référence $V_{nuit_{ref}}$ correspond au débit horaire $Q_{nuit_{ref}}$ s'écoulant tout au long de l'année (en violet sur le graphique). Le volume de nuit additionnel V_{nuit+} , est la différence entre le volume annuelle correspondant au $Q_{nuit(s)}$ de secteur et $V_{nuit_{ref}}$.

Débits nocturnes hebdomadaires et annuels sur l'année 2010



Débits nocturnes hebdomadaires et annuels sur plus de deux années (2009 à mars 2011)



Evaluation de la pression d'une zone de desserte

La pression dans les réseaux influence les fuites en les intensifiant ou en les créant. L'intérêt d'abaisser la pression dans une perspective de diminution des volumes de pertes est aujourd'hui largement démontré. Or, pour établir un lien entre la pression et les pertes à l'échelle du secteur, il faut disposer d'une estimation de la pression à cette même échelle. La pression étant variable dans le temps (pertes de charges) et de l'espace (altitude), cela suppose de définir ce que recouvre la notion de « pression d'une zone » et de préciser les manières dont elle peut être évaluée.

Concepts et méthode développés à l'international

La prise en compte de la pression pour l'évaluation de la réduction des pertes d'un secteur a donné lieu à de nombreux travaux. Deux ouvrages à visées méthodologiques peuvent être cités : « District Metered Areas Guidance Notes (Draft) » [Morrison *et al.*, 2007], « Leakage management and control et « A best practice training manual » [Farley, 2001].

Trois principaux concepts ont été développés concernant l'évaluation de la pression d'un secteur (en anglais DMA pour District Metered Area) ou d'un réseau :

- **Current Average System Pressure (CASP)** : pression moyenne annuelle du réseau. C'est cette valeur qui est prise en compte dans l'évaluation des pertes incompressibles (UARL). Elle est également dénommée Average Operating Pressure dans l'ouvrage de référence « Performance Indicators for Water Supply Services »¹.

- **Average Zone Night Pressure (AZNP)** : pression moyenne nocturne d'un secteur. Cet indicateur est utilisé pour la gestion des pertes au niveau du secteur avec suivi des débits de nuit.

- **Average Zone Point (AZP)** : point d'un secteur dont les variations de pression sont supposées représentatives de la moyenne du secteur.

La Water Services Association of Australia (WSAA) a élaboré un guide pour l'estimation de la pression moyenne des zones de desserte et des réseaux². Cette méthode passe par la définition systématique d'un point représentatif de chaque secteur (AZP) et propose une approche systématique qui comporte 4 étapes.

Etape 1 : calculer l'altitude moyenne pondérée de chaque zone

A partir des données topographiques, on considère la bande délimitée par deux courbes de niveau et on lui affecte l'altitude moyenne des deux courbes. On affecte ensuite à chaque bande un poids représentatif du réseau puis on calcule l'altitude moyenne pondérée.

Les facteurs de pondération proposés sont les suivants :

- La longueur de conduites ou le nombre de bouches d'incendie si la densité de branchement de la zone est inférieure à 20 branchements/km ;
- Le nombre de branchements particuliers si la densité de branchement de la zone est supérieure à 20 branchements/km.

Etape 2 : identifier un hydrant représentatif de l'AZP de chaque zone

Pour chaque zone, il s'agit de trouver un hydrant idéalement situé vers le centre de la zone et à une cote égale à l'altitude moyenne pondérée de la zone. Si un tel point n'existe pas, il faut choisir un hydrant dont la cote est proche et corriger ensuite les valeurs de pression de la différence de cotes.

Etape 3 : obtenir pour chaque zone une évaluation des pressions à l'AZP, trois méthodes de calcul

- Par mesure directe à l'AZP ;
- Par évaluation à partir de mesures situées à d'autres points en estimant les pertes de charges ;
- Par calcul de la pression avec un modèle hydraulique.

Etape 4 : calculer la pression moyenne du réseau à partir de celles des zones

La pression moyenne du réseau sera considérée égale à la moyenne pondérée des pressions moyennes des AZP des différentes zones. Les facteurs de pondération proposés sont les mêmes que ceux de l'étape 1 et selon les mêmes critères.

1 : ALEGRE H., BAPTISTA J. M., CABRERA JR. E., CUBILLO F., DUARTE P., HIRNER W., MERKEL W., PARENA R. (2006). PERFORMANCE INDICATORS FOR WATER SUPPLY SERVICES. 289 P.

2 : LAMBERT A. (2009) GUIDELINES AVERAGE PRESSURE. WATER SERVICES ASSOCIATION OF AUSTRALIA. 12 P.

Méthodes pratiques d'évaluation de la pression

La méthodologie proposée par la WSAA est conçue pour les services sectorisés et recourt systématiquement à la définition d'un AZP. Elle n'est donc pas toujours applicable, notamment en France, c'est pourquoi des variantes en l'absence de sectorisation ou sans recours à la notion d'AZP sont proposées³.

En l'absence d'informations sur le nombre de branchements, il est supposé que la consommation moyenne journalière est représentative du nombre de branchements. Concernant la topographie, en l'absence d'informations plus précises les cotes sol des nœuds mentionnées dans les modèles hydrauliques ont été utilisées.

Trois méthodes ont été expérimentées pour évaluer **PMS** la pression moyenne de service (CASP dans la terminologie anglophone) et **PMN** la pression moyenne nocturne (AZNP dans la terminologie anglophone).

Méthode « Topographique »

Cette méthode est fondée sur une approche topographique et néglige les variations de pression dues aux pertes de charges.

La pression statique moyenne d'une zone z avec la pondération w , PS_{wz} est obtenue en faisant la différence entre la cote trop plein CTP_z du réservoir alimentant la zone z ou le cas échéant, la HMT (Hauteur Manométrique Totale) maximum du dispositif alimentant la zone (pompe, stabilisateur de pression, etc.) et la cote sol moyenne pondérée de la zone CSM_{wz} .

Dans cette méthode, on considère que PS_{wz} constitue à la fois une évaluation de **PMS** et de **PMN**.

Méthode « Modèle hydraulique »

Cette méthode s'appuie sur le modèle hydraulique et considère les variations horaires de la pression sur une journée représentative, les pertes de charges étant évaluées par le modèle. La pression dynamique PD_i^h est calculée pour chaque nœud i à chaque heure h , permettant le calcul de la pression dynamique moyenne horaire pondérée de la zone z .

Méthode « Mesure »

Cette méthode s'appuie sur des mesures de pression effectuées en un point moyen représentatif de la zone, PMZ . On choisit un point k situé dans une partie a priori représentative de la zone z et dont la cote au sol CS_k est proche de la cote sol moyenne pondérée de la zone CSM_{wz} . PM_k^h étant la pression mesurée au point k à l'heure h , la pression moyenne horaire pondérée de la zone z .

Pour le calcul de **PMN**, deux variantes sont à distinguer suivant la manière dont le débit nocturne a été calculé :

- Soit le débit nocturne pris en compte est la moyenne des débits sur la période de 2 h à 5 h (**PMN₁**) ;
- Soit le débit nocturne pris en compte est le minimum des débits entre 2 h et 5 h (**PMN₂**).

Le calcul de la pression d'une zone fait intervenir un système de pondération. Le poids w peut, selon l'information disponible être :

- Le nombre de branchements, Nb ;
- La consommation au nœud, c ;
- La longueur de réseau, l ;
- Uniforme, u .

Evaluation de la pression par la topographie

$$PS_{wz} = CTP_z - CSM_{wz}$$

Avec :

$$CSM_{wz} = \frac{\sum_{i=1}^n CS_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \begin{array}{l} CS_i - \text{Cote Sol du nœud } i \\ w \in \{Nb, u, c, l\} \end{array}$$

Evaluation de la pression par le modèle hydraulique

$$PD_{wz}^h = \frac{\sum_{i=1}^n PD_i^h \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Estimation de **PMS**

$$PD_{wz}^j = \frac{\sum_{h=0}^{23} PD_{wz}^h}{24}$$

Estimation de **PMN₁**

$$PDN_{1wz}^j = \frac{\sum_{h=2}^5 PD_{wz}^h}{4}$$

Estimation de **PMN₂**

$$PDN_{2wz}^j = \max_{h=2}^{h=5} (PD_{wz}^h)$$

Evaluation de la pression par la mesure

$$PMwz_{pmzk}^h = PM_k^h + CS_k - CSM_{wz}$$

Estimation de **PMS**

$$PMwz_{pmzk}^j = \frac{\sum_{h=0}^{23} PMwz_{pmzk}^h}{24}$$

Estimation de **PMN₁**

$$PMNwz_{pmzk}^j = \frac{\sum_{h=2}^5 PMwz_{pmzk}^h}{4}$$

Estimation de **PMN₂**

$$PMNwz_{pmzk}^j = \max_{h=2}^{h=5} (PM_{pmzk}^h)$$

Avantages et inconvénients des méthodes d'évaluation de la pression

Les trois méthodes d'évaluation de la pression envisagées, sont en général applicables et présentent chacune des avantages et des inconvénients de telle sorte qu'aucune ne semble devoir être écartée. Ces méthodes sont synthétisées dans le tableau ci-après.

Comparatif des trois méthodes d'évaluation de la pression

	Méthode « Topographique »	Méthode « Modèle hydraulique »	Méthode « Mesure »
Principes de base	La pression moyenne est supposée peu différente de la pression statique qui peut être estimée à partir de l'altimétrie des éléments du réseau	La pression moyenne est calculée à partir d'un modèle hydraulique supposé fiable pour une journée moyenne de consommation	La pression moyenne du secteur est déduite de mesures effectuées en un point dont la pression est supposée représentative de celle de l'ensemble du secteur
Informations nécessaires	Plan du réseau sur fond topographique (courbes de niveau)	Existence d'un modèle hydraulique calé avec une information fiable et récente concernant la demande	Informations topographiques et point de mesure dont on connaît avec précision la cote au sol
Domaine d'application	Bien adapté aux secteurs en distribution pure. A manipuler avec précaution dans tous les autres cas	Applicable à tout type de secteur dès lors que les conditions de fonctionnement et la demande sont bien connus	Applicable aux seuls secteurs dont tous les usagers sont soumis au même régime de pression
Avantages	Facile à mettre en œuvre y compris pour des réseaux dont la connaissance est lacunaire	Applicable à tout type de secteur ; possibilité de simuler aisément des configurations différentes	Assez simple à mettre en œuvre et permet une adaptation aux variations de consommation et de fonctionnement
Inconvénients	Inapplicable pour les réseaux complexes	Ne permet pas une adaptation simple et réaliste aux éventuelles évolutions de la demande	Inapplicable lorsqu'il y a plusieurs régimes de pression, nécessite la mise en place de matériels de mesure
Précautions	En dehors des réseaux en distribution simple, des précautions doivent être prises et des corrections mises en œuvre	La qualité du modèle est primordiale, il est utile de faire des tests de cohérence voire de recouper avec les autres méthodes	La cote au sol du point de mesure doit être connue avec une bonne précision, la représentativité du point de mesure doit être vérifiée

Le système de pondération utilisé pour le calcul de la pression moyenne a un impact fort sur les résultats. Ce qui nous conduit à préconiser l'utilisation de la pondération par le nombre de branchements chaque fois que cette information est mobilisable.

Remarque : il peut advenir qu'une zone connaisse plusieurs types de fonctionnement en fonction des périodes de l'année, c'est le cas notamment de zones touristiques où certaines installations ne fonctionnent que pendant la haute saison. Dans de tels cas, il convient d'évaluer la pression pour chacun des régimes de fonctionnement puis d'en déduire la pression moyenne annuelle en effectuant une pondération selon la durée des périodes correspondantes.

Evaluation de la consommation nocturne

C'est durant la période nocturne que la consommation des usagers est la plus faible, c'est pourquoi souvent, le débit de fuites peut de prime abord être approché par le débit minimum nocturne. Cependant, pour aller plus loin dans la quantification du débit de fuites, il faut s'intéresser aux différentes composantes du débit nocturne et, plus particulièrement, à la consommation nocturne.

Une vision schématique des composantes du débit de nuit est représentée par le tableau ci-contre, où deux critères sont considérés :

- La séparation entre les consommations et les fuites ;
- La distinction entre les parts courantes et exceptionnelles des débits constatés.

Composantes du débit de nuit

Débit de nuit	Consommations nocturnes après compteur (usages et fuites)	Exceptionnelles	Consommations nocturnes exceptionnelles
		Courantes	Consommations nocturnes courantes
		Exceptionnelles	Fuites exceptionnelles non réparées
	Fuites (partie Service des Eaux)	Courantes	Fuites détectables non détectées Fuites difficilement détectables

— — — : Point de livraison

Pour évaluer la consommation nocturne, deux méthodes sont envisagées :

- La méthode à « consommation nocturne constante », proposée par l'IWA. Elle fait intervenir une estimation unitaire par type d'abonné du débit consommé la nuit ;
- La méthode à « consommation nocturne proportionnelle », proposée par Irstea (ancien Cemagref). Elle prend pour hypothèse que la consommation nocturne est proportionnelle à la consommation moyenne journalière.

Indicateurs journaliers de consommations et de pertes

Les indicateurs suivants sont utilisés :

- Q_{moy_j} Débit moyen journalier le jour j , en m^3/h
- Q_{nuit_j} Débit nocturne le jour j , en m^3/h
- QC_{moy_j} Débit de Consommation moyen le jour j , en m^3/h
- QC_{nuit_j} Débit de Consommation nocturne le jour j , en m^3/h
- QP_{moy_j} Débit de Pertes moyen le jour j , en m^3/h
- QP_{nuit_j} Débit de Pertes nocturne le jour j , en m^3/h

Par définition :

$$Q_{nuit_j} = QC_{nuit_j} + QP_{nuit_j} \quad \text{et} \quad Q_{moy_j} = QC_{moy_j} + QP_{moy_j}$$

Méthode « à consommation nocturne constante »

Une méthode d'évaluation de la consommation nocturne d'un secteur a été développée au Royaume-Uni en 1994 à l'occasion d'une initiative nationale sur les fuites et approfondie depuis¹. Elle repose sur l'hypothèse que la consommation nocturne est constante dans le temps (hors consommations mesurées).

La consommation nocturne est subdivisée en trois selon le type de consommateur :

- $QC_{nuit_{dom}}$: Consommation nocturne domestique ;
- $QC_{nuit_{ndom}}$: Consommation nocturne non domestique ;
- $QC_{nuit_{mes}}$: Consommation nocturne mesurée.

Les consommations nocturnes domestiques et non domestiques sont déterminées à partir du nombre d'abonnés du secteur dans chacune des catégories de consommations nocturnes domestiques et non domestiques de référence.

La consommation nocturne mesurée concerne les usagers équipés d'un comptage spécifique, leur volume nocturne est mesuré (préconisé dans le cas où la consommation nocturne du consommateur est supérieure à 500 l/h).

Les variables suivantes sont utilisées pour la suite :

- Na_{dom} Nombre d'abonnés domestiques du secteur ;
- Na_{ndom} Nombre d'abonnés non domestiques du secteur ;
- qc_{dom} Consommation nocturne domestique de référence ;
- qc_{ndom} Consommation nocturne non domestique de référence.

Evaluation de la consommation nocturne

- Consommation nocturne domestique**

La consommation nocturne domestique est calculée de la façon suivante :

$$QC_{nuit_{dom}} = Na_{dom} \times qc_{dom}$$

Avec qc_{dom} pouvant être estimé à l'aide des deux méthodes suivantes :

1) Méthode simplifiée

$$qc_{dom} \in [1.8 ; 2.5] \text{ l/h/ab}$$

2) Méthode fine

$$qc_{dom} = Tocc \times qc_{pers}$$

Avec :

$Tocc$	qc_{pers}
Taux moyen d'occupation des logements (de l'ordre de 2.3 en France)	Consommation nocturne moyenne de référence par personne, égale à 0.6 l/h/pers

- Consommation nocturne non domestique**

La consommation nocturne domestique est calculée de la façon suivante :

$$QC_{nuit_{ndom}} = Na_{ndom} \times qc_{ndom}$$

De même, deux méthodes peuvent être utilisées pour définir qc_{dom} :

1) Méthode simplifiée

$$qc_{ndom} = 8 \text{ l/h/ab}$$

2) Méthode fine

Les consommateurs nocturnes non domestiques sont regroupés en cinq catégories ayant chacune une valeur qc_{dom} propre.

Les catégories de la méthode fine pour l'estimation de la consommation nocturne non domestiques sont détaillées dans le tableau ci-dessous.

Consommations nocturnes de référence par catégorie de consommateur

Catégorie	Type de consommateur nocturne non domestique	qc_{ndom} (l/h/ab)
A	Poteaux/bouches incendies, postes de police, centrales téléphoniques, banques, églises, chapelles, jardins, jardins ouvriers, jardins maraîchers, ouvrages de traitement d'eau et d'assainissement.	0.7
B	Magasins, bureaux, artisanats, laveries automatiques, dépôts, grande propriété domestique, garages, stations-services, sites touristiques pour caravanes, fermes, petites exploitations, abreuvoirs.	6.3
C	Hôtels, écoles/collèges, restaurants, cafés, bars, brasseries, foyers sociaux, sites résidentiels pour caravanes, écuries.	10.4
D	Hôpitaux, usines, toilettes publiques, chantiers.	20.7
E	Maisons de retraite, mines, carrières.	60.6

- Consommation nocturne totale du secteur**

La consommation nocturne totale du secteur est égale à la somme des consommations nocturnes domestiques, non domestiques et des gros consommateurs mesurées :

$$QC_{nuit} = QC_{nuit_{dom}} + QC_{nuit_{ndom}} + QC_{nuit_{mes}}$$

Pertes nocturnes du secteur

Connaissant Q_{nuit} et QC_{nuit} on obtient les pertes nocturnes :

$$QP_{nuit_j} = Q_{nuit_j} - QC_{nuit_j}$$

Limitations

Dans cette approche la consommation nocturne est constante. Or, celle-ci peut fluctuer en raison du comportement des usagers. Cela est particulièrement marqué dans les zones touristiques où en période creuse, une proportion très importante de logements est inoccupée.

Il conviendrait alors de moduler la consommation nocturne en fonction des variations du taux d'occupation des logements, mais cette information n'est pas si facilement accessible. D'où l'idée, développée dans les paragraphes suivants, de considérer que la consommation moyenne du secteur est un indicateur de l'occupation des logements en fonction duquel la consommation nocturne peut être modulée.

Méthode « à consommation nocturne proportionnelle »

Hypothèses et notations

- Traduction de l'hypothèse de consommation nocturne proportionnelle**

L'hypothèse que la consommation nocturne est proportionnelle à la consommation moyenne journalière est formulée comme suit :

$$QC_{nuit_j} = \alpha_0 \times QC_{moy_j} \text{ ou encore } \frac{QC_{nuit_j}}{QC_{moy_j}} = \alpha_0$$

Avec α_0 coefficient de consommation nocturne du secteur, supposé constant.

- Expression de la relation entre pertes nocturnes et journalières**

Le lien entre la pression P et le débit de fuites QP d'un réseau est généralement exprimé de la façon approchée suivante :

$$\frac{QP_1}{QP_0} = \frac{P_1}{P_0}$$

Avec QP_0 le débit de fuite à la pression P_0 et QP_1 le débit de fuite à la pression P_1 .

Ainsi, pour une journée j :

$$\frac{QP_{nuit_j}}{QP_{moy_j}} = \frac{P_{nuit_j}}{P_{moy_j}}$$

Dans l'hypothèse où les pressions moyennes nocturnes sont proportionnelles, on peut noter :

$$\frac{QP_{nuit_j}}{QP_{moy_j}} = \beta_0 \quad \text{où } \beta_0 \text{ coefficient de pertes nocturnes est supposé constant.}$$

- Coefficient journalier de débit nocturne**

Le coefficient journalier de débit nocturne γ_j est défini comme suit :

$$\gamma_j = \frac{Q_{nuit_j}}{Q_{moy_j}}$$

- Rendement journalier du secteur**

Par analogie avec le rendement annuel du réseau (Fiche 1-1), le rendement journalier du secteur RS_j est défini comme suit :

$$RS_j = \frac{QC_{moy_j}}{Q_{moy_j}}$$

Calcul de la consommation nocturne

Les définitions établies précédemment aboutissent au système d'équations suivant :

$$\begin{cases} Q_{nuit_j} = QC_{nuit_j} + QP_{nuit_j} \\ Q_{moy_j} = QC_{moy_j} + QP_{moy_j} \\ \frac{QC_{nuit_j}}{QC_{moy_j}} = \alpha_0 \\ \frac{QP_{nuit_j}}{QP_{moy_j}} = \beta_0 \end{cases}$$

Où les inconnues sont : QC_{moy_j} , QC_{nuit_j} , QP_{moy_j} et QP_{nuit_j} .

La résolution de ce système d'équations aboutit à :

$$\begin{cases} QC_{moy_j} = \frac{\beta_0 \times Q_{moy_j} - Q_{nuit_j}}{\beta_0 - \alpha_0} \\ QC_{nuit_j} = \frac{\alpha_0 \times (\beta_0 \times Q_{moy_j} - Q_{nuit_j})}{\beta_0 - \alpha_0} \\ QP_{moy_j} = \frac{Q_{nuit_j} - \alpha_0 \times Q_{moy_j}}{\beta_0 - \alpha_0} \\ QP_{nuit_j} = \frac{\beta_0 \times (Q_{nuit_j} - \alpha_0 \times Q_{moy_j})}{\beta_0 - \alpha_0} \end{cases}$$

A partir de l'expression de QC_{moy_j} , une nouvelle expression de RS_j peut être obtenue :

$$RS_j = \frac{QC_{moy_j}}{Q_{moy_j}} = \frac{\beta_0 \times Q_{moy_j} - Q_{nuit_j}}{Q_{moy_j} \times (\beta_0 - \alpha_0)}$$

$$\text{d'où } RS_j = \frac{\beta_0 - \gamma_j}{\beta_0 - \alpha_0}$$

Evaluation pratique de β_0 et de α_0

• Evaluation de β_0

Conformément aux notations précédemment exposées, la relation entre les pertes nocturnes et journalières est la suivante :

$$\beta_0 = \frac{QP_{nuit_j}}{QP_{moy_j}} = \frac{P_{nuit_j}}{P_{moy_j}}$$

Compte tenu de l'hypothèse de constance de β_0 , cette égalité est valable pour le jour moyen. Par convention, la pression nocturne moyenne est notée PMN et la pression moyenne journalière est notée PMS , ainsi :

• Evaluation de α_0

Selon les informations disponibles, on peut envisager trois niveaux d'évaluation de α_0 .

o Estimation à partir de ratio globaux

A défaut d'informations plus précises, α_0 peut être évalué à partir d'une estimation des consommations moyennes et nocturnes d'un abonné à l'aide des ratios suivants :

– Un abonné consomme en moyenne 120 m³/an soit $QC_{moy_j} = 13,7$ l/h/ab ;

o Estimation à l'échelle du réseau

A l'échelle du réseau, lorsque les consommations annuelles et le débit de nuit moyen sont connus, on peut alors déterminer :

$$\begin{cases} QC_{moy_{(an)}} = \frac{VC[R]}{24 \times 365} \\ QP_{moy_{(an)}} = \frac{VP[R]}{24 \times 365} \\ Q_{nuit_{(an)}} = \frac{\sum_{j \in an} Q_{nuit_j} \times w_j}{\sum_{j \in an} w_j} \end{cases}$$

Où :

- $VC[R]$ et $VP[R]$ sont respectivement les volumes annuels consommés et perdus du réseau ;
- w_j vaut 0 pour les jours invalides 1 sinon (2-2).

o Estimation à l'échelle du secteur

Lorsqu'il est possible d'évaluer la consommation annuelle des abonnés du secteur (directement avec les relevés annuels ou au prorata du nombre d'abonnés au sein du réseau), une évaluation de α_0 peut être effectuée à l'échelle du secteur. $Q_{moy_{(an)}}$ et $Q_{nuit_{(an)}}$ sont déterminés à partir de la sectorisation.

$$QC_{moy_{(an)}} = \frac{VC[S]}{24 \times 365}$$

Il est donc possible, si l'on dispose d'une évaluation de α_0 et de β_0 , d'évaluer la consommation nocturne à partir des débits journaliers du secteur (Q_{moy_j} et Q_{nuit_j}).

Cela permet également une évaluation des autres débits journaliers consommés ou perdus ainsi que du rendement journalier.

$$\beta_0 = \frac{PMN}{PMS}$$

Sauf exception, β_0 est supérieur à 1 et excède rarement 2.

Bien souvent, notamment dans le cas de secteurs en distribution pure bien dimensionnés, β_0 est très proche de 1, ainsi lorsque les évaluations de PMS et PMN font défaut, on pourra supposer $\beta_0 = 1$. Les méthodes d'évaluation de PMN et de PMS sont décrites dans la Fiche 2-3.

– La consommation nocturne moyenne d'un abonné est de $QC_{nuit_j} = 2$ l/h/ab².

$$\alpha_0 = \frac{QC_{nuit}}{QC_{moy}} = \frac{2}{13,7} = 0,146$$

Soit $\alpha_0 \approx 0,15$

De plus :

$$QC_{nuit} = Q_{nuit} - QP_{nuit} \quad \text{et} \quad QP_{nuit} = \beta_0 \times QP_{moy}$$

Donc

$$\alpha_0 = \frac{Q_{nuit_{(an)}} - \beta_0 \times QP_{moy_{(an)}}}{QC_{moy_{(an)}}}$$

Soit, dans le cas où β_0 n'est pas connu et supposé égal à 1, l'évaluation de α_0 à l'échelle du réseau est la suivante :

$$\alpha_0 = \frac{Q_{nuit_{(an)}} - QP_{moy_{(an)}}}{QC_{moy_{(an)}}}$$

$$\text{Sachant que : } \begin{cases} QC_{nuit} = Q_{nuit} - QP_{nuit} \\ = Q_{nuit} - \beta_0 \times QP_{moy} \\ = Q_{nuit} - \beta_0 \times (Q_{moy} - QC_{moy}) \end{cases}$$

A l'échelle du secteur :

$$\alpha_0 = \frac{Q_{nuit_{(an)}} - \beta_0 \times (Q_{moy_{(an)}} - QC_{moy_{(an)}})}{QC_{moy_{(an)}}} \quad \text{Avec} \quad \beta_0 = \frac{PMN}{PMS}$$

Eddy RENAUD, Dikra KHEDHAOUIRIA & MARION CLAUZIER
IRSTEA BORDEAUX, 50 Av de Verdun, Gazinet
33612 CESTAS Cedex
e-mail contact : eddy.renaud@irstea.fr

Indicateurs structurels et de pertes

Les indicateurs structurels et de pertes à l'échelle d'un secteur ou d'un réseau permettent de synthétiser les principales caractéristiques d'une zone et de les mettre en lien avec les niveaux des pertes et leurs évolutions.

Indicateurs structurels

Matériau

Une façon simple de construire les indicateurs représentatifs du matériau des canalisations est de calculer des taux pondérés par la longueur.

Lorsque des matériaux sont peu représentés dans le réseau, il est souhaitable d'effectuer les regroupements qui semblent pertinents (par exemple : conduites métalliques).

Taux du Matériaux M

$$T[M] = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \times M(i)}{\sum_{i=1}^n l_i}$$

Avec :

l_i , longueur de la canalisation i , en km

$M(i)$ tel que $\begin{cases} M(i)=1 & \text{si la canalisation } i \text{ est en matériaux } M \\ M(i)=0 & \text{sinon} \end{cases}$

Age

Age moyen

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n a_i \times l_i}{\sum_{i=1}^n l_i}$$

En année avec :

a_i , âge de la canalisation i , en années

l_i , longueur de la canalisation i , en km

Remarque : l'indicateur « Année moyenne de pose », strictement équivalent à l'« Age moyen » est un peu moins parlant mais a l'avantage d'être plus stable dans le temps et est calculé de la même façon.

Diamètre

Diamètre moyen

$$DIA = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \times l_i}{\sum_{i=1}^n l_i}$$

En mm avec :

d_i , diamètre de la canalisation i , en mm

l_i , longueur de la canalisation i , en km

Remarque : l'intérêt de procéder par moyenne pondérée est l'unicité de l'indicateur, il est toutefois possible, comme pour le matériau, de raisonner par taux pour des classes de diamètres.

Casses

Taux de casse sur canalisation principales

$$TDC = \frac{\sum_{i=1}^n NC_i}{\sum_{i=1}^n t_i \times l_i}$$

En casses/km.an, avec :

NC_i , nombre de casses de la canalisation i

t_i , durée d'enregistrement des casses, en années

l_i , longueur de la canalisation i , en km

Taux de casse sur branchement

$$TDCB = \frac{NCB}{Nb} \times 1000$$

En casses pour 1 000 branchements, avec :

NCB , nombre de casses sur branchements

Nb , nombre de branchements

Densités

Densité d'abonnés

$$Da = \frac{Na}{L}$$

En abonnés/km, avec :

 Na , nombre d'abonnés L , linéaire du secteur, en kmDensité de piquages

$$Dp = \frac{Np}{L}$$

En piquages/km, avec :

 Np , nombre de piquages d'appareils de fontainerie hors branchements L , linéaire du secteur, en kmDensité de branchement

$$Db = \frac{Nb}{L}$$

En branchements/km, avec :

 Nb , nombre de branchements L , linéaire du secteur, en kmLongueur de réseau par branchement (inverse de Db)

$$Lb = \frac{L}{Nb}$$

En km/branchement, avec :

 Nb , nombre de branchements L , linéaire du secteur, en kmAPPLICATION NUMERIQUE DES INDICATEURS STRUCTURELS

Soit un secteur regroupant 25 abonnés, 20 branchements et est composé de 11 canalisations dont les caractéristiques structurelles sont résumées dans le tableau suivant :

Caractéristiques structurelles du secteur

Canalisation	Matériaux	Date de pose	Age (an)	Diamètre (mm)	Linéaire (m)	Nombre de casses* en 2011
Can1	Acier	1982	29	100	98	0
Can2	Acier	1982	29	100	147	1
Can3	Pvc	2002	9	32	47,3	0
Can4	Fonte	1986	25	50	38,9	1
Can5	Pvc	2001	10	32	12,1	0
Can6	Pvc	2001	10	32	51	0
Can7	Pvc	2001	10	32	62,7	0
Can8	Fonte	1987	24	50	36	1
Can9	Polyéthylène	2006	5	40	21,6	0
Can10	Fonte	1987	24	50	24	3
Can11	Polyéthylène	2004	7	40	29	0
TOTAL	-	-	-	-	567.6	6

* Sur Canalisation

✓ Calcul des indicateurs structurels pour l'année 2011

$$T[\text{Acier}] = \frac{98 + 147}{567.6} = 0.43$$

$$DIA = \frac{32 \times (47.3 + 12.1 + 51 + 62.7) + 100 \times (98 + 147) + 50 \times (38.9 + 36 + 24) + 40 \times (21.6 + 29)}{567.6} = 65.2 \text{ mm}$$

$$A = \frac{29 \times (98 + 147) + 9 \times 47.3 + 25 \times 38.9 + 10 \times (12.1 + 51 + 62.7) + 24 \times (36 + 24) + 5 \times 21.6 + 7 \times 29}{567.6} = 20.3 \text{ ans}$$

$$TDC = \frac{6}{567.6} = 0.01 \text{ casses/an}$$

$$Da = \frac{25}{567.6} = 0.04 \text{ abonnés/m}$$

$$Db = \frac{20}{567.6} = 0.03 \text{ branchements/m}$$

Indicateurs de pertes

Les principes des indicateurs annuels de pertes, évalués avec des volumes annuels à l'échelle du réseau, peuvent être étendus pour des débits journaliers à l'échelle du secteur (Fiches 1-1 et 2-2).

Rappel sur les débits :

Q_{moy_j} Débit moyen le jour j , en m^3/h

Q_{nuit_j} Débit nocturne le jour j , en m^3/h

QC_{moy_j} Débit de Consommation moyen le jour j , en m^3/h

QC_{nuit_j} Débit de Consommation nocturne le jour j , en m^3/h

QP_{moy_j} Débit de Pertes moyen le jour j , en m^3/h

QP_{nuit_j} Débit de Pertes nocturne le jour j , en m^3/h

Rappel sur les autres variables

$\alpha_0 = \frac{QC_{nuit_j}}{QC_{moy_j}}$	Coefficient journalier de débit nocturne
$\beta_0 = \frac{QP_{nuit_j}}{QP_{moy_j}}$	Coefficient de consommation nocturne du secteur
$\gamma_j = \frac{Q_{nuit_j}}{Q_{moy_j}}$	Coefficient de pertes nocturne

Rendement journalier du secteur, RS_j Par définition :

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

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

Soit ramené à la journée et au secteur :

$$RS_j = \frac{QC_{moy_j}}{Q_{moy_j}}$$

Soit donc :

$$RS_j = \frac{\beta_0 - \gamma_j}{\beta_0 - \alpha_0}$$

Indice linéaire de pertes journalier du secteur, $ILPS_j$ Par définition :

$$ILP = \frac{VP}{365 \times L}$$

En $m^3/km.an$, avec :

- VP , Volume annuel de pertes en m^3
- L , Linéaire du secteur en km

Soit ramené à la journée et au secteur :

$$ILPS_j = \frac{24 \times QP_{moy_j}}{L}$$

En $m^3/km.j$.

Et en tenant compte des variables :

$$ILPS_j = \frac{24 \times (Q_{nuit_j} - \alpha_0 \times Q_{moy_j})}{L \times (\beta_0 - \alpha_0)}$$

Indice journalier de pertes par abonné du secteur, $IPAS_j$ Par définition :

$$IPA = \frac{VP}{365 \times Na}$$

En $m^3/abonné.an$, avec :

- VP , Volume annuel de pertes en m^3
- Na , Nombre d'abonné du secteur

Soit ramené à la journée et au secteur :

$$IPAS_j = \frac{24 \times QP_{moy_j}}{Na}$$

En $m^3/abonné.j$

Et en tenant compte des variables :

$$IPAS_j = \frac{24 \times (Q_{nuit_j} - \alpha_0 \times Q_{moy_j})}{Na \times (\beta_0 - \alpha_0)}$$

Indice journalier de pertes par branchement du secteur, IPBS_j

Par définition :

$$IPB = \frac{VP}{365 \times Nb}$$

En m³/branchement.an, avec :

- VP, Volume annuel de pertes en m³
- Nb, Nombre de branchement du secteur

Soit ramené à la journée et au secteur :

$$IPBS_j = \frac{24 \times QP_{moy_j}}{Nb}$$

En m³/branchement.j

Et en tenant compte des variables :

$$IPBS_j = \frac{24 \times (Q_{nuit_j} - \alpha_0 \times Q_{moy_j})}{Nb \times (\beta_0 - \alpha_0)}$$

Remarque : ces indicateurs peuvent être calculés aux échelles hebdomadaires, mensuelles et annuelles en utilisant les débits correspondants.

Indicateurs adaptés pour une analyse à moyen et long terme

Rappel sur les débits (Fiche 2-2) :

Q_{moy(s)} Débit moyen hebdomadaire de la semaine s, en m³/h

Q_{nuit(s)} Débit nocturne hebdomadaire de la semaine s, en m³/h

Q_{moy(an)} Débit moyen annuel de l'année an, en m³/h

Q_{nuit(an)} Débit nocturne annuel de l'année an, en m³/h

Q_{nuit_ref} Débit de référence en m³/h

Débits moyens hebdomadaires et annuels

Compte tenu de la très grande variabilité des débits journaliers et de l'existence d'anomalies d'évaluation, pour une analyse d'un secteur à moyen ou long terme, il est préférable d'utiliser les moyennes hebdomadaires obtenues après filtrage des données et les débits annuels qui en découlent.

Débits moyens hebdomadaires

$$\begin{cases} Q_{moy(s)} = \frac{\sum_{j \in \text{semaine}} Q_{moy_j} \times \lambda_j}{\sum_{j \in \text{semaine}} \lambda_j} \\ Q_{nuit(s)} = \frac{\sum_{j \in \text{semaine}} Q_{nuit_j} \times \lambda_j}{\sum_{j \in \text{semaine}} \lambda_j} \end{cases}$$

Débits annuels

$$\begin{cases} Q_{moy(an)} = \frac{\sum_{j \in an} Q_{moy_j} \times \lambda_j}{\sum_{j \in an} \lambda_j} \\ Q_{nuit(an)} = \frac{\sum_{j \in an} Q_{nuit_j} \times \lambda_j}{\sum_{j \in an} \lambda_j} \\ Q_{nuit_{ref}} = \text{Min}(Q_{nuit(s)})_{s \in an} \end{cases}$$

Débit moyens hebdomadaires et annuels ramenés au branchement

Pour prendre en compte la taille du secteur, les débits précédant sont préférentiellement ramenés au branchement.

Débit moyen hebdomadaire par branchement

$$QNB_{(an)} = \frac{Q_{nuit_{ref}}}{Nb} \text{ m}^3 / \text{h} \cdot \text{brcht}$$

Débit nocturne de référence par branchement

$$QRB_{(an)} = \frac{Q_{nuit_{ref}}}{Nb} \text{ m}^3 / \text{h} \cdot \text{brcht}$$

Affectation des abonnés aux secteurs

La connaissance des consommations à l'échelle du secteur couplée à celle des débits de sectorisation est nécessaire pour avoir une estimation des pertes à l'échelle du secteur. Pour ce faire, il convient de connaître la répartition des abonnés au sein des différents secteurs. Un moyen pour atteindre cet objectif est de géolocaliser les branchements, ce qui par ailleurs permet de mieux représenter la demande au sein des modèles hydraulique.

Préambule

Afin de comprendre la méthodologie de l'affectation des abonnés aux secteurs, il convient de rappeler les définitions¹ suivantes :

- **Abonné** : client/usager au sujet duquel l'organisme responsable ou l'opérateur enregistre des informations appropriées.
- **Point de livraison / Point de fourniture** : interface physique fixe en aval de laquelle le service public de l'eau n'a plus la responsabilité légale pleine et entière du service ou des infrastructures. Exemples : regard de branchement, compteur, limite entre domaine privé et domaine public.
- **Branchement** : ensemble des éléments physiques assurant le raccordement entre un point de livraison et la canalisation principale.

Il sera également question des notions suivantes :

- **Fichier / Base clientèle** : fichier contenant un ensemble d'informations sur les abonnés : les consommations, les adresses postales, les références du compteur et du branchement associé, etc ;

– **Géolocalisation (géoréférencement)** : procédé permettant de positionner un objet (ici l'adresse des abonnés) sur une carte ou un SIG à l'aide de ses coordonnées géographiques ;

– **Affectation des abonnés aux secteurs** : faire correspondre chaque abonné à son secteur.

Objectifs

Le plus souvent, le nombre d'abonnés de chacun des secteurs est connu mais la consommation des abonnés d'un secteur ne l'est pas. Les consommations à l'échelle du secteur sont en effet estimées par rapport au nombre d'abonnés et au nombre de secteurs de la zone d'étude. Or, il serait intéressant d'obtenir cette information afin de la comparer aux débits obtenus par la sectorisation et d'obtenir

par la suite une estimation des volumes de pertes. Ce travail nécessite la mobilisation de nombreuses informations et demande une méthodologie particulière.

Remarque : l'affectation des abonnés aux secteurs permettrait également par la suite de répartir correctement la consommation aux nœuds hydrauliques dans les modèles logiciels de modélisation.

Présentation des outils

L'affectation des abonnés, par le biais du point de fourniture, se fait par les adresses postales. Parmi les outils de géolocalisations existant, les suivant peuvent être utilisés :

- **BD_adresse® de l'IGN**

Il s'agit d'une base de données contenant des adresses géolocalisées. Ces bases sont obtenues auprès de l'IGN (Institut Géographique National) et sont disponibles à l'échelle départementale. Il est possible de projeter ces données sur un SIG et de disposer des données d'adresses sous forme d'un tableur (fichier au format csv).

De cette base de données, il a été utilisé les numéros de rue, noms de rue et le code postal. Par la suite, ces données ont été croisées avec celles du fichier client pour l'affectation au secteur.

Avantage : la base de données est fiable et les adresses sont géolocalisées assez précisément.

Inconvénient : les adresses du fichier client doivent être bien orthographiées et normalisées suivant la norme IGN (exemple : RTE pour route, R pour rue...).

- **Gmap®**

Il est possible d'obtenir les coordonnées géographiques d'une adresse avec Gmap®. Pour ce faire, il faut obtenir les droits d'utilisation d'un programme VBA (Visual Basic for Applications) qui met en relation un tableur (MO Excel®) contenant les adresses à géolocaliser et le site <http://maps.google.com>.

Avantage : les adresses postales sont reconnues même si elles ne sont pas complètes (sans numéro de rue ou mal orthographié).

Inconvénient : le nombre d'adresses géolocalisables est limité à 3 000 par jour.

Méthodologie d'affectation

Choix préalable de l'échelle de précision voulue pour l'affectation

Avant de se lancer dans la géolocalisation, les besoins doivent être clairement définis par rapport au niveau de l'affectation :

- Faut-il une affectation des points de fourniture à la voie (géolocalisation) ou à une surface plus étendue : le secteur ?

La premier choix exigera des adresses postales précises et bien renseignées et pourra être utile à des fins de

Fichier clientèle et traitement

L'affectation des abonnés au secteur correspond en réalité à l'affectation des points de fourniture identifiés par une référence. Ce dernier présente l'avantage d'être immuable, donc non tributaire des changements de compteurs ou d'abonnés. Chaque point de fourniture est associé à un nom de client (ou groupe de client) et à une adresse postale qui servira à l'affectation géographique. La donnée du point de fourniture est importante car elle permettra par la suite de faire le lien avec d'autres données de la base clientèle.

Une adresse postale complète est composée d'un numéro de rue, nom de rue et du code postal. Il arrive que les adresses soient incomplètes et rendent ainsi la localisation difficile voire impossible d'où l'importance de disposer d'un fichier d'adresses le plus propre possible. Le premier traitement consiste à « nettoyer » le fichier brut. Des erreurs de tous genres au niveau des adresses peuvent s'y être glissées.

Etapas de l'affectation des abonnés

La base de données BD_Adresse® est tout d'abord intégrée dans le SIG du réseau d'étude. Ce dernier comporte au moins les canalisations et des couches de secteurs. En croisant, les couches de secteurs avec les adresses de BD_Adresse®, on obtient une sous-base de données contenant l'adresse et le secteur associé (cf. Organigramme de prétraitement), comme dans le tableau suivant :

Secteur associé	Numéro de rue	Nom de rue	Code Postal	Autre données de BD_adresse®
$S[i]$	X_i	Y_i	Z_i	
$S[k]$	X_n	Y_n	Z_n	

Ce tableau a essentiellement deux fonctions :

- Servir à l'affectation, aussi bien pour la géolocalisation que pour l'affectation « simple ». Le tableau précédant est comparé et croisé avec le fichier clientèle (cf. Organigramme de traitement).

modélisations hydrauliques de la consommation des abonnés. Le second choix est moins exigeant en termes de qualité d'adresses postales et est suffisant pour les bilans de consommation des abonnés à l'échelle du secteur, on parlera d'« affectation simple ». Dans la mesure du possible, le premier choix sera favorisé dans une optique de mise en place de la télérelève abonné.

Le tableau ci-dessous donne une image de ce que peut être un fichier clientèle.

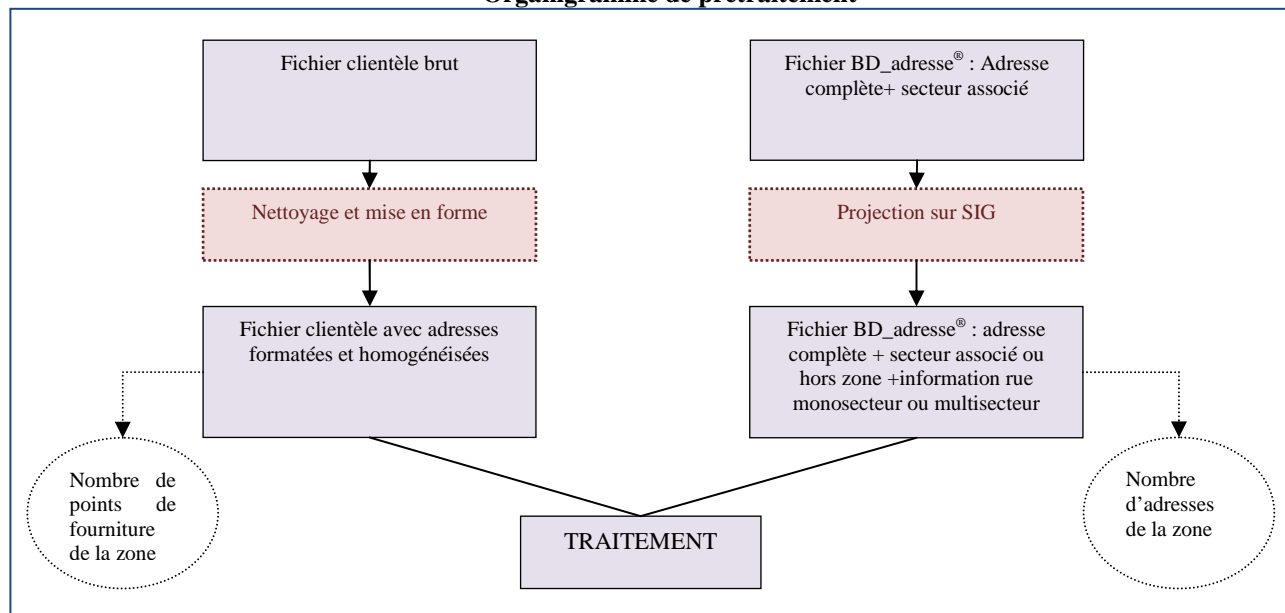
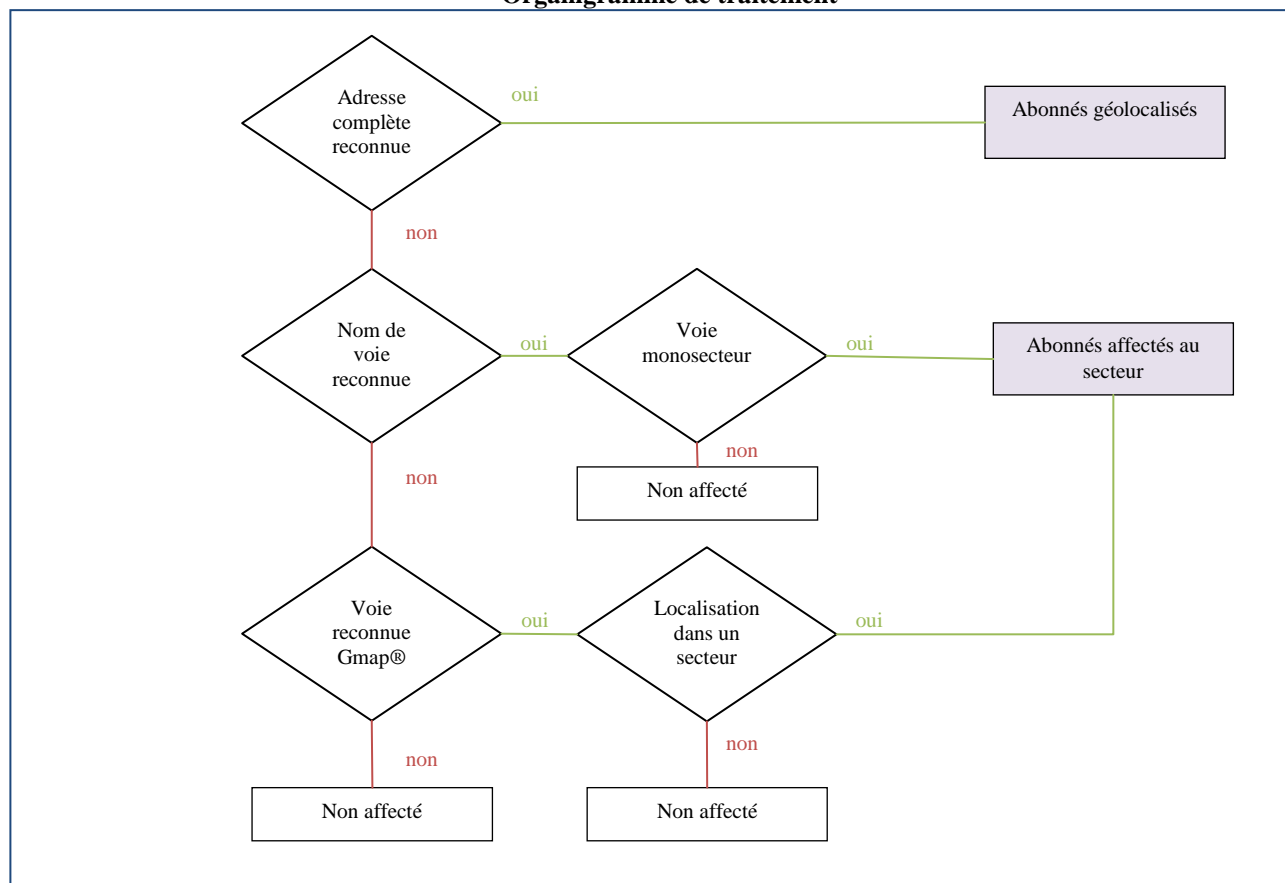
Exemple de fichier clientèle

Données essentielles à l'affectation				Données en plus
	Adresse postale			
Reference: Point de Fourniture(PF)	Numéro de rue	Nom de rue	Code Postal	Nom Etc..
PF_i	X_i	Y_i	Z_i	
...				
PF_n	X_n	Y_n	Z_n	

- Donner un ordre de grandeur du nombre d'adresses que possède un secteur afin de vérifier les cohérences avec le fichier clientèle.

L'organigramme suivant illustre les étapes pour l'affectation simple (précision à l'échelle du secteur) en fond violet et les actions associées (encadrés rouges). Dans certains cas, des abonnés ne peuvent être affectés à l'aide du simple fichier initial (fond blanc), il faut alors utiliser d'autres ressources (connaissance des agents de terrain, fichier des ordres de tournées de relèves, ...) pour, à minima, affecter aux secteurs.

La géolocalisation précise (possible uniquement pour les adresses complètes) est obtenue en comparant le fichier clientèle traité avec les adresses complètes de la base de données Bd_adresse®.

Organigramme de prétraitement**Organigramme de traitement**

Remarque : dans un fichier clientèle traité et comparé à la base BD_adresse®, il peut y avoir aussi bien des rues multisecteurs que des rues monosecteurs. Donc les dernières étapes de traitement se font en parallèle.

Représentation de la géolocalisation

Il est intéressant de visualiser les étapes de l'affectation. Cependant, ce n'est possible que pour les abonnés géolocalisés (avec une adresse complète). Les outils sont la base BD_adresse[®] de l'IGN et ArcGis[®].

Rappel : la zone correspond à l'ensemble des secteurs.

- **Adresses et la zone d'étude**

La figure représente les adresses (points) de la base BD_adresse[®] ainsi que quatre secteurs. Les points qui sont intéressants sont ceux qui sont à l'intérieur des secteurs. Les systèmes d'information géographique, SIG, permettent de recouper les deux informations et d'extraire pour chaque secteur, les adresses complètes correspondantes.

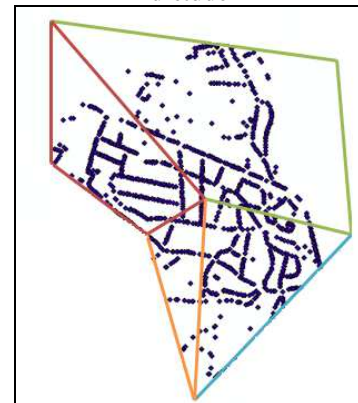
Représentation des adresses BD_adresse[®] et de la zone d'étude



- **Adresses dans la zone d'étude**

En recoupant les adresses BD_adresse[®] avec l'ensemble de la zone on obtient la représentation de la figure à droite. Ce niveau est intéressant car il permet d'éliminer les adresses en dehors de la zone d'étude. Un fichier de type tableur sera extrait du SIG, il contiendra l'information sur les adresses complètes de la zone.

Représentation des adresses BD_adresse[®] compris dans la zone d'étude

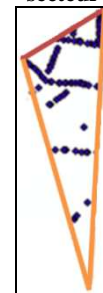


- **Adresses dans le secteur**

Le même travail peut être effectué mais en recoupant les informations à l'échelle du secteur. On obtient alors la figure ci-après. Ce niveau d'information est le but ultime. Un fichier de type tableur sera extrait du SIG ; il contiendra l'information sur les adresses complètes du secteur. En comparant au fichier clientèle, il sera possible d'affecter, par le biais des adresses, les abonnés au niveau de la voie.

Il sera utile pour l'affectation et la répartition des consommations dans les modèles hydrauliques.

Représentation des adresses BD_adresse[®] compris dans un secteur



Actions de lutte contre les fuites

Plusieurs familles d'interventions peuvent être mobilisées pour réduire les fuites, elles agissent sur différents facteurs qui influencent le volume de fuite. Ainsi, leurs domaines d'application et leur efficacité dépendent du contexte du réseau et de la nature des fuites.

Leviers d'actions

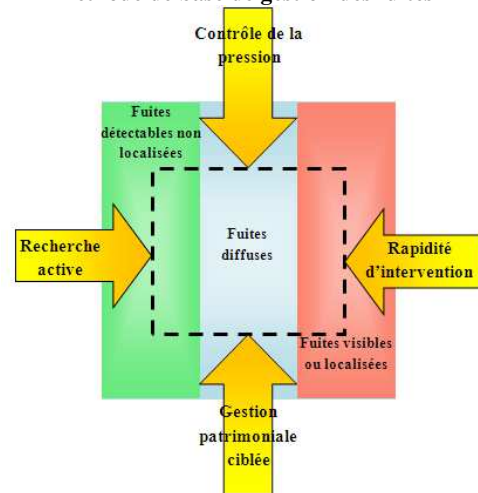
Plusieurs types d'actions sont possibles pour lutter contre les fuites, toutes ont leur intérêt et leur efficacité respective dépend de la configuration du secteur et du type et de l'ampleur de ses fuites. Quatre leviers principaux de réduction des fuites peuvent être distingués :

- **La rapidité d'intervention** : ce type d'action concerne les fuites visibles ou localisées, il s'agit de limiter au maximum le temps d'écoulement de la fuite dès lors qu'elle est localisée, la réalisation pratique de l'intervention fixe une limite à la possibilité de réduction de cette durée ;
- **La recherche active des fuites** : il s'agit de détecter, de localiser des fuites qui ne sont pas visibles afin de limiter leur temps d'écoulement à l'état non localisé. Les campagnes de recherche active des fuites peuvent être déclenchées de façon systématique selon une certaine fréquence ou guidées par les évolutions des débits de pompages ou de sectorisation ;
- **Le contrôle de la pression** : il ne s'agit plus là de réduire la durée des fuites mais leur débit, en réduisant la pression lorsque cela est possible ou en la modulant pour corriger les variations de pertes de charges liées aux variations de la demande. Le contrôle de la pression permet également limiter la fréquence d'apparition des fuites.

- **La gestion patrimoniale ciblée** : certaines canalisations, branchements ou autres organes du réseau, connaissent une fréquence élevée d'apparition des fuites, leur réhabilitation ou leur renouvellement permet de limiter le nombre de fuites et donc les volumes perdus

La figure ci-après illustre le synoptique des quatre leviers d'actions et la figure ci-dessous en donne la formulation mathématique ainsi que la contribution de chacune des variables dans l'action de lutte contre les fuites.

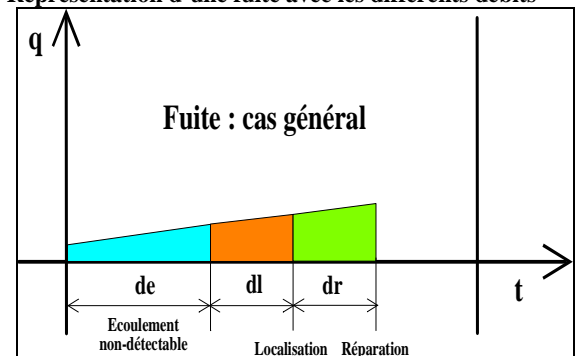
Méthode de base de gestion des fuites¹



Moyens d'action sur les différentes familles de fuites

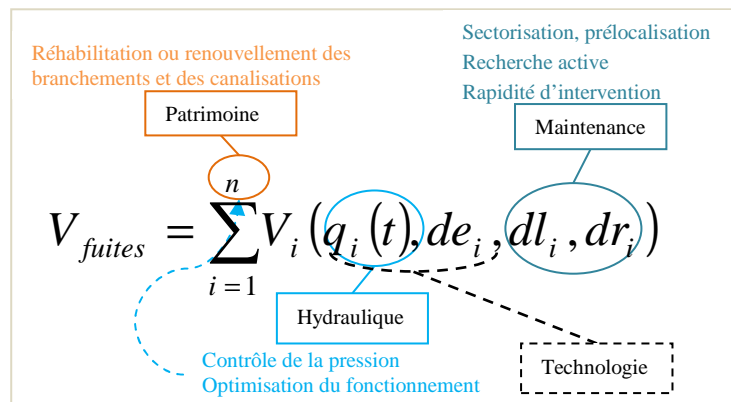
Les trois grandes familles de fuites : diffuses ; détectables non-visibles ; et visibles (distinguées par leurs de débits de fuites) illustrées par le schéma suivant peuvent faire l'objet d'actions données par les encadrées ci-dessous.

Représentation d'une fuite avec les différents débits



Notations :

- V_{fuites} , Volume global des fuites ;
- V_i , Volume de la $i^{ème}$ fuite ;
- n , Nombre de fuites (canalisations et branchements) ;
- $q_i(t)$, Débit instantané de la $i^{ème}$ fuite ;
- de_i , Durée d'écoulement non détectable de la fuite ;
- dl_i , Durée nécessaire à la localisation de la fuite dès lors qu'elle est détectable ;
- dr_i , Durée nécessaire à la réparation de la fuite après sa localisation.



Recherche active

De nombreuses fuites sont invisibles à la surface et seule une recherche active permet de les localiser. Un panel de techniques variées est utilisé pour prélocaliser puis localiser les fuites.

Techniques de pré-localisation des fuites

Quantification nocturne

Il s'agit de pousser plus loin de façon ponctuelle la sectorisation du réseau pendant la période nocturne, lorsque l'essentiel du débit transitant dans le réseau correspond à des fuites (en général entre 2 h et 5 h).

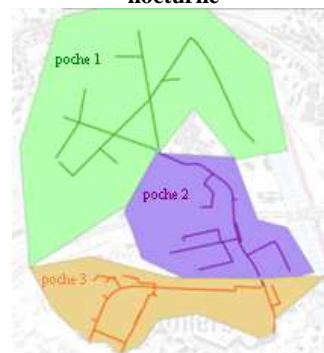
Cette technique, très efficace, permet de quantifier des fuites à partir de 0,5 m³/h. Elle consiste à diviser le secteur en plusieurs sous-secteurs de façon séquentielle¹.

Le secteur doit être judicieusement choisi, les vannes localisées et fonctionnelles et les appareils de mesure en état de marche.

Etude des plans et des vannes du secteur

Une fois le secteur choisi, des sous-secteurs sont délimitées par des jeux d'ouverture / fermeture de vannes. Ils sont conçus pour limiter les coupures d'eau des usagers, lorsque cela est possible, des réalimentations provisoires sont prévues. La journée précédant la campagne de recherche nocturne, toutes les vannes sont repérées et leurs manœuvrabilités vérifiées.

Exemple de représentation de sous-secteurs de quantification nocturne



Mise en place des appareils de mesure

La zone à étudier ne doit avoir qu'un seul point d'entrée muni d'un compteur ou d'un débitmètre afin de pouvoir suivre l'évolution du débit. Le débit en entrée du secteur étudié doit être connu avec précision et les appareils de mesure doivent être munis d'un afficheur pour suivre le débit en temps réel. Des débitmètres à insertion sont installés en entrée du secteur le cas échéant.

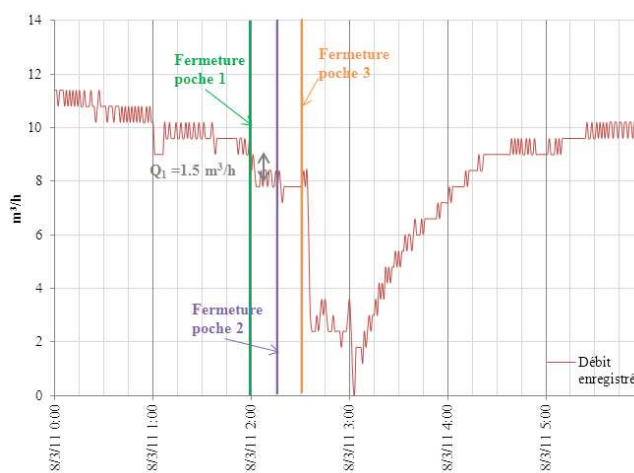
Organisation durant la nuit de la campagne

Deux agents, au moins, sont nécessaires sur le terrain. Un agent ferme successivement les vannes selon un programme établi et à intervalle régulier (souvent 15 minutes) pendant qu'un autre suit l'évolution du débit au niveau du compteur. Environ 8 sous-secteurs peuvent ainsi être étudiés sur une nuit de campagne comportant deux heures de recherche effective.

Analyse des résultats

L'analyse des débits permet de quantifier les fuites au sein de chacun des sous-secteurs.

Débits mesurés lors d'une opération de quantification nocturne



Prélocalisation acoustique

La prélocalisation acoustique est réalisée au moyen d'enregistreurs de bruits placés sur des éléments fixes du réseau (hydrant, bouche à clef, ...). Le champ d'écoute peut varier de 50 à 200 mètres en fonction des matériaux de la conduite.

Les appareils enregistrent les caractéristiques de bruit : amplitude et/ou largeur du signal. Les données sont relevées soit directement sur le prélocalisateur, soit à distance par un système centralisé. L'analyse des bruits permet d'identifier la présence d'une fuite dans la zone de portée du prélocalisateur.

Cette technologie présente l'intérêt de pouvoir être mise en œuvre sans perturber la distribution, elle trouve notamment son application dans les secteurs très maillés où la mesure des débits nocturne n'est pas possible. Les prélocalisateurs acoustiques peuvent être utilisés en campagne ou à poste fixe.




Photographie de prélocalisateurs acoustiques



Techniques de localisation des fuites

Les techniques les plus utilisées pour localiser les fuites sont les techniques acoustiques. Il s'agit de repérer l'emplacement de la fuite à l'aide du bruit généré par l'écoulement. Ces techniques, très efficaces pour les conduites métalliques donnent de moins bons résultats pour les conduites plastiques. D'autres techniques telles que les gaz traceurs existent, leurs domaines d'application restent aujourd'hui assez limités.

Exemples de technologies de lutte contre les fuites

Amplificateurs	Corrélateurs acoustiques	Recherche par gaz traceur
Des sondes, mécaniques ou électroniques, permettent l'écoute directe sur le réseau au niveau des conduites/branchements ou des accessoires.	Deux capteurs sont installés de part et d'autre de la conduite, généralement sur des vannes. Les signaux obtenus par chaque capteur sont ensuite corrélés afin de connaître l'emplacement de la fuite.	Un gaz est injecté en un point de la conduite, la fuite est ensuite détectée par mesure de la concentration du gaz grâce à une sonde. Les gaz qui sont le plus couramment utilisés sont l'hélium et l'hydrogène (mélangé à de l'azote).
		

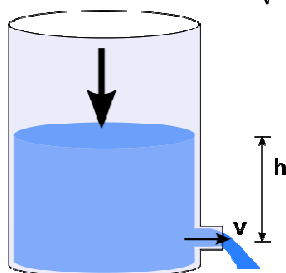
Modulation de pression

Réduire la pression permet de réduire le débit des fuites. Les possibilités de réduire la pression d'un secteur doivent donc être recherchées.

Lien entre le débit et la pression dans les réseaux

Une fuite peut être considérée comme un écoulement de l'eau par un orifice. Les règles de l'hydraulique établissent que la vitesse d'écoulement d'un fluide (v) au travers d'un orifice dépend de la charge (h) ou, en d'autres termes, que le débit dépend de la pression :

Formule de Torricelli : $v = \sqrt{2gh}$



Avec :

- v , en m/s
- h en m
- g accélération de pesanteur en m/s^2

Une formulation couramment admise à l'international¹ du lien entre les fuites et la pression est la suivante :

$$\frac{L_1}{L_0} = \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{N_1}$$

Avec :

L_1 Débit de fuite à la pression P_1

L_0 Débit de fuite à la pression P_0

N_1 Exposant dont la valeur varie suivant des caractéristiques des canalisations concernées. N_1 est le plus souvent compris entre 0,5 (matériaux rigides) et 2,5 (matériaux déformables pour lesquels l'augmentation de la pression s'accompagne d'une augmentation de la section de l'orifice).

Principes du contrôle de la pression

Réduction de pression

La pression au sein d'un réseau varie dans l'espace et dans le temps du fait de la topographie, des pertes de charges et du fonctionnement des différents organes du réseau. Pour garantir une bonne qualité du service, il est nécessaire de garantir en tous points du réseau et à tout moment une pression minimale (qui est couramment estimée à 20 mètres de colonne d'eau ou 2 bars). Un réseau comporte souvent un ou plusieurs points critiques qui connaissent de basses pressions tandis que les autres points du réseau sont soumis à des pressions confortables voire élevées.

Lorsque la pression au point critique dépasse le minimum requis, il est possible de réduire de façon globale la pression de service. Souvent, cela consiste en pratique à installer un stabilisateur de pression aval en tête de réseau (figure ci-contre).

Stabilisateur de pression aval



Dans bien des cas, la réduction de pression ne peut concerner qu'une partie du réseau, le dispositif de réduction de pression doit alors être installé sur la canalisation alimentant la zone concernée.

Modulation de pression

Les pertes de charges dans le réseau croissent en même temps que le débit qui transite, de telle sorte qu'elles sont généralement moins fortes en période nocturne lorsque la demande est faible. Ainsi, lorsque le système est conçu pour garantir une pression suffisante en tout point et à tout moment, la pression en période de faible demande est excédentaire, y compris au point critique. Il est donc

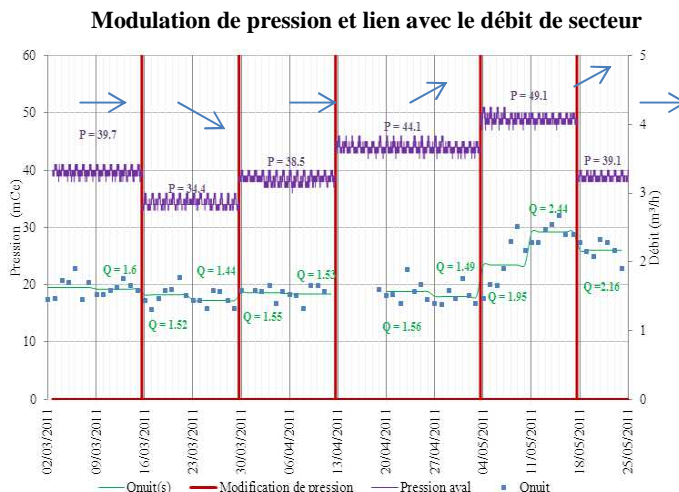
envisageable de réduire la pression de desserte quand la demande est faible, on parle de modulation de pression. En pratique, il s'agit de mettre en place des stabilisateurs avals dont la consigne de pression varie selon une commande. Les systèmes d'asservissements peuvent être une horloge, une mesure de débit sur la canalisation qui porte le dispositif, ou une mesure de pression en un point critique.

Expérience d'une modulation de pression sur un secteur

Il a été mené, en partenariat avec le SIAEP de Coulounieix Razac (24) et Saur, une campagne de modulation de pression sur un secteur long de 9 km alimenté par un stabilisateur de pression².

Un planning d'augmentation et de diminution de pression, sur une période de plus de 2 mois par phase de 15 jours, a été mis en place.

Le suivi du débit nocturne moyen hebdomadaire, $Q_{nuit}(s)$ a clairement mis en évidence la corrélation entre débit de fuite et pression. De plus, l'incidence de la pression sur l'apparition des fuites a été confirmée par une augmentation forte du débit liée à une ou plusieurs nouvelles fuites lorsque la pression a été augmentée de façon importante (graphique ci-contre).



Eddy RENAUD, Dikra KHEDHAOUIRIA,
MARION CLAUZIER & CÉLINE AUBIN
 IRSTEA BORDEAUX, 50 Av de Verdun, Gazinet
 33612 CESTAS Cedex
 e-mail contact : eddy.renaud@irstea.fr

Renouvellement

Certains tronçons de canalisation connaissent une fréquence importante d'apparition des fuites, le renouvellement de canalisations est un moyen de limiter durablement les volumes de fuites.

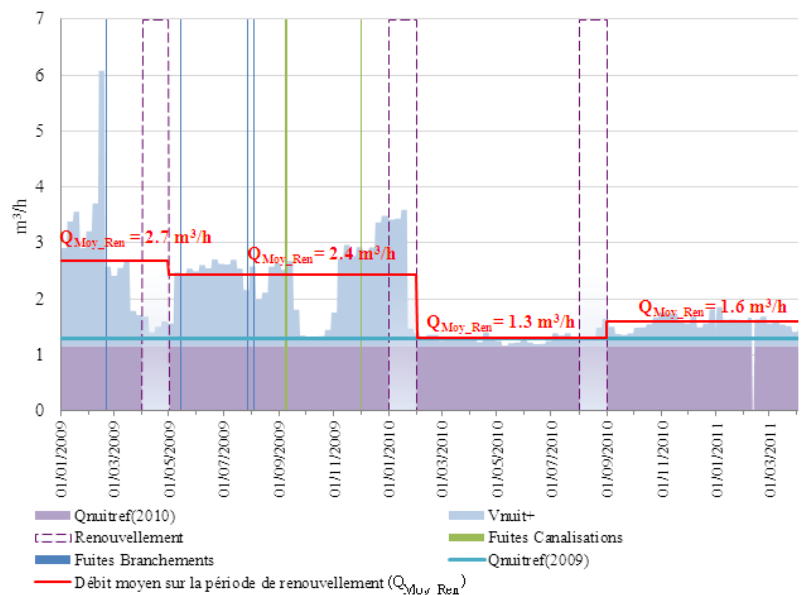
Afin d'analyser l'impact du renouvellement sur les fuites, le débit hebdomadaire nocturne d'un secteur ayant connu plusieurs épisodes de renouvellement a été suivi. Il est apparu¹ clairement que la diminution des pertes n'est pas proportionnelle au linéaire de canalisation renouvelé.

L'efficacité du renouvellement dans la lutte contre les pertes est dépendant d'un choix judicieux des tronçons renouvelés. Cette évidence doit inciter à beaucoup de prudence dans les rapprochements qui peuvent être faits entre performance en matière de pertes et taux de renouvellement. L'approche quantitative ne peut être faite indépendamment d'une approche qualitative.

Les outils de prévision des casses peuvent être utilisés pour hiérarchiser les tronçons les plus à risque².

D'une façon plus générale, il est important de rappeler que les canalisations principales ne sont qu'une partie du réseau et que la gestion patrimoniale des branchements particuliers et des accessoires est un enjeu de première importance dans la lutte contre les fuites.

Chronique des débits hebdomadaires nocturnes avec la prise en compte des phases de renouvellement



1 : AUBIN C. (2011) ETUDE DU POTENTIEL DES ACTIONS DE REDUCTION DES FUITES DES RESEAUX D'EAU POTABLE. CEMAGREF. 60 P.

2 : LOGICIEL DE PREVISION DES CASSES DES RESEAUX D'EAU POTABLE, <https://casses.cemagref.fr/>

Eddy RENAUD, Dikra KHEDHAOUIRIA,
MARION CLAUZIER & CÉLINE AUBIN
IRSTEA BORDEAUX, 50 Av de Verdun, Gazinet
33612 CESTAS Cedex
e-mail contact : eddy.renaud@irstea.fr

Stratégies financières glissées pour le renouvellement des réseaux

La problématique du renouvellement des infrastructures est un des trois enjeux majeurs auquel les services d'eau ont à faire face lors des prochaines décennies. Les besoins de renouvellement à l'échelon national sont évalués entre 1 Md€ et 2 Md€ alors que l'enveloppe financière consacrée aujourd'hui à l'activité de travaux de remplacement des réseaux d'eau est de l'ordre de 0,6 Md€. Les moyens financiers mobilisés par les services publics d'eau potable apparaissent aujourd'hui insuffisants pour faire face aux enjeux dans la double perspective de gestion patrimoniale et de la limitation des déperditions d'eau lors de son transport.

Modes de financement et modalités d'arbitrage

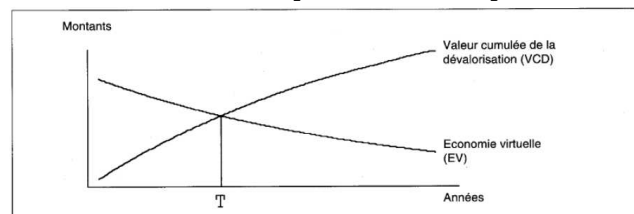
L'autofinancement : il s'agit a priori du mode de financement à privilégier compte tenu du caractère prévisible du besoin à satisfaire, de l'absence de subvention, de la nécessité de maîtriser le prix de l'eau et de la mise en œuvre d'un financement durable du service. Le cadre comptable relatif au service d'eau n'inclut pas de mécanisme dédié et obligatoire à destination du financement du renouvellement des infrastructures. Par ses modalités, l'amortissement pour dépréciation reste aux antipodes des enjeux et se révèle substantiellement insuffisant. La création d'autofinancement reste une décision gestionnaire relevant de l'autorité organisatrice. Le législateur a facilité la pratique de l'autofinancement dans la loi sur l'eau de 2006 en rendant possible le vote en excédent de la section d'investissement. Mais ce mode de financement reste défavorisé par le principe général de dépôt des fonds auprès du Trésor Public sans rémunération, les soumettant au phénomène d'érosion monétaire.

Par nature, **l'emprunt** n'est pas l'instrument financier le plus adéquat dans le cas d'un effort financier prévisible s'inscrivant de façon récurrente dans le temps. L'amortissement financier des emprunts conduit à un report de la charge sur la génération suivante accentuant le déficit cumulé en financement durable du patrimoine constaté aujourd'hui. S'il n'apparaît pas comme une réponse universelle, il permet néanmoins de pouvoir écriéter certains pics de financement de travaux et contribuer ainsi à une

atténuation de l'impact sur le prix de l'eau de l'intensité de l'investissement pendant certaines périodes.

La comparaison entre l'économie virtuelle réalisée dans le cadre de l'autofinancement (absence d'intérêt à rembourser, pas de frais de dossier, ...) et la valeur cumulée de la dévalorisation, nous enseigne que dans un contexte de non-placement des libéralités financières des collectivités publiques, l'autofinancement n'est compétitif que dans une dynamique d'utilisation à court-terme des montants budgétaires disponibles. La **thésaurisation** de moyen-long terme se trouve défavorisée d'un point de vue financier.

Détermination de l'instant T en-deçà duquel l'autofinancement a un coût économique inférieur à l'emprunt¹

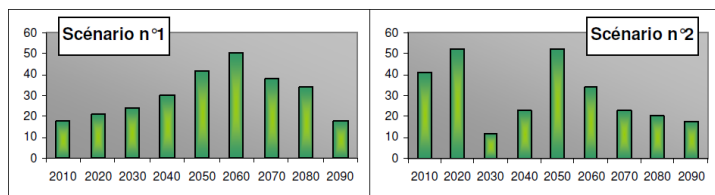


Enfin, dans l'hypothèse de placement de l'épargne des collectivités territoriales et de leurs établissements publics, la thésaurisation n'est compétitive au regard de l'emprunt que dans la situation où le taux de rémunération de l'épargne serait proche du taux d'emprunt².

Impacts financiers d'une gestion financière sur le long terme du renouvellement des réseaux d'eau

La présente étude a pour objectif de mesurer qu'elle est l'impact financier des modalités de financement du renouvellement en prenant en compte un cycle de vie complet des canalisations. La démarche a nécessité de formuler des conventions initiales afin de limiter le nombre de paramètres lors de la phase de calcul et de faciliter l'interprétation des résultats. La figure ci-dessous présente les besoins de renouvellement dans le temps des deux scénarii retenus.

Besoins en travaux de renouvellement dans le temps pour les deux scénarii retenus³



Trois stratégies de financement sont déclinées dans des contextes économiques différents (taux d'intérêt bas, modéré et élevé) :

- La stratégie correspondant à un effort intergénérationnel uniforme ; cette stratégie se caractérise, après un ajustement de prix à l'origine, puis par un prix du service constant dans le temps ; les usagers contribuent ainsi équitablement au maintien en l'état du patrimoine ;
- La stratégie ayant un mode de financement à coût nul : il s'agit pour chaque pas de temps (décennie) d'ajuster le prix du service pour faire correspondre les moyens financiers dégagés dans le budget aux besoins de travaux de renouvellement. En l'absence de thésaurisation, il n'y a donc pas de coût lié à l'érosion monétaire. En ne mobilisant pas d'emprunt, les coûts financiers provenant du paiement d'intérêts sont nuls.

1. FNDAE, 1991, LE FINANCEMENT DU RENOUVELLEMENT DES RESEAUX D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE, 75 p.

2. LOUBIER, S., 2001, LES STRATEGIES DE FINANCEMENT DE LA MAINTENANCE ET DU RENOUVELLEMENT DES EQUIPEMENTS GERES PAR DES ASSOCIATIONS SYNDICALES AUTORISEES, ACTES D'ATELIER 14 p.

3. CADOR, J.-M., 2002, LE RENOUVELLEMENT DU PATRIMOINE EN CANALISATIONS D'EAU POTABLE EN FRANCE, UNIVERSITE DE CAEN BASSE-NORMANDIE, 18 p.

- La stratégie du recours systématique à l'emprunt traduisant une situation totalement attentiste et dépourvue de toute prévision.

Ces trois stratégies sont déclinées successivement dans le contexte actuel de non-placement de l'épargne, puis dans une situation de placement des fonds thésaurisés (taux de placement inférieur de un point par rapport au taux d'emprunt afin de prendre en compte le caractère sécurisé des placements des collectivités locales).

Les variations du prix de l'eau sont également caractérisées à partir d'une hypothèse de contexte budgétaire initial.

Les tableaux ci-après présentent le coût du financement du renouvellement :

Tableau 3 : coût du financement avec placement de l'épargne (scénario n°1)

	Effort générationnel uniforme	Mode de financement à coût nul	Financement par emprunt
Taux bas	8,0 %	0,0 %	15,9 %
Taux modéré	8,0 %	0,0 %	18,9 %
Taux élevé	11,4 %	0,0 %	38,3 %

Tableau 4 : coût du financement avec placement de l'épargne (scénario n°2)

	Effort générationnel uniforme	Mode de financement à coût nul	Financement par emprunt
Taux bas	25,7 %	0,0 %	14,5 %
Taux modéré	25,3 %	0,0 %	17,2 %
Taux élevé	44,9 %	0,0 %	32,6 %

Tableau 1 : coût du financement sans placement de l'épargne (scénario n°1)

	Effort générationnel uniforme	Mode de financement à coût nul	Financement par emprunt
Taux bas	18,1 %	0,0 %	15,9 %
Taux modéré	34,4 %	0,0 %	18,9 %
Taux élevé	85,1 %	0,0 %	38,3 %

Tableau 2 : coût du financement sans placement de l'épargne (scénario n°2)

	Effort générationnel uniforme	Mode de financement à coût nul	Financement par emprunt
Taux bas	51,0 %	0,0 %	14,5 %
Taux modéré	71,6 %	0,0 %	17,2 %
Taux élevé	142,1 %	0,0 %	32,6 %

Les différentes simulations nous fournissent les enseignements suivants :

- Dans l'hypothèse de placement des libéralités, le coût de la thésaurisation est notablement atténué (sous réserve que le taux de placement soit proche des taux d'intérêt pratiqués en matière d'emprunt) ;
- Seule la stratégie « effort intergénérationnelle » permet de conserver un prix de l'eau stable (après l'ajustement initial à la hausse) ;
- Les stratégies « mode de financement à coût nul » (pas de thésaurisation, pas d'emprunt), et « recours exclusif à l'emprunt » engendrent des variations significatives du prix de l'eau dont les amplitudes sont proches de celles des besoins de renouvellement.

Gestions financières glissées : mobiliser les outils existants pour décliner une stratégie de long terme

Des outils d'analyse financière à destination des collectivités publiques dépositaires de la compétence eau potable existent. Ces outils permettent de caractériser la composante économique à partir des documents budgétaires. La mise en œuvre de ces outils se fait généralement en deux temps : une analyse rétrospective caractérisant l'économie du service (état de la dette, fond de roulement, épargne annuelle de gestion), puis une analyse prospective avec détermination de l'impact sur le prix de l'eau.

Mais la problématique du financement d'immobilisations présentant des durées de vies longues (plusieurs décennies) renvoie à une unité de temps différente de celles des outils précités (en général une décennie). Le facteur limitant de l'analyse prospective réside dans la difficulté à déterminer l'ensemble des paramètres concourants au calcul : durée de vie réelle des canalisations, conditions économiques, évolution de l'assiette de facturation, etc.

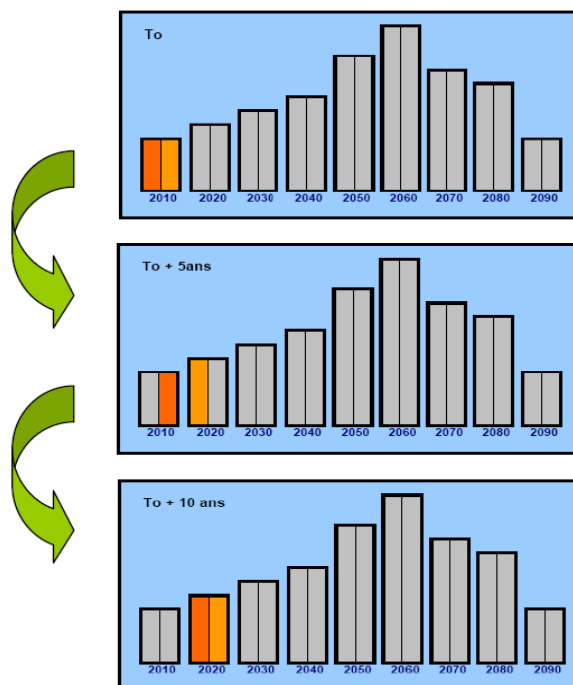
Une utilisation combinée de ces deux approches ouvrent des perspectives intéressantes : la collectivité débat sur sa stratégie globale en fixant les objectifs de long terme, puis la démarche se fait plus experte par la mise en œuvre d'outils portant sur le court terme. Par itérations successives, des ajustements appropriés seraient pratiqués, tant du point de vue financier que de l'amélioration de l'actualisation des besoins de renouvellement.

Le schéma suivant illustre la stratégie glissée par décennie subdivisée en deux périodes : les cinq premières années

Conclusion

Dans son rapport thématique de 2003, la Cour des Comptes¹ avait proposé de moderniser et d'adapter les outils comptables dans la perspective de favoriser le financement durable des infrastructures des services publics d'eau. Si le législateur a acté la possibilité de pouvoir voter en excédent la section d'investissement, la possibilité étendue de placement des libéralités n'a trouvé à ce jour aucun écho. En l'état, la gestion financière prévisionnelle par thésaurisation est défavorisée, alors même qu'elle correspond à un

comme un intervalle de programmation, les cinq suivantes comme un intervalle de prévision, l'ensemble concourant à satisfaire l'objectif général de financement de la décennie considérée.

Schéma de principe de la stratégie financière glissée


financement intergénérationnel équitable en laissant à la charge de chaque génération d'utilisateur un poids financier comparable à l'intensité de l'utilisation du patrimoine.

La mobilisation des outils d'analyse financière déclinés dans une dynamique gestionnaire de long terme rend possible un pilotage pertinent du financement du renouvellement. Il reste néanmoins à lever l'obstacle de l'ajustement du prix de l'eau afin de sortir du cycle d'appauvrissement de la valeur du patrimoine des services publics.

Christophe WITTNER
UMR GESTE ENGEES/IRSTEA
1, quai KOCH - BP 61039
67070 STRASBOURG cedex
e-mail contact : christophe.wittner@engees.unistra.fr

Financement du renouvellement et intercommunalité

L'échelle territoriale pertinente pour mener la lutte contre les pertes dépend du contexte et des actions envisagées. En matière de financement du renouvellement, la dispersion territoriale est un frein que la réforme de l'intercommunalité en cours pourra éventuellement lever en partie.

Intercommunalités EAU en 2009

La disparition du FNDAE et le non subventionnement des opérations de renouvellement / réhabilitation des réseaux d'eau potable (sauf si renforcement parfois) nous amènent à nous interroger sur :

Comment financer le renouvellement des réseaux ?

Quelle réponse l'intercommunalité peut-elle apporter ?

La compétence Eau Potable comprend la production, le traitement, la distribution, l'adduction d'eau potable. Elle est du ressort de la commune qui peut transférer cette compétence en partie ou en totalité à une structure intercommunale.

Nous nous intéressons :

- d'une part à l'intercommunalité dite « technique » sous la forme d'un syndicat intercommunal : SIVU ou SIVOM qui sont la forme traditionnelle des intercommunalités de l'eau et qui ont souvent été créées sur un territoire lié à une question de ressource en eau ou de mutualisation technique et financière pour la construction d'infrastructures ou SM syndicat mixte (communes, syndicat de communes, département),

- d'autre part à l'intercommunalité dite « de projet » regroupant les EPCI à fiscalité propre telles que CU communautés urbaines, CA communautés d'agglomération et SAN Syndicats d'Agglomération Nouvelle, CC communautés de communes dont le territoire est parfois lié au découpage cantonal et motivé par un projet de développement économique ou urbanistique donc non centré sur une question de la gestion de l'eau. La mise en place ou la réorganisation de ces EPCI ont été impulsés par la loi Chevènement de 1999.

Le terme EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunale) était déjà utilisé avant 1999, c'est la notion d'EPCI à fiscalité propre qui est nouvelle.

En 2007 la répartition entre services d'AEP intercommunaux (3 772) et communes (8 074) était la suivante :

Services d'eau en 2007¹

Organisation	Commune	CC	CA ou SAN	CU	SIVU	SIVOM	SM	Total
Nombre de services		207	85	14	2949	374	143	11846
Nombre de communes	8074	2281	1242	358	19762	3003	2060	36780

Et en 2009 :

Services d'eau en intercommunalité 3^{ème} trimestre 2009²

Compétence	SIVU	SIVOM	SM fermé	SM ouvert	Total sans FP	CC à TPU	CC sans TPU	CA	CU à TPU	CU sans TPU	SAN	Total FP	Total général
Eau (Traitement, Adduction, Distribution)	2830	378	295	45	3548	91	133	83	13	3	5	328	3876

Sans tenir compte de la compétence eau, au 1^{er} janvier 2009 la France compte 34 164 communes regroupées dans les établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre, soit 528 communes de plus qu'un an auparavant (33 636). Au cours de l'année, ce sont 225 communes isolées qui ont adhéré à des regroupements existants. Le nombre d'établissements publics de coopération intercommunale à fiscalité propre s'élève à 2 601 au 1^{er} janvier 2009 contre 2 583 un an auparavant. Ainsi, 93,1 % des communes et 87,3 % de la population appartiennent à un des quatre types de groupements à fiscalité propre (<http://www.dgcl.interieur.gouv.fr/>).

Pour les SIVU, SIVOM, c'est la commune qui est à l'initiative du transfert de compétence ; pour les EPCI à fiscalité propre, cela dépend s'il s'agit d'une compétence obligatoire, optionnelle selon le tableau ci-dessous.

EPCI à fiscalité propre et compétence Eau³

EPCI	CC	CA	CU
		> 50 000 habitants	> 500 000 habitants
Compétence Eau Potable	optionnelle	optionnelle	obligatoire

L'organisation intercommunale des services d'eau a évolué de la volonté du législateur et de la réforme territoriale proposée notamment dans le rapport BALLADUR en 2009 dans une volonté de réduire le nombre d'intercommunalités en privilégiant les EPCI à fiscalité propre.

Les services d'eau ont également été impactés par la mise en place de l'instruction comptable M49 qui depuis 1995 oblige les services d'eau des communes de plus de 3 000 habitants ou les intercommunalités dont au moins une des communes a plus de 3 000 habitants à équilibrer le budget annexe de l'eau sans contribution du budget général des collectivités, ce qui en 2007 concerne 20 % des services d'eau mais 70 % de la population. En ce qui concerne les SIVU, 81 % sont exemptés de l'équilibre budgétaire et pour les CC c'est la moitié.

Dans certains départements la gestion du service d'eau ou l'exploitation est organisée à un échelon supra local qui va parfois jusqu'à l'échelle départementale, souvent sous forme de syndicat mixte.

1. CANNEVA G, PEZON C., 2008 « DES COMMUNES AUX COMMUNAUTÉS, LA REVOLUTION INVISIBLE DES SERVICES D'EAU EN FRANCE », REVUE FLUX, N°74, DECEMBRE 2009, PP.56-67.

2. BANATIC – MINISTERE DE L'INTERIEUR, <http://www.banatic.interieur.gouv.fr>

3. GUIDE DE L'INTERCOMMUNALITE, 2006.

Citons quelques exemples :

Quelques exemples de « syndicats départementaux » situation 2009

Structure	Spécificités
NOREADE, la régie du SIDEN-SIAN Service d'eau et d'assainissement du SIDEN-SIAN, (Syndicat Interdépartemental des Eaux du Nord de la France – Syndicat intercommunal d'assainissement du Nord) depuis le 1/1/2009	Syndicat mixte pour la production et la distribution d'eau potable et industrielle Assainissement collectif et assainissement non collectif, assainissement pluvial 670 communes, syndicats intercommunaux ou EPCI du Nord, Pas-de Calais, Aisne, Somme Un seul prix de l'eau
SMG35 Syndicat Mixte pour la gestion du fonds départemental pour le développement de la production d'eau potable d'Ille et Vilaine	Toutes les collectivités 35 y compris Rennes Mise en œuvre du schéma directeur départemental + étude SAFEGE renouvellement des réseaux AEP et prix de l'eau en Ile et Vilaine 2006: harmoniser le prix de l'eau Réflexion au CG35 sur le renouvellement des réseaux de distribution
SDEA, 67 -Syndicat des eaux et de l'assainissement du Bas-Rhin, syndicat mixte, -«outil de coopération intercommunale spécialisée, créé et administré par des élus »	455 communes adhérentes sur les 527 du Bas-Rhin - nouveaux membres : transfert complet de la compétence eau potable et/ou assainissement au SDEA. - collectivités partiellement intégrées : le SDEA assure a minima le contrôle – l'entretien – l'exploitation des équipements publics de production – transport – distribution d'eau potable et/ou de collecte – transport – traitement des eaux usées et pluviales Evolution possible vers transfert complet de compétence
SYDRO, 71 Syndicat mixte départemental pour la gestion du fonds départemental des réseaux de distribution d'eau (Saône et Loire 71)	437 sur 573 communes dont 7 hors 71 (73 collectivités) Subvention à 50 % Statuts en cours de modification

Intercommunalités EAU – situation en 2011 : réforme des collectivités territoriales

Incidences sur les intercommunalités Eau

La loi du 16 décembre 2010 portant réforme des collectivités territoriales a chargé le préfet et la commission départementale de coopération intercommunale (CDCI) d'élaborer le schéma départemental de coopération intercommunale (SDCI) avant le 31 décembre 2011 : ce schéma, qui servira de cadre de référence à l'évolution de la carte intercommunale dans le département, devra décliner les objectifs de la loi à savoir :

- la couverture intégrale du territoire par des EPCI à fiscalité propre et la suppression des enclaves et des discontinuités,
- la rationalisation des périmètres des EPCI à fiscalité propre, notamment l'obligation pour les EPCI à fiscalité propre de regrouper au moins 5 000 habitants, sauf en zone de montagne et en cas de caractéristiques particulières telles que l'insularité, une frontière physique majeure,
- la réduction du nombre de syndicats intercommunaux SIVU, SIVOM ou SM (mixtes) et notamment la disparition des syndicats devenus obsolètes ou ayant une faible activité.

Ce dernier paragraphe concerne tout particulièrement les syndicats d'eau, leur nombre serait à réduire de moitié.

Les chiffres issus de la base Banatic au 1^{er} octobre 2011, présentés dans le tableau suivant sont encore intermédiaires.

Services d'eau en intercommunalité au 1^{er} octobre 2011¹

Compétence	SIVU	SIVOM	SM fermé	SM ouvert	CC	CA	CU	métropole	SAN	Total général
Eau (Traitement, Adduction, Distribution)	2699	353	336	42	224	90	16	1	5	3766

Si on compare ce tableau au tableau du 3^{ème} trimestre 2009, on constate une baisse du nombre de SIVU et SIVOM et une augmentation des SM fermé et CA et sur le total général il y a 100 structures en moins.

L'évolution pourrait aller vers la constitution de nouveaux syndicats, SM ou autres ? Résultats de fusion de syndicats existants et donc qui deviendraient plus gros, soit passage de la compétence sur les EPCI à fiscalité propre avec parfois un découpage de territoire lié à la caractéristique des EPCI à fiscalité propre en tant qu'intercommunalité de projet différente de celle de l'intercommunalité technique caractérisant les syndicats d'eau.

Citons, pour exemple, le cas du Doubs :

Extrait des propositions du schéma départemental de coopération intercommunale du Doubs avril 2011- Préfecture du Doubs (<http://www.franche-comte.pref.gouv.fr/>)

Les syndicats d'eau potable constituent des unités cohérentes reliées à un réseau et à des infrastructures existantes. Les communes du Doubs, bien qu'ayant largement délégué une partie de leur compétence à une structure syndicale, n'ont pas encore toutes intégré un syndicat d'eau ni transféré la totalité de leurs compétences.

Les syndicats existants doivent par ailleurs atteindre une taille critique leur permettant de créer les services administratifs et techniques qui leur sont nécessaires. Une fusion de syndicats est l'une des solutions. Une autre est de voir leur intégration au sein d'un EPCI disposant déjà de moyens administratifs et techniques suffisants, ce qui évite des charges de structure supplémentaires.

Le département est régulièrement concerné par des problèmes d'eau, que ce soit en quantité ou en qualité. Plusieurs interconnexions entre les réseaux des syndicats ont été faites ou le seront prochainement. Il s'agit d'une piste intéressante de réflexion pour inciter les syndicats à travailler davantage ensemble, voire à fusionner. Ainsi, l'objectif poursuivi est double :

- d'une part, faire atteindre une taille critique à des syndicats souvent trop petits ;
- d'autre part, regrouper des syndicats dont les réseaux sont interconnectés et qui travaillent donc déjà ensemble pour répondre à des problématiques locales. En effet, le département est régulièrement impacté par des difficultés liées à la quantité ou à la qualité de l'eau, qui nécessitent des interconnexions renforcées.

Incidence sur les structures départementales

La réforme pourrait conforter la position des structures supra locales à échelle départementale

Quelques illustrations :

- Bas Rhin : SDEA

Extrait des propositions du schéma départemental de coopération intercommunale du Bas-Rhin - SYNDICATS- avril 2011- Préfecture du Bas-Rhin (<http://www.bas-rhin.gouv.fr>)

Il est rappelé que dans ce domaine, le SDEA intervient par transfert de compétences dans les domaines de l'eau et/ou de l'assainissement, transfert qui entraîne substitution de plein droit du SDEA aux droits et obligations de la collectivité membre à raison des compétences transférées. Une forte mobilisation des élus a conduit ensuite près de 180 collectivités affiliées au Service des Eaux et de l'Assainissement du Bas-Rhin, regroupant 439 communes sur les 526 que compte le département, à délibérer en quelques mois, fin 1998 - début 1999, pour confirmer leur adhésion au SDEA. Elles ont ainsi fortement affirmé leur confiance et leur soutien dans l'outil commun et renforcé considérablement sa légitimité. En 2010, le SDEA fédère outre des communes et des établissements publics de coopération intercommunale, la Communauté Urbaine de Strasbourg soit plus de 450 communes représentant une population de 686 000 habitants, ainsi que le département du Bas-Rhin. Dans le Bas-Rhin, le SDEA, syndicat de taille départementale, constitue par essence un outil privilégié pour y contribuer dans les champs de compétence « eau potable » et « assainissement-épuration ». Ceci d'autant plus qu'à travers un processus d'évolution institutionnelle engagé en 2004 et entériné par arrêté préfectoral du 16 janvier 2008, il a anticipé sur cette réforme et mis en œuvre une démarche d'intégration, permettant d'ores et déjà de dissoudre une trentaine de syndicats locaux. Cette démarche est d'ailleurs régulièrement citée en exemple au plan national et sert de « modèle » dans d'autres départements (Haute Garonne, Haute Vienne...), pour conjuguer au mieux rationalisation de l'intercommunalité, renforcement du rôle des élus à tous niveaux et réponses plus efficaces et cohérentes à la mesure des nouveaux enjeux de l'eau et de l'assainissement, qui dépassent souvent le simple cadre local (prévention des pollutions diffuses, sécurisation de la production d'eau potable et de l'élimination des boues d'épuration, approche globale par bassin versant...). En effet, comme le souligne la Cour des Comptes dans son rapport public annuel 2011 sur les services d'eau et d'assainissement « seuls des regroupements d'une taille significative permettraient de réaliser des économies d'échelle et de mutualiser les moyens humains et techniques pour piloter correctement les services publics de l'eau et de l'assainissement ».

- Saône et Loire : SYDRO et ASMEAU

Extrait du Dossier de presse « La gestion publique de l'eau, le combat du Département – CITES 71 – 22 et 23 septembre 2011 » (<http://www.cg71.fr>)

La Saône-et-Loire a décidé, par délibération en date du 28 septembre 2009, d'adhérer à l'association pour la mutualisation des moyens en eau (Asmeau), que le Département a contribué à créer avec 5 syndicats intercommunaux d'eau potable. Cette forme de mutualisation permet une mise en commun des moyens publics et la réalisation d'économies d'échelle. Le statut d'association permet la libre adhésion la définition commune des objectifs. Il respecte le principe d'autonomie des collectivités adhérentes. L'Asmeau, qui regroupe aujourd'hui sept syndicats des eaux est présidée par Bernard Lacombe, président du syndicat des eaux de la basse Dheune. Elle a pour mission la maîtrise d'œuvre en matière d'eau potable et la réalisation d'études. Elle est l'interlocutrice technique des partenaires des syndicats des eaux, veille à la gestion patrimoniale et à la réversibilité du mode de gestion des ouvrages. En Saône-et-Loire, le Sydpro et l'Asmeau se trouvent à une période charnière et ont lancé une concertation auprès de leurs membres respectifs pour anticiper leurs besoins et élargir leurs champs de compétences.

- Vienne : SIVEER

Extrait des propositions du schéma départemental de coopération intercommunale de la Vienne - avril 2011- Préfecture de la Vienne (<http://www.vienne.gouv.fr>)

Projet d'intégration des SIAEP au SIVEER (Syndicat Intercommunal Mixte d'Équipement Rural, pour l'Eau et l'Assainissement du Département de la Vienne) Il existe dans le département 40 syndicats ayant pour compétence la distribution de l'eau potable et de l'assainissement. Une majorité d'entre eux est adhérente du SIVEER et l'on constate que les compétences sont en fait exercées en totalité par le syndicat départemental, la plupart des syndicats d'eau n'ayant plus de personnel. De plus, un partage de la ressource justifie que les syndicats d'eau non adhérents rejoignent par voie de fusion cette structure afin de mettre fin notamment aux coûteuses opérations individuelles de recherche en eau. Sont ainsi concernés sous réserve du résultat de la concertation à venir au cours des prochaines semaines entre l'Etat, les présidents de ces syndicats et le SIVEER et les structures suivantes : 29 syndicats adhérents et 11 syndicats non adhérents.

Intercommunalités EAU : périmètres en évolution : quelques éléments de réflexion sur le renouvellement et la recherche de fuites

- La gestion de la compétence eau potable à l'échelle de l'intercommunalité semble être une bonne réponse à la mise en commun de moyens financiers ou humain pour une meilleure solidarité des territoires.

Ex : élaboration d'un programme de renouvellement permettant une solidarité territoriale, lissage des besoins de renouvellement, embauche de personnel qualifié, achat de matériel pour faire des campagnes de détection de fuite, élaboration d'une politique de sectorisation du réseau, ...

La première étape peut être la négociation collective des emprunts.

- Quelle est l'échelle pertinente pour une organisation « professionnalisée » autour des problématiques de l'eau ?

- Entre les intercommunalités traditionnelles SIVU, SIVOM et les Communautés de Communes, quelle réponse pour le financement du renouvellement ? La même ? Une réponse différenciée ?

- Quelle place pour les communes rurales face aux communes urbaines ? Les communes rurales vont-elles financer les besoins de renouvellement du bourg centre équipé depuis plus longtemps ? La présence sur le territoire d'un bourg centre donne-t-elle une plus grande dynamique au territoire ? Plus de moyens financiers, techniques ? Plus d'économies d'échelle ?

- Quel est le bon territoire pour la lutte contre les pertes ? Celui du service, du secteur, réseau de distribution/réseau de transfert, de l'unité de distribution UD, ... ?

- Comment cibler les zones de territoire pour avoir l'action la plus efficace sur la réduction des fuites ?

Il est plus facile d'augmenter le rendement de 50 % à 70 %, que de 85 à 90 %.

- Quelle est la meilleure échelle pour organiser la collecte et le stockage de données (fuites, casses, ...) sur des supports SIG ou des bases de données et assurer leur mise à jour ?

- Mutualisation avec d'autres services ? Pour les travaux, pour les recherches de fuites (gaz, chauffage urbain) ?

- L'intercommunalité et la gestion déléguée : évolution des structures vers la régie, maintien sur le territoire de mode de gestion différenciés, ... ?

- La mutualisation des services d'eau et d'assainissement, une façon de mutualiser les moyens ?

Cependant la réforme des collectivités territoriales fait que nous entrons dans une période transitoire qui pourra engendrer des questions nouvelles telles que sur des réseaux avec rendements différents, comment représenter cette réalité ? Faudra-t-il considérer les territoires séparés un certain temps, imaginer des financements complémentaires pour que la nouvelle intercommunalité de l'eau ait rapidement des caractéristiques homogènes sur tout son territoire ?

Prise en compte de l'anticipation des investissements dans le coût des pertes en eau

L'eau perdue par les fuites doit être produite. Ainsi, dans un contexte de progression de la demande des usagers, le terme d'atteinte des limites de capacité de production du service est lié à la performance du réseau du point de vue des pertes.

Problématique

La quantification des fuites, même si elle est approximative renseigne sur les volumes perdus pendant un laps de temps. Dans ce cas, l'évaluation économique des pertes se fait sur la base d'un coût par m³ perdu. Pour les services qui produisent leur eau, ce coût correspond au coût marginal qui est souvent très faible, ce qui au final ne permet pas de favoriser la décision de mettre en place une politique de recherche de fuites. L'évaluation économique prend plus de sens quand le service importe son eau et donc le coût de l'eau perdue sera évalué sur la base du coût d'achat d'eau qui est sensiblement plus important que le coût marginal. Nous proposons une alternative à cette approche que nous qualifierons de classique, en évaluant l'impact des fuites sur l'anticipation des investissements de production ainsi que toutes les autres actions qui visent à augmenter

l'approvisionnement en eau. Nous partons du constat que chaque réseau est caractérisé par une capacité de production nominale sur une durée de vie donnée. L'existence de fuites peut perturber l'approvisionnement en eau particulièrement dans un contexte de forte pression sur la ressource ou d'atteinte des capacités nominales de production. Cette capacité sera atteinte dès que les besoins en jour de pointe y seront supérieurs. La présence de fuites anticipe donc la réalisation d'investissement d'augmentation de capacité, d'extension, de recherche de nouveaux captage ou la mise en place d'interconnexion. Ceci se traduit par un surcoût ΔC que devra supporter le service d'eau pendant un intervalle de temps Δt . L'approche développée permet d'attribuer un coût à l'eau perdue différent du coût de production^{1,2}.

Méthodologie

La méthodologie peut être utilisée sur un réseau d'alimentation en eau potable pour lequel nous disposons a priori des données suivantes sur la fenêtre d'observation $[t_0, t_a]$:

- Le volume annuel produit : Q_{pr}
- Le volume annuel consommé par les abonnés domestique : Q_{dom}
- Le volume annuel consommé par les gros consommateurs : Q_{gros}
- Le volume annuel non compté autorisé : Q_{nc}
- Le volume de pertes d'eau : Q_p
- Le volume importé : Q_{imp}

- Le volume exporté : Q_{exp}
- Le volume produit le jour de pointe : q_{pr}
- Le volume importé le jour de pointe : q_{imp}
- La capacité nominale de production
- Le nombre d'abonnés par type : domestiques, gros consommateurs, autres.

La méthode vise à déterminer la date pour laquelle la capacité nominale est atteinte afin d'établir une relation de cause à effet entre la variation du niveau de rendement net et le décalage dans le temps de l'investissement (anticipation ou report). Nous détaillons dans ce qui suit ses principales étapes.

Etablir le bilan hydraulique annuel du réseau

L'eau introduite dans le réseau, Q_T :

$$Q_T = Q_{pr} + Q_{imp} = Q_{cae} + Q_p$$

Le volume consommé autorisé, Q_{cae} :

$$Q_{cae} = Q_{dom} + Q_{gros} + Q_{nc} + Q_{exp}$$

Le rendement net du réseau, noté ρ :

$$\rho = \frac{Q_{cae}}{Q_T}$$

Etablir le bilan hydraulique du jour de pointe

Soit q_T l'eau introduite dans le réseau, q_p l'eau perdue, q_{pr} l'eau produite, q_{imp} l'eau importé et q_{ca} le volume d'eau consommé autorisé en jour de pointe :

$$q_T = q_{pr} + q_{imp} = q_{ca} + q_p$$

On note k_p le coefficient de pointe du jour de pointe Q_{JT} le débit moyen journalier tel que :

$$k_p = \frac{q_T}{Q_{JT}} \text{ et } Q_{JT} = \frac{Q_T}{365}$$

Nous proposons d'estimer le débit de fuites le jour de pointe en fonction du rendement net et d'un paramètre α qu'il conviendra de caler en fonction du réseau étudié. Ainsi, nous établissons la relation suivante entre q_p et Q_{JT} :

$$q_p = (1 - \alpha \times \rho) Q_{JT} \text{ où } \alpha > 0$$

1. WALSKI, T. M. (1983). THE NATURE OF LONG RUN COST SAVINGS DUE TO WATER CONSERVATION. WATER RESOURCES BULLETIN, AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION, 19(3), 489–498.

2. WYATT, A., S. (2009). REVENUE WATER: FINANCIAL MODEL FOR OPTIMAL MANAGEMENT IN DEVELOPING COUNTRIES. RESEARCH TRIANGLE INSTITUTE REPORT. DOI:10.3768/RTIPRESS.2010.MR.0018.1006, 71 p.

Etablir une relation entre les deux bilans (annuel et pointe) afin d'exprimer le rendement net du jour de pointe en fonction du rendement net annuel

Soit β le rendement du jour de pointe, on obtient la relation entre le rendement net (annuel) ρ et β comme suit :

$$\beta = \frac{q_{ca}}{q_T} = \frac{q_T - q_p}{q_T} = \frac{q_T - (1 - \alpha \times \rho) \times Q_{JT}}{q_T}$$

$$\beta = \frac{k_p + \alpha \times \rho - 1}{k_p} \text{ avec } \alpha > 0$$

Définir un modèle d'évolution des volumes d'eau le jour de pointe

L'évolution de q_T dans le temps notée $q_T(t)$ peut s'écrire à partir du bilan annuel comme suit :

$$q_T(t) = q_{ca}(t) + q_p(t) \Rightarrow q_T(t) = \frac{q_{ca}(t)}{\beta}$$

$$q_{ca}(t) = q_{dom}(t) + q_{gros}(t) + q_{nc}(t) + q_{exp}(t)$$

Il apparaît nécessaire de caler une fonction qui traduit l'évolution dans le temps de ces différents volumes. Nous considérons que le nombre de gros consommateurs ne croît pas, et que le volume autorisé non compté est stable et que le volume exporté en cas de stress sur la ressource tend vers 0. Notons \bar{q}_{dom}^i la consommation moyenne pour un abonné i le jour de pointe, \bar{q}_{gros} la consommation moyenne des « gros consommateurs » le jour de pointe et \bar{q}_{nc} le volume non compté autorisé en moyen le jour de pointe. Ces volumes peuvent être calculés à partir d'un historique

de données. On note $n(t)$ la fonction qui décrit l'évolution du nombre d'abonnés domestiques dans le temps. Nous obtenons les résultats suivants :

$$q_{ca}(t) = q_{dom}(t) + q_{gros} + q_{nc} \text{ avec } q_{dom}(t) = \bar{q}_{dom}^i \times n(t)$$

$$q_{ca}(t) = \bar{q}_{dom}^i \times n(t) + \bar{q}_{gros} + \bar{q}_{nc}$$

Dans le cas où l'évolution du nombre d'abonnés est linéaire alors :

$$n(t) = a \times t + b \Rightarrow q_{ca}(t) = \bar{q}_{dom}^i \times (a \times t + b) + \bar{q}_{gros} + \bar{q}_{nc}$$

$$q_T(t) = \left(\frac{\bar{q}_{dom}^i \times a}{\beta} \right) \times t + \left(\frac{\bar{q}_{dom}^i \times b + \bar{q}_{gros} + \bar{q}_{nc}}{\beta} \right)$$

$$q_T(t) = \left(\frac{k_p}{k_p + \alpha \times \rho - 1} \right) \left[\bar{q}_{dom}^i \times a \times t + \bar{q}_{dom}^i \times b + \bar{q}_{gros} + \bar{q}_{nc} \right]$$

Déterminer la date t^* pour laquelle la capacité nominale est atteinte en fonction du rendement net du réseau

La capacité nominale est atteinte à t^* quand le volume d'eau introduit en jour de pointe n'arrive plus à satisfaire la demande. Notons par q_{pro}^{Max} la capacité nominale de production et q_{imp}^{Max} la quantité nominale pouvant être importée le jour de pointe. La limite de satisfaction est obtenue quand :

$$q_T(t) = q_{pro}^{Max} + q_{imp}^{Max}$$

$$q_{pro}^{Max} + q_{imp}^{Max} = \frac{k_p}{k_p + \alpha \times \rho - 1} \times \left[\bar{q}_{dom}^i \times a \times t + \bar{q}_{dom}^i \times b + \bar{q}_{gros} + \bar{q}_{nc} \right]$$

$$t^* = \frac{\left(\frac{k_p + \alpha \times \rho - 1}{k_p} \right) \times (q_{pro}^{Max} + q_{imp}^{Max}) - (\bar{q}_{dom}^i \times b + \bar{q}_{gros} + \bar{q}_{nc})}{\bar{q}_{dom}^i \times a}$$

$$K = \frac{(q_{pro}^{Max} + q_{imp}^{Max}) \times (k_p - 1)}{\bar{q}_{dom}^i \times a \times k_p} - \frac{(\bar{q}_{dom}^i \times b + \bar{q}_{gros} + \bar{q}_{nc})}{\bar{q}_{dom}^i \times a}$$

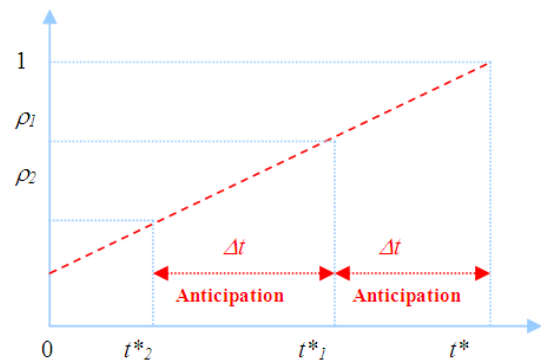
$$t^* = \frac{(q_{pro}^{Max} + q_{imp}^{Max}) \times \alpha}{\bar{q}_{dom}^i \times a \times k_p} \times \rho + K$$

Exprimer le décalage dans le temps Δt en fonction de la variation de rendement net

L'impact de la variation du rendement sur l'anticipation ou le report de l'investissement de production peut être calculé par rapport à deux valeurs distinctes du rendement ρ_1 et ρ_2 caractérisés par $t^*_{\rho_1}$ et $t^*_{\rho_2}$ qui correspondent aux échéances d'atteinte de la capacité nominale pour deux niveaux de rendement tel que $\rho_1 > \rho_2$ et $t^*_{\rho_1} > t^*_{\rho_2}$ ainsi $\Delta t = (t^*_{\rho_2} - t^*_{\rho_1})$ est défini par l'équation suivante. La figure ci-contre illustre la relation entre décalage dans le temps et niveau de rendement :

$$\Delta t = \frac{(q_{pro}^{Max} + q_{imp}^{Max}) \times \alpha}{\frac{-i}{q_{dom}} \times a \times k_p} \times (\rho_2 - \rho_1)$$

Echéance d'atteinte de capacité en fonction du niveau de rendement net



Déterminer le coût par m^3 d'eau perdue en cas d'un surcoût d'investissement ΔC pendant Δt

En raison de la présence de fuites, le service devra supporter un surcoût annuel ΔC dû au nouvel investissement pendant une période Δt qui sépare le rendement constaté dû à $\overline{Q_T}$ fuites en moyenne par an et le rendement maximal théorique $\rho_1 = 1$ qui correspond à l'absence de fuites. Le surcoût moyen d'un mètre cube perdu est noté c tel que :

$$c = \frac{\Delta C}{\overline{Q_T}}$$

APPLICATION NUMERIQUE

Le coût marginal de production dans un service d'eau est de 7 centimes d'euros. Le service alimente un village de 500 abonnés. Les données de production et de consommations en m^3 sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Caractéristiques du réseau

$Q_{pr} = 70\,000$	$\rho_2 = 0.80$	$q_{pro}^{Max} = 280$
$Q_{imp} = 30\,000$	$\frac{-i}{q_{dom}} = 214$	$q_{imp}^{Max} = 130$
$Q_{ca} = 60\,000$	$a = 1\%$	$\alpha = 1$
$Q_{exp} = 20\,000$	$k_p = 1.3$	$\overline{Q_T} = 20\,000$

La capacité nominale de production est atteinte par anticipation pendant Δt années, avec Δt est calculé par :

$$\Delta t = \frac{(q_{pro}^{Max} + q_{imp}^{Max}) \times \alpha}{\frac{-i}{q_{dom}} \times a \times k_p} (\rho_2 - \rho_1) = \frac{(280 + 130) \times 1 \times (0.8 - 1)}{214 \times 0.01 \times 1.30} = -29.5 \text{ ans}$$

Le surcout moyen par m^3 perdu :

$$c = \frac{\Delta C}{\overline{Q_T}} = \frac{\Delta C}{2 \times 10^4} = \frac{1}{2} \Delta C \times 10^{-4}$$

Le surcoût par m^3 engendré par l'anticipation de l'investissement dépendra du montant investi pour augmenter la capacité de production. En supposant un surcoût annuel dû à l'investissement, $\Delta C = 10^4$ le surcoût par m^3 $c = 0.50$ € serait à supporter pendant 29.5 ans. Ce coût est donc supérieur au coût marginal de 7 centimes.

Evaluation du coût marginal économique justifiant la recherche de fuites

Les actions de lutte contre les pertes constituent une charge financière pour le service. En contrepartie, les volumes d'eau économisés induisent une réduction des dépenses directes qui dépend du coût marginal de production et de transport de l'eau.

Contexte

La lutte contre les fuites dans les réseaux d'eau est un réel challenge pour de nombreux services d'eau désirant préserver la ressource et améliorer leur niveau de rendement. Cependant, la mise en place d'une politique de recherche de fuites (proactive ou curative) implique nécessairement la réalisation d'investissements qui peuvent être conséquents, et qui sont considérés par bon nombre de services comme dissuasifs. Afin d'aider le gestionnaire du service d'eau à décider, nous proposons une approche d'évaluation économique qui permet d'étayer

« économiquement » la mise en place d'une politique de recherche de fuites. Le principe est de comparer les dépenses inhérentes de la recherche de fuites à celles en rapport avec la perte d'eau. Cette comparaison s'appuie sur les coûts de fonctionnement, de maintenance et d'investissement pour la recherche de fuites d'un côté, et de l'autre sur le coût marginal de l'eau et le volume annuel de perte. L'approche permet d'évaluer un coût marginal minimum à partir duquel la mise en place d'une politique de recherche de fuites devient économiquement viable.

Méthodologie

La méthode requiert une connaissance élevée du fonctionnement hydraulique du réseau afin de prévoir des variantes pour la recherche de fuites. Ces variantes traduisent les limites des secteurs à mettre en place et conditionne donc l'installation des dispositifs d'écoute, de détection et d'échange d'information. L'approche se base sur les étapes suivantes :

Etablir le bilan hydraulique annuel du réseau

Soit Q_T l'eau introduite dans le réseau alors :

$$Q_T = Q_{pr} + Q_{imp} = Q_{cae} + Q_p$$

Le volume consommé autorisé Q_{cae} est égal à :

$$Q_{cae} = Q_{dom} + Q_{gros} + Q_{nc} + Q_{expo}$$

Le rendement net du réseau, noté ρ est obtenu par :

$$\rho = \frac{Q_{cae}}{Q_T} \text{ et } Q_p = (1 - \rho) \times Q_T$$

Définir les secteurs de mesure et les variantes possibles de recherche de fuites active et passive

Il s'agit de sectoriser le réseau afin d'affiner le bilan hydraulique et de détecter plus rapidement la présence de fuites. La sectorisation s'accompagne de la génération de scénarii de mise en œuvre de la recherche de fuites.

Chaque scénario se traduit par une variante caractérisée par l'utilisation d'équipements qui peuvent être fixes ou mobiles. Chaque variante est également caractérisée par la fréquence de déplacements des équipements ou de leur interrogation (à distance). Nous distinguons deux types

d'équipements : les équipements d'écoute et les équipements de mesure. Les équipements d'écoute correspondent aux enregistreurs de bruits (loggers) ou des pré-localisateurs. Les équipements de mesures sont installés au niveau des secteurs hydrauliques, ils correspondent aux débitmètres et aux compteurs. Ces différents équipements disposent d'enregistreurs de données qui peuvent être interrogés par radio relève ou par télérelève (en temps réel) via des systèmes GPRS ou GSM.

Coût d'installation des appareils de mesure pour la sectorisation

La mise en place de la sectorisation nécessite l'installation d'équipements de comptage. Nous en identifions deux types : débitmètre et compteur. Le coût total de la mise en place de l'appareil de mesure, $C_{T(\text{appareil})}$ comprend :

- Le coût de fourniture de l'appareil, $C_{(\text{appareil})}$
- Le coût de fourniture d'appareils annexes (accessoires), $C_{(\text{appareil_an})}$
- Le coût de pose (appareil et appareils annexes), C_{pose}

- Le coût de fourniture du regard, $C_{(\text{regard})}$
- Le coût de pose du regard, $C_{(\text{pose_regard})}$

$$C_{T(\text{appareil})} = C_{(\text{appareil})} + C_{(\text{appareil_an})} + C_{\text{pose}} + C_{\text{regard}} + C_{\text{pose_regard}}$$

A titre d'illustration, nous présentons les estimations de coût suivantes en fonction du diamètre de la conduite.

Résultats d'estimation de coût d'installation d'appareil de mesure par point de mesure (en euros de 2010)

Diamètre de conduite en (mm)	100	150	200	300	500
Débitmètre électromagnétique	3 000	3 200	3 600	4 400	6 000
Comptage traditionnel	2 200	3 300	4 200	6 700	7 900
Débitmètre à insertion	2 770	2 770	2 800	2 900	3 000

Le coût du regard dépend du nombre d'appareils à installer (qui dans la situation étudiée pouvait être d'un ou deux) et donc de la dimension du regard.

Choix du système de récupération des enregistrements de mesure

Le système de récupération testé communique les données sans fil à l'aide de SMS ou un signal GPRS. Ce système utilise des enregistreurs de données autonomes disposés dans des regards, certains enregistreurs peuvent être équipés d'antennes externes (en dehors du regard, fournies en option). Ceci dépend de la force du signal transmis par l'enregistreur et la capacité des équipements de récupération de données à le capter. Six enregistreurs ont été comparés sur la base de leur performance technique et leur coût ainsi que la durée de vie des batteries. Le coût de l'enregistreur

comprend : i) le coût de fourniture C_{fe} qui varie entre 500 € et 1500 € par enregistreur, ii) le coût des appareils en commun, $C_{(com)}$ (modem, adaptateurs) qui varient entre 200 € et 400 € et le coût des câbles, $C_{(cab)}$ qui varie entre 30 € et 100 € par câble (euros courant 2010). Le coût total d'installation d'un enregistreur, $C_{T(en)}$ muni de n_c câbles est obtenu comme suit :

$$C_{T(en)} = C_{fe} + C_{(com)} + n_c \cdot C_{(cab)}$$

Coût de mise en place de pré-localisateurs

La politique de recherche de fuites peut se baser sur l'utilisation de pré-localisateurs ou enregistreurs de bruits. Ce sont des dispositifs d'enregistrement de bruits sur les conduites d'eau potable la nuit, bruits susceptibles d'indiquer la présence de fuites. Les pré-localisateurs sont installés dans des regards ou dans les bouches à clé. Cependant, certaines bouches à clé doivent être modifiées à cause des tiges de manœuvre qui doivent être adaptées, ce qui rajoute un coût supplémentaire. Les pré-localisateurs ou enregistreurs de bruits disposent d'une pile d'une durée de vie (autonomie) de 5 ans en moyenne. Ils sont programmés pour enregistrer les bruits autour des conduites la nuit sur des plages horaires à paramétrer (souvent entre 2 h et 4 h du matin pour limiter les bruits parasites liés au trafic par exemple). Ces dispositifs techniques peuvent être interrogés à distance, soit par radio-relève où un opérateur les interroge en passant à proximité avec un véhicule circulant au maximum à 50 km/h équipé d'un ordinateur et un logiciel spécifique qui permet de détecter les bruits enregistrés suspects en analysant l'intensité des bruits par rapport à des seuils prédéfinis. Ces enregistreurs peuvent transmettre en temps réel les enregistrements à travers une télégestion et un envoi des informations vers le centre de supervision. Avant l'installation des pré-localisateurs, une remise à niveau des tiges de manœuvre est parfois nécessaire, le coût de cette modification est d'environ 350 € (en 2010). Le coût du pré-localisateur C_l comprend : le coût de fourniture C_f , le coût d'entretien C_m , qui peut être exprimé en p % du coût de fourniture et le coût de pose C_p qui comprend le coût de main d'œuvre et le coût d'utilisation de matériel et de

transport (camionnette, fourgon). Ainsi, le coût total du pré-localisateur sur une durée de vie, $D = 5$ ans est de :

$$C_l = C_f + C_m + C_p$$

Le coût de fourniture C_f est estimé à 400 € (en 2010). Les pré-localisateurs peuvent être loués ou mis à disposition à environ 0,75 € par jour. Le coût d'entretien est estimé à $p \cdot C_f$. Le coût moyen de pose C_p pour un pré-localisateur est estimé à 16 €, ce coût comprend le coût de la main d'œuvre (1 jour de travail pour 2 personnes), d'étude pour choisir l'endroit où les installer et le coût de transport. Dans le cas où les pré-localisateurs sont déplacés, le coût de déplacement comprend : la pose et la dépose du pré-localisateur. Ce coût comprend la main d'œuvre (10 minutes pour une personne pour un enregistreur), divers frais et le coût de transport. Le coût de dépose par pré-localisateur est de 6,5 €. Le coût de radio-relève comprend le coût de la main d'œuvre et le coût du matériel utilisé, ainsi que le coût du véhicule, d'après l'étude menée le coût est estimé à 80 € par heure ou bien 1,8 € par km environ. Plusieurs variantes ont été testées en ce qui concerne l'utilisation des pré-localisateurs. Ils peuvent être utilisés en campagne, c'est-à-dire déplacés de façon périodique ou bien en fixe. 4 politiques ont été testées, d'abord en radio-relève avec : campagne curative, campagne préventive, fixe curative et fixe préventive.

En campagne curative : les pré-localisateurs seront déplacés en fonction du nombre de fuites de l'année qui précède. Soit n_f le nombre de fuites recensées à l'année ($n-1$). L'estimation des coûts se fait en considérant une durée de vie des pré-localisateurs de $D=5$ ans. Ainsi, sur les 5 années de l'analyse, ils seront déplacés ($5.n_f$) fois en moyenne. L'estimation du coût de cette politique sur 5 ans comprend :

- Le coût C_{r_tot} de remise à niveau des tiges de manœuvre n_b , environ $C_r = 350$ € par tige
- Le coût de mise à disposition ou de location des pré-localisateurs n_{loc} , $C_{loc} = 0,75$ € par jour de location T_{loc}
- Le coût de pose et de dépose, $C_{p_dep} = 6,5+16=22,5$ € par pré-localisateur
- Le nombre de déplacement, n_d qui en curatif correspond au nombre moyen de fuites futures, $5.n_f$
- Le coût de radio-relève donné par heure ou par km, $C_{rel_tot} = C_{rel} \cdot L$ ou $C_{rel_tot} = C_{rel} \cdot T$. Où T le temps nécessaire pour réaliser la radio-relève

Le coût total de la politique $C_{T(politique)}$ est donné par :

$$C_{T(politique)} = C_r \cdot n_t + C_{loc} \cdot n_{loc} \cdot T_{loc} + C_{p_dep} \cdot n_{loc} \cdot 5.n_f + C_{rel} \cdot T \cdot 5.n_f$$

En campagne préventive : le déplacement des pré-localisateurs se fait périodiquement. La fréquence varie entre 1 fois par an à 1 fois par semaine. Dans ce cas, le coût dépendra du nombre de déplacements n_d effectués sur 5 ans, qui est obtenu par le produit de la période de temps et le nombre de déplacement annuel : n_{d_an} où $n_d = 5.n_{d_an}$. Le

coût total de la politique va différer de la politique précédente à cause du nombre de déplacements à réaliser qui ne sera plus dépendant du nombre de fuites constatées, le coût comprend :

$$C_{T(politique)} = C_r \cdot n_t + C_{loc} \cdot n_{loc} \cdot T_{loc} + C_{p_dep} \cdot n_{loc} \cdot n_{d_ap} \cdot 5 + C_{rel} \cdot T \cdot n_{d_ap} \cdot 5$$

En fixe curatif ou préventif : la politique suppose l'achat de pré-localisateurs. L'utilisation des pré-localisateurs en curatif suppose que le nombre de radio-relèves dépende du nombre de fuites prévues soit $5.n_f$ dans ce cas le coût de la politique sur 5 ans est de :

$$C_{T(politique)} = C_r \cdot n_t + (C_f + C_m) \cdot n_{loc} + C_p + 5 \cdot C_{rel} \cdot T \cdot n_f$$

En préventif, le nombre de télé-relèves n_{rel} par an est à définir, dans ce cas, le coût est donné par :

$$C_{T(politique)} = C_r \cdot n_t + (C_f + C_m) \cdot n_{loc} + C_p + 5 \cdot C_{rel} \cdot T \cdot n_{rel}$$

Le coût total de la politique de recherche $C_T(D,f)$ de fuites comprend : i) le coût d'installation $C_{(appareil)}$ de n_s équipements de mesure pour la sectorisation et n_p pré-localisateurs, ii) leur déplacement selon la variante prise en compte, iii) le coût de la corrélation acoustique C_{ca} pour détecter la localisation des fuites n_f . Le coût total de la recherche de fuite $C_T(D,f)$:

$$C_T(D,f) = n_s \cdot C_{T(en)} + n_p \cdot C_{T(politique)} + n_f \cdot D \cdot C_{ca}$$

Evaluation du coût marginal de l'eau

Le coût marginal C_m de l'eau traduit le coût de production hors frais de gestion d'une unité (m^3) supplémentaire d'eau.

Ce coût comprend le coût de l'énergie nécessaire au pompage C_e , le coût de chloration C_{cl} , la redevance prélèvement de l'agence de l'eau R_p .

$$C_m = C_e + C_{cl} + R_p$$

Evaluation du coût marginal économique

Soit $C_T(D,f)$ le coût total de la politique de recherche de fuites sur une période D et avec une variante de déplacement de fréquence f , et \bar{Q}_p le volume moyen d'eau perdu annuellement et ζ l'efficacité de la recherche de fuites ($\zeta=1$ si toutes les fuites sont trouvées). On définit par le coût marginal économique C_m^* le coût marginal économique qui correspond au coût marginal minimum à partir duquel il est opportun de mettre en place une politique de recherche de fuites. La recherche de fuites est économiquement viable quand :

$$C_T(D,f) \leq D \cdot \bar{Q}_p \cdot \zeta \cdot C_m \Rightarrow C_m \geq \frac{C_T(D,f)}{D \cdot \bar{Q}_p \cdot \zeta \cdot C_m} \\ \Rightarrow C_m^* = \frac{C(D,f)}{D \cdot \bar{Q}_p \cdot \zeta \cdot C_m}$$

APPLICATION NUMERIQUE

Le coût marginal de production dans un service d'eau est de 7 centimes d'euros. Le tableau ci-dessous renseigne sur la valeur du coût marginal économique pour différentes variantes de recherche de fuites avec différentes valeurs pour l'efficacité de la recherche de fuites, ζ .

Coût marginal économique (€ 2010) en fonction de la variante de recherche et de l'efficacité de la campagne

Fréquence déplacement	Campagne curative	Campagne préventive	Fixe radio relève préventive	Fixe radio relève curatif
1 semaine	40 400	174 800	79 250	54 050
Efficacité	Coût marginal économique, C_m^* en centimes €			
$\zeta=1$	3	14	6	4
$\zeta=0.75$	4	19	8	6
$\zeta=0.5$	6	28	13	9

Les valeurs en verts indiquent les variantes qui sont économiquement viables et pour lesquelles le coût marginal économique ne dépasse pas le coût marginal de production C_m de 7 centimes d'euros par m³. La méthode que nous proposons permet donc de tester plusieurs variantes et de sélectionner celle qui offre le meilleur compromis entre coût de mise en œuvre et économie d'eau réalisée.

	Fiches concernées
AEAG, SMEGREG, OIEau (2005). Connaissance et maîtrise des pertes dans les réseaux d'eau potable. Agence de l'eau Adour Garonne. 89 p.	2-1
AFNOR, Norme NF ENV 13005 (1999). Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. 28 p.	1-3
Alegre H., Baptista J. M., Cabrera Jr. E., Cubillo F., Duarte P., Hirner W., Merkel W., Parena R. (2006). Performance Indicators for Water Supply Services. 289 p.	1-1; 2-2
Aubin C. (2011). Etude du potentiel des actions de réduction des fuites des réseaux d'eau potable. Cemagref. 60 p.	3-2 ; 3-3 ; 3-4
BANATIC – Ministère de l'intérieur, http://www.banatic.interieur.gouv.fr	4-2
Canneva G., Pezon C. (2008). « Des communes aux communautés, la révolution invisible des services d'eau en France », Revue Flux, n°74, Décembre 2009, p.56-67.	4-1 ; 4-2
Cour des comptes, Décembre 2003, La gestion des services publics d'eau et d'assainissement, http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/034000735/index.shtml , 186 p.	4-1
Fantozzi M., Lambert A. (2010). Legitimate night use component of minimum night flows initiative. IWA Water Loss 2010 conference proceedings.	
Farley M. (2001). Leakage management and control. A best practice training manual. World Health Organization Geneva, Switzerland. 162 p.	2-4; 3-1
FNDAE (1991). Le financement du renouvellement des réseaux d'alimentation en eau potable, 75 p.	4-1
Guide de l'intercommunalité (2006)	4-2
ISO, Norme ISO 24512 (2007). Activités relatives aux services de l'eau potable et de l'assainissement - Lignes directrices pour le management des services publics de l'eau potable et pour l'évaluation des services fournis. 54 p.	2-6
Lambert A.O., Brown T.G., Takizawa M., Weimer D. (1999). A Review of Performance Indicators for Real Losses from Water Supply Systems. AQUA – IWA Publishing.	3-3
Lambert A. (2009). Guidelines Average Pressure. Water Services Association of Australia. 12 p.	1-1; 2-2
Logiciel de prévision des casses des réseaux d'eau potable, https://casses.cemagref.fr/	3-4
Loubier, S. (2001). Les stratégies de financement de la maintenance et du renouvellement des équipements gérés par des associations syndicales autorisées, Actes d'atelier 14 p.	4-1
Martin, C. (2010). Mise en place d'une méthodologie de recherche de fuites et d'amélioration des rendements des réseaux d'eau potable, application sur le périmètre de la Moder, Stage de fin d'études Licence Pro, Engees, 59 p.	4-4
Morrison J., Tooms S., Rogers D. (2007). District Metered Areas, Guidance Notes. Draft IWA Water Loss Task Force. 96 p.	2-4
Renaud E. (2009). Valeurs de référence de l'indice linéaire de pertes des réseaux d'alimentation en eau potable. SMEGREG. 63 p.	1-1
Renaud E., Khedhaouiria D., Clauzier M. (2011). Réduction des pertes dans les réseaux d'alimentation en eau potable du département de la Gironde, Valorisation de la sectorisation dans la lutte contre les fuites. Rapport final. 84 p.	1-2
Sissoko M. T. (2010). Maîtrise des pertes d'eau potable. Méthodes d'évaluation de la pression caractérisant une zone de desserte. Cemagref. 98 p.	2-3
SMEGREG (2004). Module sectorisation des réseaux d'eau potable, Guide technique. SAGE nappes profondes Gironde. 12 p.	2-2
Walski, T. M. (1983). The nature of long run cost savings due to water conservation. Water Resources Bulletin, American Water Resources Association, 19(3), 489-498.	4-3
Wyatt, A., S.(2009). Revenue Water: Financial Model for Optimal Management in Developing Countries. Research Triangle Institute Report.doi:10.3768/rtipress.2010.mr.0018.1006, 71 p.	4-3

PARTENARIAT 2011 – Action 3
« Réduction des fuites dans les réseaux d'alimentation en eau potable »

Onema

Hall C – Le Nadar

5 square Félix Nadar

94300 Vincennes

01 45 14 36 00

www.onema.fr

Irstea

1 rue Pierre-Gilles de Gennes

CS 10030,

92761 Antony cedex

01 40 96 61 21

www.irstea.fr