

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Etude des débits d'intrusion et d'extrusion des eaux dans un collecteur d'assainissement.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 6-0037-17

APA Citation (APA توثيق):

Chebba, Hafida (2017). Etude des débits d'intrusion et d'extrusion des eaux dans un collecteur d'assainissement[Thèse de master, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بنمّين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات، مبداعات، مقالات، دوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE -ARBAOUI Abdellah-

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE URBAINE

MEMOIRE DE MASTER

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option : Conception des systèmes d'assainissement

THEME DU PROJET :

**ETUDE DES DEBITS D'INTRUSION ET D'EXTRUSION
DES EAUX DANS UN COLLECTEUR
D'ASSAINISSEMENT**

PRESENTE PAR :

Chebba Hafida

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
Mr M.MIHOUBI	Professeur	Président
Mr A. ADDOU	M. A. A	Examineur
Mr Y. BOUNAH	M. A. B	Examineur
Mr S. TOUMI	M. A. B	Examineur
Mr B. SALAH	Professeur	Promoteur

Session 2016; 2017

Remerciement

Je tiens à remercier d'abord DIEU, de m'avoir donné le courage et la volonté pour mener à terme ce présent mémoire. Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé à l'élaborer et mon gratitude ira particulièrement à : Monsieur « SALAH BOUALLEM » qui a accepté de diriger ce travail et pour sa disponibilité, ses conseils et sa grande patience.

Je remercie également Monsieur « MOHAMED BOUKHALFA » Directeur des travaux chez SEAAAL pour son aide si précieuse.

Je remercie également tous ceux qui ont pris une part active dans l'élaboration de ce modeste travail.

Merci

Chebba Hafida

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes parents : ma mère et mon père, qui m'ont encouragé et soutenu énormément .Je le dédie également à mes deux sœurs Soumeya et Asma et mon frère Mohammed

A mes amis ...

Et à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail de loin ou de près, à tous mes camarades et mes enseignants.

ملخص

- إن تسلل وتسرب المياه نوعان من الظواهر التي تساهم في تدهور أنظمة الصرف الصحي. فالتسرب يسبب تدفقات عالية في شبكة الصرف الصحي في حين أن تسرب المياه يمكن أن يسبب تلوث المياه الجوفية، ومع ذلك، فإنه لا يزال من الصعب التنبؤ بهاتين الظاهرتين وتحديد قيمتها غالباً ما يكون صعباً وغير مؤكد. الهدف من هذا العمل يتمثل في
- تحديد ومقارنة أساليب تقييم المياه الطفيلية للتمكن من معرفة حجمها المقدر من قبل وسائل مختلفة وتباين الفجوة بين مختلف التقديرات.
 - تحليل لحساسية نموذج دارسي على تسرب المياه من أنبوب الصرف الصحي وذلك باستخدام محاكاة مونت كارلو.

Résumé

L'intrusion et l'extrusion des eaux sont deux phénomènes qui contribuent à la dégradation des systèmes d'assainissement. L'intrusion est à l'origine des débits importants dans les conduites tandis que l'extrusion peut provoquer une contamination des nappes souterraines. Cependant ils restent difficiles à prévoir et leur quantification est souvent difficile et incertaine. L'objectif de ce travail est de

- Recenser et comparer les méthodes d'évaluation des eaux parasites afin d'apprécier les volumes des eaux claires parasites estimés par les différentes méthodes et la variabilité de l'écart entre les différentes estimations.
- Analyser la sensibilité du modèle de Darcy sur les taux d'exfiltration dans une conduite d'assainissement et cela en utilisant la simulation de Monte Carlo.

Abstract

Water intrusion and extrusion are two phenomena that contribute to the degradation of sanitation systems. Intrusion is at the origin of the high flows in the pipes while the extrusion can cause contamination of the underground water tables. However, they remain difficult to predict, their quantification is often difficult, and uncertain. The objective of this work is to

- Identify and compare the methods of evaluation of unwanted water in order to assess the volumes of the undesirable clear waters estimated by the different methods and the variability of the difference between the different estimates.
- Analyze the sensitivity of the Darcy model on the exfiltration rates in a sanitation pipe by using the Monte Carlo simulation.

Table des matières

Introduction général	1
I. Synthèse bibliographique	3
I.1-Introduction.....	3
I.2 Intrusion et extrusion de l'eau dans les systèmes d'assainissement	3
I.2.1 Généralités.....	3
I.2.2 classification et facteurs de la dégradation de l'état structurel du réseau d'égout ...	4
I.2.2.1 La classification et prédiction de l'état structurel des réseaux.....	4
I.2.2.2 Les facteurs de détérioration	8
I.3 L'intrusion des eaux claires parasites.....	10
I.3.1 Définition.....	10
I.3.2 Origines	11
I.3.3 Les impacts des Eaux claires parasites.....	14
I.3.4 Méthodes d'estimation des ECP.....	16
I.4 L'exfiltration des eaux usées des conduites d'assainissement.....	18
I.4.1 Généralités.....	18
I.4.2 Processus d'exfiltration des eaux des canalisations vers la nappe phréatique.....	19
I.4.3 Les impacts de l'extrusion des eaux d'égout.....	20
I.4.4 Les méthodes d'estimation des débits d'extrusion des eaux usées.....	21
I.4.4.1 Échantillonnage et modélisation des eaux souterraines.....	21
I.4.4.2 Le bilan hydrique des mesures de débit.....	22
I.4.4.3 Enquêtes de terrain	22
I.4.4.4 Enquêtes de laboratoire.....	23

II. L'évaluation des débits d'intrusion par les méthodes traditionnelles.....	24
II.1 Introduction.....	24
II.2 Généralité sur la zone d'application des méthodes.....	24
II.2.1 Définition de la zone d'étude.....	24
II.2.2 La campagne de mesure.....	25
II.2.3 Choix des sites de mesure.....	26
II.2.4. Analyses des effluents de temps sec.....	29
II.3. Les méthodes d'estimation traditionnelles des Eau claire parasite.....	29
II.3.1. Les méthodes d'estimation journalière.....	29
II.3.1.1 La méthode du débit journalier d'eaux usées de temps sec	29
II.3.1.2. Méthode du débit nocturne minimum.....	31
II.3.1. 3. Méthode de rapport nyctéméral.....	33
II.3.1. 4. La Méthode de minimum mobile.....	34
II.3.1. 5. La méthode de facteur de débit minimum.....	36
II.3.1. 6. Méthode de production d'eau usée.....	38
II.3.1. 7. La méthode de Stevens et Schutzbach.....	39
II.3.1. 8. Méthode des données d'Imhoff.....	40
II.3.1. 9. Méthode suisse.....	43
II.3.1. 10. Méthode Horizon.....	45
II.3.2. Les méthodes d'estimation annuelle/saisonnnière.....	46
II.3.2. 1. La méthode du triangle.....	46
II.3.2. 2. Méthode d'Annen et Mueller.....	48
II.3.2. 3. Différence des débits journaliers de hautes et basses eaux.....	50
II.3.2. 4. Différence des débits nocturnes de hautes et basses eaux.....	51
II.4. Résultats et discussion	51

II.4.1 Comparaison des méthodes sur les points de mesure.....	55
II.4.2. La fraction d'ECP par chaque méthode d'estimations journalières sur les points	60
II.4.4. Volume total d'ECP dans chaque point.....	64
III. L'évaluation des débits d'extrusion par l'équation de darcy.....	66
III.1 Introduction.....	66
III.2. L'équation de DARCY	66
III.3. Les limites de l'équation de Darcy.....	67
III.4. les approches de l'exfiltration basé sur la loi de Darcy.	67
III.5. Identification des paramètres et des processus.....	69
III.5.1 Zone de fuite A_{ex}	70
III.5.2 Conductivité hydraulique de la zone de colmatage.....	72
III.5.3 Zone de colmatage / Processus de colmatage.....	73
III.6. Les débits d'exfiltration par la simulation de <i>Monte Carlo</i>	76
III.6.1. Définition.....	76
III.6.2. Les avantages de la simulation MC.....	76
III.6.3. L'application de la simulation monte Carlo pour l'analyse de sensibilité de l'équation de Darcy.....	77
III.6.3.1. Récapitulatif.....	77
III.6.3.2. Résultats.....	78
III.6.3.3. Discussion	79
Conclusion générale.....	83

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableaux</i>	<i>Page</i>
Tableau 1.1 : Types et pourcentages des défauts recensés sur un échantillon du patrimoine réseaux d'assainissement	5
Tableau 1.2 : les modèles de prédiction des tuyaux d'égout envisagés par des recherches précédentes	7
Tableau 1.3 : Les facteurs qui influencent la dégradation structurelle des réseaux	8
Tableau 1.4 : Pertinence des facteurs influençant l'état structurel des tuyaux	10
Tableau 1.5 : Classification des apports d'eaux parasites	13
Tableau 1.6 : Classification d'ECP par rapport le comportement spatio-temporel	13
Tableau 1.7 : Classification d'ECP par rapport le type du réseau	13
Tableau 1.8 : Les principales méthodes traditionnelles utilisées dans l'estimation des ECP journaliers	17
Tableau 1.9 : Les principales méthodes traditionnelles utilisées dans l'estimation des ECP annuel/saisonniers	15
Tableau 2.1 : Liste des points de mesure de pluie	27
Tableau 2.2 : Liste de points de mesures de volumes totaux journaliers et les sites correspondants	28
Tableau 2.3. : Débit nocturne minimum spécifique d'eau usé	32
Tableau 2.4. : Fraction de l'eau usée sur le débit nocturne minimum total	32
Tableau 2.5 Charges polluantes unitaires – Valeurs européennes types	42
Tableau 2.6 : Les méthodes d'estimation journalière d'ECP	52
Tableau 2.7 Les méthodes d'estimation annuel / saisonnière d'ECP	54
Tableau 2.8 : la fraction d'ECP (en % du débit de temps sec) dans les points des mesures par les différentes méthodes	61
Tableau 2.9 : Les écarts moyens (en % du débit sec) entre les méthodes :	61
Tableau 3.1 valeurs de la conductivité hydraulique	72
Tableau 3.2 Conductivité de la zone de colmatage selon les différentes expériences	73
Tableau 3.3 : résultats des recherches de laboratoire sur l'exfiltration	75
Tableau 3.4 : les valeurs croissantes de la charge hydraulique dans une canalisation de 2000 mm de diamètre	78
Tableau 3.5 les valeurs croissantes d'épaisseur de la zone de colmatage	78
Tableau 3.6 les valeurs croissantes de la conductivité de zone de colmatage dans un sol de type sable	78

LISTE DES FIGURES

<i>Figure</i>	<i>Page</i>
Figure 1.1 - graphique illustrant les interactions possibles entre les tuyaux d'égout et les eaux souterraines	4
Figure 1.2: Distribution des classes d'état des conduites par rapport au matériel de construction	6
Figure 1.3: Distribution des classes d'état des conduites par rapport à la date de construction	6
Figure 1.4 : Les différents types des eaux parasites	12
Figure 1.5: Schéma illustrant l'exfiltration d'une conduite située au-dessus d'une nappe souterraine	19
Figure 2.1 Ossature principale du system d'assainissement de l'Ouest d'Alger	26
Figure 2.2 Localisation des pluviomètres	27
Figure 2. 3 Localisation des points de mesure	28
Figure 2.4 Hydrographe qui aide à visualiser l'intrusion des ECP comme réponse au débit météorologique humide	30
Figure 2.5 Détermination des ECP par la méthode du débit journalier d'eaux usées de temps sec sur le point P_01	31
Figure 2.6 Détermination des ECP par la méthode du débit nocturne minimum sur le point M2-2	34
Figure 2.7 Détermination des ECP par la méthode du rapport nyctéméral sur le point P01	35
Figure 2.8. la méthode du minimum mobile	36
Figure 2.9 Application de la méthode de rapport nyctéméral sur le point P01	37
Figure 2.10: Graphique montrant la relation entre la taille du bassin et le facteur Min	38
Figure 2.11 Application de la méthode de facteur de débit minimum sur Point m2-16	40
Figure 2.12: Application de Méthode de production d'eau usée surPoint M2-2	41
Figure 2.13: Application de Méthode de Stevens et Schutzbach sur Point M2-2	42
Figure 2.14: Application de la Méthode de données d'imhoff sur la station d'épuration de beni messous	43
Figure 2.15: Comparaison entre les volumes d'ECP générés par l'utilisation des 3 types des polluants sur la step de beni messous	46
Figure 2.16. La méthode du triangle	47
Figure 2.17 : division de l'hydrogramme des débits selon la méthode du triangle sur le point P03	48
Figure 2.18 : Détermination des ECP par la méthode du triangle sur Point P03	49
Figure 2.19 : Détermination du point d'inflexion sur le point M2-2	50
Figure 2.20 : Détermination des ECP par la méthode d'Annen et Muller sur point M2-2	50
Figure 2.21 : comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le point M2-2	55
Figure 2. 22: comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le point M2-	56
Figure 2. 23: comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le point M2-15	57
Figure 2.24: comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le point M2-16	57
Figure 2.25: comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le point P01	58

Figure 2.26: comparaisons entre les débits d'eau usée estimé par M1 et M7 (du 9 /12 au 28/12/08)	59
Figure 2.27: Volume total moyen d'ECP dans chaque point du 18 /12 au 27 /12/200	64
Figure 3.1 : Illustration schématique de l'exfiltration d'un égout qui fuit au-dessus d'une nappe phréatique	70
Figure3.2: schéma pour le calcul du paramètre mouillé	72
Figure 3.3: Schéma d'exfiltration à travers la zone de colmatage D Morrison, et al 2013	74
Figure3.7 : l'évolution des taux d'exfiltration en fonctions des paramètres de l'équation de darcy dans un collecteur de diamètre 1500 mm	79
Figure 3.8: Exfiltration à des fuites individuelles pendant un écoulement a débit maximum	81
Figure 3.9: Exfiltration à des fuites individuelles pendant un écoulement a débit minimum	81

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Les résultats d'applications des méthodes d'estimation sur les points de mesure :

ANNEXE 2 : les résultats de la modélisation de Monte Carlo

LISTE DES ABREVIATIONS

AGHTM : Association Générale des Hygiénistes et des Techniciens Municipaux.

APUSS: Assessing Infiltration and Exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems (Projet de recherche soutenu par la Commission européenne).

ASCE: American Society of Civil Engineers.

ATV: Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Association allemande pour la technologie des eaux usées),

ATV-DVWK : Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Association allemande pour l'eau, les eaux usées et les déchets).

BSI : British Standards Institution.

BSI: British Standards Institution.

CARE-S :Computer Aided Rehabilitation of Sewer Networks (Projet de recherche soutenu par la Commission européenne).

CCTV : closed circuit television (inspection par camera conventionnelle).

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

DBO: Demande Biochimique en Oxygène.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

ECP : Eaux Claires Parasites.

EPA: United States Environmental Protection Agency.

IWA :International Water Association.

LROP : Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien.

MES: Matière en suspension.

PRISM: Proactive Rehabilitative Sewer Infrastructure Management.

SEAAL : Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger.

STEP : Station d'épuration.

Introduction générale

Dans plusieurs villes du monde, les systèmes d'assainissement souffrent de capacités insuffisantes, de défaillances de construction et de détérioration des conduites. Les conséquences sont des dommages structurels et des inondations locales entraînant l'exfiltration d'eau dans les sous-sols, les perturbations du trafic, l'érosion de la rue et de la surface à cause des infiltrations permanentes des eaux de surface et la pollution des eaux souterraines.

Les raisons de ces problèmes sont les effets combinés de l'infrastructure vieillissante et de l'urbanisation. Le coefficient de ruissellement augmente avec l'urbanisation ce qui entraîne une augmentation du volume et de l'intensité des eaux de surface. En outre, la fréquence des pluies à forte intensité semble augmenter dans de nombreuses régions, et les météorologues prédisent que de nouveaux changements climatiques tournent vers la même direction. Les principales parties des réseaux d'égouts, sont très anciennes et vulnérables aux défaillances. Leur conception repose sur des hypothèses anciennes sur la nature du sol, la population et la production d'eaux usées de la zone urbaine. De plus, la forte densité de population, la corrosion rapide et la croissance microbologique dans les réseaux provoquent des problèmes opérationnels supplémentaires.

De nombreux réseaux d'égout souffrent de phénomène d'intrusion et / ou d'extrusion des volumes d'eau significatifs. L'intrusion des eaux a un effet particulièrement défavorable sur l'efficacité de l'usine de traitement, et peut réduire considérablement la performance des systèmes d'égout en augmentant les volumes évacués, ce qui peut induire à des inondations et des débordements ainsi qu'à l'augmentation des volumes de pompage. Lorsqu'un taux important d'intrusion se produit, la chute des performances hydrauliques des égouts entraîne des coûts supplémentaires pour la réhabilitation.

L'exfiltration conduit à la pollution des eaux souterraines, ce qui peut affecter, à moyen et long termes, la qualité de la ressource, destiné généralement pour la consommation en eau potable, mais aussi pour les utilisations industrielles et agricoles. La dégradation de la qualité de ces ressources en eau affectera la qualité de vie et la santé publique des habitants.

L'évaluation et la détection efficaces des intrusions/extrusions des eaux dans les réseaux d'égouts urbains sont donc des questions très importantes qui devront être soigneusement étudié pour une gestion durable des infrastructures d'assainissement.

Ce travail est divisé en trois parties indépendantes :

- **Chapitre 1 : « Synthèse Bibliographique »** : ce chapitre contient les principes fondamentaux sur l'intrusion et l'extrusion des eaux dans les égouts. Outre les définitions, les causes, les impacts et les processus pertinents, il décrit les méthodes de mesure, les modèles et les approches pratiques traitant ces problèmes partout dans le monde
- **Chapitre 2 : « L'évaluation des débits d'intrusion par les méthodes traditionnelles »**
Ce chapitre décrit les différentes méthodes utilisées généralement pour l'estimation des ECP, une analyse complète ainsi qu'une comparaison est donnée en se basant sur les résultats obtenus sur le bassin du ouest d'Alger
- En raison des difficultés et la complexité qui accompagnent le phénomène d'exfiltration, **Chapitre 3 : « L'évaluation des débits d'extrusion par l'équation de Darcy »** vise à donner une approche simple pour la quantification des taux d'exfiltration en utilisant la modélisation de *Monte Carlo* sur l'équation de Darcy

Chapitre 1 :

Synthèse Bibliographique

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1-Introduction

La qualité structurelle des systèmes d'égout urbains et leur efficacité fonctionnelle sont des paramètres clés pour garantir le transfert des eaux usées aux stations de traitement sans intrusion ou extrusion des eaux. L'intrusion des eaux parasites est particulièrement nuisible à l'efficacité de l'usine de traitement, tandis que l'extrusion des eaux usées peut entraîner une contamination des eaux souterraines. L'étude de ces deux problèmes est essentielle à long terme pour la gestion durable de l'eau urbaine car ils ont des conséquences économiques importantes pour les opérateurs des réseaux d'égouts.

Après la prise de conscience des impacts négatifs de ces deux phénomènes, plusieurs chercheurs et praticiens ont tenté d'évaluer et traiter ce sujet. La première étape de ce travail de recherche consiste à réaliser un état de l'art sur l'intrusion et l'extrusion en termes de connaissance des phénomènes et les différents progrès obtenus au cours de ces 40 années de recherches, les recherches les plus pertinentes sont celles faites dans le cadre des deux projets européennes APUSS et CARE-S, les travaux faites en États-Unis par EPA et d'autres travaux partout dans le monde notamment en Japon et en Canada.

I.2 Intrusion et extrusion de l'eau dans les systèmes d'assainissement

I.2.1 Généralités

La fonction des réseaux d'assainissement est de collecter et d'évacuer, en général vers une station de traitement, les eaux usées et pluviales, avant rejet dans un milieu récepteur naturel. Mais, par suite d'un vieillissement naturel des ouvrages, d'une mise en œuvre non adaptée, ou d'aléas divers survenant tout au long des dizaines d'années de leur durée de vie, une partie de ces réseaux n'est plus en mesure de rendre les services que l'on attend d'eux. D'une part, ils collectent fréquemment des quantités importantes « d'eaux parasites », et d'autre part ils contribuent à la pollution des nappes phréatiques utilisées souvent pour la consommation en eau potable.

Lorsque l'infiltration et l'exfiltration sont observées, les réparations ou les travaux de réhabilitation seront normalement considérés comme nécessaires, mais l'investissement pour construire ou, plus fréquemment, pour renouveler, réhabiliter et moderniser les égouts urbains nécessite de ressources substantielles qui peuvent souvent dépasser la capacité à court terme des gestionnaires d'exploitation (Ellis et al., 2010).

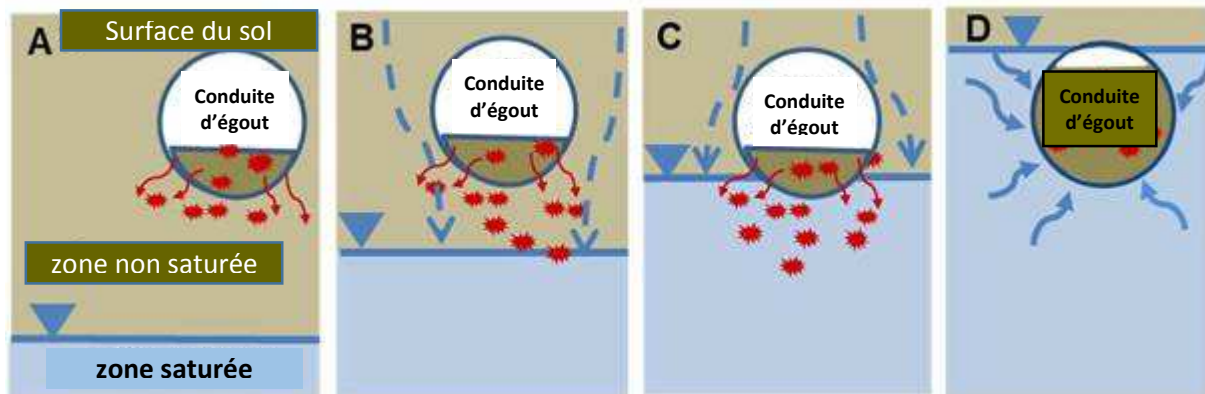


Figure 1.1 - graphique illustrant les interactions possibles entre les tuyaux d'égout et les eaux souterraines (source <http://cfpub.epa.gov>)

La pression d'une réglementation et de directives européennes plus strictes conduit inexorablement à une réévaluation fondamentale de la situation de l'assainissement.

Des enquêtes aux niveaux national et international sont menées pour mieux connaître l'état structurel et fonctionnel de ces réseaux. En France, l'enquête menée par l'AGHTM et le CSTB en 1989, auprès de 1106 gestionnaires pour un linéaire total de 49281 km, tout type de réseau pris en compte, recense le type et le nombre de défauts observés sur cet échantillon du patrimoine réseaux d'assainissement (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Types et pourcentages des défauts recensés sur un échantillon du patrimoine réseaux d'assainissement (CSTB et AGHTM, 1989).

Défauts ou dégradations	Nombre	Pourcentage (%)
Eaux parasites	114	29,3
Fissuration	60	15,4
Obstacle penetrant	42	10,8
Exfiltration	39	10
Affaissement	25	6,4
Corrosion	24	6,2
Ensablement	22	5,7
Contre pente	21	5,4
Ecrasement	17	4,4
Rugosité	17	4,4
Abrasion	8	2
Total	389	100

I.2.2 classification et facteurs de la dégradation de l'état structurel du réseau d'égout :

I.2.2.1 La classification et prédiction de l'état structurel des réseaux

L'état structural des conduites et le manque d'étanchéité sont respectivement les principaux facteurs d'une potentielle intrusion ou extrusion des eaux (EPA, 1977 ; Stein, 1998). Les méthodes typiques sont l'inspection par caméra télévisé conventionnelle (CCTV), l'entrée de l'homme et l'utilisation des miroirs et des caméras ; la méthode la plus importante est CCTV. L'analyse des résultats de l'inspection donne une classification de dégâts unique en raison de leur état actuel (Franz. T, 2006).

En règle générale, une atteinte (ou « reache ») est classée en fonction de ses dommages les plus graves ou de son état général afin de déterminer l'urgence de la réhabilitation. Schulz et al. (2005a) vérifient une certaine corrélation entre la distribution des intrusions d'ECP et la classification des égouts pour le bassin versant de Dresde / Allemagne.

De la même manière M.Rutsch et H.Uibrig (2003) ont proposé un système de classification en fonction du type de matériaux et en fonction de la date de construction.

La répartition des défauts concernant les caractéristiques des égouts a été étudiée pour le système d'égout de Dresde, Allemagne. Les enregistrements CCTV d'environ 7,2% du système d'égout de Dresde ont été attribués aux caractéristiques structurelles des égouts. Le système de classification a été appliqué à l'ensemble de données. Une classe de condition, contient des types différents de défauts soit structurels, soit des carences fonctionnelles et leurs impacts environnementaux, soit les deux.

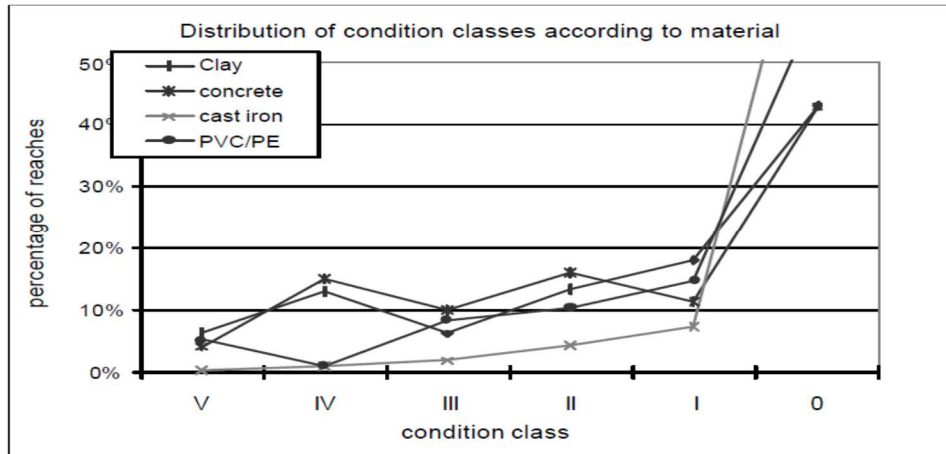


Figure 1.2 : Distribution des classes d'état des conduites par rapport au matériel de construction (M.Rutsch et al., 2003).

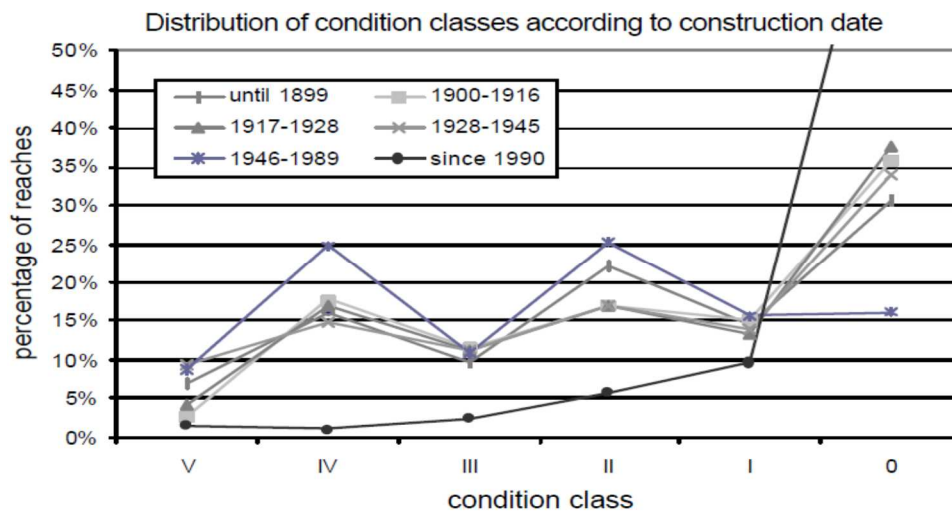


Figure 1.3 : Distribution des classes d'état des conduites par rapport à la date de construction (M.Rutsch et al., 2003).

D'après les mêmes auteurs, dans cette classification, la classe I représente une « Gravité des défauts sévère », la classe IV représente une « Gravité des défauts léger » et la classe V représente un « défaut détecté seulement ».

Un aperçu complet et une comparaison des systèmes de classification sont donnés dans (CARE-S, 2003).

Il existe de nombreuses études documentées sur les approches pour prédire l'état des égouts pour hiérarchiser les inspections. Dans ces études l'état structurel des égouts est prédit en utilisant différents facteurs dans le but d'optimiser les coûts d'inspection, et déterminer les priorités de réhabilitations. Ariaratnam et al. (2001) ont par exemple mis au point un modèle de prédiction appelé PRISM, qui utilise une programmation linéaire pour optimiser la gestion financière du réseau d'égout en regroupant les conduites d'égout en catégories en fonction de leurs paramètres caractéristiques. Ruwanpura et al. (2004) ont utilisé une méthodologie de simulation basée sur des règles pour prédire l'évaluation de l'état des égouts. Le modèle a prédit l'évaluation de l'état des tuyaux en fonction de l'âge, du matériau et de la longueur du tuyau.

Tableau 1.2 : Résumé des modèles de prédiction de l'état des tuyaux d'égout envisagés par des recherches précédentes

<i>Pays</i>	<i>Reference de la recherche</i>	<i>Model de Prédiction de l'état des conduite en fonction de :</i>	<i>Commentaire</i>
Japon	Hasegawa et al. (1999)	Matériel de tuyau, longueur, diamètre et autres caractéristiques.	N'évalue pas efficacement l'état d'un égout (Fenner ,2000)
Canada	Ariaratnam et al.(2001)	Âge, diamètre, matériel, type de déchets et profondeur	
Canada	McDonald et Zhao (2001)	Emplacement, type de sol, profondeur de tuyau, taille, type de déchets, zone sismique	
Allemagne	Baur et Herz (2002)	Matériel de construction, période de construction et emplacement.	Courbes de transition développées en utilisant les caractéristiques de la conduite.
USA	Yan et Vairavamoorthy (2003)	l'état et l'environnement du sol ont été transformés par « une approche floue » en format numérique pour la classification.	Une méthode pour évaluer l'état des tuyaux où il y a une incertitude dans les données disponibles.
Canada	Ruwanpura et al. (2004)	Âge, matériel et longueur	
USA	Najafi et Kulandaivel (2005)	Longueur, diamètre, matériau, âge, profondeur, gradient.	

I.2.2.2 Les facteurs de détérioration :

Selon la théorie de Davies et al. (2001a) L'état structurel d'un tuyau n'est pas constante. La détérioration d'un défaut mineur à l'effondrement est un processus de longue durée. Il suit un processus en trois étapes :

1-Un défaut initial : L'effondrement d'un égout se produit normalement lorsqu'un défaut initial, souvent mineur, permet une détérioration ultérieure. Ce défaut est causé par des erreurs de conception, de mauvaises pratiques de construction, des surcharges ou des dommages d'entretien. *Défauts visibles :* fissures à la paroi de la conduite, joint déplacé.

2 -Détérioration : L'in-et l'exfiltration provoquent la migration des particules du sol. Le support latéral est perdu et permet une déformation supplémentaire et les fissures deviennent des fractures. Le support latéral peut également être insuffisant en raison d'un remblai mal compacté ou inadéquat. Le ramollissement et l'érosion de tuyaux ou de joints par des attaques chimiques ou mécaniques surviennent. Dans la plupart des cas, les tuyaux sont soumis à de multiples défauts et, par conséquent, plusieurs processus de détérioration se produisent consécutivement. *Défauts visibles :* fractures, légères déformations, infiltrations.

3-Effondrement : la perte du support latéral permet au côté de la tuyauterie de se déplacer plus loin vers l'extérieur. L'effondrement est souvent déclenché par un événement aléatoire qui peut ne pas être lié à la cause de la détérioration. Par conséquent, il n'est pas possible de prédire quand un égout s'effondrera. Cependant, il est possible d'estimer si un égout s'est détérioré suffisamment pour que l'effondrement soit probable. *Défauts visibles :* fractures et déformations, cassement probable.

Tableau 1.3 : Les facteurs qui influencent la dégradation structurelle des réseaux d'assainissement (Davies, 2001)

<i>Caractéristiques de construction</i>	<i>Fonctionnalités externes locales</i>	<i>Autres facteurs</i>
Méthode d'installation, norme de fabrication, tailles des collecteurs, profondeur des collecteurs, lit de pose, matériaux de construction, types et matériaux des joints, les branchements.	occupation de la surface, type de la surface, caractéristiques du trafic, fuite principale de l'eau, mouvement au sol, régime d'écoulement souterraine, infiltration/exfiltration, type de sol / remblai	Caractéristiques des égouts, maintenance inappropriée, historique des investissements, niveau des sédiments, l'écoulement en charge

D'autres facteurs qui causent indirectement le manque d'étanchéité des collecteurs suivant (Stein, 1998) sont :

- ✓ Intrusion des racines,
- ✓ l'abrasion due au transport des sédiments, à la cavitation et à l'utilisation de méthodes, de nettoyages inappropriés,
- ✓ corrosion avec et sans exposition mécanique, déformation des tubes.

Dans le même contexte, une étude faite en U.K. par O'Reilly et al. (1989) réalisée sur 180 km de conduites d'égout dans Southern Water Authority (SWA), a révélé que les fissures, les fractures et les ruptures étaient les défauts les plus fréquents dans les tuyaux en béton. La majorité des défauts dans les tuyaux d'argile vitrifiée étaient des fissures suivies de fractures et de défauts d'articulation. Il y a eu très peu de défauts dans les tubes de ciment d'amiante examinés dans le rapport SWA.

L'étude a constaté que les tuyaux dans la gamme moyenne de diamètres (300-700 mm) présentaient plus de défauts que les tuyaux plus petits ou plus grands. On suggère aussi que le taux de défauts diminue à mesure que la profondeur des égouts augmente en raison de l'influence décroissante des facteurs de surface comme le trafic routier et activités de maintenance de surface sur les égouts. Alors que, pour les égouts très profonds, on pense que l'effet croissant de la pression de surcharge entraîne une augmentation du taux de défauts.

Considérant les facteurs qui influencent l'état structurel et la détérioration des conduites Davies et al. (2001a) tirent les conclusions que les facteurs sont nombreux et largement variés et que la connaissance détaillée des processus et des interactions des facteurs est relativement limitée. Ainsi, les études statistiques des processus mécaniques, chimiques et biologiques sont nécessaires. Un aperçu complet des causes de la détérioration des conduites est donné dans Stein (1998) ; Davies (2001) et HR Wallingford (2002).

Müller (2002) détermine la pertinence des facteurs influençant l'état structurel du réseau. Une base de données très complète a été fournie avec quatre systèmes d'égouts et leurs données complètes, y compris les inspections CCTV.

Tableau 1.4 : Pertinence des facteurs influençant l'état structurel des tuyaux (Müller, 2002)

<i>Facteur</i>	<i>Pertinence</i>	<i>Commentaire</i>
<i>Date de construction (âge, joints et main d'œuvre)</i>	Très haut	Enquêté depuis 1940
<i>Dimension</i> <i>Système d'égouts (unitaire, pluvial, séparatif)</i> <i>Profondeur du remblai</i> <i>Type de sol</i> <i>Matériaux de construction</i>	Haut	
<i>Charge de trafic</i> <i>Lit de pose</i>	faible	Selon la zone de conduite
<i>Profilé</i> <i>Niveau des eaux souterraines</i> <i>Bassin</i>	Aucune déclaration possible	

I.3 L'intrusion des eaux claires parasites

I.3.1 Définition

L'eau parasite constitue l'eau extra-atmosphérique qui est rejetée dans les égouts et qui n'est ni influencée qualitativement par les usages domestiques, industriels, agricoles ou autres, ni spécifiquement collectée et rejetée pendant les précipitations.

La norme européenne BS EN 752 (BSI, 1996a) ne définit l'eau parasite que comme déversement indésirable dans les égouts. Néanmoins L'attribut "indésirable" est subjective - par exemple, les eaux parasites peuvent être favorables au transport des sédiments- et permettent des interprétations adaptées individuellement.

I.3.2 Origines :

L'apport d'eau parasite provient de plusieurs sources et donc d'un certain nombre de procédés. Les sources sont les précipitations, les inondations, les sources ponctuelles d'eau de surface et les eaux souterraines.

Dans la littérature, plusieurs classifications et appellations ont été proposées pour distinguer les différentes formes des eaux claires parasites. Ces classifications font références à deux critères séparé ou combinés :

- La répartition spatiale (apports ponctuels, diffus).
- La répartition temporelle (apport permanents, quasi-permanent, temporaires).
- Une classification des eaux claires parasites.

Belhadj (1994) a donné une classification simplifiée des ECP qui est la suivante :

- **Les eaux claires parasites de captage EPC** : ils correspondent à des raccordements illicites d'eaux pluviales sur un réseau sanitaire. Ces apports se caractérisent par une réponse rapide et limitée aux séquences pluvieuses. Leur temps de réponse est variable de quelques minutes à une ou deux heures selon la configuration du réseau. ils sont souvent à l'origine des pointes de débit observées sur le réseau (mise en charge) ou à la station d'épuration. Ces apports peuvent être de deux types : - apports quasi permanents : eau de source ou de drainage ou apports temporaires : eaux pluviales des surfaces imperméables.
- **Les eaux claires parasites d'infiltration EPI** : ce sont des apports diffus dans l'espace. Ils proviennent de défauts d'étanchéité du réseau concerné. Ces eaux sont donc présentes dans l'environnement direct de la tranchée d'assainissement et sont drainées par le réseau. On distingue : - les apports permanents ou composants saisonnière : drainage des eaux souterraines, leur quantité est fonction de la hauteur de la zone saturée au-dessus du réseau. C'est le **drainage lent**,
- les apports temporaires ou composante événementielle : ce type d'apport est caractérisé par des débits de pointe importants à l'exutoire par temps de pluie. Ce sont des eaux de pluie qui transitent rapidement dans le sol et contribuent à la recharge des eaux souterraines. Une partie de cette eau est drainée par le réseau, c'est le **drainage rapide**. Ce dernier dépend donc de la lame d'eau précipitée ainsi que de la structure et de l'état hydrique du sol (pluies antérieures).

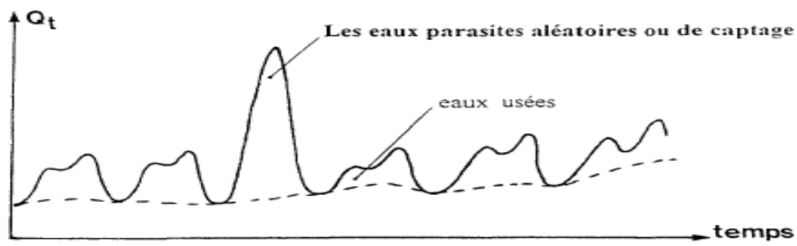


Figure 1.1: Mise en évidence des apports d'eaux parasites de captage (EPC)

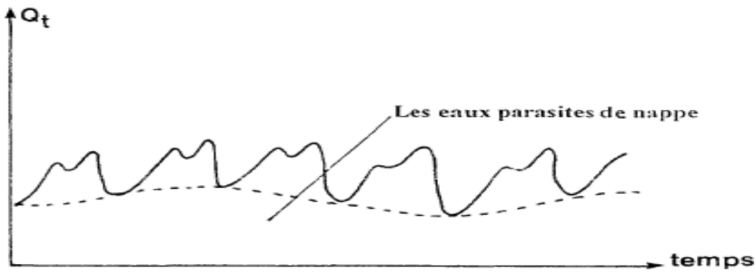


Figure 1.2: Mise en évidence des apports d'eaux parasites de nappe (drainage lent)

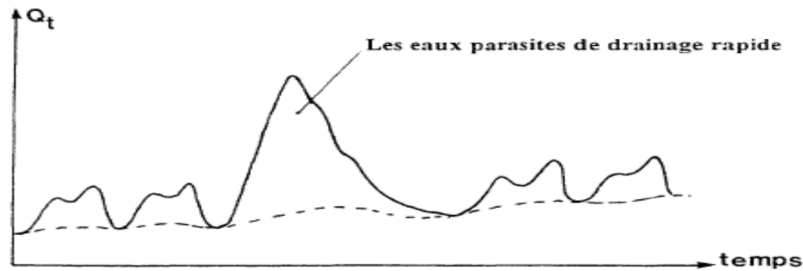


Figure 1.3: Mise en évidence des apports d'eaux parasites de drainage rapide

Figure 1.4 : Les différents types des eaux parasites (Belhadj, 1994)

➤ **Remarque**

Les eaux parasites de captage sont caractérisées par une courbe en cloche dans l'hydrogramme qui revient rapidement vers les valeurs de base initial tandis que les eaux parasites de drainage rapide sont caractérisées par une courbe en cloche qui revient lentement vers les valeurs de base initial.

Pour les eaux parasites de nappe on constate une augmentation du débit de base qui dure pendant une longue période par rapport aux autres types d'apports.

Tableau 1.5 : Classification des apports d'eaux parasites (d'après LROP-agence de bassin SEEVE Normandie , 1982)

<i>Temps de réponse</i>	<i>Nature des eaux parasites</i>	<i>Causes à rechercher</i>
<i>Quelques minutes à 1 ou 2 heures</i>	Apports aléatoires	Erreurs de branchements Collectes de fossés Surverses de plans d'eau
<i>Quelques heures à quelques jours</i>	Apports pseudo-permanents	Infiltration dans les nappes à niveau variable Ressuyage des terrains perméables Drainage
<i>Saisonnier ou annuel ou infini</i>	Apports permanents	Infiltration dans les nappes à niveau stable Ressuyage des terrains peu perméables (limons)

Tableau 1.6 : Classification d'ECP par rapport le comportement spatio-temporel (Ranchet et al.1982)

<i>Source</i>	<i>Apparition Permanente</i>	<i>Apparition temporaries</i>
<i>Diffuse</i>	Infiltration au cours de la période des basses eaux	Infiltration pendant le changement des niveaux d'eau souterraine
<i>Point</i>	Eaux de source et de ruisseau, drainage, eau de refroidissement	Eaux pluviales dans les égouts

Tableau 1.7 : Classification d'ECP par rapport le type du réseau (ATV-DVWK, 2003)

	<i>unitaires</i>	<i>Séparatif</i>	
		Eaux usée	Eaux pluviales
<i>Infiltration d'eaux souterraines par des fuites</i>	✓	✓	✓
<i>Drainage</i>	✓	✓	✓
<i>Eaux de source et de ruisseau</i>	✓	✓	✓
<i>Eaux de refroidissement</i>	✓	✓	
<i>Mauvais raccordement des eaux pluviales</i>		✓	
<i>Vidange des eaux pluviales sur les couvercles des regards</i>		✓	
<i>Les eaux de surface des zones extérieures, qui ne devraient pas être recueillies dans le réseau d'égouts</i>	✓	✓	✓

I.3.3 Les impacts des Eaux claires parasites

❖ L'impact sur les conduites :

Indépendamment de son origine, l'eau parasite augmente les charges hydrauliques, ce qui entraîne des coûts d'exploitation et de maintenance plus élevés pour le pompage, mais peut également affecter directement les clients domestiques, à cause des phénomènes comme le reflux d'eau usée. La principale conséquence de l'évacuation supplémentaire de l'eau est la diminution de la capacité de transport et de stockage. Une capacité de transport insuffisante entraîne des surcharges hydrauliques telles que la contre-pression, l'enfouissement ou l'activation des débordements d'urgence.

Torsten (2006) a entrepris une enquête majeure avec les données publiées sur l'étendue des eaux parasites, les résultats varient considérablement : en Allemagne, de 0 à 100% de supplément à l'eau usée, au Royaume-Uni de 15 à 50% et en Suisse, 47%. Selon les estimations faites par Vipulanadan et ozgurel gurkan (2004) l'intrusion des eaux représente près de la moitié de tous les débits dans les usines de traitement à l'échelle nationale dans les Etats Unis.

L'efficacité réduite du système d'égout à cause de la présence de l'eau parasite peut entraîner une plus grande demande d'énergie pour le pompage des eaux usées. L'infiltration d'eau souterraine de l'aquifère environnant dans les tuyaux d'égout peut transporter des particules de sol dans le collecteur, et celles-ci, lorsqu'elles sont déposées, peuvent entraîner une capacité réduite et endommager la structure du sol entourant le tuyau d'égout (G. Dimova et al 2015).

Les eaux parasites ont une teneur plus élevée en oxygène et en nitrates que l'eau usée. Ainsi, ils conduisent à la pré-dégradation de substances organiques facilement dégradables et réduit le risque de corrosion acide sulfurique biogène. Mais la détérioration structurelle des tuyaux peut être forcée par la corrosion due à l'eau agressive. Une analyse très complète des effets de l'eau parasite peut être trouvée dans Decker (1998).

Conte tenue de ces effets indésirables, la norme européenne EN 752-4 (1997) stipule que la conception des égouts doit tenir compte de l'eau parasite.

❖ L'Impact sur les stations d'épuration

Les principales conséquences d'ECP sont la surcharge hydraulique et la dilution des eaux. L'eau parasite a des propriétés physiques et chimiques différentes par rapport aux eaux usées (Franz .T, 2006), elle est :

- Est plus froid,
- a une teneur en oxygène plus élevée,
- peut avoir une teneur supérieure en nitrate et des valeurs de pH inférieures selon l'origine,
- a des concentrations plus faibles des substances.

L'eau parasite provoque une diminution de l'activité des boues activées due à des températures plus basses. La teneur en substances organiques facilement dégradables est diminuée à cause de la pré-dégradation dans le réseau d'égout. Ainsi, les acides organiques sont moins disponibles et des problèmes peuvent survenir lors du traitement amélioré des eaux usées, c'est-à-dire la dénitrification et l'élimination biologique du phosphore.

Les études présentées par Grzegorz Kaczor et al. (2015) ont révélé que les eaux parasites qui pénètrent dans l'égout sanitaire pendant les jours humides (pluvieuses) portent certaines quantités de polluants qui influent défavorablement sur la composition chimique des eaux usées brutes. S. Rödel et al. (2016) confirment ces résultats et ajoutent qu'une diminution de l'eau parasite augmente la des matières biodégradables ; et sa réduction entraîne une consommation d'énergie plus faible de certains composants de l'installation, tels que la station de pompage et l'aération.

Néanmoins Kroiss et Prendl (1996) soulignent que les ECP ont aussi des effets positifs comme l'amortissement des pics de concentration, un tamponnement des valeurs de pH dans le cas d'une eau usée dure.

❖ conséquences sur les eaux réceptrices

Selon G. Dimova et al. (2015) des problèmes écologiques et de durabilité se posent lorsque les effets environnementaux de l'eau parasite sont considérés, des débits hydrauliques accrus provoquent souvent des déversements incontrôlés d'eaux usées non traitées des eaux d'égout, provoquant la pollution et entraînant un risque pour la santé publique.

I.3.4 Méthodes d'estimation des ECP :

On distingue deux types de méthodes de mesure d'ECP dans les réseaux d'égout: d'une part les méthodes à base de débit ou statistiques et d'autre part les méthodes à base de polluants ou chimiques. Les méthodes de mesure dans les branchements domestiques sont différentes en raison du faible débit et du manque d'accès.

Les méthodes statistiques, également appelées méthodes hydrauliques ou quantitatives, utilisent des mesures de débit d'égout dans des conditions ou des périodes spécifiées (par exemple, débit nocturne résiduel) pour obtenir le débit d'eaux claires parasites. Ces méthodes sont facilement applicables, car elles nécessitent seulement des mesures de débit tandis que la méthode chimique exige une mesure ou une analyse supplémentaires en plus de la mesure du débit (Kretschmer et al., 2008).

Les méthodes chimiques, également appelées méthodes à base de polluants ou qualitatives, utilisent des concentrations de polluants, comme, DBO, DCO, MES, dans les eaux usées et les charges polluantes moyennes par habitant (Verbanck et al., 1989, Kracht & Gujer, 2005).

Aumond & Joannis (2006) et Schilperoort (2006) ont montré que certaines propriétés physiques, par exemple la turbidité, la conductivité et la température peuvent également être utilisées comme indicateurs d'intrusion d'ECP avec une relation de dilution simple pour quantifier l'intrusion d'ECP sur la base de l'analyse du bilan la charge de polluants en tant que concentration de DCO, MES ou NH₄.

Au lieu d'utiliser des polluants naturels ou une propriété physique de débit de temps sec, De Benedittis et Bertrand Krajewski (2005), Bares et al. (2008) et Kracht et al. (2008) ont proposé des traceurs artificiels pour la quantification des eaux usées, les traceurs les plus importants sont les isotopes naturels de l'eau comme ¹⁸O/¹⁶O et D/H.

De Bénédittis et Bertrand-Krajewski (2005a) ont examiné 13 méthodes différentes d'estimation de débit d'ECP, dont 11 variantes de la méthode statistique et deux variantes de la méthode chimique. Leurs résultats ont montré une grande variabilité dans le volume estimé par les méthodes. Ils ont constaté que les montants d'intrusion provenant des méthodes varient jusqu'à 20% du débit de temps sec total.

Mitchell et al. (2007) ont comparé trois méthodes de prédiction empiriques utilisées pour estimer l'ampleur de l'infiltration des ECP dans 45 bassins d'égouts isolés dans le district d'assainissement du comté d'Orange (OCS D, Californie). Ils ont pu déduire les limites et le domaine d'application de chaque méthode.

➤ *Les méthodes d'estimation à l'échelle journalière*

Tableau 1.8 : Les principales méthodes traditionnelles utilisées dans l'estimation des ECP journaliers

<i>Méthode</i>	type	Echelle	Référence
<i>La méthode du débit journalier d'eaux usées de temps sec</i>	Débitmétrique	journalier	(EPA, 1977)
<i>Méthode du débit nocturne minimum</i>	Débitmétrique	journalier	(Fischer, 1990) (Renault, 1983)
<i>Méthode de rapport nyctéméral</i>	Débitmétrique	journalier	(Joannis, 1994)
<i>La Méthode de minimum mobile</i>	Débitmétrique	journalier	(Weiss et al. 2002); (Ertl et al., 2008) (ATV-DVWK, 2003)
<i>la méthode de facteur de débit minimum</i>	Empirique	journalier	(ASCE, 1982).
<i>Méthode de production d'eau usée</i>	Empirique	journalier	(Mayer, 1999) ; (Harping, 1997) ; Université de Wisconsin- Madison, 1978).
<i>la méthode de Stevens et Schutzbach</i>	Empirique	journalier	(Stevens et Schutzbach, 1999)
<i>Méthode des données d'Imhoff</i>	Chimique	journalier	(Renault, 1983)
<i>Méthode suisse</i>	Chimique	journalier	(Hager et al.,1985)
<i>La méthode Horizon</i>	Chimique	journalier	(Horizon, 1992)

➤ *Les méthodes d'estimation à l'échelle annuel/saisonnière*

Tableau 1.9 : Les principales méthodes traditionnelles utilisées dans l'estimation des ECP annuels/saisonniers

<i>Méthode</i>	<i>type</i>	<i>Echelle</i>	<i>Référence</i>
<i>La méthode du triangle</i>	Débitmétrique	Annuel/ saisonniers	(Weiss et al., 2002) ; 5Agence nationale pour la protection de l'environnement du Bade-Wurtemberg, 2001) ; (Brombach et al., 2003).
<i>Méthode d'Annen et Mueller</i>	Débitmétrique	Annuel/ saisonniers	(Annen, 1980)
<i>Différence des débits journaliers de hautes et basses eaux</i>	Débitmétrique	Annuel/ saisonniers	(Joannis, 1994)
<i>Différence des débits nocturnes</i>	Débitmétrique	Annuel/ saisonniers	(Joannis, 1994)

Une étude détaillée ainsi qu'une comparaison de ces méthodes est donnée dans le *chapitre 2*.

I.4 L'exfiltration des eaux usées des conduites d'assainissement

I.4.1 Généralités

L'exfiltration se produit lorsque les eaux usées sortent du système et contaminent les eaux souterraines environnantes et le sol voisin. Les fuites d'eaux usées sans pression ont été suggérées comme un risque potentiel de contamination des aquifères urbains, et bien que la fuite soit une conséquence inévitable des pratiques de construction en vigueur, l'Union européenne respectant la norme EN 752-2 5 (1996) reconnaît ces problèmes et impose des exigences d'intégrité structurelle pour les systèmes d'égout urbains, en assurant leur étanchéité contre les fuites. Les régimes réglementaires émergents dans de nombreux pays exigent que les fuites soient traitées pour une utilisation durable des ressources en eau (Rutsch, 2007).

I.4.2 Processus d'exfiltration des eaux des canalisations vers la nappe phréatique

L'exfiltration des égouts est un processus complexe. Les facteurs influents selon Rutsch (2007) sont les suivants :

- i) débit d'eau usée / niveau d'eau,
- ii) composés d'eaux usées, processus à l'interface tube / sol (lit de pose, type de défaut, matériau du tuyau),
- iii) propriétés du sol (conductivité hydraulique, nappe phréatique).

En outre, les variations spatio-temporelles des facteurs aggravent la complexité du système. Il est difficile de surveiller l'exfiltration des égouts, car les égouts sont enterrés dans le sol et l'exfiltration n'est pas visible.

Dans le cas d'une nappe phréatique au-dessous du niveau de la conduite, les eaux usées exfiltrent le sol principalement insaturé. On suppose également que l'égout est recouvert d'un lit de sable ou de gravier plus ou moins intact. Par la suite, la zone insaturée est suivie par la zone capillaire et la zone saturée (figure 1.5). La zone insaturée contient de l'humidité du sol, qui est stockée contrairement à la gravitation : eau adsorbée et capillaire.



Figure 1.5 : Schéma illustrant l'exfiltration d'une conduite située au-dessus d'une nappe souterraine (Rutsch, 2007).

Okubo et Matsumoto (1983) divisent l'exfiltration en trois étapes en fonction des changements de la qualité de l'eau, des pertes de charge et de la conductivité hydraulique pendant la période d'inondation :

- ✓ Le taux d'exfiltration diminue rapidement avec la réduction de l'oxygène dissous en raison de la croissance microbienne aérobie.
- ✓ Le taux d'exfiltration est presque constant ou augmente légèrement. La croissance microbienne aérobie est limitée par le niveau de DO inférieur.
- ✓ Le taux d'exfiltration diminue rapidement à mesure que le colmatage biologique apparaît en dépit des conditions anaérobies dans la couche superficielle.

Le processus de colmatage est réversible pendant les périodes de récupération, en fonction des conditions météorologiques et climatiques (Platzer et Mauch, 1997).

I.4.3 Les impacts de l'extrusion des eaux d'égout

Les effets de l'exfiltration ne sont pas connus en détail. Certaines études ont des difficultés à distinguer la pollution des égouts et la pollution d'autres sources (Vollertsen et Hvitved-Jacobsen, 2003). Les difficultés se produisent en raison du nombre élevé de possibilités. Cependant, plusieurs auteurs se sont mis d'accord sur le fait que les eaux usées peuvent être un facteur important dans la pollution des eaux souterraines urbaines.

Plusieurs études ont indiqué une pollution généralisée des eaux souterraines dans les zones urbaines résultant de la fuite générale des égouts (Amick et Burgess, 2000). La question de savoir si la pollution est causée par l'évacuation des égouts peut être étudiée par l'examen des incidents enregistrés ou par l'analyse de la qualité de l'eau souterraine et des substances indicatrices d'enquête qui sont attribuées aux eaux usées.

(Craun, 1984) décrit plusieurs cas d'histoires d'épidémies causées par la consommation d'eau souterraine contaminée aux États-Unis, parmi lesquels il y a eu un cas en Alaska où 89 personnes exposées à l'eau d'un puits contaminé par des eaux usées ont tombé malade avec des symptômes tels que nausées, vomissements et diarrhée.

Plusieurs cas d'épidémies résultants d'une fuite des égouts ont été rapportés, Anon (1985) a signalé un cas où des fuites provenant des égouts brisés à Haïfa, (Palestine occupée) ont affecté 6 000 personnes par une épidémie de typhoïde et de dysenterie.

Missteart and bishop (1997) ont cité un cas dans la ville de NAAS, près de Dublin, où l'approvisionnement public en eau est devenu grossièrement contaminé en 1991 par les eaux usées, 4000 personnes sont devenues malades, souffrant d'un degré variable de troubles gastro-intestinaux.

I.4.4 Les méthodes d'estimation des débits d'extrusion des eaux usées

Généralement, deux approches peuvent être distinguées pour quantifier les fuites d'égout :

1- Les méthodes indirectes, qui estiment l'exfiltration dans le cadre de la recharge urbaine de la surveillance des eaux souterraines et / ou un bilan de masse d'eau du bassin versant considéré.

2- Méthodes directes, visant à quantifier l'exfiltration, en effectuant des tests de pression pour des tuyaux individuels ou des dommages ou en utilisant l'équilibrage des substances de traceur dans certaines distances d'égout. Un cas spécial de méthodes directes est celui des enquêtes de laboratoire, qui sont menées sur des plates-formes d'essai.

I.4.4.1 Échantillonnage et modélisation des eaux souterraines

L'échantillonnage des eaux souterraines est une approche simpliste pour évaluer les fuites d'égout ou la recharge des eaux souterraines au moyen de concentrations observées dans les eaux usées domestiques.

Introduit pour la première fois par en Nottingham, Royaume-Uni par Barrett et al. (1997) qui proposent une combinaison d'isotopes stables et d'indicateurs microbiologiques comme paramètres les plus efficaces pour quantifier la recharge d'eau souterraine due aux fuites d'égout, des travaux similaires ont été conduits en Barcelone, Espagne par Vázquez-Suné et al. (2000) et en Sana'a, Yémen par Foppen (2002).

Cependant Ellis and Revitt (2002) font remarquer que la détérioration des eaux souterraines est la plus sévère dans une zone étroite de chaque côté de la ligne de la tranchée d'égout avec une occurrence relativement mineure et l'impact général de l'exfiltration sur les eaux souterraines semble pas grave dans leur opinion et donc les marqueurs de cation et anion utilisés dans cette méthode comme indicateurs ne sont pas nécessairement issus de l'exfiltration.

1.4.4.2 Le bilan hydrique des mesures de débit

L'estimation est basée sur les données relatives au ruissellement, à la consommation d'eau potable et aux eaux usées, plusieurs études ont été faites (Amick et Burgess, 2000; McDermott et O'Donoghue, 1999), les résultats de ces études sont soumis à de fortes incertitudes en raison de données d'entrée incomplètes ou incertaines car l'infiltration des ECP, la consommation d'eau interne et les fuites provenant des conduites d'eau doivent être prises en compte dans le même délai pour fournir de bonnes estimations d'exfiltration. Dans ce contexte, Karpf et Krebs (2005) affirment que des séries chronologiques suffisamment longues des données mentionnées permettent un bon ajustement de taux d'exfiltration modélisés et mesurés. L'étude de (McDermott et O'Donoghue) était la seule exception en ce qui concerne l'examen des incertitudes pour les mesures de débit.

L'avantage de cette méthode est sa simplicité car l'évaluation des débits l'exfiltration se fait à partir données de routine, même si elle est soumise à des erreurs systématiques. Il faut souligner que la plupart des services publics d'eau en Europe s'appuient sur des approches empiriques génériques pour identifier les hypothèses d'équilibre hydrique liées aux fuites.

1.4.4.3 Enquêtes de terrain :

La fuite des égouts dans les égouts opérationnels a été principalement évaluée par des tests de pression (Ullmann, 1994 ; Dohmann et al., 1999). Pourtant, il n'est pas confirmé si de tels tests représentent des exfiltrations dans des conditions réelles. En raison des charges de pression partiellement grandes, seuls les résultats des essais avec des niveaux d'eau inférieurs à 50% du diamètre du tuyau ont été considérés dans cette évaluation. Wolf et al. (2005a) ont montré que l'installation pourrait gêner ou même causer des dommages supplémentaires au cours de l'enquête, ce qui est extrêmement critique.

Les fuites d'égout provenant de certaines de tuyaux peuvent être mesurées à partir d'expériences de traceur (Rieckermann et al. 2005). Étant donné que le traceur est également dilué dans les eaux usées, toute perte de traceur est directement corrélée à la fuite dans le tuyau.

1.4.4.4 Enquêtes de laboratoire

Par rapport aux mesures sur le terrain dans les réseaux d'égouts, les investigations en laboratoire sont très pratiques car elles permettent un environnement de travail sécurisé. Les conditions limites contrôlées telles que le sol, les types de dégâts, la composition des eaux usées et le niveau de l'eau permettent d'identifier les processus et les variables souhaités. Les mesures d'exfiltration dans une plate-forme d'essai ont été menées par Rauch et Stegner (1994) et Blackwood et al. (2005), bien que l'intervalle d'observation dans les deux études soit trop court pour obtenir un taux d'exfiltration constant. Vollertsen et Hvitved-Jacobsen (2003) et Dohmann et al. (1999) ont étudié le comportement des fuites pendant les conditions d'écoulement variable et constante pour différentes tailles et types de fuites et en alternance des situations d'infiltration / exfiltration.

Les modèles expérimentaux ainsi que les résultats montrent que même pour des recherches de longue durée, le comportement diffère considérablement.

Conclusion

Bien que l'intrusion et l'extrusion des eaux dans les réseaux d'égout ne soient pas des phénomènes largement étudiés, plusieurs études et enquêtes sur ces deux phénomènes ont été achevées dans le monde entier. Il s'agit notamment du travail accompli aux États-Unis par l'EPA et plusieurs études en Europe, dont la majorité est axées sur l'Allemagne. L'étude de l'intrusion et l'extrusion des eaux a été d'un grand intérêt pour l'Allemagne, car ce pays possède une infrastructure très ancienne et détériorée. Le coût pour compléter les réparations nécessaires aux systèmes d'égouts allemands est estimé à près de 100 milliards de dollars. Par conséquent, plusieurs études ont été menées pour donner la priorité aux travaux de réparation. Certaines des études antérieures les plus applicables sont discutées ci-dessus. Ces études ont appliqué différentes approches dans le but de prévoir, caractériser, et réduire les taux d'intrusion et d'extrusion dans les réseaux d'assainissement.

Chapitre 2 :

*L'évaluation des débits
d'intrusion par les
méthodes traditionnelles*

L'évaluation des débits d'intrusion par les méthodes traditionnelles

II.1 Introduction

L'intrusion des eaux claires parasites dans le réseau d'égout urbain est une question cruciale à long terme pour la gestion durable de l'eau urbaine et la gestion des infrastructures de l'eau, et a de sérieux impacts environnementaux, sociaux et économiques sur les villes et les systèmes d'égouts. Par conséquent, pour avoir une gestion durable des systèmes d'égout urbains, l'intrusion de l'eau indésirable dans les réseaux d'égouts urbains doit être soigneusement étudiée.

L'évaluation des volumes d'ECP dans les réseaux d'égouts est une question très importantes, le but de cette partie de l'étude est de décrire et discuter les méthodes couramment utilisées dans la quantification des ECP dans les systèmes d'égout, et d'identifier les avantages et les limites de chaque méthode. Ces méthodes seront divisées en deux catégories : les méthodes d'estimation journaliers et les méthodes d'estimation annuel/saisonnière.

Les méthodes présentées dans ce chapitre seront utilisées sur l'Ouest d'Alger pour évaluer le niveau des eaux parasites dans les systèmes d'égout. Cela va donner la possibilité de comparer les différentes méthodes pour pouvoir identifier les critères de sélection et prendre de décision sur les lieux de réhabilitation.

II.2 Généralité sur la zone d'application des méthodes

II.2.1 Définition de la zone d'étude

Le bassin versant Ouest de la Wilaya d'Alger couvre une superficie de près de 25 000 ha et est occupé par une population de l'ordre de 400 000 habitants. Le système d'assainissement qui dessert le bassin versant Ouest qui est décrit sur la figure 2.1, contient les zones décrites ci-dessous :

- Station d'épuration de Beni Messous.
- Sous bassin versant des collecteurs Ain Benian, Beni Messous et Dely Brahim.
- Sous bassin versant côtier de Staoueli.
- Sous bassin versant de la zone urbaine de Staoueli.
- Sous bassin versant de Zeralda.

La station d'épuration de Beni Messous a d'une capacité de traitement de 250 000 Eqh. A l'heure actuelle, les eaux traitées par la station sont rejetées en amont immédiat de l'embouchure de l'oued Beni Messous.

II.2.2 La campagne de mesure

Cette campagne de mesure a été réalisée dans le cadre d'actualisation du schéma directeur de l'assainissement de la Wilaya d'Alger par SEAAL et s'est déroulé du 23 octobre 2008 au 06 janvier 2009. Les objectifs de cette campagne étaient les suivants :

- ✓ Apporter une connaissance des débits de temps sec et de temps de pluie en sortie des principaux bassins versants ;
- ✓ Permettre de mieux comprendre le fonctionnement de divers points du réseau (ouvrages particuliers, tronçons intermédiaires de certains grands collecteurs...);
- ✓ Fournir les informations concernant la pluviométrie pendant la durée de la campagne ;
- ✓ Contribuer à la connaissance des charges polluantes associées aux débits de temps sec.

Les résultats obtenus en période de temps sec ont fourni des données essentielles pour permettre de caractériser les flux de temps sec (débits et charges polluantes) pour la zone de l'Ouest d'Alger concerné par notre étude.

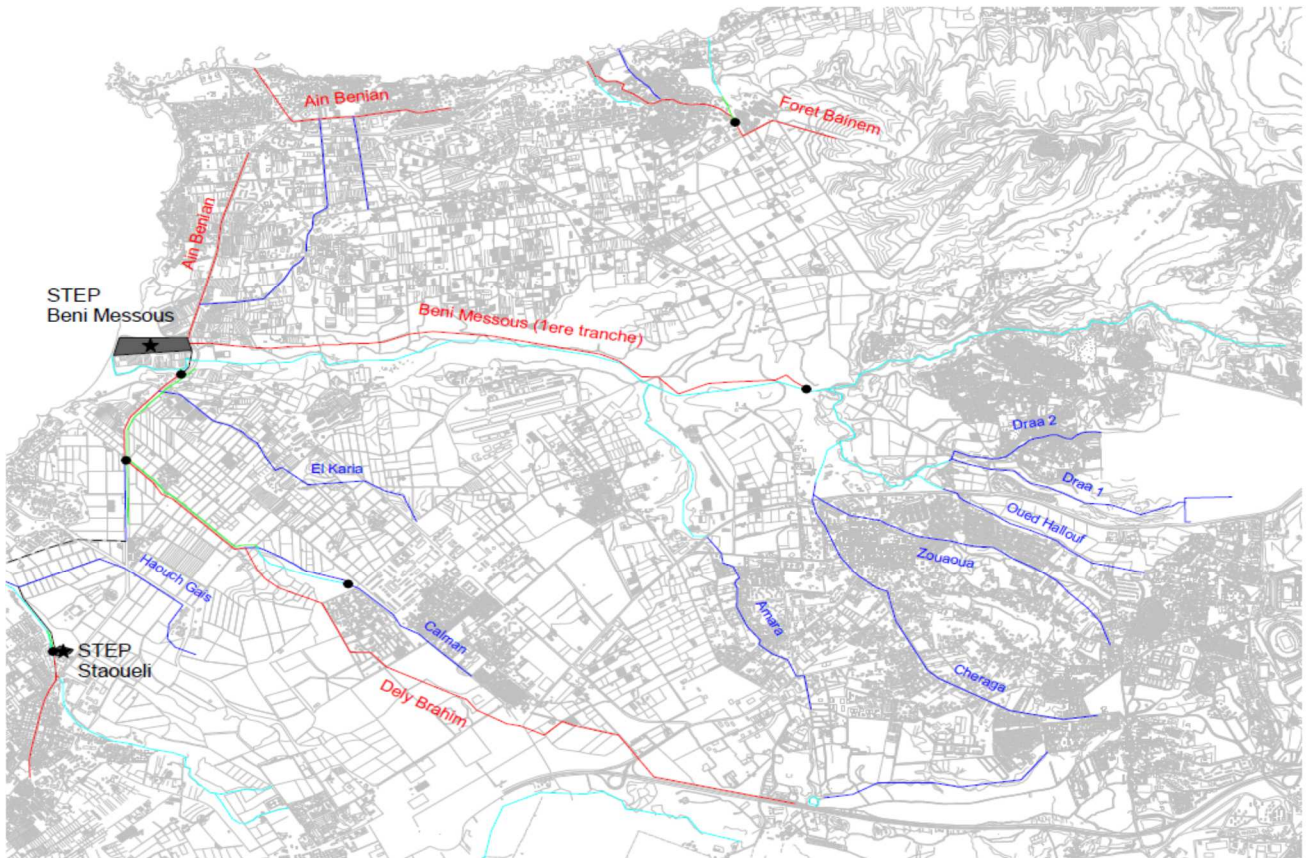


Figure 2.1 : Ossature principale du system d'assainissement de l'Ouest d'Alger (source : SEAAL).

II.2.3 Choix des sites de mesure

✓ Campagne pluviométrique

Le choix des sites a été fait afin de couvrir l'intégralité de la zone d'étude et de fournir un pluviomètre de référence pour chaque site de mesures hydrauliques en réseau, ceci tout en conservant à l'esprit l'accessibilité et la sécurité des équipements de mesure.

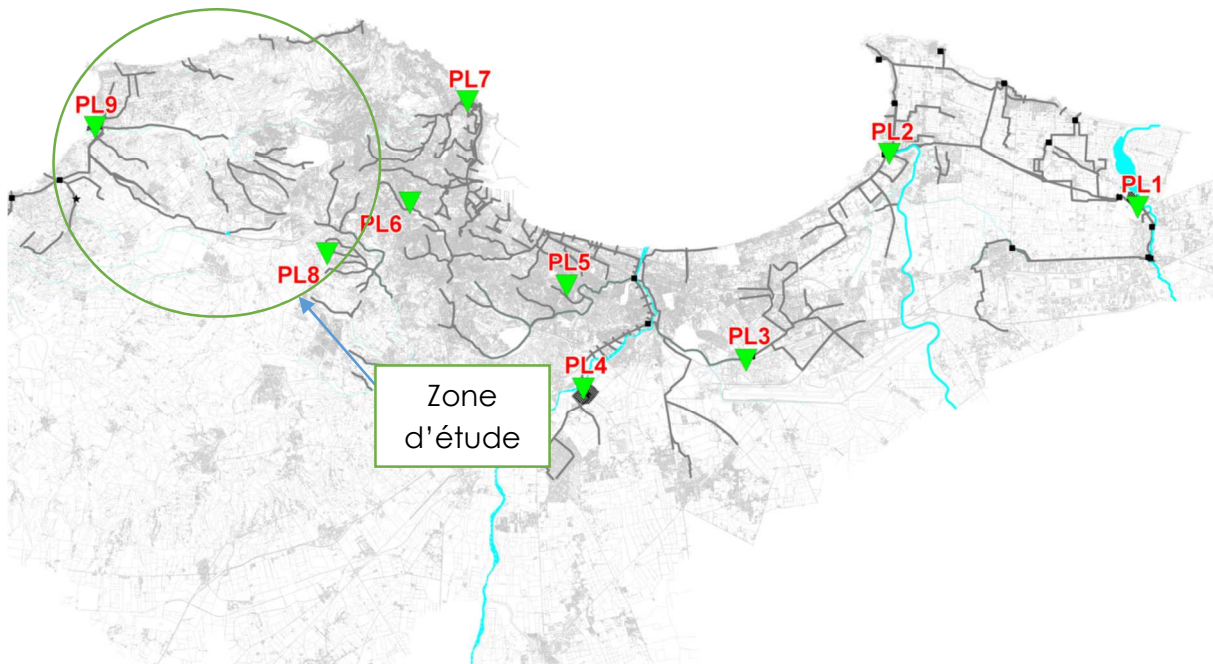


Figure 2.2 Localisation des pluviomètres (Source : SEAAL).

✓ *Type de mesure* : Hauteur des précipitations (mm).

Tableau 2.1 : Liste des points de mesure de pluie

<i>Nom du point</i>	<i>Nom du site</i>	<i>Date d'installation</i>
PL9	STEP Beni Messous	30 octobre 2009
PL8	Centre de formation SEAAL de El Achour	2 novembre 2009

✓ **Campagne hydraulique en réseau**

Le choix des sites a été fait de façon à permettre de mesurer la plus grande part possible des débits sortant du système d'assainissement, par temps sec et par temps de pluie.

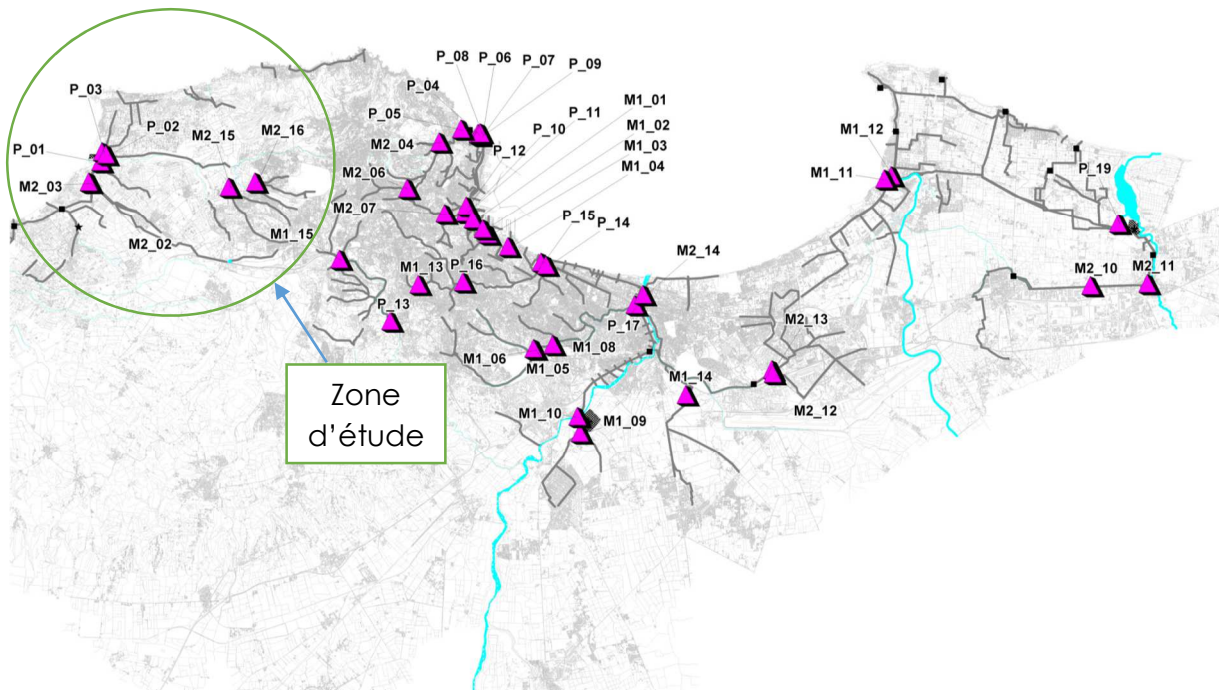


Figure 2. 3 : Localisation des points de mesure (Source SEAAL).

- ✓ **Type de mesures :** Les volumes totaux journaliers (obtenue par des mesures de vitesse et de hauteur d'eau)

Tableau 2.2 : Liste de points de mesures de volumes totaux journaliers et les sites correspondants

<i>Nom du point</i>	<i>Nom du site</i>	<i>Collecteur</i>	<i>Remarque</i>
P01	Aval Dely Brahim	Collecteur Dely Brahim	
P02	Aval Beni Messous	Collecteur Beni Messous	Plusieurs lacunes dans la série de mesure, ce point ne sera pas considéré dans notre étude
P03	Aval Ain Benian	Collecteur Ain Benian	
M2-2	Dely Brahim arrivée de Cheraga	Collecteur Dely Brahim	
M2-3	Dely Brahim arrivée de Staoueli	Liaison Staoueli (PR06) - Collecteur Dely Brahim	
M2-15	Aval Cheraga	Collecteur Cheraga	
M2-16	Aval Draa	Collecteur Draa	Quelques jours de mesure manquants

II.2.4. Analyses des effluents de temps sec

Malheureusement les prélèvements et analyses des échantillons n'étaient faits dans cette campagne que dans les zones industriels, par conséquent on ne dispose que de la série des mesures des polluants de la station d'épuration de Beni Messouss.

II.3. Les méthodes d'estimation traditionnelles des Eau claire parasite

II.3.1. Les méthodes d'estimation journalière

II.3.1.1 La méthode du débit journalier d'eaux usées de temps sec (EPA ,1973) :

L'infiltration représente l'influence du temps humide sur le réseau d'égouts et est calculée en soustrayant les eaux usées sanitaires et le débit d'infiltration dans une période pendant laquelle le système a été influencé par la pluie. Le débit maximal et le volume d'eau total peuvent être calculés à partir des enregistrements de débits. Les débits entrants lors d'un événement de tempête peuvent être répartis en deux composantes : direct et retardé.

Le débit direct est la part de débit qui augmente rapidement peu après le début de la tempête et diminue rapidement à la conclusion de l'événement. Le temps qu'il faut pour que l'eau du sous bassin le plus proche atteigne l'installation de traitement peut être estimé comme la différence de temps entre l'initiation de la tempête et l'augmentation du débit observé. Le débit direct se termine à un moment après la fin de la tempête approximativement égal au temps de réponse depuis le sous bassin le plus éloigné.

Le débit retardé est la partie de débit qui diminue progressivement à la fin de la tempête et après le débit de pointe provoqué par les connexions directes. Le débit retardé est le débit commençant à la fin de débit direct et se terminant à un moment où le flux de temps sec reprend.

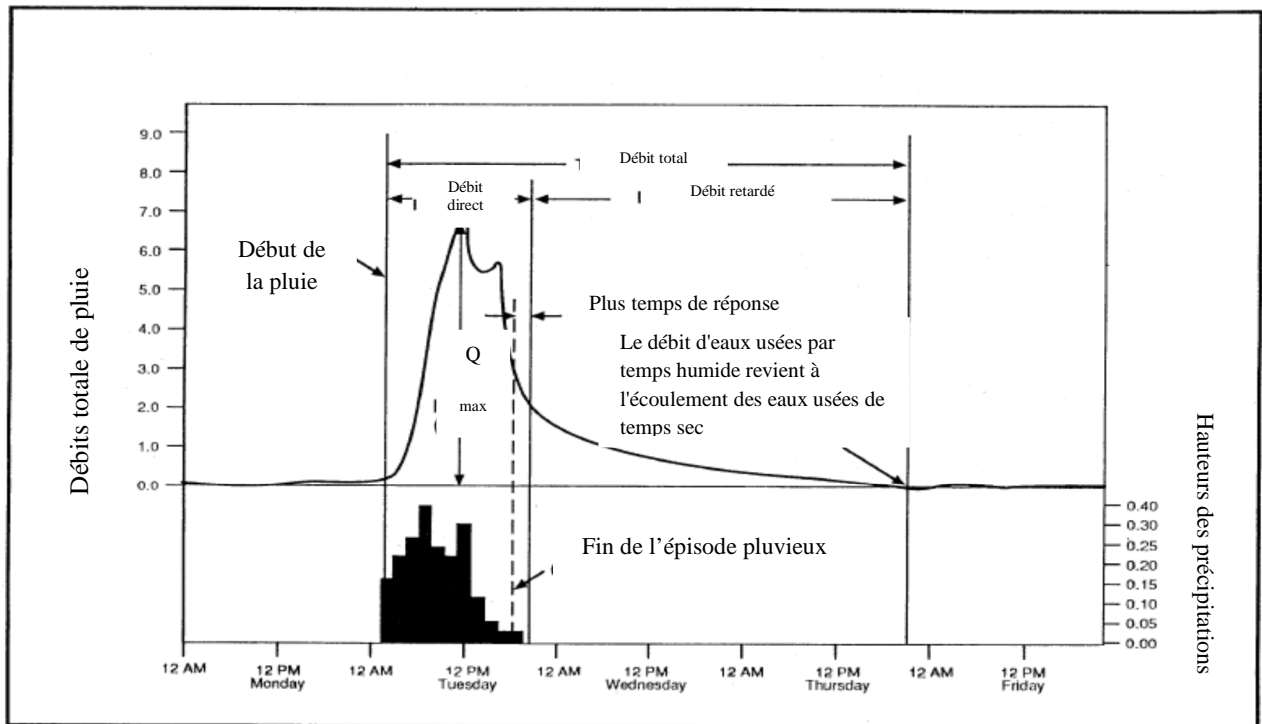


Figure 2.4 : Hydrographe qui aide à visualiser l'intrusion des ECP comme réponse au débit météorologique humide (source : MassDEP 1993).

On s'attend à ce qu'une partie du débit retardé inclue l'infiltration provoquée par les précipitations. Pour estimer le débit d'infiltration, on isole des jours secs de la période concerné, le débit d'Infiltration des ECP peut être estimé en soustrayant le débit d'eau usée du débit totale journalier mesuré

$$Q_{ECP} = Q_{Total} - Q_{eu} \quad (II.1)$$

Le débit d'eau usé peut être estimé à partir du débit de consommation en eau potable Q_{AEP} en le multipliant par un coefficient de rejet C_r : $Q_{eu} = Q_{AEP} * C_r$ (II.2)

Hypothèses Le débit d'eau usée est constant durant toute la période d'étude

Avantages et inconvénients :

(+)	(-)
+Simple et facile a utilisé	-Néglige les jours de pluies
	-Dépends fortement du débit d'eau usée estimé

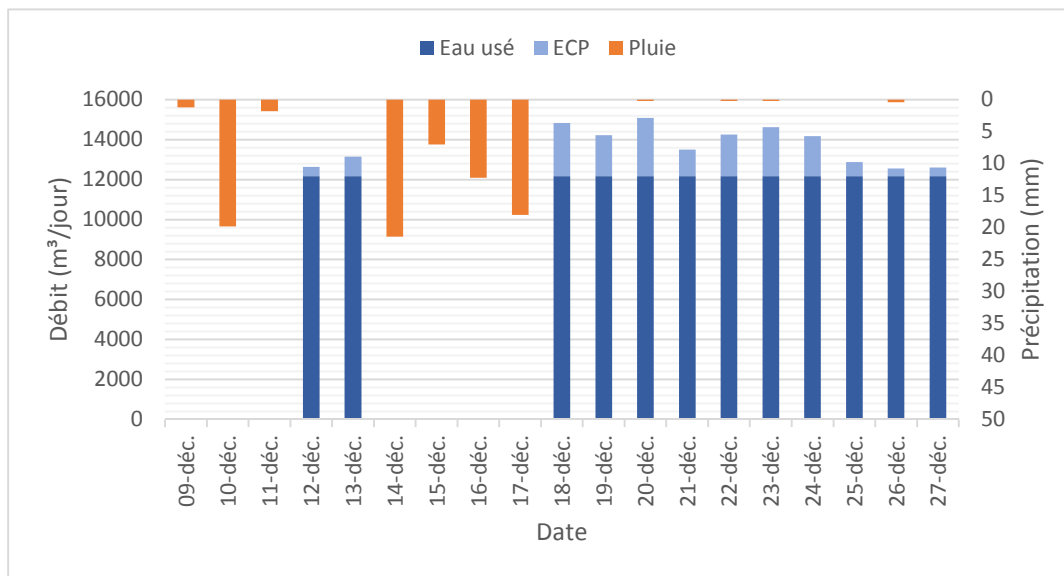


Figure 2.5 : Détermination des ECP par la méthode du débit journalier d'eaux usées de temps sec sur le point P01.

II.3.1.2. Méthode du débit nocturne minimum (Fischer 1990 ; Renault, 1983) :

En raison du rythme jour-nuit, le débit d'eau usée minimum est en principe très faible et se produit la nuit. Ce débit diminue avec la diminution de la taille du bassin versant et des pentes croissantes provoquent un court écoulement dans le réseau d'égout aussi bien qu'avec la faible influence des stations de pompage et des rejets industriels.

Ainsi, le débit d'intrusion d'ECP est proche du débit nocturne minimum total. Des mesures appropriées devraient être effectuées de préférence entre 2 et 4 heures et les week-ends pour éviter l'influence industrielle. Il est possible de mesurer l'intrusion des ECP avec une résolution temporelle élevée. Ainsi, des variations du taux d'intrusion peuvent être identifiées.

Fischer (1990) détermine le débit minimum d'eau de nuit en fonction des caractéristiques du bassin versant (tableau 2-3). Alternativement, Renault (1983) donne une fourchette de la fraction d'eau usée sur le débit minimum total en fonction des caractéristiques du bassin versant (tableau 2-4).

Tableau 2.3. : Débit nocturne minimum spécifique d'eau usé (Fischer, 1990).

Taille [P]	Caractéristiques bassin	Qmin [L/(s·1000 P)]
< 5,000	Homogène, sans accroissement du temps d'écoulement	0,3
5,000 – 100,000	-	0,5
> 100,000	Temps d'écoulement > 10 h	1,0

Tableau 2.4. : Fraction de l'eau usée sur le débit nocturne minimum total (Renault, 1983).

Taille du bassin	penne	Fraction des eaux usées [%]
large	faible	25 – 40
étroit	forte	15 – 25

Hypothèses : Cette méthode suppose que le débit d'eaux usées est quasi-nul pendant la nuit. Ainsi les débits minimums nocturnes enregistrés peuvent être assimilés aux débits d'eaux claires qui circulent en permanence dans le réseau. Par conséquent, le débit Q_{ECP} est constant est égal au débit minimum journalier.

Avantages et inconvénients :

(+)	(-)
+une seule mesure pour la détermination des ECP	-la définition de la période nocturne et diurne approximatif
Date	

Figure 2.6 : Détermination des ECP par la méthode du débit nocturne minimum sur le point M2-2.

II.3.1. 3. Méthode de rapport nycthéméral (Joannis, 1994) :

Un réseau exempt d'eaux parasites présente une courbe journalière des débits assez contrasté, avec des débits nocturnes faibles par rapport aux débits diurnes. La présence d'ECP translate sensiblement cette courbe vers le haut et atténue le contraste entre débit nocturne et débit diurne. La forme de l'hydrogramme peut être alors caractérisée par divers paramètres dont le rapport nycthéméral R_n .

$$R_n = \frac{\text{le débit moyen en période nocturne}}{\text{le débit moyen en période diurne}} \quad (\text{II.3})$$

Soit R_{n0} la valeur du rapport nycthéméral de Référence (RNR) qui permet d'exprimer la fraction du débit sanitaire diurne présent dans un réseau sain (absence d'eaux parasites) durant la nuit

$$\text{On a alors } \frac{Q_{ECP}}{Q_T} = \frac{24(R_n - R_{n0})}{\{(Dt \cdot R_n) + 24 - Dt\}(1 - R_{n0})} \quad (\text{II.4})$$

Ou

- Q_{ECP} débit d'eaux claires parasites
- Q_T débit total journalier
- Dt durée de la période nocturne
- R_{n0} rapport nycthéméral de référence (0,15 – 0,25).

La fraction nocturne est définie comme étant le rapport du débit nocturne du débit total journalier

$$F_n = \frac{\text{le débit moyen en période nocturne}}{\text{le débit moyen journalier}} \quad (\text{II.5})$$

Comme pour le rapport nycthéméral, une valeur de référence de la fraction nocturne F_{n0} est nécessaire pour le calcul des apports d'ECP. Les valeurs de F_{n0} citée dans la littérature sont :

- ✓ Réseau lent et/ou faible pente → $F_{n0} = 0,25 \div 0,4$
- ✓ Réseau court et /ou forte pente → $F_{n0} = 0,15 \div 0,25$

Remarque : Dans le cas idéal, les valeurs de référence F_{n0} et R_{n0} sont déterminées par des mesures en période de nappe basse. On considère alors que le bassin versant étudié n'est pas affecté par l'infiltration d'ECP. Si ce n'est pas le cas, seules les infiltrations d'eaux de nappes non permanentes liées aux battements des nappes superficielles sont estimées.

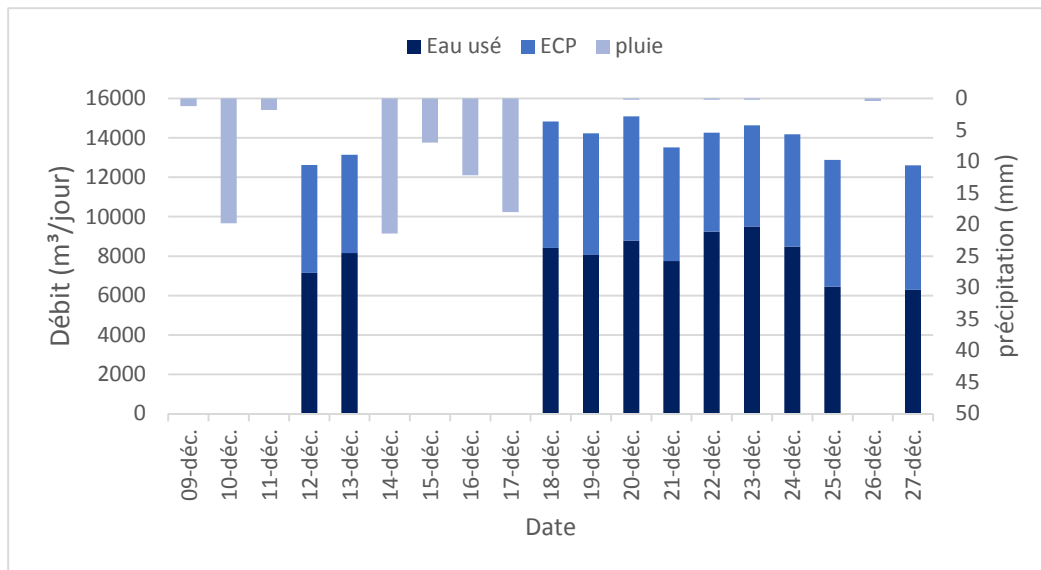


Figure 2.7 : Détermination des ECP par la méthode du rapport nyctéméral sur le point P01.

Hypothèse :

La quantité d'ECP dans un réseau d'assainissement influe sur la forme d'un hydrogramme des débits journaliers totaux.

Avantages et inconvénients

(+)	(-)
+ prend en compte les débits d'eau usée résiduel nocturne	- les valeurs de référence sont approximatives et influent sur les résultats
	- la définition de la période nocturne et diurne

II.3.1. 4. La Méthode de minimum mobile (Weiss et al., 2002 ; Ertl et al.,2008 ; ATV-DVWK, 2003)

La méthode du minimum mobile est également basée sur des mesures quotidiennes. La méthode peut être appliquée lorsque des débitmètres automatiques sont installés à l'entrée d'une station d'épuration ou un regard d'accès.

On suppose que le débit à sec est égal au débit minimal total d'eau usée observé les jours précédant l'évènement. Ainsi, au moins une journée de temps sec est supposée dans la période choisie. Le résultat est un hydrogramme en escalier Le débit d'eau usée est supposé constant. Par conséquent, un filtre mathématique k est appliqué pour sélectionner le flux de temps sec de l'ensemble des données en prenant le débit quotidien minimum d'une certaine période autour de chaque k jour de temps sec. Ce paramètre k est appelé le temps de latence ou lag time. Les essais montrent qu'un temps de latence de **21 jours** est un bon compromis pour exclure le ruissellement superficiel de courte durée (ATV-DVWK, 2003). Un temps de latence plus court conduit à une surestimation des ECP.

Dans une deuxième étape, les eaux usées domestiques et industrielles - aussi exactement que disponibles à partir des mesures ou des calculs d'approvisionnement en eau - sont soustraites des valeurs totales journalières.

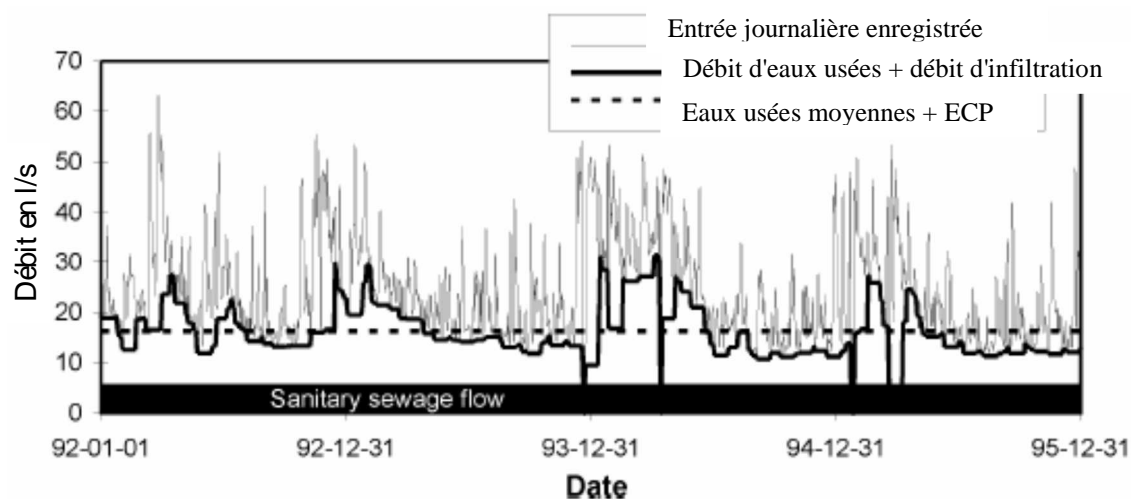


Figure 2.8. la méthode du minimum mobile (Source : Weiss et al., 2002)

Hypothèses

La méthode repose sur l'hypothèse principale que l'infiltration est causée par des oscillations plutôt lentes du niveau de l'eau souterraine et les changements rapides du débit sont causés par le ruissellement de tempête.

Avantages et inconvénients

(+)	(-)
+La possibilité d'évaluer le comportement saisonnier du système + évaluation graphique	Le temps de latence (lag time k) est variable selon les cas et l'estimation de sa valeur exacte est complexe

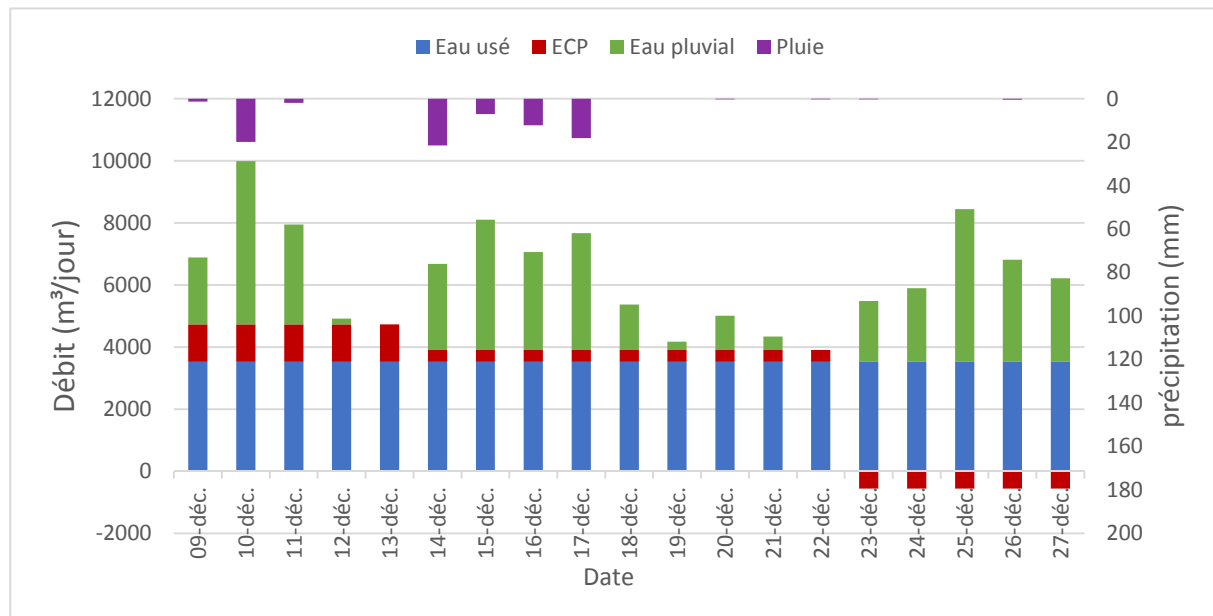


Figure 2.9 Application de la méthode de rapport nyctéméral sur le point P0

II.3.1. 5. La méthode de facteur de débit minimum (ASCE, 1982).

Cette méthode utilise le débit journalier moyen et le débit journalier minimum sur un bassin en fonction des facteurs de débit minimum. Le facteur de débit minimum (*min factor*) est défini comme la fraction du débit journalier minimum / débit journalier moyen. Ce facteur augmente avec la taille du bassin, comme le montre la «courbe du facteur min» de la figure 2.10

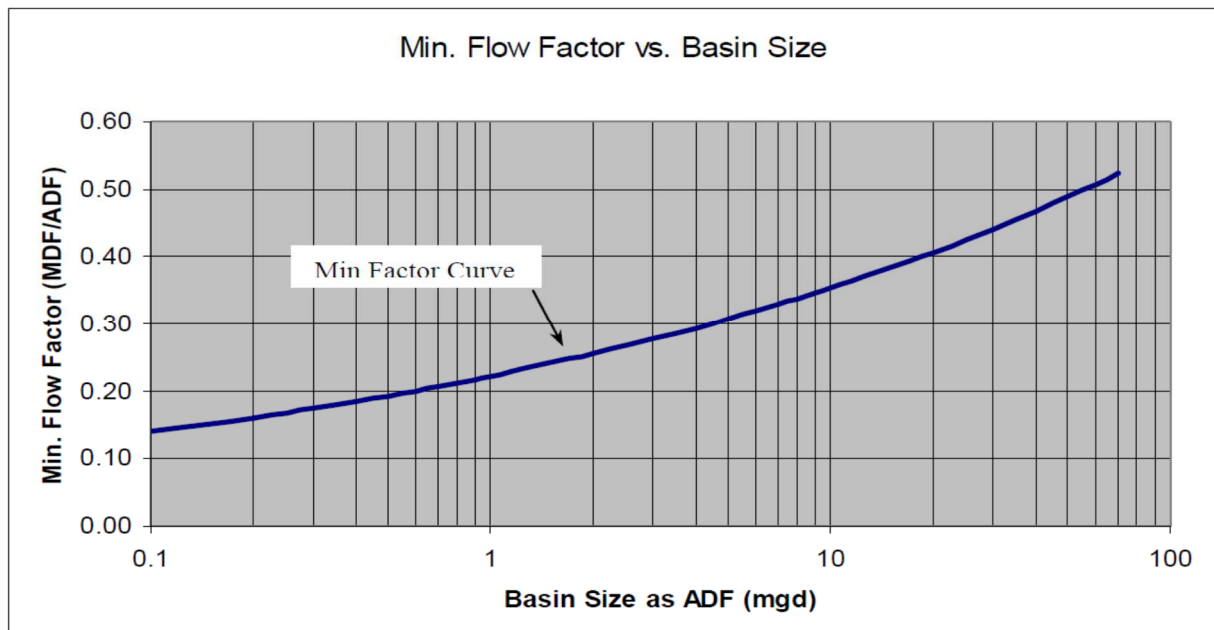


Figure 2.10 : Graphique montrant la relation entre la taille du bassin et le facteur Minimum (Source : Mitchell et al ,2007)

Cette relation entre la taille du bassin et le facteur Min peut être étroitement corrélée à l'aide de l'équation 3 où le terme $(Q_{\text{journalier}} - Q_{\text{infiltration}})$ peut initialement être réduit au $Q_{\text{journalier}}$. Alors le débit d'infiltration peut être calculé en prenant la différence entre le débit journalier minimum réel mesuré et le débit journalier minimum basé sur le facteur Min comme montré dans l'équation 4.

Pour une solution plus exacte au débit d'infiltration d'ECP, une ou plusieurs itérations des équations (II.6) et (II.7) devront être faites. Pour que l'équation 3 soit valide, les flux Débit journalier moyen et débit d'infiltration doivent être exprimés en unités de *mgd* (million gallons par jour : unité de mesure américain)

✓ **1ier itération**

- **Min Factor = $0.222 (Q_{\text{journalier}})^{0.202}$**
- **$Q_{\text{infiltration}(1)} = Q_{\text{minimum}} - \text{Min Factor} \cdot Q_{\text{journalier}}$**

✓ **2iem itération**

- **Min Factor₂ = $0.222 (Q_{\text{journalier}} - Q_{\text{infiltration}(1)})^{0.202}$**
- **$Q_{\text{infiltration}(2)} = Q_{\text{minimum}} - \text{Min Factor} \cdot (Q_{\text{journalier}} - Q_{\text{infiltration}(1)})$**

✓ **n iem itération**

- **Min Factor_n = 0.222 (Q_{journalier} - Q_{infiltration(n-1)}) ^ 0.202** (II.6)

- **Q_{infiltration(n)} = Q_{minimum} - Min Factor . (Q_{journalier} - Q_{infiltration(n-1)})** (II.7)

Avantages et inconvénients :

(+)	(-)
+Ne nécessite pas une estimation des eaux usées ou un choix d'une période nocturne	-le nombre d'itération nécessaire pour s'approcher de la valeur exacte des ECP est non défini

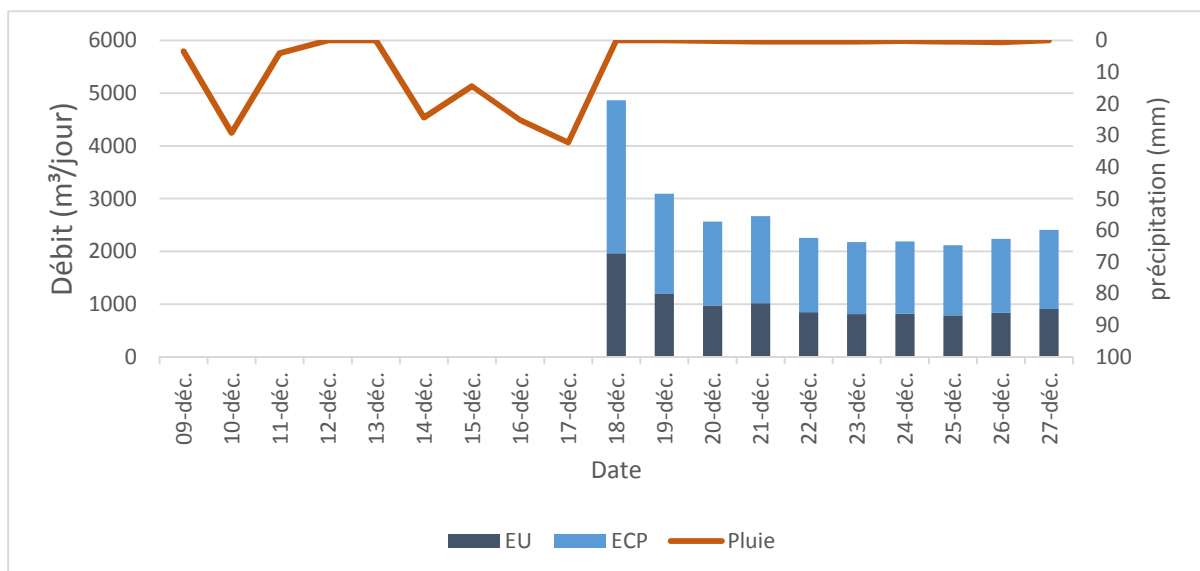


Figure 2.11 Application de la méthode de facteur de débit minimum sur Point M2-16.

II.3.1. 6. Méthode de production d'eau usée (Mayer, 1999, Harping, 1997, Université de Wisconsin-Madison, 1978) :

Cette méthode permet d'estimer la quantité d'écoulement d'eaux usées domestiques et de dériver les ECP infiltré par soustraction. La méthode est basée sur des études d'utilisation de l'eau domestique dans lesquelles le taux minimal d'utilisation de l'eau qui se produit pendant les premières heures du matin (généralement de 00 :00 h à 6 :00 h) représente environ 12% de l'utilisation quotidienne totale de l'eau.

Certains utilisent cette observation comme base pour estimer que 0,12 de la production moyenne quotidienne d'eaux usées se produit pendant la période d'écoulement minimum pendant la nuit, laissant 0,88 comme la fraction d'eaux usées produite en prenant la différence entre le $Q_{\text{journalier}}$ et le Q_{minimum} . Certains praticiens modifient le facteur 0,88 pour obtenir des résultats plus cohérents avec l'utilisation spécifique du sol ou la taille du bassin. Cela peut être reformulé pour dire qu'un facteur, X (=0,88) du $Q_{\text{eau usé}}$ est égal à la différence entre le $Q_{\text{journalier}}$ et le Q_{minimum} . Ensuite, l'infiltration de base $Q_{\text{infiltration}}$ est le flux qui reste après le $Q_{\text{eau usé}}$ est soustrait au $Q_{\text{journalier}}$.

Les relations utilisées pour estimer $Q_{\text{infiltration}}$ sont écrites dans les équations. (II.8) et

(II.9)

$$- Q_{\text{eau usé}} = (Q_{\text{journalier}} - Q_{\text{minimum}}) / X \quad (\text{II.8})$$

$$- Q_{\text{infiltration}} = Q_{\text{journalier}} - Q_{\text{eau usé}} \quad (\text{II.9})$$

Ou :

- $Q_{\text{infiltration}}$ = le débit infiltré des ECP ;
- $Q_{\text{eau usé}}$ = Production moyenne journalier totale d'eaux usées
- $Q_{\text{journalier}}$ = Débit journalier moyen ; ;
- Q_{minimum} = Débit journalier minimum ;
- X = Fraction de la production moyenne journalier totale d'eaux usées qui tient compte de la production d'eau usé de nuit non nulle (0,88).

Comme le $Q_{\text{infiltration}}$ varie au cours de l'année, la différence entre le débit moyen et minimum (et $Q_{\text{eau usé}}$) devrait rester constant.

Hypothèse : Le volume d'eau usé minimum représente environ 12% de l'utilisation quotidienne totale de l'eau.

Avantages et inconvénients :

(+)	(-)
+ L'estimation des eaux usées indépendante de la consommation en eau potable.	- surestimer la quantité d'ECP pour les grands bassins ($Q_{\text{journalier}} > 22730 \text{ m}^3$) et sous-estimer la quantité d'ECP pour les petits bassins ($Q_{\text{journalier}} < 454 \text{ m}^3$). -dépend fortement de la valeur de débit minimum mesurée.

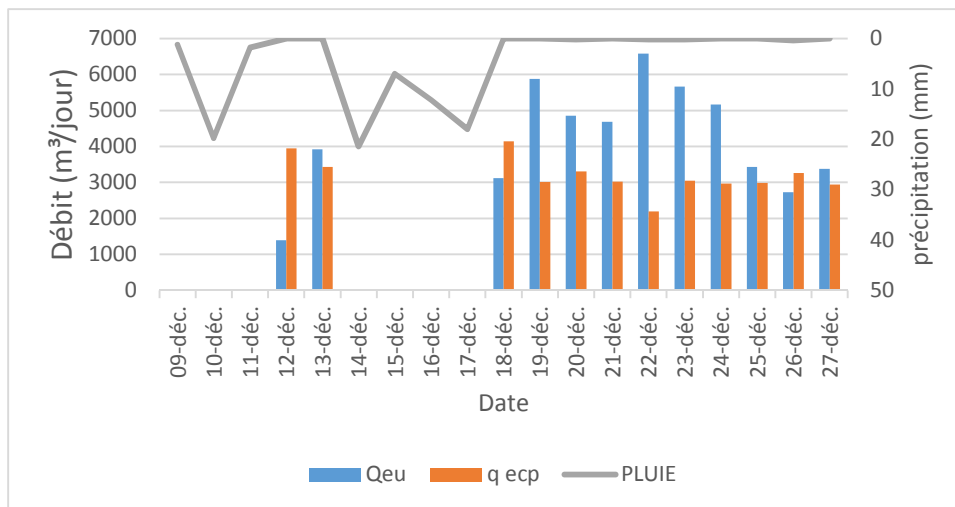


Figure 2.12 : Application de méthode de production d'eau usée sur le point M2-2.

II.3.1. 7. La méthode de Stevens et Schutzbach (Stevens et Schutzbach 1999) :

En 1999, Stevens et Schutzbach ont développé une méthode empirique pour surmonter les faiblesses apparentes de la méthode de production des eaux usées. Dans certains petits bassins, on a observé que l'estimation des ECP par la méthode de production d'eau usée générait des valeurs négatives. L'équation de *Stevens / Schutzbach (SS)* utilise une technique d'ajustement de courbe pour augmenter la fiabilité de l'estimation d'ECP surtout dans les bassins où les débits sont très bas ou très élevés ou dans des bassins fortement influencés par le débit de la station de pompage. C'est l'équation de Stevens / Schutzbach empiriquement dérivée. Pour que l'équation (II.10) soit valide, des unités de *mgd* doivent être utilisées pour le Q_{minimum} et le $Q_{\text{journalier}}$.

$$Q_{\text{infiltration}} = \frac{0,4 \cdot Q_{\text{minimum}}}{1 - 0,6 \cdot \left(\frac{Q_{\text{minimum}}}{Q_{\text{journalier}}}\right)^{0,7}} \quad (\text{II.10})$$

Avantages et inconvénients

(+)	(-)
+ Donne une bonne estimation des ECP pour les grands bassins. Indépendante de l'estimation théorique de l'eau usée. + Vérifié comme méthode empirique la plus précise	Applicable uniquement aux flux résidentiels.

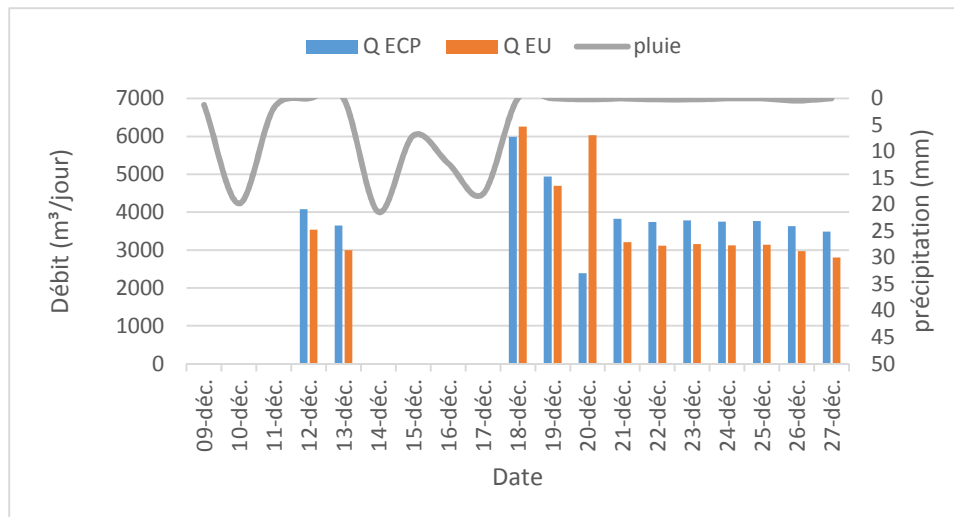


Figure 2.13 : Application de Méthode de Stevens et Schutzbach sur Point M2-2.

II.3.1. 8. Méthode des données d'Imhoff (Renault, 1983) :

La présence d'ECP provoque la dilution des effluents et une diminution de la concentration des polluants dans les eaux usées. Cette méthode repose sur une analyse statistique des rejets d'eaux usées strictes.

En comparant des valeurs de référence des rejets moyens journaliers de polluants par habitant avec des valeurs mesurées en réseau d'assainissement, on peut déduire le débit d'ECP :

$$Q_{ECP} = Q_T \left(1 - \frac{Q_{ref} \cdot CT}{M_{ref}} \right) \quad (II.11)$$

L'estimation du débit d'eau usée Q_{eu} est faite en fonction du débit de la consommation moyenne journalière d'eau potable par habitant Q_{ref} et du nombre N d'équivalent habitant correspondant tel que

$$Q_{eu} = Q_{ref} N = \frac{Q_{ref} \cdot QT \cdot CT}{M_{ref}} \quad (II.12)$$

Le nombre N d'équivalent habitant considéré est défini par : $N = \frac{M_{polluant}}{M_{ref}}$ (II.13)

$$M_{polluant} = Q_T C_T \quad (II.14)$$

Avec :

- Q_T : débit total journalier (m³/jour) ;
- CT : concentration moyenne journalière (g/m³) ;
- $M_{polluant}$: charge journalière du polluant (g/jour).
- M_{ref} : la valeur de référence du rejet moyen journalier

Tableau 2.5 Charges polluantes unitaires – Valeurs européennes types

Paramètre	Charge unitaire en g/j/Eqh
MES	70 à 90
DBO	50 à 60
DCO	100 à 120
N Total	15
P Total	14

Cependant, les charges polluantes associées aux eaux usées étant très liées au niveau de vie de la population, il n'est pas illogique que les valeurs de charges de la Wilaya d'Alger soient inférieures aux valeurs observées couramment en Europe

Hypothèse

- Les eaux claires parasites sont propres et exempte de pollution
- La concentration du polluant reste constante durant la journée

Avantages et inconvénients

(+)	(-)
+ La possibilité d'application sur n'importe quel paramètre de pollution disponible	-fixation d'une valeur de référence -ne prend pas en compte la variabilité du débit d'eau usé journalier la concentration des polluants

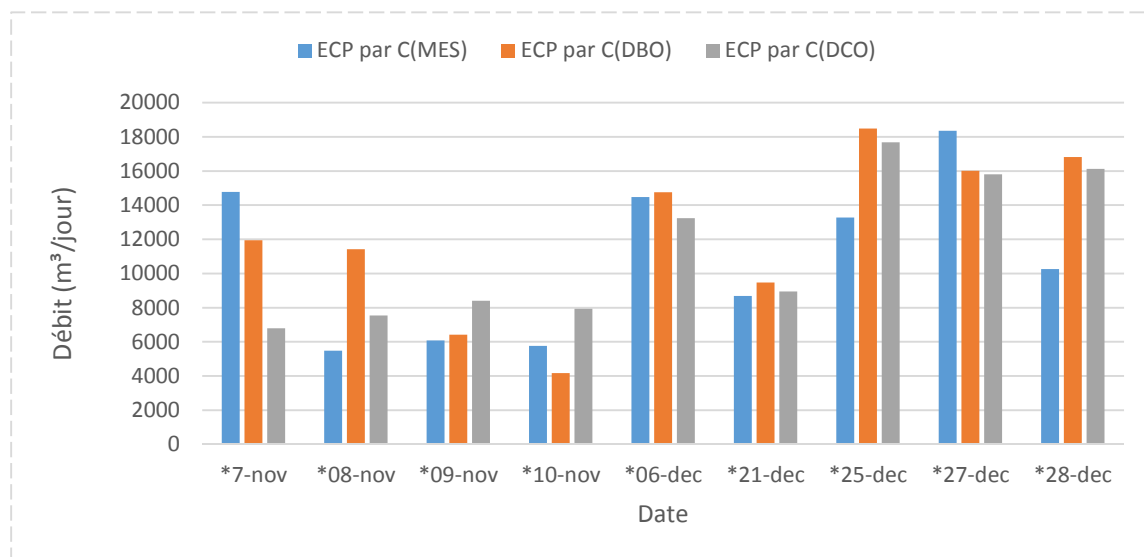


Figure 2.14 : Application de la Méthode de données d'Imhoff sur la station d'épuration de beni Messous

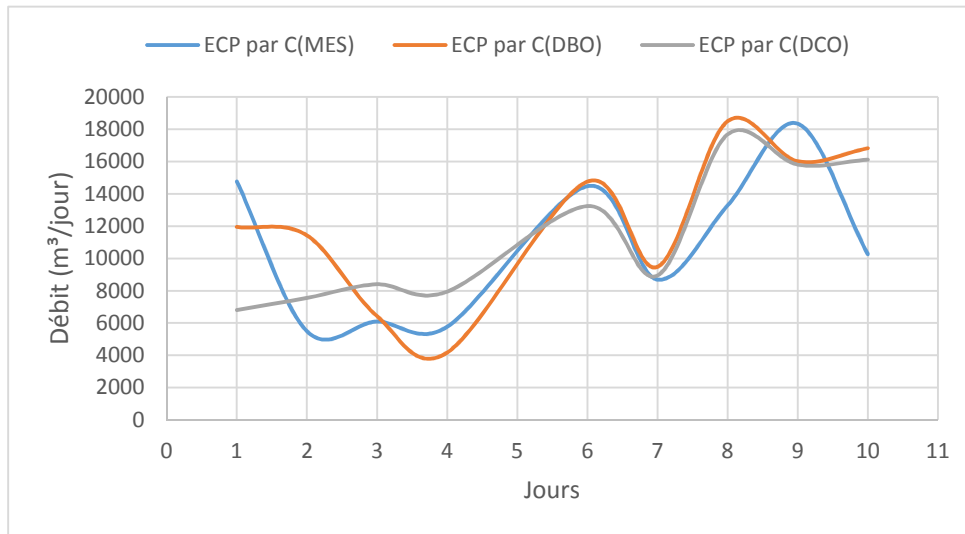


Figure 2.15 : Comparaison entre les volumes d'ECP générés par l'utilisation des 3 types des polluants sur la step de beni Messous.

Les 3 méthodes ont donné des estimations très proche des ECP, ils touche le minimum (4000 m³/j à 8000 m³/j) entre le troisième le quatrième jour et le maximum (environ 18000 m³/j) entre le huitième et le neuvième jour, et il se croisent au septième jour de mesure

II.3.1. 9. Méthode suisse (Hager et al., 1985) :

La méthode suisse nécessite des mesures en continu par l'utilisation de capteurs spécifiques in situ ou par analyse sur des échantillons successifs d'eaux usées. La quantification des ECP repose sur les deux relations suivantes :

$$QECP = QT - QEU \quad (II.15)$$

$$C = \frac{S}{Q} \quad (II.16)$$

Avec

- QT le débit total en temps sec
- C;la concentration en polluant
- S le flux de polluant ou le débit massique

La valeur $QECP$ du débit d'ECP est inconnue et la concentration C_{EU} des polluants dans les eaux usées strictes est calculée selon une procédure itérative dont le principe est le suivant :

en posant l'hypothèse que ($C_{eu, \min} = C_{eu, moy}$)

On obtient

$$Q_{ECP1} = (Q_T - Q_{eu1})_{\min} = Q_{T\min} \left(1 - \frac{C_{T,\min}}{C_{T,m}}\right) \quad (II.17)$$

Avec

- $Q_{T, m}$: le débit total moyen journalier en temps sec (m³/h)
- $Q_{T, \min}$: le débit total minimum journalier en temps sec (m³/h) ;
- $C_{T, m}$: la concentration moyenne journalière en polluant (g/l) ;
- $C_{T, \min}$: la concentration minimum journalière en polluant (g/l) ;
- S : le flux de polluant ou le débit massique (kg/h).

En se basant sur la même hypothèse et l'équation on obtient pour la 2^{iem} itération

$$Q_{ECP2} = (Q_T - Q_{eu,2})_{\min} = Q_{T,\min} \left\{ 1 - \frac{C_{T,\min}}{S} \left[Q_{T,m} \left(1 - \frac{C_{T,\min}}{C_{T,m}}\right) \right] \right\} \quad (II.18)$$

Hypothèse

- Les eaux claires parasites sont propres et exemptes de pollution
- La concentration du polluant reste constante durant la journée

Avantages et inconvénients

(+)	(-)
+ n'utilise pas de valeur de référence du rejet journalier moyen de polluants par habitant	- le protocole expérimental reste très lourd puisque la mesure en continu de polluants est nécessaire

II.3.1. 9. Méthode Horizon (Horizon, 1992)

La méthode horizon cité dans *De Bénédittis (2004)* est une méthode utilisée par le bureau d'étude horizon (1992) sur le bassin versant de Pierre-Bénite (Grand Lyon).

Cette méthode a la particularité d'utiliser le rapport nyctéméral Y des débits moyen journalier diurne et nocturne Q(D) et Q(N) et le rapport nyctéméral X des débits moyen journalier des eaux usée stricte diurnes et nocturne Q_{eu}(D) et Q_{eu}(N) pour l'estimation des ECP .

$$Q_{ECP} = \frac{Qd(Y-X)}{1-X} \quad (II.19)$$

Avec

- $Y = \frac{Q(N)}{Q(D)}$ le rapport nyctéméral des debit total journalier diurne et nocturne
-
- $X = \frac{Q_{eu}(N)}{Q_{eu}(D)}$ le rapport nyctéméral des debit journalier d'eau usé stricte diurne et nocturne
- Qd le debit total journalier diurne

Hypothèse

- ✓ Les eaux claires parasites sont propres et exempte de pollution
- ✓ La concentration du polluant reste constante durant la journée

Avantages et inconvénients

(+)	(-)
N'utilise pas de valeur de référence du rejet journalier par habitant. seuls deux échantillons moyens prélevés respectivement sur une période diurne et une période nocturne choisie soigneusement sont nécessaires	la teneur en polluant est négligeable dans les ECP

II.3.2. Les méthodes d'estimation annuelle/saisonnière

II.3.2. 1. La méthode du triangle (Weiss et al, 2002 ; Brombach et al., 2003) :

La méthode du triangle est une méthode graphique basée sur des mesures quotidiennes. Les volumes journaliers d'eaux usées, (par ex. Les volumes de débit entrant une station d'épuration, mesures ponctuelles sur le réseau..) sont classés et normalisés au maximum observé. Le résultat est typiquement une courbe (figure 2-16). On suppose que des volumes élevés se produisent pendant les périodes de temps humide.

Par conséquent, le nombre de jours avec le ruissellement tempête est prolongé du côté droit vers la gauche.

Le débit d'eau usée est censé être constant ; elle est exprimée par une ligne horizontale. Les mesures manquantes peuvent être reconnues par des valeurs inférieures à cette ligne. La zone située entre la courbe et la ligne horizontale représente le volume annuel de la tempête et de l'eau claire parasite. Pour séparer ces deux composantes, il est supposé qu'il n'y a pas d'écoulement régressif aux jours de temps sec et que l'intrusion est réduite pendant les périodes de pluie, car les niveaux d'eau plus élevés dans les égouts empêchent l'infiltration. La ligne droite qui ferme le triangle reproduit cette approche conceptuelle.

La zone située entre la ligne d'eau usée, la courbe de volume quotidienne et la droite représente le volume des ECP. La superficie comprise entre la courbe de volume quotidienne et la ligne droite représente le volume d'eaux pluviales.

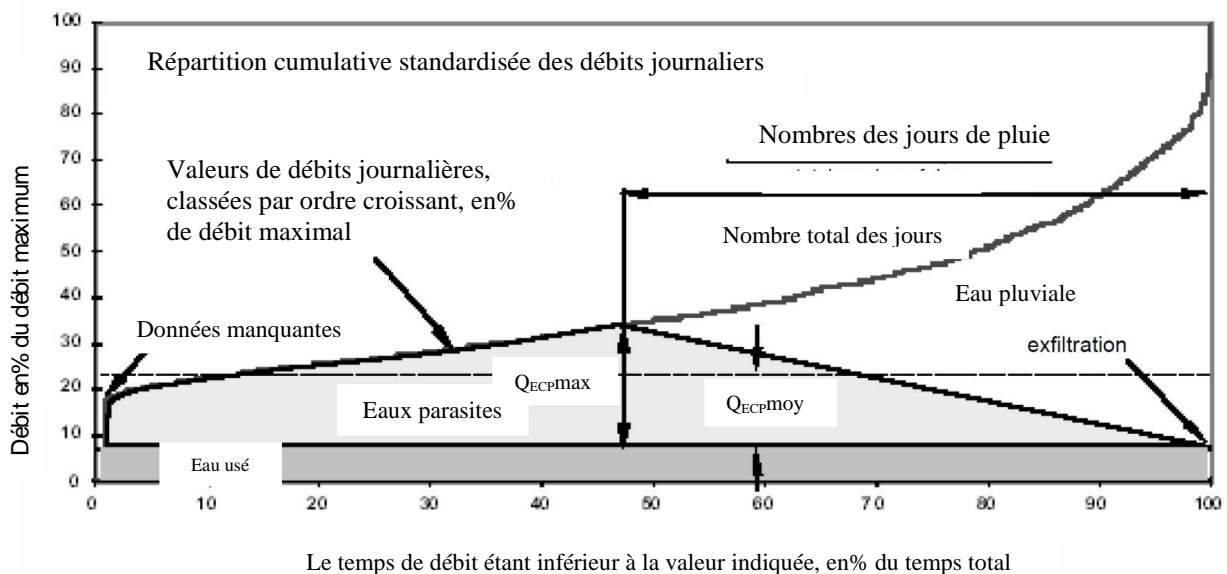


Figure 2.16. La méthode du triangle (Source : Brombach et al. 2003)

Hypothèses

Pour séparer ces deux composantes, il est supposé qu'il n'y a pas d'écoulement régressif aux jours de temps sec et que l'intrusion est réduite pendant les périodes de pluie, car les niveaux d'eau plus élevés dans les égouts empêchent l'infiltration.

Avantages et inconvénients :

(+)	(-)
+ simple à appliquer.	-le débit d'eau utilisé est supposé constant.
+ inclue à la fois les jours humide et les jours secs.	-la détermination graphique des ECP est rigoureuse et approximative.

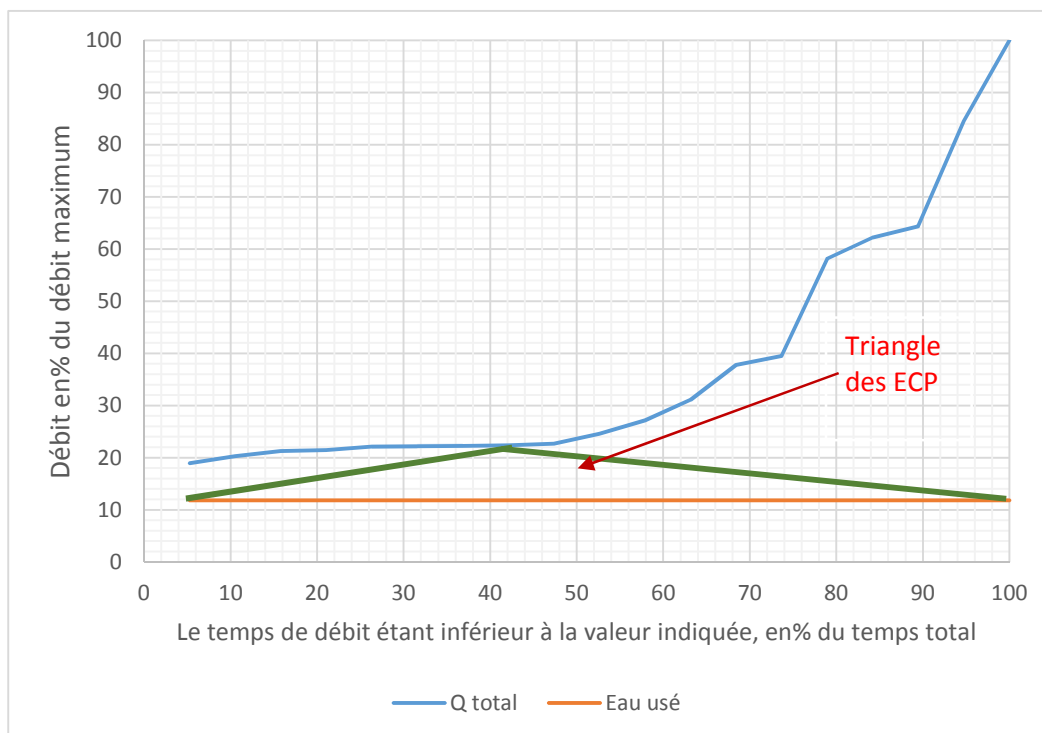


Figure 2.17 : division de l'hydrogramme des débits selon la méthode du triangle sur le point M2-2

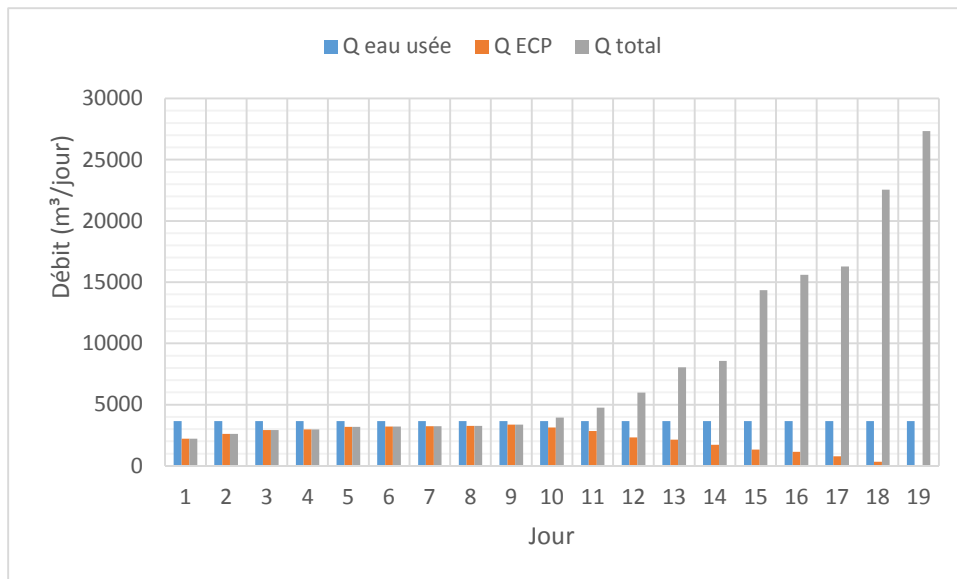


Figure 2.18 : Détermination des ECP par la méthode du triangle sur point M2-2

II.3.2. 2. Méthode d'Annen et Mueller (Annen, 1980) :

Comme la méthode du triangle, cette méthode repose sur un traitement d'une série de données de débits journaliers d'une période donnée, ces derniers sont triés par ordre croissant ensuite représentés par une courbe en fonctions du temps, cette courbe contient généralement deux parties linéaires séparées par un point d'inflexion

Ce points sépare les débits du temps sec des débits de temps de pluie , pour évaluer le volume d'ECP par cette méthode il suffit de soustraire le débit d'eau usé du débit de temps sec obtenue en moyennant les valeur de la partie inférieure de la courbe

$$\bar{Q}_{ECP} = \bar{Q}_{ts} - \bar{Q}_{eu} \quad (II.20)$$

Avec

- \bar{Q}_{eu} :le débit moyen d'eau usé estimé a partir de la consommation domestique
- \bar{Q}_{ts} :le débit total de temps sec obtenue
- \bar{Q}_{ECP} :le débit moyen d'eaux claires parasites

Hypothèses : Débit constant d'eaux usées strictes pendant toutes la chronique d'étude.

Avantages et inconvénients :

(+)	(-)
+Ne nécessite pas les données pluviométriques (la possibilité de définir les jours de temps sec et les jours de pluie graphiquement sans données pluviométriques).	-le choix du point d'inflexion est parfois difficile. -on ne peut pas apprécier la variation journalière des ECP qui sont représentées sous la forme d'un volume total.

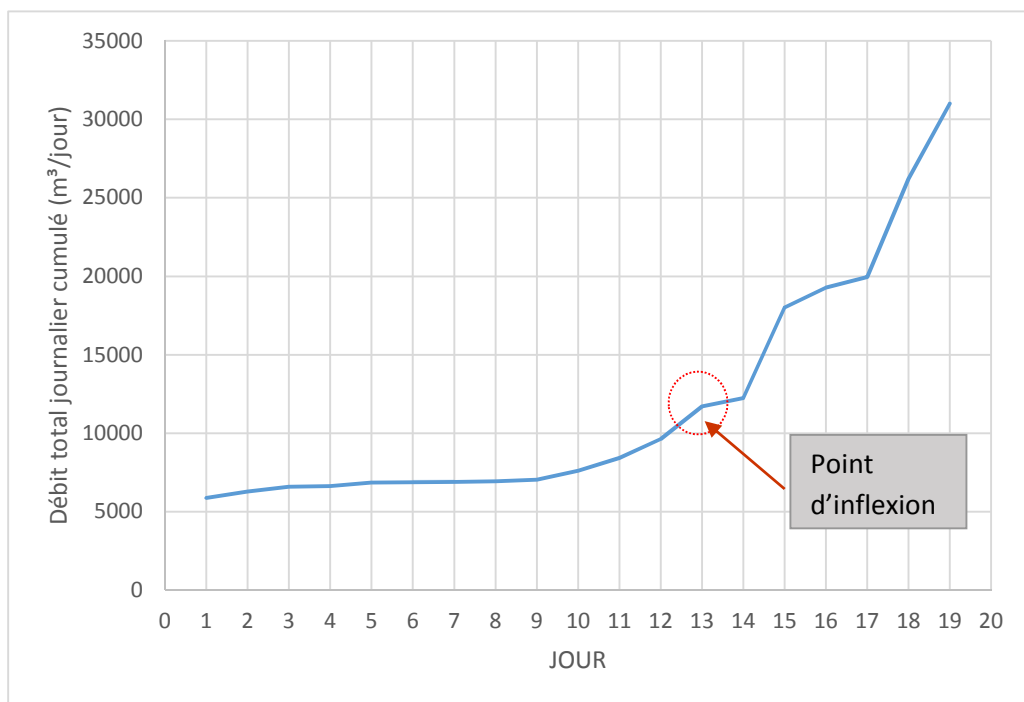


Figure 2.19 : Détermination du point d'inflexion sur le point M2-2

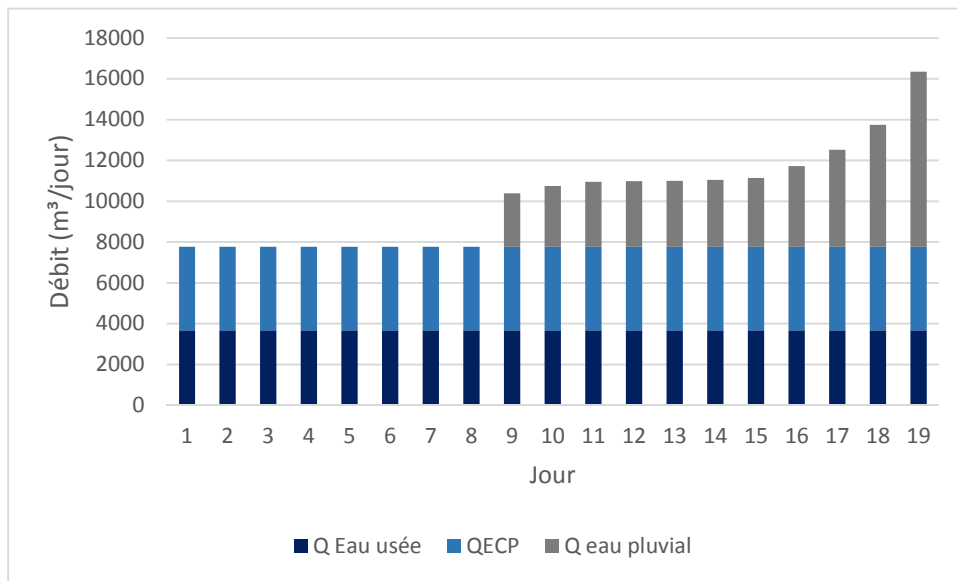


Figure 2.20 : Détermination des ECP par la méthode d'Annen et Muller sur point M2-2

II.3.2. 3. Différence des débits journaliers de hautes et basses eaux (Joannis, 1994) :

Pour appliquer cette méthode, il faut réaliser deux campagnes de mesure, une dans la période des hautes eaux HE et l'autre dans la période des basses eaux BE . Selon *Joannis (1994)*,

$$Q_{ECP} = Q_{T(he)} - Q_{T(be)} \quad (II.21)$$

- $Q_{T(he)}$ le débit total journalier moyen de temps sec observé durant la période des hautes eaux
- $Q_{T(be)}$ le débit total journalier moyen de temps sec observé durant la période des basses eaux
- Q_{ECP} une estimation du débit journalier moyen d'ECP non permanentes

Hypothèse : Cette méthode repose sur l'hypothèse que la dilution des eaux usées stricte reste constante pendant les périodes des hautes basses eaux.

Avantages et inconvénients :

(+)	(-)
+ quantifier que les infiltrations d'ECP non permanentes liées aux fluctuations du niveau piézométrique des eaux souterraines	-Néglige la variabilité saisonnière de l'eau usée stricte -n'identifie pas les apports permanents d'ECP en temps sec

II.3.2. 4. Différence des débits nocturnes de hautes et basses eaux (Joannis, 1994) :

La procédure de calcul est identique à celle de la méthode précédente, le débit total moyen journalier est remplacé par le débit nocturne journalier qui peut être le débit minimum observé ou bien la moyenne des débits d'une période nocturne

La différence entre le débit total nocturne moyen de temps sec observé durant ces deux périodes donne une estimation des apports d'ECP saisonniers liés aux fluctuations du niveau piézométrique des nappes souterraines.

Hypothèse

Cette méthode repose sur l'hypothèse que la dilution des eaux usées stricte reste constante dans les périodes des hautes et basses eaux.

- Avantages et inconvénients :

(+)	(-)
+ donne une meilleure évaluation des débits d'ECP vue qu'elle est basée sur des mesures nocturnes et donc l'influence des eaux usées reste minimale	Néglige la variabilité saisonnière de l'eau usée stricte

II.4. Résultats et discussion :

Les tableaux 2.6 et 2.7 donnent une synthèse des méthodes utilisées et des données disponibles

Tableau 2.6 : Les méthodes d'estimation journalière d'ECP :

METHODE \ POINT	P01	P03	M2-2	M2-3	M2-15	M2-16	STEP	Commentaire
La méthode du débit journalier d'eaux usées de temps sec(M1)	✓	✓	✓	✗	✓	✓	DI	Le volume d'eau usée théorique s'est révélé supérieur au volume mesuré dans le point M2-3 par conséquent la méthode M1 est inapplicable sur ce point
Méthode du débit nocturne minimum(M2)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	DI	Débit nocturne du point P03 non significatif car très influencé par le pompage
La méthode de rapport nyctéméral(M3)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	DI	
La méthode de minimum mobile (M4)	✗	✓	DI					<p>M4 nécessite une série de mesure d'au moins 21 jours avant la période d'étude (indisponible pour les points M2_2 M2-3 M2-15 M2-16)</p> <p>L'application du M4 sur P01 a donné des résultats négatifs car et le calcul du débit théorique d'EU ne peut être fiable du fait qu'une part importante des EU circule dans les oueds avant de rejoindre le réseau (pertes dans les oueds impossible à évaluer)</p>

Chapitre2 : L'évaluation des débits d'intrusion par les méthodes traditionnelles

la méthode de facteur de débit minimum (M5)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	<i>DI</i>	Débit nocturne du point P03 non significatif car très influencé par le pompage
La méthode de production d'eau usée(M6)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	<i>DI</i>	Débit nocturne du point P03 non significatif car très influencé par le pompage
La méthode de Stevens et Schutzbach(M7)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	<i>DI</i>	Débit nocturne du point P03 non significatif car très influencé par le pompage
La méthode des données d'Imhoff (M8)	<i>DI</i>						✓	Séries des mesures des polluants indisponibles
La méthode suisse (M9)	<i>DI</i>							Séries des mesures des polluants indisponibles
La méthode horizon(M10)	<i>DI</i>							Séries des mesures des polluants indisponibles

Tableau 2.7 Les méthodes d'estimation annuel / saisonnière d'ECP :

METHODE \ POINT	P01	P03	M2_2	M2_3	M2-15	M2-16	STEP	Commentaire
La méthode du triangle (M11)	✓	✗	✓	✗	✓	✓	DI	
La méthode d'annen et muller (M12)	✓	✗	✓	✗	✓	✓	DI	
La méthode de différence des débits journaliers de hautes et basses eaux(M13)	<i>DI</i>							Séries des mesures limitées dans le temps alors que M13 nécessite une plus longue durée de mesure couvrant les périodes des hautes et basses eaux
La méthode de différence des débits nocturnes de hautes et basses eaux(M14)	<i>DI</i>							Séries des mesures limitées dans le temps alors que M14 nécessite une plus longue durée de mesure couvrant les périodes des hautes et basses eaux

DI : données indisponible ou insuffisant

✓ : Méthode appliqué avec succès

✗ : Méthode appliqué mais résultats négatif ou irréaliste à cause des mesures fausses ou incertains

II.4.1 Comparaison des méthodes sur les points de mesure :

Toutes les méthodes ont été appliquées simultanément sur les points de mesure, les jours de pluie ont été exclus pour mieux visualiser la différence entre les méthodes, les jours de temps sec ont été sélectionnés en utilisant les données pluviométriques enregistrées durant l'étude diagnostic, le nombre total des jours sec est **10 jours** pour le point de mesure M2-16 et **12 jours** pour les autres points.

Le point M2-3

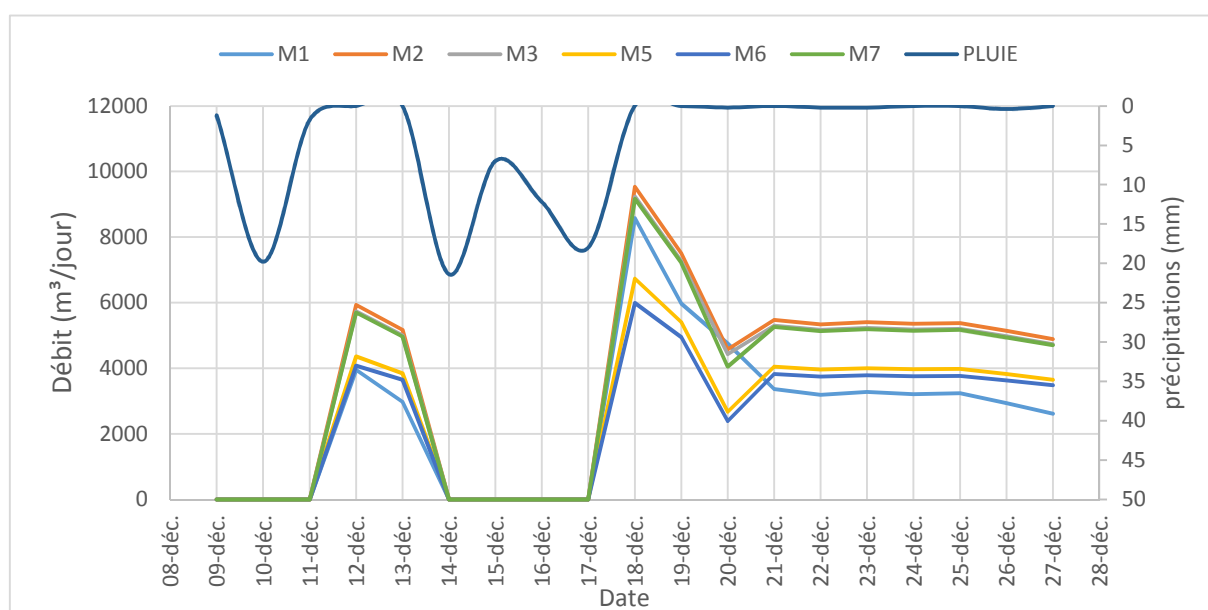


Figure 2.21 : comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le point M2-2

Des volumes importants sont aperçus après les épisodes pluvieux, la méthode (*M1*) a donné des valeurs relativement faibles par rapport autres méthodes. Cette méthode est basée sur l'hypothèse que Q est constant et que la totalité des eaux rejetées est transporté par le collecteur. Un coefficient de rejet de 0,7 a été appliqué à la consommation d'eau potable mais cette valeur reste approximative et la quantité d'eau usée réelle ne peut être définie que par des mesures directes.

Le point M2-3

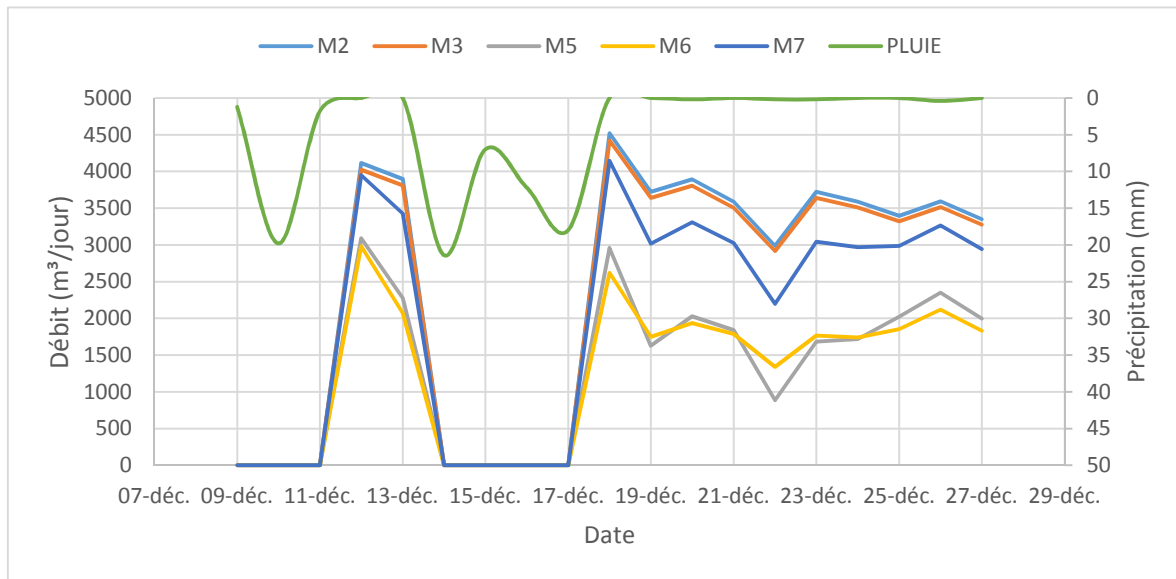


Figure 2.22 : comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le point M2-3

Les méthodes **M2** et **M7** sont tous les deux basé sur le débit nocturne, **M2** néglige les eaux usées résiduelle tandis que **M7** essaie de tenir compte de cette fraction, toutefois le facteur 0,12 n'est pas toujours représentatif et peut être (selon les cas) très loin de la réalité.

M1 a donner des valeurs négatifs, les valeurs mesurées dans le collecteur lors de la campagne de mesure sont inférieure a la quantité d'eau usé estimé à partir de la consommation AEP, ces derniers sont peut être surestimé ce qui a influe sur les résultats.

M7 basé sur une estimation des eaux usées a partie des débits minimum a donner des résultats plus concordants avec les autres méthodes d'estimation nocturne, comme constaté dans le cas précédent, **M5** et **M6** ont donné des résultats très proche.

Le point M2-15

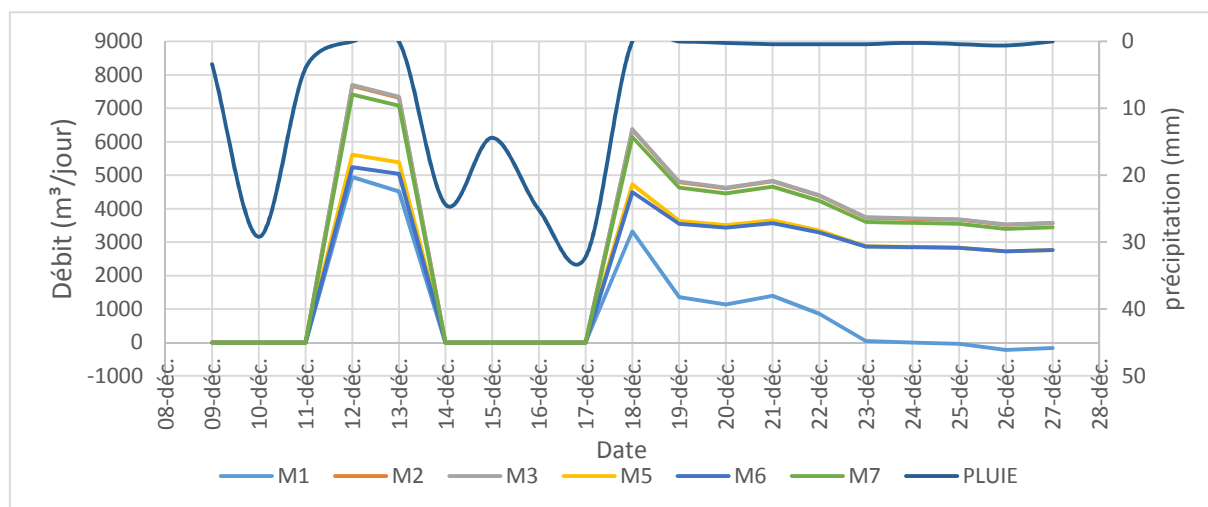


Figure 2.23 : comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le **point M2-15**

Le point M2-15 se situe dans la zone du pluviomètre PL9, cette zone est caractérisée par une forte pluviométrie suivie par des jours secs. Quand on a appliqué la méthode **M1**, les valeurs de débits d'ECP ont commencé à diminuer dramatiquement à partir du premier jour sec jusqu'à arriver à des valeurs négatives. Il est impossible dans certain cas de comparer les consommations d'eau potable et les débits mesurés en égout du fait d'un fonctionnement particulier du réseau qui ne permettrait pas d'acheminer la totalité des eaux rejetées jusqu'au point de mesure considéré (postes de pompage à l'arrêt pour réhabilitation, déversements de temps sec dus à des opérations de curage...).

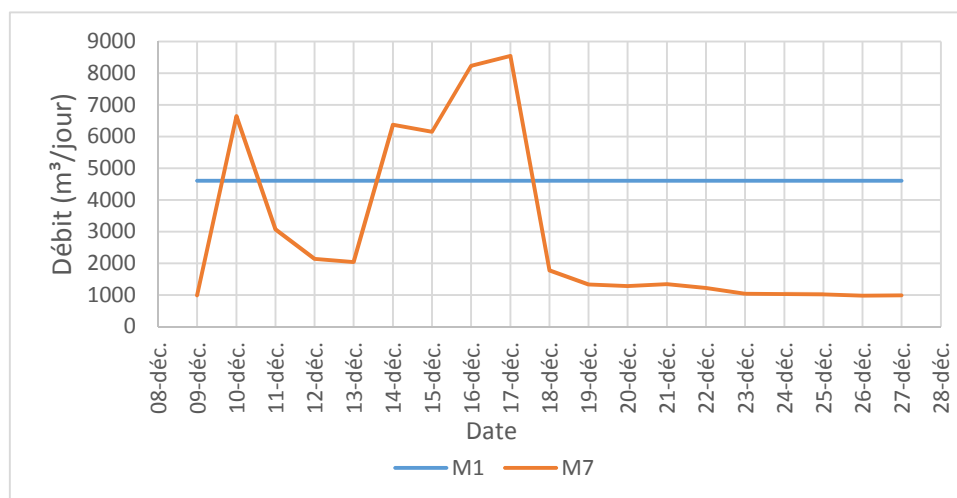


Figure 2.24 : comparaisons entre les débits d'eau usée estimés par M1 et M7 (du 9/12 au 28/12/08)

La méthode **M7** donne une meilleure estimation des eaux usées puisque elle est basée sur des mesures directes, en plus elle nous permet de mieux apprécier la variabilité du débit d'eau usée journalier.

Le point M2-16

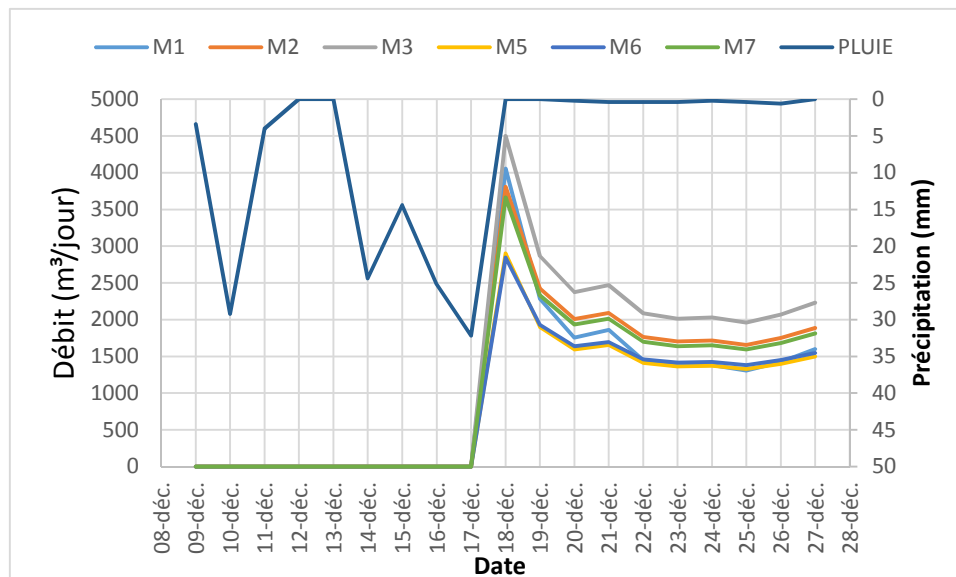


Figure 2.25 : comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le **point M2-16**

Les méthodes **M1** , **M2** ,**M5** ,**M6** , **M7** ont donner des résultats presque identique tandis que la méthode **M3** a donné des résultats un peu plus grands que les autres méthodes.

Les résultats de la méthode **M3** repose sur le choix de la période nocturne et la période diurne, pour bien estimer les heures nocturnes, la meilleure solution reste de tracer les hydrogrammes de toute la période concernée et de définir les heures nocturnes là où le débit total touche son minimum.

Le point P01

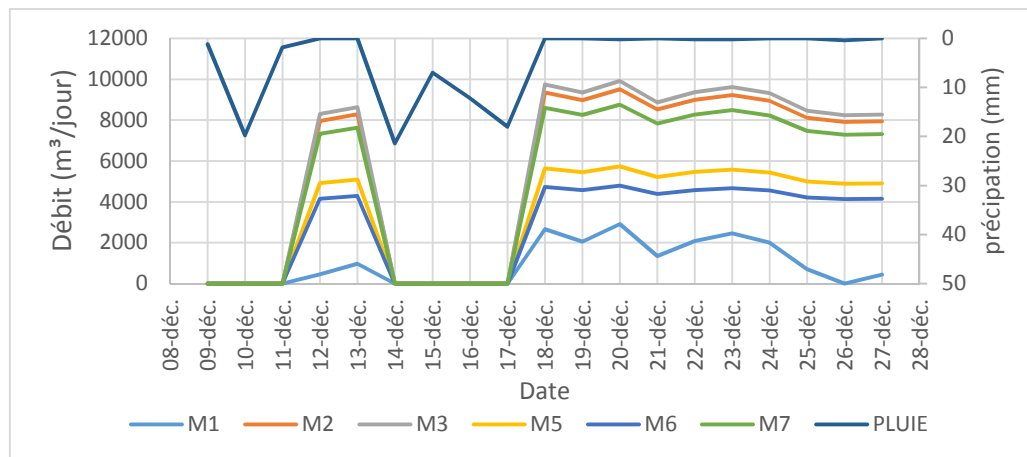


Figure 2.26 : comparaisons des méthodes d'estimation journalière d'ECP sur le **point P01**

On constate une divergence dans les résultats, les méthodes ne donnent aucune information sur le volume d'ECP dans le collecteur, **M7** comme il a été mentionné donne des valeurs surestimées dans les grands bassins, On remarque un grand écart même entre les méthodes qui, dans les cas étudiés précédemment, ont donné des valeurs proches comme **M5** et **M6**. **M1** suppose que le débit est constant et que la totalité des débits usés théoriques sont acheminés par le réseau alors que ce n'est généralement pas le cas. Les méthodes basées sur les débits nocturnes sont moins significatives dans ce cas car plus le bassin est grand plus la période nocturne aussi diminue et plus le coefficient de point minimum de débit K_{pmin} augmente.

Conclusion sur les méthodes appliquées et leurs résultats sur les points de mesure :

Quel que soit la méthode utilisée, on remarque une augmentation puis diminution d'ECP après les événements de pluie à cause du drainage rapide des eaux pluviales par le réseau. Les méthodes qui utilisent le débit nocturne tendent à surestimer le volume d'ECP par rapport aux autres méthodes, les méthodes basées sur le débit d'eau usée et le débit journalier ont donné des valeurs généralement plus faibles, leur inconvénient réside dans l'estimation théorique des eaux usées qui est supposée constante. La méthode de production des eaux usées a produit les estimations d'ECP les plus élevées de toutes les méthodes dans tous les points de l'étude, une évaluation doit être effectuée pour déterminer un facteur plus approprié (x) qui devrait être utilisé dans l'équation. On voit que la méthode de Stevens et Schutzbach et la méthode du facteur du débit minimal en général produisent une estimation inférieure, plus stable des ECP.

II.4.2. La fraction d'ECP par chaque méthode d'estimations journalières sur les points

La fraction d'eaux claires parasites F_{ECP} est définie par le rapport entre le débit d'ECP et le débit total de temps sec mesuré

$$F_{ECP} = \frac{\text{volume d'ECP} \times 100}{\text{volume total}} \quad (\text{II.22})$$

Les fractions d'ECP ont été calculé avec l'équation pour chaque point de mesure et chaque méthode dans la période du (9/12 au 27 /12/2008)

Ils sont ensuite comparés avec les moyennes des mesures nocturne directes réalisé (du 2/12 au 4 /1/2009) par *SEAAL* dans le cadre de la caractérisation des flux de temps sec

La méthode *des mesures nocturne directes* repose sue le principe suivant :

$$QTSnoct-mes = QECPP + QEUnoct \quad (\text{II.23})$$

Avec

- $QTSnoct-mes$ est le débit de temps sec mesuré dans l'égout pendant lanuit (typiquement entre minuit et 5 heures du matin),
- $QECPP$ est le débit d'eaux claires parasites permanentes, valeursupposée constante que l'on cherche à estimer,
- $QEUnoct$ est le débit d'eaux usées en période nocturne, qui comprend des eaux usées résultant à la fois de la consommation d'eau durant la nuit et de la consommation d'eau du soir dont les rejets ne parviendraient en aval du réseau qu'après plusieurs heures de temps de transfert. celui-ci peut s'exprimer de la façon suivante :

$$QEUnoct = K \times QEUmoyen(\text{II.24})$$

- $QEUmoyen$, est le débit moyen d'eaux usées,
- K est le coefficient de débit nocturne résiduel, coefficient variant de 0,15 à 0,4 en fonction de la longueur et de la pente des bassins versants (et donc de temps de parcours des eaux usées dans les réseaux).

Remarque :

Cette méthode semble plus réaliste que la méthode du *débit nocturne minimum M2*, du fait de la prise en considération du débit résiduel par correction du débit nocturne minimum par un facteur k. Cependant, ce paramètre représente des variations importantes (0,15 à 0,4) en fonction des caractéristiques du réseau, et les recommandations pour son choix sont très sommaires (réseau long ou court, pente faible ou forte), on peut tomber facilement dans la sous-estimation ou la surestimation des débits d'eau usée nocturne.

Tableau 2.8 : la fraction d'ECP (en % du débit de temps sec) dans les points de mesure par les différentes méthodes.

	p1	P3	M22	M23	M215	M216	STEP
M1	12,3%	32,24%	52,86%		14,27%	69,6%	
M2	63,04%		75,3%	55,05%	80,26%	78,3%	
M3	65,69%		72,91%	46,53%	80,55%	74,5%	
M4		8,804%					
M5	38,42%		54,29%	25,02%	61,26%	61,8%	
M6	32,28%		50,52%	24,56%	60,21%	63,1%	
M7	58%		71,93%	40,46%	77,57%	75,3%	
M8							54,4%
Mesures directe nocturnes (seal)	60%		68,35%	57,14%	75,36	80,8%	

Tableau 2.9 : Les écarts moyens (en % du débit sec) entre les méthodes.

	M1	M2	M3	M5	M6	M7
M1	#	36,53	35,69	16,28	13,8	32,98
M2	#	#	0,84	20,25	22,73	3,55
M3	#	#	#	19,41	21,89	2,71
M5	#	#	#	#	2,41	16,7
M6	#	#	#	#	#	19,18
M7	#	#	#	#	#	#

L'écart moyen entre les valeurs estimées de la fraction d'ECP selon deux méthodes varie de 0,84 (*M2-M3*) et 22,73 (*M6-M3*) sauf pour la méthode *M1* ou l'écart maximum atteint jusqu'à 36,53 % du débit de temps sec.

Ces observations confirment le fait que les résultats de cette méthode est fortement lié à l'estimation théorique des eaux usée qui n'est pas toujours fiable car :

- Elle est supposé constante
- Le coefficient de rejet approximatif
- Néglige le fait que parfois une grande partie des rejets ne parvient pas au point de mesure et circule dans les oueds ou perdu par exfiltration

Les écarts les plus faibles sont observés entre les méthodes *M2* et *M3*, *M7* et *M3*, *M6* et *M5*. L'écart moyen est de 17,6%, l'écart moyen sans compter *M1* est de 12,96%. Ces valeurs sont conformes aux résultats de l'étude entreprise par J. De Bénédictis et J.-L. Bertrand-Krajewski (2005) qui ont trouvé un écart de l'ordre de 20% entre les 9 méthodes d'estimation d'ECP, parmi les méthodes testés par J. De Bénédictis et J.-L. Bertrand-Krajewski (2005) : *M1* et *M2* et la méthode des mesures directe nocturnes

II.4.3. La comparaison entre les méthodes d'estimation annuel/saisonnière des ECP :

La figure 2.27 représente le volume total d'intrusion d'ECP dans la période d'étude dans les points de mesure par la méthode d'Annen & Muller (A&M) et la méthode du triangle.

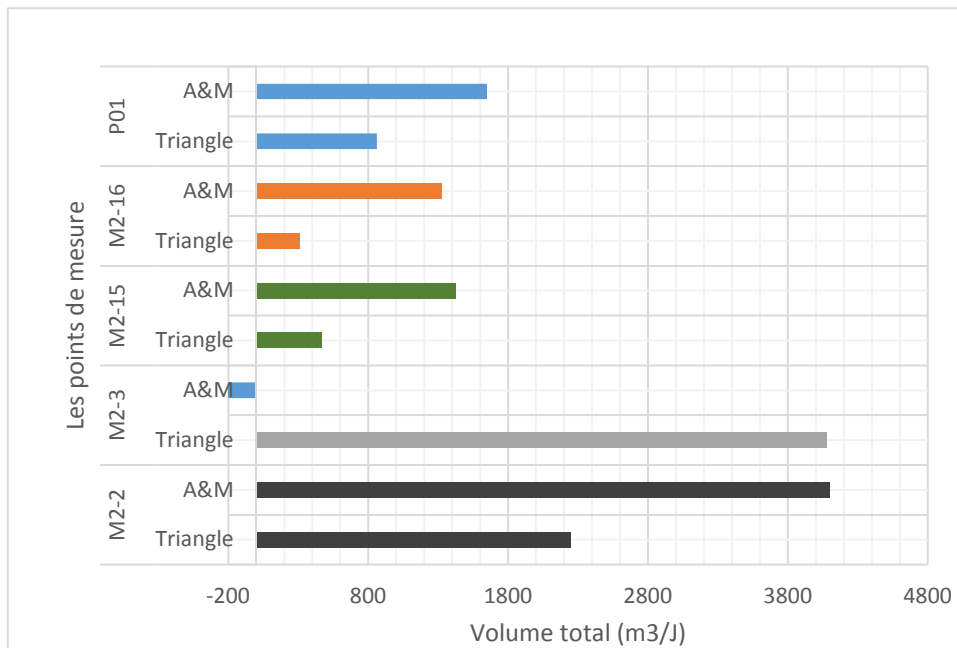


Figure 2.27 : les taux d'intrusion dans les points de mesure par la méthode d'A&M et la méthode du triangle

On remarque que pour un même point de mesure les valeurs estimées du volume total d'ECP par les deux méthodes sont très variables et peuvent générer un écart relativement important. Une valeur négative fournie par la méthode de Annen & Muller est observées pour le point de mesure M2-3.

La méthode de Annen & Muller produit des résultats systématiquement plus grands que la méthode du Triangle car elles sont basées sur des hypothèses différentes, la première tient compte des intrusion à la fois dans les jours de pluie et les jours sec alors que la deuxième suppose que la pluie réduit l'intrusion et par conséquent le taux d'ECP est négligeable en temps de pluie.

Bien que les deux méthodes ne donnent pas des valeurs exactes des taux d'intrusion, il reste utile de les utiliser pour sectoriser les apports d'ECP prépondérants.

II.4.4. Volume total d'ECP dans chaque point :

Figure 2.28 représente Volume total d'ECP estimé dans chaque point (*Sans compter les méthodes avec un écart de plus de 30%).

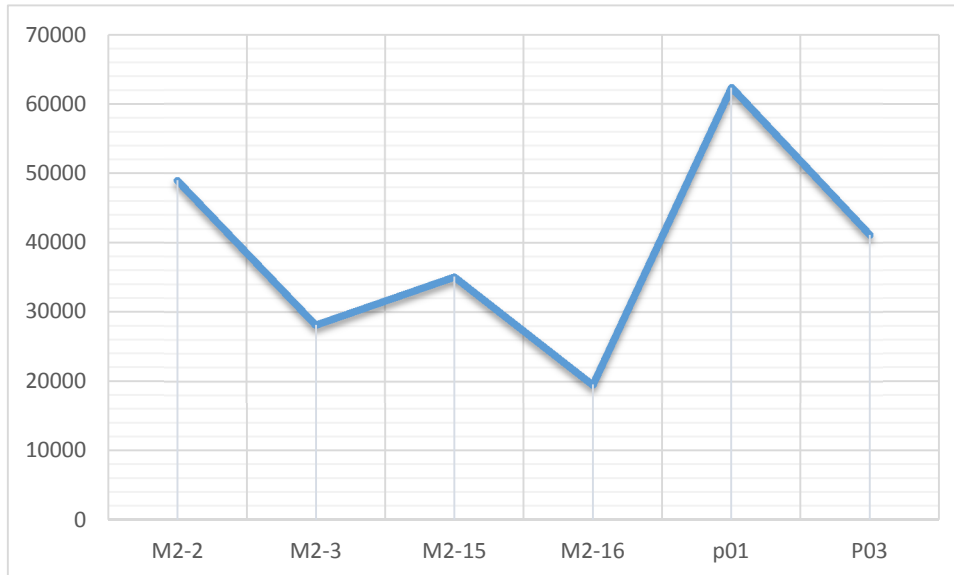


Figure 2.28 : Volume total moyen d'ECP dans chaque point du 18 /12 au 27 /12/2009

Les études comparatives réalisées à l'échelle du jour de temps sec de la période d'étude montrent que toutes les valeurs estimées du volume journalier d'ECP sont significatives, et la fraction moyenne d'ECP par les différentes méthodes dépassent les 50% du débit de temps sec dans tous les points de mesure, par conséquent une stratégie de réhabilitation pour la réduction des intrusions d'ECP devrait être développée, cette stratégie doit permettre la restauration de l'étanchéité du réseau d'égout, ainsi, les conséquences négatives d'une telle réduction, comme l'élévation des eaux souterraines ou une décharge plus faible dans l'égout doivent être prises en compte et minimisées par exemple avec des drainages supplémentaires ou des rinçages fréquents des égouts.

Conclusion

La comparaison entre les différentes méthodes a prouvé que chaque méthode a ses limites. Chacune de ces méthodes est basée sur certaines hypothèses et a ses propres limites et avantages. Il n'existe pas de méthode unique et standard d'évaluation des ECP dans les systèmes d'égouts et une combinaison de ces méthodes peut être utile pour réduire les hypothèses et les incertitudes et obtenir des données plus indépendantes, précises et fiables sur les ECP, de plus chaque méthode doit être appliquée selon les conditions expérimentales spécifiques du site étudié.

Pour des résultats plus fiables, il faut respecter la variabilité des débits d'eau usée en termes de débit et de concentration du polluant, il faut aussi bien définir les périodes nocturne et diurne et éviter d'attribuer des valeurs approximatives aux paramètres liés à l'estimation des ECP par les méthodes précédentes car chaque paramètre doit être défini selon les conditions présentes.

Une bonne estimation des ECP requiert une plus longue période d'observation, une estimation plus solide des rejets en termes de débits et de concentrations, et une meilleure connaissance des caractéristiques générales du bassin et du réseau.

Chapitre 3 :

L'évaluation des débits

d'extrusion par

l'équation de Darcy

L'évaluation des débits d'extrusion par l'équation de Darcy

III.1 Introduction

En dépit de certaines approches prometteuses, aucune méthode éprouvée de mesure de l'exfiltration à plus grande échelle n'est disponible. Les méthodes de mesure sont pour la plupart trop compliquées pour les opérateurs à appliquer. En général, il existe encore de mauvaises connaissances sur les fuites et il n'est pas surprenant que presque aucun opérateur d'égout ne puisse fournir des informations sur l'exfiltration des eaux usées de son système, sans parler de l'utiliser pour la planification de la réhabilitation. Dans cette partie du travail, nous allons appliquer le model de darcy pour quantifier directement la perte d'eaux usées d'un égout et nous allons analyser la sensibilité de ce model en utilisant la simulation de Monte Carlo (MCS).

III.2. L'équation de DARCY

La modélisation des fuites d'égout vise en général à prédire les débits à l'interface du sol de la canalisation. Dans la littérature, on parle de deux approches. L'équation de Torricelli décrit l'écoulement a l'air libre : $Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2gh}$ (III.1)

Avec Q débit, μ coefficient de sortie, une zone de sortie, g accélération gravitationnelle et h niveau d'eau. Cependant, l'équation de Torricelli ne considère pas le sol environnant avec l'accélération gravitationnelle incorporée. Le débit d'un fluide à travers un milieu poreux tel que formulé par *Henry Darcy en 1856* peut être appliqué pour modéliser l'exfiltration des égouts, la loi de Darcy relie entre le niveau d'eau (h), les profondeurs la colonne du sol (Δs), le coefficient de perméabilité (k), la zone de fuite du tuyau (fuite A) et le débit d'exfiltration (Q) et est exprimé par :

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{H}{\Delta s} \quad (\text{III.2})$$

Selon Fredlund et Rahardjo (1993), la loi peut s'appliquer à la fois aux sols saturés et non saturés.

III.3. Les limites de l'équation de darcy

Bien que l'approche de Darcy soit plus précise qu'un modèle de type Torricelli, il faut souligner deux faiblesses :

- Tout d'abord, l'hypothèse d'une relation linéaire entre le débit et le niveau de l'eau pourrait s'avérer trop simpliste. La relation linéaire de la loi de Darcy est valable uniquement dans le domaine de l'écoulement laminaire. Par conséquent, l'hypothèse implicite que les conditions d'écoulement dans les pores du sol sont laminaires (R. P. Gupta, 1999) Il faut souligner aussi que lorsque les voies d'écoulement préférentielles dominent les caractéristiques d'écoulement dans le sous-sol (comme cela se produit par exemple pendant des périodes de sécheresse prolongées - l'utilisation du modèle darcien peut devenir inappropriée)(Powell et al., 2003).
- Deuxièmement, la loi de Darcy comme approche mécaniste est considérée comme appropriée pour modéliser les fuites d'eau claire. Mais les changements dynamiques dans la composition des eaux usées, les processus dans le sol sous-jacent et les propriétés changeantes des sols et des eaux souterraines pourraient nécessiter d'autres facteurs pour la modélisation des fuites d'égout.

III.4. les approches de l'exfiltration basé sur la loi de Darcy.

a) *Approche non linéaire*

Dans le domaine des processus d'échange entre les rivières et les aquifères, Rushton et Tomlinson (1979) soulignent que la fuite calculée avec l'approche linéaire de Darcy est beaucoup plus grande en période de débit rivière très élevé que ce qui se produirait dans la pratique. Il ne tient pas compte de la résistance accrue du sol au passage de l'eau à mesure que son volume augmente. Ainsi, ils proposent une relation non linéaire pour la recharge des eaux souterraines :

$$Q = K_1(e^{K_2 \Delta h} - 1) \text{ pour } \Delta h > 0 \quad (\text{III.3})$$

Avec Q le débit entre la rivière et l'aquifère par m de longueur de la rivière [$\text{m}^3\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$], K_1 une constante représentant le coefficient de fuite du littoral [ms^{-1}], K_2 une constante et Δh la différence de niveau d'eau entre l'aquifère et la rivière [m].

Pourtant, pour l'exfiltration des égouts, les niveaux d'eau sont faibles, on peut supposer un comportement linéaire du débit d'exfiltration, bien que les taux soient à moitié aussi importants par rapport à l'approche linéaire.

b) Facteur de fuite

Les propriétés du sol sont soumises à des changements en raison de la percolation des eaux usées et des processus successifs, à savoir : le colmatage de surface et la dégradation biologique. *Rauch et Stegner (1994)* ont raffiné la loi de Darcy en proposant le facteur de fuite K_{ex} exprimant la perméabilité de la zone de collation (K_c). Ils ont conclu que l'exfiltration est uniquement influencée par les processus physiques dans la zone de colmatage,

$$K_{ex} = \frac{K_c}{\Delta s} = \frac{Q_{EX}}{A_{EX} \cdot h} \quad (\text{III.4})$$

Le modèle simple permet de déterminer une mesure des fuites d'égout sans l'utilisation de la profondeur de la zone colmatée. Dans ce contexte, *Gustafsson (2000)* a également utilisé la loi Darcy pour décrire l'interaction entre les collecteurs et l'aquifère environnant. L'approche est basée sur la variation temporelle et spatiale de la pression de l'eau dans les conduites et l'aquifère environnant, la surface du collecteur sur lequel les eaux usées sont écoulées et un coefficient de fuite. Dans une application similaire, *Karpf et Krebs (2004; 2005)* ont réussi à appliquer le modèle de Darcy pour décrire l'intrusion et l'exfiltration à grande échelle dans le bassin urbain de Dresde (Allemagne). Ils ont étalonné le facteur de fuite sur la base de longues séries chronologiques d'écoulement d'eaux usées et de mesures de la nappe phréatique. L'approche de fuite a été utilisée dans diverses études sur l'exfiltration des eaux usées à petite échelle et à laboratoire (*Vollertsen et Hvitved-Jacobsen, 2003; Klinger et al., 2005; Wolf et Hötzl, 2006*) et à grande échelle (*Gustafsson, 2000; Karpf et Krebs, 2005; Rutsch, 2007*).

c) NEIMO (Network Exfiltration and Infiltration model) le modèle d'exfiltration et d'infiltration réseau :

NEIMO (Burn et al., 2005, De Silva et al., 2006) détermine l'exfiltration suivant la loi de Darcy en supposant que la couche de colmatage est le facteur limitant. NEIMO utilise l'évaluation des dégâts par les inspections télévisées par caméra conventionnelle (CCTV) pour les égouts et fait une corrélation de ces dommages aux volumes de l'écoulement variables dans les pipelines pour permettre le calcul du taux de fuite de la source ponctuelle pour différentes tailles, âges, matériaux et conditions du sol.

L'influence des eaux usées est simulée pour évaluer correctement la charge de contaminants dans différentes zones urbaines. Le modèle a été vérifié par l'analyse de sections d'égout sélectionnées, où des fuites ont été observées. La sortie NEIMO est transmise aux modèles de zones non saturées, calculant les temps de déplacement dans la nappe phréatique et les effets de la désintégration des contaminants. La combinaison de NEIMO avec les modèles de zones saturées et non saturées nécessite la solution de l'équation de Richard et l'identification d'autres paramètres du sol. En outre, la prise en compte de la zone saturée suppose des informations sur l'aquifère, ce qui est particulièrement difficile dans les zones urbanisées et / ou hétérogènes.

L'approche Darcy est appliquée pour les conditions d'état stationnaire et l'écoulement laminaire. Pourtant, plusieurs enquêtes ont également révélé des conditions dynamiques pour les deux cas humide et sec.

III.5. Identification des paramètres et des processus

Le procédé décrit par l'équation de darcy (équation III.5) est contrôlé par le charge hydraulique h , la zone de fuite AL , l'épaisseur Z_b du sol colmaté au voisinage des fuites et par la conductivité K_s de la couche de colmatage. En raison du manque de données concernant l'épaisseur de la couche de colmatage, le colmatage est souvent décrite par le facteur de fuite K_{ex} :

$$Q_{Ex} = K_s \cdot A_{Ex} \cdot \frac{h}{Z} = K_{Ex} \cdot h \cdot A_{Ex} \quad (III.5)$$

Avec

- Q_{Ex} = le débit d'extrusion m^3/s
- K_s = la conductivité hydraulique m/s
- A_{Ex} = Zone de fuite (m^2)
- H = hauteur d'eau dans le canalisation (m)
- Z = épaisseur de la zone de colmatage (m)
- K_{ex} = le facteur de fuite (s^{-1})

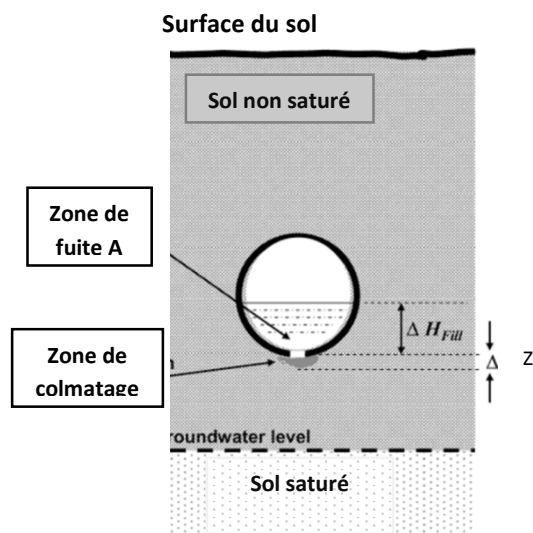


Figure 3.1 : Illustration schématique de l'exfiltration d'un égout qui fuit au-dessus d'une nappe phréatique. (Source : Rutsch et al 2008)

III.5.1 Zone de fuite A_{ex}

La zone de fuite est un résumé de toutes les fuites probables dans le périmètre mouillé. Le périmètre mouillé est calculé à partir du niveau d'eau obtenu lors de la mesure, elle est généralement déterminé en fonction des informations collectées durant les inspections télévisées par caméra conventionnelle (CCTV).

La zone de fuite A_L (m^2m^{-1}) a été exprimée par une approche empirique non linéaire selon une analyse par infiltration par simulation MODFLOW réalisé par (Karpf et Krebs, en préparation-a).

Dans cette étude, l'approche de la zone de fuite a été développée pour les formes de fuite quadratique (forme de fuite standardisée) et est basée sur le facteur d'infiltration K_{ex} , ($m^2s^{-1}m^{-1}$), ce qui représente un indicateur pour la classe d'état de la conduite (étendue des dommages). Le facteur d'infiltration peut être déduit des données sur les eaux souterraines et les eaux usées (Karpf et Krebs, en préparation-b).

En outre, un facteur empirique α intègre les conductivités hydrauliques du remblai de tranchée ($K_{S,T}$ (ms^{-1})) et le sol naturel ($K_{S,S}$ (ms^{-1})), la profondeur du remblai sous les conduites d'égout (D_T (m)), la largeur de la tranchée (W_T en m) et la largeur de la fuite standard quadratique (a (m)).

La zone de fuite A_L selon Karpf et Krebs (2005) est donné par:

$$A_{ex} = \alpha \cdot K_{ex} \quad (III.6)$$

$$\alpha = \frac{a^2}{(0,72a^2 + 2,23a - 0,01)K_{SS,y}} \quad (III.7)$$

$$K_{SS} < K_{ST} \rightarrow y = \left[1; \left[\frac{11,01a^{0,55} - 0,76}{-76,75D_T + 29,21W_T + 57,09\frac{K_{SS}}{K_{ST}} - 8,07} \right] \right] \quad (III.8)$$

Avec

$$\rightarrow \frac{K_{SS}}{K_{ST}} > 0,001 ; \frac{D_T}{W_T} < 0,2$$

$$\text{Pour } K_{SS} = K_{ST} ; y = 1 \quad (III.9)$$

Pour des raisons pratiques, on peut se demander si les informations nécessaires sur la zone de fuite, les propriétés du sol et le niveau de l'eau sont disponibles avec une précision suffisante pour appliquer l'approche Darcian pour une situation d'égout réel. Ainsi, le facteur de fuite dans les enquêtes sur l'échelle du bassin versant de Gustafsson (2000) et Karpf et Krebs (2004) a été lié au périmètre mouillé comme représentant la zone de fuite inconnue, c'est-à-dire que la porosité des tuyaux est supposée distribuée uniformément.

Cela s'applique en particulier aux sites où les enregistrements CCTV ne sont pas disponibles et pour des enquêtes à grande échelle, où le calcul des zones de fuite est un effort irraisonnable.

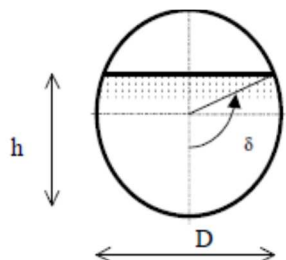


Figure 3.2 : schéma pour le calcul du paramètre mouillé

$$h = R(1 - \cos\delta) \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Périmètre mouillé } P = D\delta \quad (\text{III.11})$$

$$\text{avec } \delta = \arccos\left(1 - 2\frac{h}{D}\right) \text{ (rad)} \quad (\text{III.12})$$

III.5.2 Conductivité hydraulique de la zone de colmatage

La conductivité hydraulique d'un sol est le coefficient de proportionnalité de la loi de Darcy reliant le flux d'écoulement au gradient hydraulique. Elle est le résultat des forces de frottement de l'eau dans les pores du sol, forces résistant à l'écoulement. La conductivité hydraulique est, d'une part, proportionnelle à la perméabilité intrinsèque k du sol qui est elle-même fonction de la porosité du sol et d'autre part, inversement proportionnelle à la viscosité dynamique du fluide (l'eau).

Tableau 3.1 valeurs de la conductivité hydraulique

Nature du sol	K_s en $\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$	K_s en $\text{m} \cdot \text{j}^{-1}$
<i>Sols argileux de surface</i>	10^{-7}	10^{-6}
<i>Sols limoneux de surface</i>	10^{-6}	10^{-5}
<i>Sable fin</i>	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$
<i>Sable moyen</i>	$5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
<i>Sable grossier</i>	$2,5 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}

les collecteurs d'assainissement sont généralement posés sur un lit de sable, la conductivité peut varier selon le type de sol, la zone de colmatage a une perméabilité plus faible que le sol sur lequel est posé la conduite, sa conductivité hydraulique dépend du sol et de la composition du flux polluants. Cette conductivité est variable aussi selon les temps secs et humides, car les volumes d'eau pluvial évacués ont un effet de rinçage de cette zone, la conductivité peut être déduite par des mesures au laboratoire, pour évaluer l'effet de la perméabilité de la zone de colmatage sur le taux d'exfiltration.

Tableau 3.2 Conductivité de la zone de colmatage selon les différentes expériences

<i>Type de sol</i>	<i>Conductivité de la zone de colmatage</i>	<i>Reference</i>
<i>Sable</i>	10^{-5}	Rauch et Stegner (1994)
<i>Sable</i>	$3,1 \cdot 10^{-8}$	Dohmann et al. (1999)
<i>Sable</i>	10^{-6} à $2 \cdot 10^{-6}$	Vollertsen and Hvitved-Jacobsen (2003)

La variation des valeurs calculées de la conductivité de la couche de colmatage dans ces études est une réflexion de la complexité des facteurs contrôlant le processus d'exfiltration et la nature biologique de la couche de colmatage.

Pour évaluer son effet sur les taux d'exfiltration, on fait varier la conductivité hydraulique de **K (10^{-5} à 10^{-8}) m/s** dans notre simulation présentée à la fin de ce chapitre.

III.5.3 Zone de colmatage / Processus de colmatage

Chaque fois que les liquides contenant des particules plus fines filtrent à travers des milieux poreux, les particules contenues dans les liquides obstruent la couche supérieure du milieu.

Robert D. Morrison et Brian L. Murphy (2013) déterminent 3 éléments responsables de la résistance primaire à l'exfiltration dans les tuyaux d'égout due à la couche de colmatage qui sont :

- ✓ la couche de colmatage se compose de sédiments et de matériaux de remblai elle a des tailles de pores plus petites et, par conséquent, une perméabilité inférieure à celle des sédiments d'égout.

- ✓ La couche de colmatage est située dans et autour de la fuite plutôt étroite, où le liquide doit passer, ce qui entraîne la section transversale la plus restreinte du débit d'exfiltration du tuyau.
- ✓ Les fuites des égouts forment généralement une couche de colmatage relativement enrichie (jusqu'à 25%) en matière organique, la croissance de la biomasse tend à diminuer la perméabilité de la couche de colmatage, les cellules bactériennes et les substances polymères extracellulaires excrétés par les bactéries remplissent les pores de la zone et à limite le volume de fuite.

Dans un délai de quelques minutes à quelques heures, les particules contenues dans le liquide d'exfiltration couvriront la surface matériau plus grossier (Vollertsen, 2007).

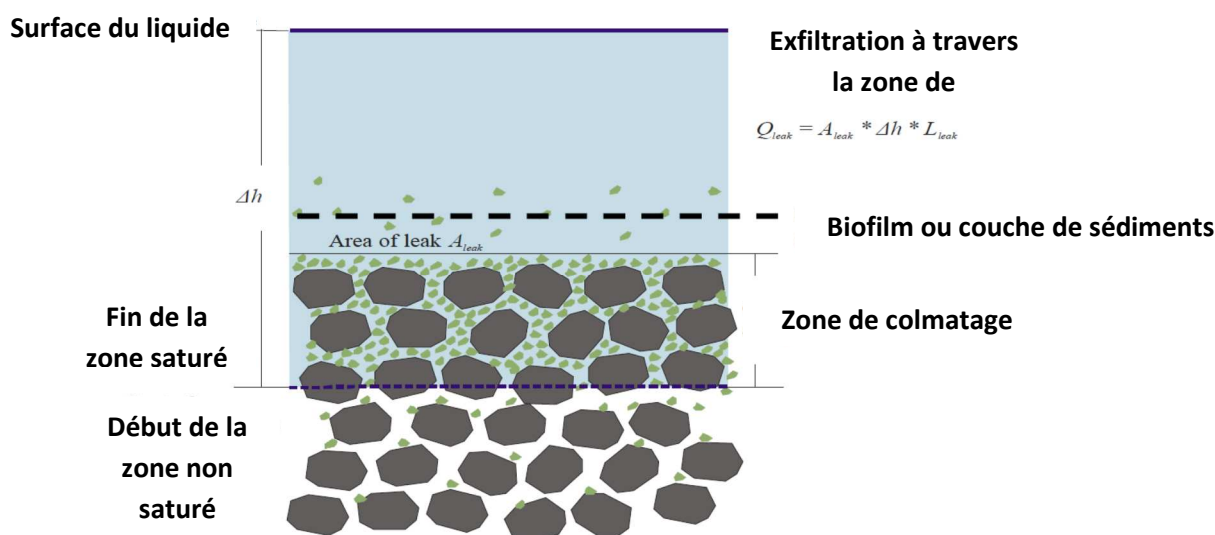


Figure 3.3 : Schéma d'exfiltration à travers la zone de colmatage D Morrison, et al 2013

La couche de colmatage est un tapis organique rempli avec les protozoaires, les bactéries, les algues et autres micro-organismes et de leurs sous-produits Dizer et al (2004). L'épaisseur de la couche de colmatage est difficile à déterminer avec les inspections des collecteurs.

Des études de laboratoire sont effectuées sur de nombreux types de plantes pilotes à partir de colonnes de sols sur des plates-formes d'essai spécifiques. Les premiers se concentrent sur le processus de colmatage et le colmatage des sols, tandis que les plates-

formes d'essai permettent également de simuler l'exfiltration afin de corréliser les taux d'exfiltration aux formats de dégâts spécifiques. Pour les recherches en laboratoire, les conditions aux limites telles que le sol, la taille et l'emplacement des dommages, la composition des eaux usées et le niveau de l'eau sont connues et permettent ainsi d'identifier les processus souhaités.

Tableau 3.3 : résultats des recherches de laboratoire sur l'exfiltration

<i>Expérience</i>	<i>Type de sol</i>	<i>Le temps de chargement</i>	<i>L'épaisseur de la zone de colmatage (mm)</i>	<i>Taux d'exfiltration (Ld-1cm-1)</i>	<i>Le facteur de fuite (ms-1m-1)</i>
Rauch et Stegner (1994)	Sable grossier	20-50 minutes	10	0,8-5,2	0,01-0,001
	gravier		50		
Dohmann et al. (1999)	Sable silteux	12 semaines	20-40	0	0,001-0,54
	Sable moyen	12 semaines	100	0,48-5,52	
	sable grossier	3 semaines	20	0,96-6	
Vollertsen and Hvitved-Jacobsen (2003)	Sable limoneux	9 jours a 7 semaines	10-20 (supposé)	0,02-0,06	1,4 .10 ⁻⁴
Blackwood et al. (2005b)	gravier	60-90 minutes	-	8,6-86	0,83

On suppose que la couche est de colmatage mince et varie entre **Z (0,01 et 0,1) m** selon divers travailleurs et possède une perméabilité relativement faible.

III.6. Les débits d'exfiltration par la simulation de *Monte Carlo*

III.6.1. Définition

On appelle *méthode de Monte-Carlo* toute méthode visant à calculer une valeur numérique, et utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes, cette méthode utilise des inputs (entrées) aléatoires pour résoudre des problèmes quantitatifs.

La simulation de Monte Carlo est une technique mathématique informatisée qui permet aux gens de prendre en compte le risque dans l'analyse quantitative et la prise de décision, elle fournit au décideur une gamme de résultats possibles et les probabilités qu'ils auront pour tout choix d'action, elle offre une vision beaucoup plus complète de ce qui peut arriver.

III.6.2. Principe de la simulation de Monte Carlo :

Ils existent des problèmes qui ne peuvent être résolus que par la méthode de MC .Elle est souvent considérée comme la méthode de dernier ressort puisque elle demande des ressources computationnelles assez consistantes.

La méthode est basée sur

- (i) l'échantillonnage des quantités aléatoires,
- (ii) de la répétition d'une simulation déterministe (trial) pour chaque quantité échantillonnée
- (iii) l'agrégation des résultats.

En utilisant les distributions de probabilité, les variables peuvent avoir différentes probabilités de différents résultats se produisant. Les distributions de probabilités sont une façon beaucoup plus réaliste de décrire l'incertitude dans les variables d'une analyse de risque. Les distributions de probabilité communes comprennent : normal, log normal , uniforme , triangulaire , PERT et discret .

III.6.3. Composantes d'un algorithme MC

- ❖ Description probabiliste : un modèle stochastique du problème.
- ❖ Générateur uniforme de nombres aléatoires : un générateur de nombres aléatoires uniformément distribués sur l'intervalle [0, 1].
- ❖ Loi d'échantillonnage : une technique pour échantillonner une distribution de probabilité générique.
- ❖ Simulateur : un simulateur déterministe qui renvoie l'output quand tous les paramètres sont connus.
- ❖ Collecteur des outputs : structure des données pour stocker tous les outputs de la simulation.
- ❖ Analyseur de l'output : ensemble de techniques statistiques qui permettent de tirer conclusions à partir des données générées par le simulateur.
- ❖ Estimateur d'erreur : ceci permet d'associer à chaque quantité estimée à partir de l'output une indication sur l'erreur ou sur la confiance

III.6.3. les étapes de la simulation par ordinateur :

Il existe un certain nombre de programmes informatiques qui exécutent la simulation de Monte Carlo, mais une feuille de calcul de base d'excel peut être utilisée pour exécuter une simulation MC. Une hypothèse importante que nous prenons est que chacune de ces variables est indépendante des autres.

La première étape consiste à générer des valeurs aléatoires pour chacune des entrées. En supposant une distribution uniforme, nous pouvons utiliser la fonction **RAND ()** pour générer des nombres aléatoires dans l'intervalle [min , max] voulu . La largeur de l'intervalle est la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de chaque paramètre.

La formule de chaque paramètre d'entrée est : $\text{min} + (\text{max}-\text{min})*\text{RAND}()$

Avec **min** : la valeur minimale dans l'intervalle de variation du paramètre d'entrée et **max** : la valeur maximale dans l'intervalle de variation du paramètre d'entrée.

Cette formule génère une valeur aléatoire comprise entre le **min** et **max** de chaque intervalle. Ensuite cette formule est copiée autant de fois voulus, plus le nombre de simulations est grand plus l'erreur est minimisée.

III.6.2. Les avantages de la simulation MC

La simulation de Monte Carlo offre un certain nombre d'avantages par rapport à l'analyse **déterministe** ou à l'estimation d'un seul point :

Résultats probabilistes. Les résultats montrent non seulement ce qui pourrait arriver, mais la probabilité de chaque résultat.

Résultats graphiques. En raison des données générées par une simulation de Monte Carlo, il est facile de créer des graphiques de différents résultats et leurs chances d'occurrence. Ceci est important pour communiquer les résultats aux autres parties prenantes.

Analyse de sensibilité. Avec seulement quelques cas, l'analyse déterministe rend difficile de voir quelles variables impactent le résultat le plus. Dans la simulation de Monte Carlo, il est facile de voir quelles entrées ont eu le plus grand effet sur les résultats finaux.

Analyse de scénario : dans les modèles déterministes, il est très difficile de modéliser différentes combinaisons de valeurs pour différentes entrées pour voir les effets de scénarios différents. À l'aide de la simulation de Monte Carlo, les analystes peuvent voir exactement quels éléments ont eu des valeurs ensemble lorsque certains résultats se sont produits. Ceci est précieux pour poursuivre l'analyse.

Corrélation des intrants. Dans la simulation de Monte Carlo, il est possible de modéliser les relations interdépendantes entre les variables d'entrée. Il est important pour la précision de représenter comment, en réalité, lorsque certains facteurs augmentent, d'autres augmentent ou diminuent en conséquence.

III.6.3. L'application de la simulation monte Carlo pour l'analyse de sensibilité de l'équation de Darcy

III.6.3.1. *Récapitulatif*

Pour évaluer l'effet de la perméabilité de la zone de colmatage sur les taux d'exfiltration, on fait varier la conductivité hydraulique de **K (10^{-5} a 10^{-8}) m/s (Tableau 3.2).**

La hauteur d'eau dans la conduite **H** varie selon le taux de remplissage de **(0-D) m**. Dans ce cas on a choisi **un diamètre de 2000 mm** pour mieux évaluer l'effet du taux de remplissage (charge hydraulique) sur l'exfiltration.

Remarque : le choix de **D2000** s'est fait en se basant sur l'ossature principale de la wilaya d'Alger (SEAAAL) qui montre que **D2000** constitue le plus grand diamètre utilisé dans les collecteurs d'assainissement de la wilaya d'Alger.

On suppose que la couche de colmatage **Z** est mince et varie entre **(0,01 et 0,1)m** (Tableau 3.3).

Comme déjà expliqué dans (III.5.1), la zone de fuite **A_{ex}** a été supposé égale au périmètre mouillé (équation. III.11).

Une simple simulation de Monte Carlo a été effectuée en calculant **50 000 combinaisons** sélectionnées au hasard des paramètres d'entrée indépendants dans les intervalles sélectionnés, les résultats sont ensuite représentés graphiquement.

La figure suivante est un exemple du modèle montrant les vingt premières itérations pour la simulation de Monte Carlo pour la première valeur fixé de H (h=0,1 m) réalisé sur une feuille de calcul Excel.

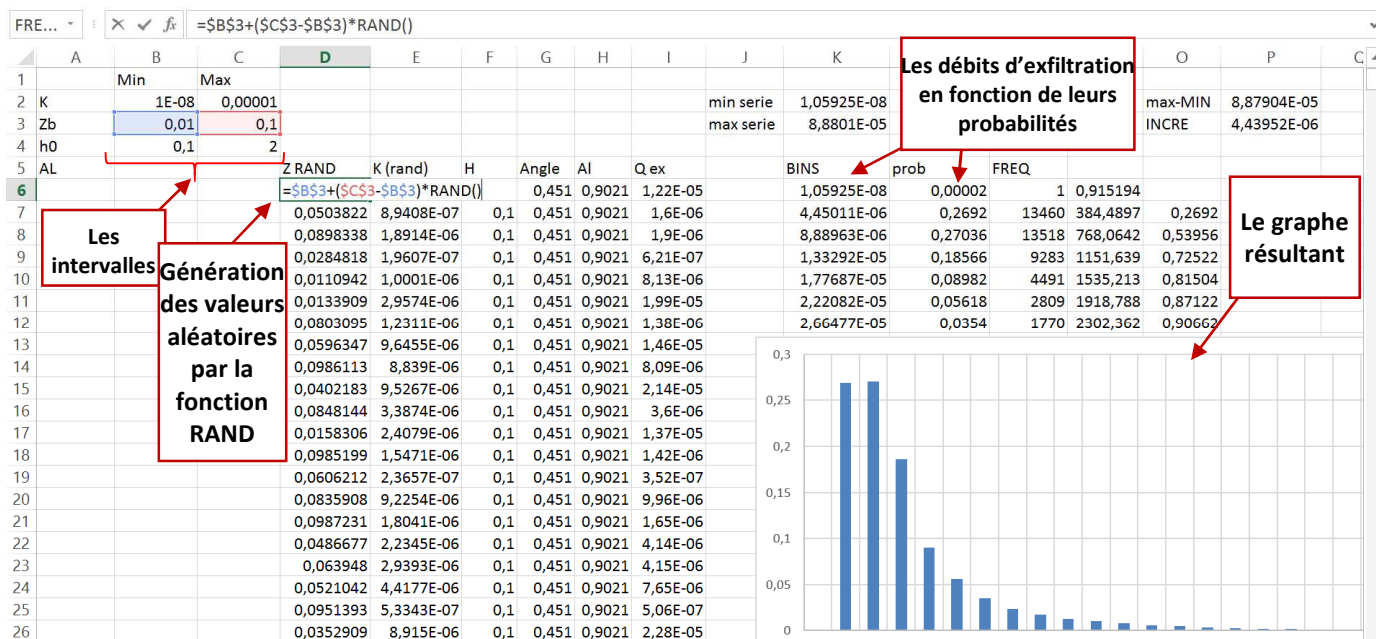


Figure 3.4 : exemple de la simulation Monte Carlo pour l'équation de Darcy sur Excel.

Les caractéristiques de sensibilité de l'approche sont analysées par simulation MC. Pour analyser la sensibilité de l'équation de Darcy, chaque fois on fixe un paramètre et on fait varier les autres dans leur plages spécifiée, 50 000 simulation sont effectuées pour chaque valeurs fixé des paramètres de l'équation, les valeurs choisies varies du minimum au maximum de chaque intervalle.

Tableau 3.4 : les valeurs croissantes de la charge hydraulique dans une canalisation de 2000 mm de diamètre

D=2000 mm										
H (m)										
0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2

Tableau 3.5 les valeurs croissantes d'épaisseur de la zone de colmatage

Z(m)									
0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1

Tableau 3.6 les valeurs croissantes de la conductivité de zone de colmatage dans un sol de type sable

K (m/s)						
10^{-5}	5.10^{-5}	10^{-6}	5.10^{-6}	10^{-7}	5.10^{-7}	10^{-8}

III.6.3.2. Résultats

Figure 3.7 représente l'influence des différents paramètres de l'équation de darcy sur les taux d'exfiltration les plus probables donnés par la simulation de *Monte Carlo*.

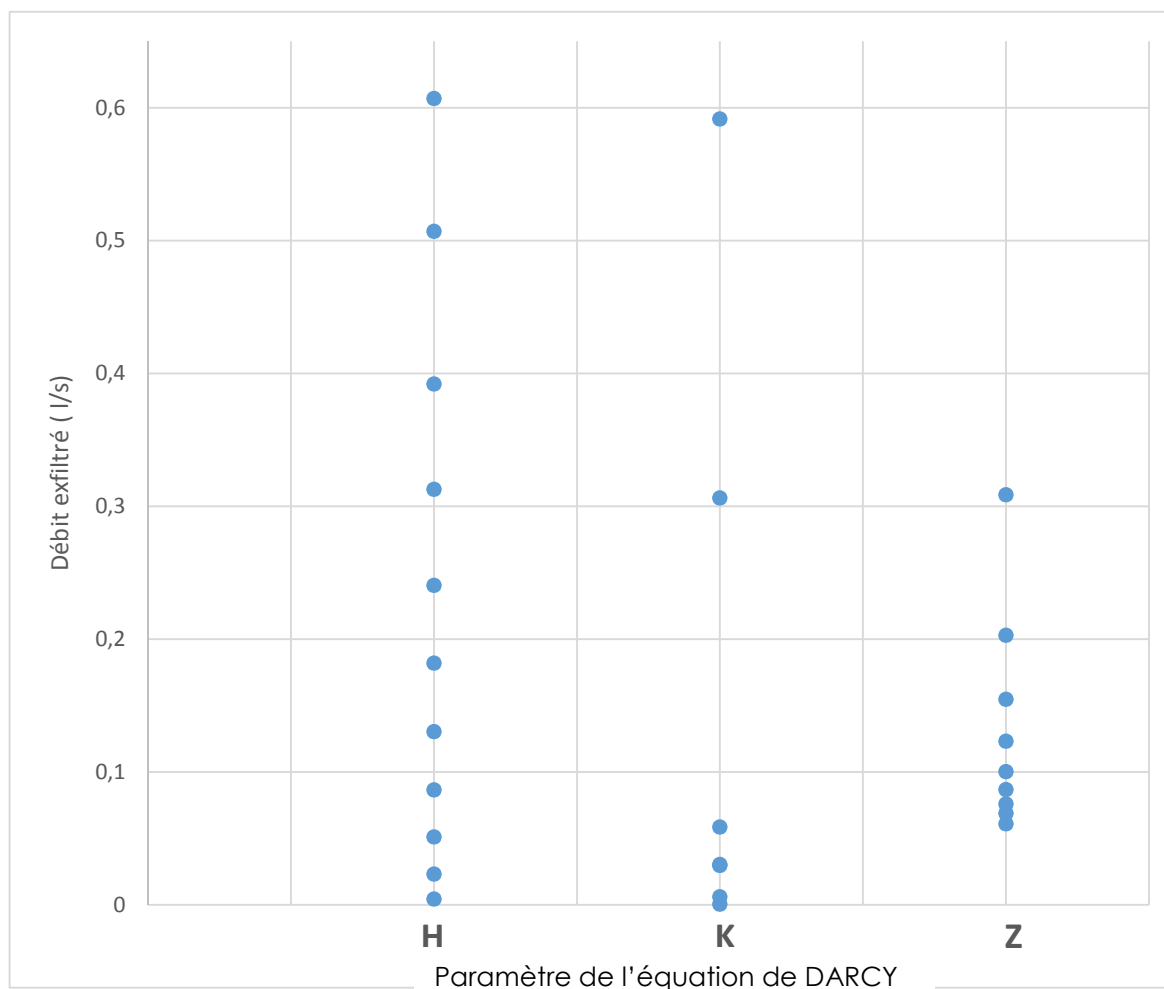


Figure 3.5 : l'évolution des taux d'exfiltration en fonctions des paramètres de l'équation de Darcy.

III.6.3.3. Discussion :

L'application de la loi de Darcy suppose que l'exfiltration et le taux de fuite dépendent de la profondeur de remplissage des égouts, c'est-à-dire de la charge hydraulique.

Ce modèle fournit une base déterministe pour l'hypothèse que la profondeur d'écoulement dans l'égout aura une influence directe sur le taux d'exfiltration, en plus la différence de pression entre la charge hydraulique dans l'égout et celle des eaux souterraines sous-jacentes va forcer l'effluent hors les ouvertures d'égout dans le sol environnant. La charge hydraulique est donc le «facteur clé» qui influence l'apparition de l'exfiltration.

La perméabilité de la zone de colmatage est généralement faible et difficile à déterminer, d'après les figures précédentes, on constate qu'à la valeur qui varie de (10^{-8} à 10^{-6} m³/s), correspondent à des faibles taux d'exfiltration, ce qui est logique vu que la perméabilité de la zone de colmatage est gouvernée par la matrice du colmatage i.e. des particules plus petites se coincent entre les grosses particules ce qui rend le passage de l'eau difficile.

On remarque que la perméabilité commence à avoir un impact considérable sur les volumes exfiltrés une fois elle a dépassé 10^{-6} m³/s, à la valeur (10^{-5} m³/s), la perméabilité a eu un effet très important sur l'exfiltration, sachant que la perméabilité du sable est $>10^{-5}$, ce constat confirme le rôle de la zone de colmatage sur l'amortissement des exfiltrations.

Comme on pouvait s'y attendre, plus l'épaisseur de la zone de colmatage augmente, plus le taux d'exfiltration diminue, cependant, on remarque qu'à partir d'un certain seuil de Z, le taux d'exfiltration se stabilise et l'épaisseur de la zone de colmatage n'a plus grand effet sur le freinage des fuites.

Les figures (3.8 et 3.9) montrent les taux d'exfiltration possibles pour une seule fuite pendant un écoulement de rejet avec un débit maximum ($H=0,8.D$) et un écoulement de rejet avec un débit minimum ($H = \frac{D}{10}$ (en supposant que la vitesse minimale $>0,3$ m/s)) respectivement dans une conduite de diamètre de 1500 mm.

Les probabilités les plus élevées pour un écoulement de rejet avec un débit minimum (en temps sec) sont 26,6% et 27,1 % que le débit sera entre 0,0071 et 0,0143 l/s, avec une probabilité de 95%, que l'exfiltration sera inférieure à 0,057 l/s dans une fuite individuelle. La probabilité la plus élevée pour les taux d'exfiltration pendant un écoulement de rejet avec un débit maximum (en temps humide) est que à 54,6 % le débit sera entre 0,2 et 0,39 l/s avec une probabilité de 95%, que l'exfiltration sera inférieure à 1,57 l/s dans une fuite individuelle.

L'utilité de ce modèle est qu'il nous permet d'estimer approximativement les taux d'exfiltration à n'importe quelle charge dans le cas où les données concernant les caractéristiques de la zone de colmatage et la zone de fuite sont indisponibles.

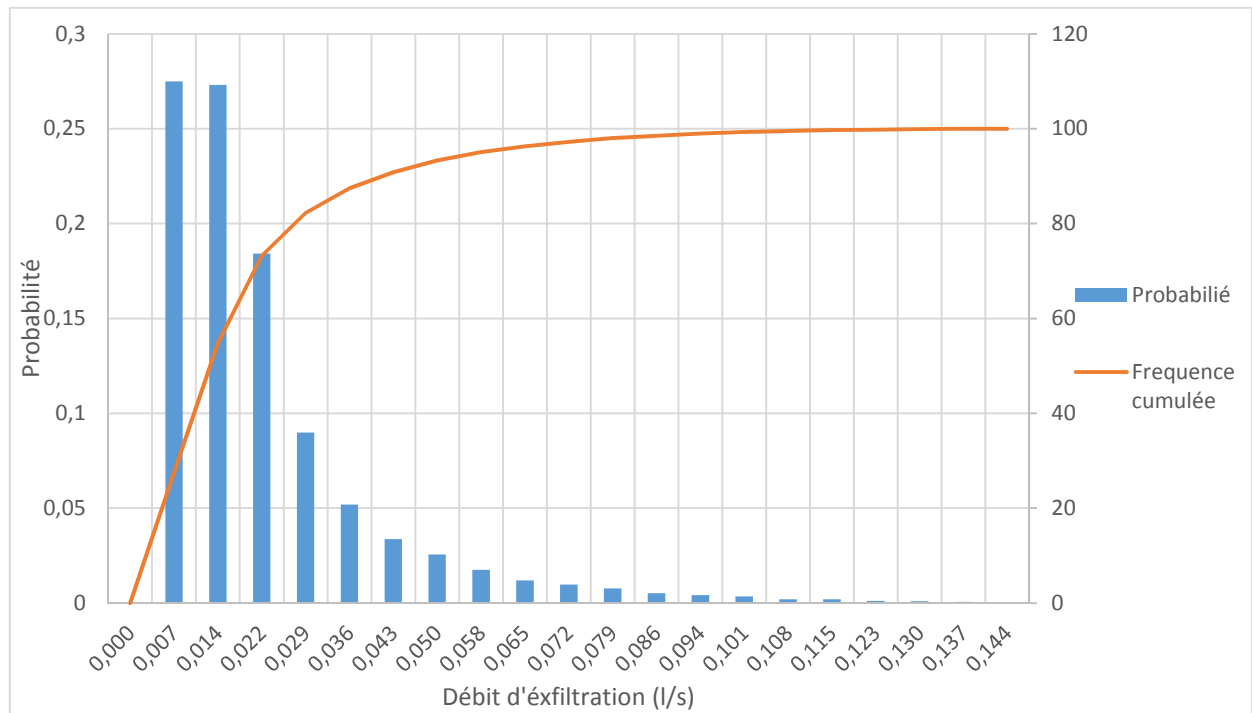


Figure 3.6 : Exfiltration à des fuites individuelles pendant un écoulement a débit minimum (D1500)

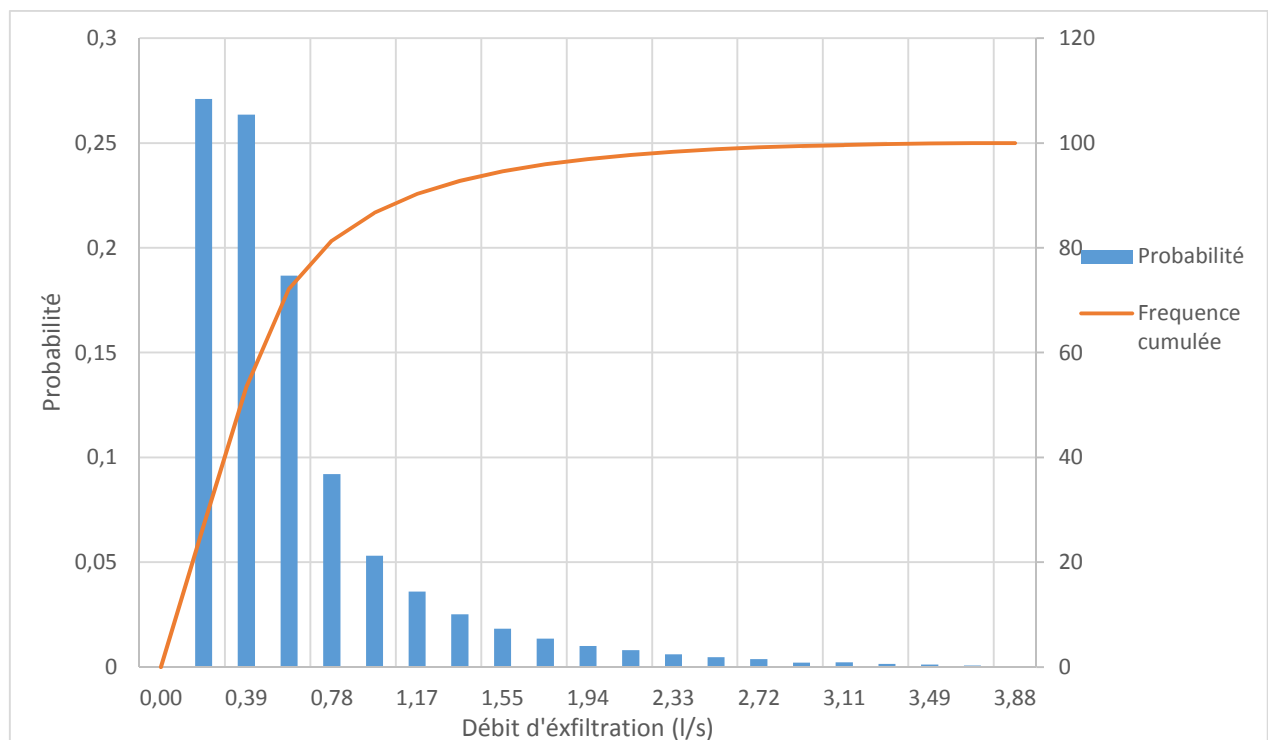


Figure 3.7 : Exfiltration à des fuites individuelles pendant un écoulement a débit maximum (D1500)

Conclusion

L'application de la méthode de MC sur l'équation de Darcy a prouvé son efficacité, même si seulement par une approche probabiliste, cette modélisation a eu pour objectif de déterminer l'influence des paramètres de l'équation sur les taux d'exfiltration et de développer un outil de prédiction et d'estimation des fuites en fonction de ces différents paramètres.

Néanmoins une estimation ne peut être exacte que par des valeurs d'entrées réelles et bien déterminées. Avec les hypothèses qui supposent certains des paramètres d'entrées, l'incertitude dans les estimations de fuite reste élevée. Les hypothèses sont nécessaires car les données expérimentales ne sont pas disponibles et il n'existe pas de méthodes développées pour mesurer ces valeurs. À l'heure actuelle, seule la charge hydraulique constitue un paramètre possible à déterminer à partir des mesures dans les collecteurs. Plus de travaux et de recherches sont nécessaires pour développer les outils et les méthodes nécessaires pour la détermination des autres paramètres, ce qui permettrait de les adapter aux conditions spécifiques, en améliorant encore la précision des estimations, par exemple plutôt qu'un large intervalle de valeurs possibles, l'épaisseur et la conductivité de la couche de colmatage peuvent être ajustées en fonction du type de sol, de l'état d'écoulement et du type du rejet. En plus les méthodes présentées pour calculer la zone de fuites qui sont basées sur des hypothèses peuvent être améliorées dans le futur pour moins d'incertitude dans les calculs des débits exfiltrés.

Conclusion générale

La littérature concernant le concept de l'intrusion et l'extrusion dans les égouts, a été recherchée dans des revues et bases de données en ligne, des rapports et des entretiens. L'objectif était de comprendre comment la question est traitée dans différentes régions et quelle est la perception et la connaissance du problème. Nous voulions également savoir comment l'intrusion et l'extrusion et ses effets sont réglementés dans différentes parties du monde pour pouvoir comprendre ce qui peut être appris et appliqué sur le scénario Algérien .

Les réseaux d'assainissement, quel que soit leur nature, transportent des quantités non négligeables d'eaux parasites d'infiltration. Ces eaux sont issues des défauts d'étanchéité des réseaux et dépendent fortement du contexte climatique. Dans le cas où des mesures directes par traceur artificiel est impossible, certaines méthodes traditionnelles de quantification existantes déjà, constituent une bonne alternative pour la quantification des volumes d'eaux parasites. Cependant ces méthodes peuvent générer des écarts non négligeables tout dépend des conditions et hypothèses d'application, et leur précision dépend fortement de la précision des mesures nécessaires pour leur application.

En outre, il semble nécessaire de souligner que les conditions de validité de ces méthodes restent toujours non définies et des expériences supplémentaires sont nécessaires pour définir le domaine d'application de chaque méthode.

D'autre part l'extrusion des eaux des égouts -qui est un problème très peu traité dans le monde et qui nécessite plus d'attention en raison de ces effets indésirables sur les réseaux d'égout et l'environnement –constitue un facteur important dans le bilan hydrique urbain. Cependant, l'évaluation directe des volumes d'exfiltration présente de grandes incertitudes en raison de la connaissance imprécise des paramètres d'entrées, une simulation de *Monte Carlo* a été appliquée à l'ensemble de données d'un réseau d'égouts et a entraîné le taux d'exfiltration le plus probable, mais l'incertitude impliquée reste significative.

Des travaux supplémentaires, en particulier sur la détermination de la validité dès l'hypothèse qui constitue les bases des calculs, sont nécessaires pour une plus grande confiance dans les estimations des fuites calculées.

Référence

bibliographique.

Référence bibliographique.

- ***Amick, R.S. and Burgess, E.H.*** (2000) Exfiltration in sewer systems. U.S Environmental protection agency (EPA), Cincinnati, Ohio, US.
- ***Annen G.W.*** 1980, Dry weather runoff and annual polluted water. Correspondence wastewater Vol. 27, N° 6, p 411-413.
- ***Anon*** (1985). *Leaking sewer causes Typhoid in Israel*, *World Water*, 8.
- ***Ariaratnam, S., El-Assaly, A., and Yang, Y.*** 2001. “Assessment of infrastructure inspection needs using logistic models.” *J. Infrastruct. Syst.*, 7_4_, 160–165.
- ***ASCE*** (1982). Manual of Practice No.60 “Gravity Sanitary Sewer Design and Construction”.
- ***ATV-DVWK*** (2003). Situation of extraneous water in Germany. Report of working group ES-1.3 “Extraneous water”. *KA Abwasser Abfall* 50(1), 70-81
- ***Aumond, M., & Joannis, C.*** (2005) Turbidity monitoring in sewage. *10th International Conference on Urban Drainage*. Copenhagen, Denmark.
- ***Bareš, V., Stránský, D., & Sýkora, P.*** (2009) Sewer infiltration/inflow: long-term monitoring based on diurnal variation of pollutant mass flux. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 60(1), 1–7. doi:10.2166/wst.2009.280
- ***Barrett, M.H., Lerner, D.N., Hiscock, K.M., Pedley, S., and Tellam, J.H.*** (1997) , The use of marker species to establish the impact of the City of Nottingham, UK on the quantity and quality of its underlying groundwater. In *Groundwater in the urban environment* (ed J. Chilton). Balkema Publications Rotterdam, The Netherlands
- ***Baur, R., and Herz, R.*** 2002_. “Selective inspection planning with aging forecast for sewer types.” *Water Sci. Technol.*, 46_6–7_, 389–396
- ***BELHADJ N.*** 1994, *Variations par temps de pluie des débits dans les réseaux d’eaux usées de type séparatif : identification des composantes et modélisation des infiltrations*. Thèse de Doctorat ès Sciences et Techniques de l’Environnement. Paris : Laboratoire central des Ponts et Chaussée,
- ***Bertrand-Krajewski J.-L., Cardoso M. A., Ellis B., Frehmann T., Giulianelli M., Gujer W., Krebs P., Pliska Z., Pollert J., K. Pryl.*** (2005). towards a better knowledge and management of infiltration and exfiltration in sewer systems: the APUSS project. Proceedings of 10th ICUD - International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark, 8 p.
- ***Borchardt D. and Sperling F.*** (1997). Urban stormwater discharges: ecological effects on receiving waters and consequences for technical measures. *Water Science and Technology* 36(8-9), 173-178.
- ***BSI (1997a)***. BSI EN 752-4 Drain and sewer systems outside buildings – Hydraulic design and environmental considerations.
- ***BSI, 1996a***, *BS EN 752: Drain and sewer systems outside buildings – Generalities and definitions*.
- ***Burn, S., DeSilva, D., Ambrose, M., Meddings, S., Diaper, C., Correll, R., Miller, R., and Wolf, L.*** (2005) A Decision Support System for Urban Groundwater Resource Sustainability, Proc. 10th Int. Conference on Urban Drainage, Copenhagen.

- **CARE-S** (2003). Report D3 - Classification systems based on visual inspection.
<http://cares.unife.it/>
- **Craun, G.F.** (1984). *Health aspects of groundwater pollution*. In: **G. Bitton and C.P. Gerba** (Eds), *Groundwater Pollution Microbiology*, John Wiley and Sons, 135-179.
- **CSTB., AGHTM.** 1989 *Réhabilitation des Réseaux d'Assainissement. Synthèse des Résultats de l'Enquête menée en 1989*. Marne la Vallée : CSTB., Paris : AGHTM Commission "Assainissement". Groupe de travail "Réhabilitation". 7 p.
- **Davies J. P., Clarke B. A., Whiter J. T. and Cunningham R. J.** (2001a). Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes. *Urban Water* 3(1-2).
- **De Bénédittis J.** (2004). Mesurage de l'infiltration et de l'exfiltration dans les réseaux d'assainissement. Thèse de doctorat : Génie Civil .INSA de Lyon, Villeurbanne, France
- **De Bénédittis J., Bertrand-Krajewski J.-L.** (2003). Measurement of infiltration rates in urban sewer systems: use of oxygen isotopes ; Proceedings of the 18th European Junior Scientists Workshop on "Sewer Processes and Networks", Almogrove, Portugal, 8 p.
- **De Bénédittis J., Bertrand-Krajewski J.-L.** (2005). Infiltration in sewer systems: comparison of measurement methods. *Water Science and Technology*, 52(3).
- **De Bénédittis J., Bertrand-Krajewski J.-L.** (2005). Measurement of infiltration rates in urban sewer systems by use of oxygen isotopes. *Water Science and Technology*, 52(3), 229-237.
- **Decker J.** (1998). (Effects of extraneous water on sewer systems and receiving waters). These de Doctorat. Institut d'Ingénierie de l'Environnement, RWTH Aachen.
- **DeSilva, D., Burn, S., Moglia, M., Tjandraatmadja, G., Gould, S., and Sadler, P.** (2006). NEIMO Manual (Network Exfiltration and Infiltration Model). CMIT, Rep. CMIT(C)-2005-219
- **Dimova, G., Ribarova, I., & de Carné, F.** (2015). Coping with extraneous water in sewerage systems. In *Understanding and Managing Urban Water in Transition*.
- **Dizer, H. and Hagendorf, U.** (1991) Microbial contamination as an indicator of sewer leakage. *Water Research*, 25(7), 791-796.
- **Dohmann, M., Decker, J., and Menzenbach, B.** (1999) *Water hazards caused by leaking channels* Publisher, Berlin, Heidelberg
- **Ellis, B. and Revitt, D.M.** (2002) Sewer losses and interactions with groundwater quality. *Water sci. technol.*, 45(3), 195-202.
- **Ellis.B ; Jean-Luc Bertrand-Krajewski** 2010). *Assessing Infiltration and Exfiltration on the Performance of Urban Sewer Systems* IWA Publishing; 1 edition 192 p
- **EPA** (1977). *Sewer system evaluation, rehabilitation and new construction – A manual of practice*. Environmental protection technology series, EPA-600/2-77-017d.
- **Ertl Th., G. SpatziererSt. Wildt** 2008 , *Estimating groundwater infiltration into sewerages by using the moving minimum method – a survey in Austria* 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008

- **FISCHER M.** Contaminated water in the canal - now even more expensive. Correspondence wastewater Vol. 37, N° 10, 1990, pp 1196-1201
- **Foppen, J.W.A.** (2002) Impact of high-strength wastewater infiltration on groundwater quality and drinking water supply: the case of Sana'a, Yemen. *Journal of Hydrology*, 263(1-4), 198-216.
- **Franz T.** 2007 Spatial classification methods for efficient infiltration measurements and transfer of measuring results. Dissertation, Département de la gestion des eaux urbaines, TU Dresden. *Dresdner Bericht* 28, ISSN 1615-083X.
- **Gustafsson, L.-G.** (2000) Alternative Drainage Schemes for Reduction of Inflow/Infiltration -Prediction and Follow-Up of Effects with the Aid of an Integrated Sewer/Aquifer Model, Proc. 1st International Conference on Urban Drainage via Internet, Internet, pp 21 - 37.
- **HAGER W.H, RAYMANN B., BRETSCHER U.** 1985 Calculation of water in sewage systems.
- **Harping, J.S.** (1997). "Nature of Indoor Residential Water Use". Thèse d'ingénieur, Département d'ingénierie civile, environnementale et architecturale. Université du Colorado. Boulder, CO.
- **University of Wisconsin-Madison** (1978). "Management of Small Wastewater Flows" EPA-600/7-78-173. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Municipal Environmental Research Laboratory (MERL) Cincinnati, OH.
- **Hasegawa, K., Wada, Y., and Miura, H.** _1999_. "New assessment system for premeditated management and maintenance of sewer pipe networks." *Proc., 8th Int. Conf. on Urban Storm Drainage*, Sydney, Australia, 586–593.
- **HR Wallingford** (2002). Development of guidelines for the structural hydraulic and environmental rehabilitation of sewers. EU Commission research project, contract SMT4–CT98–2272, job no. MAS0303. <http://www.hydroinformatics.org/srguide/>,
- **JOANNIS C.** Précision des estimations de débits d'eaux parasites d'infiltration dans les réseaux de collecte des eaux usées. Influence des erreurs de mesure et de la méthode de calcul. *Bulletin de liaison du LCPC*. Janvier-Février 1994, pp 71-87
- **Kaczor G., Bergel T., Bugajski P.** 2015. Impact of extraneous waters on the proportion of sewage pollution indices regarding its biological treatment. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas* Nr 2015/ IV (3 (Dec 2015))
- **Karpf C., Krebs P.** (2005). Assessment of extraneous water inflow in separated sewer networks. Proceedings of 10th ICUD - International Conference on Urban Drainage, Copenhagen, Denmark, 21-26 August 2005, 8 p.
- **Karpf, C. and Krebs, P.** (2004) Sewers as drainage systems - quantification of groundwater infiltration. In NOVATECH, 06/06 - 06/10/2004, Lyon.
- **Karpf, C. and Krebs, P.** (2005) Application of the leakage model to assess exfiltration. *Water sci. technol.*, 52(5), 225-231
- **Ken W.F. Howard** 2007 *Urban Groundwater, Meeting the Challenge: IAH Selected Papers on Hydrogeology* 8 CRC Press ISBN 9780415407458
- **Klinger, J., Wolf, L., and Hötzl, H.** (2005) Leaky sewers-measurements under operating conditions, Proc. 4th world wide workshop for young environmental scientists (WWWYES), Domaine de Cherioux, Vitry sur Seine, France.

- **Kracht, O., & Gujer, W.** (2005) Quantification of infiltration into sewers based on time series of pollutant loads. *Water Science and Technology: a Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 52(3), 209–18.
- **Kracht, O., Gresch, M., & Gujer, W.** (2007) A stable isotope approach for the quantification of sewer infiltration. *Environmental Science and Technology*, 41(16), 5839–45.
- **Kretschmer, F., Ertl, T., & Koch, F.** (2008) Discharge monitoring and determination of infiltration water in sewer systems. In *11th International Conference on Urban Drainage* (pp. 1–7). Edinburgh, Scotland, UK.
- **Kroiss H. and Prendl L.** (1996). Influence of extraneous water on planning and operation of WWTPs. Series of publications on water management, vol. 18, 27-44 Institut de gestion des eaux urbaines et du paysage de l'eau, TU Graz
- **Leif Wolf (Editor), Brian Morris (Editor), Stewart Burn (Editor)** Urban Water Resources Toolbox: Integrating Groundwater into Urban Water Management (European Water Research) ISBN-13: 978-1843391388 297 p
- **LROP-AGENCE DE BASSIN SEINE NORMANDIE.** *Analyse et détection des eaux parasites. Méthodologies d'étude. Méthodes de détection.* 1980-1981.
- **Mayer, P.W., DeOreo, W.B., Opitz, E.M., Kiefer, J.C., Davis, W.Y., Dziegielewski, B., and Nelson, J.O.** (1999). “Residential End Uses of Water”, Report to AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- **McDermott, G. and O'Donoghue, S.** (1999) Targeting sewage exfiltration - the hidden problem. *Water supply*, 17(3/4).
- **McDonald, S., and Zhao, J.** 2001. “Condition assessment and rehabilitation of large sewers.” Proc., Int. Conf. on Underground infrastructure Research.
- **Missteat, B.D. and Bishop, P.K.** (1997). Groundwater contamination from sewers: Experience from Britain and Ireland. In: Chilton et al. (Eds.), *Groundwater in the Urban Environment: Problems, Processes and Management*, Rotterdam, Balkema,
- **Mitchell, Paul S.; Stevens, Patrick L.; Nazaroff, Adam** 2007 A Comparison of Methods and a Simple Empirical Solution to Quantifying Base Infiltration in Sewers , : Water

Practice, Volume 1, Number 6, pp. 1-20(20)

- **Müller K.** (2002). Development of a generally applicable procedure for the selective inspection of sewers and house connections. Research Report, RWTH Aachen. <http://www.isa.rwthachen>.
- **Najafi, M., and Kulandaivel, G.** 2005. “Pipeline condition prediction using neural network models.” *Proc., Pipeline 2005*, ASCE, Reston, Va., 767–781.
- **O'Reilly M. P., Rosbrook, R. B., Cox, G. C. and McCloskey, A.** (1989). Analysis of defects in 180 km of pipe sewers in Southern water authority. TRRL Research Report 172
- **Okubo, T. and Matsumoto, J.** (1983) Biological clogging of sand and changes of organic constituents during artificial recharge. *Water Research*, 17(7), 813-821

- **Platzer, C. and Mauch, K.** (1997) Soil clogging in vertical flow reed beds - mechanisms, parameters, consequences and solutions, *Water sci. technol.*, 35(5), 175-181
- **Powell, K.L., Taylor, R.G., Cronin, A.A., Barrett, M.H., Pedley, S., Sellwood, J., Trowsdale, S.A., and Lerner, D.N.** (2003) Microbial contamination of two urban sandstone aquifers in the UK. *Water Research*, 37(2), 339-352.
- **R. P. Gupta. et B. B. S,** “Applied Hydrogeology of Fractured Rocks,” Kluwer Academic Publishers, New York, 1999.
- **RANCHET J., RENARD D., VICQ A.** *Analyse et détection des eaux parasites dans les réseaux d’assainissement.* TSM, Vol.77, N° 4, avril 1982, pp 173-183
- Rauch, W. and Stegner, T. (1994) the colmation of leaks in sewer systems during dry weather flow. *Water sci. technol.*, 30(1), 205-210.
- **RENAULT D.** Les eaux claires parasites dans les réseaux d’assainissement (réseaux unitaires). Diagnostic et réhabilitation des réseaux. Impact et économie dans le traitement. TSM, nov et dec 1983.
- **Rieckermann, J.** (2005a). Standard Operation Procedure (SOP): Quantification of Exfiltration from Sewers with artificial Tracers (QUEST). Final report, EAWAG, Zürich, Switzerland.
- **Robert Morrison Brian Murphy** 2013 Environmental Forensics: Contaminant Specific Guide Royal Society of Chemistry ISBN-13 978-1849731966 592p
- **Rushton, K.R. and Tomlinson, L.M.** (1979) possible mechanisms for leakage between aquifers and rivers. *Journal of Hydrology*, 40, 49-65.
- **Rutsch M.** 2007 Assessment of sewer leakage by means of exfiltration measurements and modelling tests. Dissertation, Département de la gestion des eaux urbaines, Université technique de Dresde. Rapport Dresdner 27, ISSN 1615-083X. HSSS: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:swb:14-1175685350577-01644>
- **Ruwanpura, J., Ariaratnam, S., and El-Assaly, A.** _2004_. “Prediction models for sewer infrastructure utilizing rule-based simulation.” *Civ. Eng. Environ. Syst.*, 21_3_, 169–185.
- **S. Rödel, F. W. Günther, T. Brüggemann** 2016 Investigating the impacts of extraneous water on wastewater treatment plants IWA Publishing DOI: **10.2166/wst.2016.570**
- **Schilperoort, R. P. S., Gruber, G., Flamink, C. M. L., Clemens, F., & Van der Graaf, J. H. J. M.** (2006) Temperature and conductivity as control parameters for pollution-based real-time control. *Water Science & Technology*, 54(11), 257. doi:10.2166/wst.2006.744
- **Schulz N., Baur R. and Krebs P.** (2005a). Integrated modelling for the evaluation of infiltration effects. *Water Science and Technology* 52(5).
- **Stein** (1998). Instandhaltung von Kanalisationen. (Maintenance of sewer systems). 3rd edition, Berlin: Ernst & Sohn
- **Vázquez-Suné, E., Castillo, O., Sánchez-Vila, X., Alberich, C., and Carrera, J.** (2000) Use of natural and anthropogenic tracers to identify sources of groundwater recharge in urban areas in Barcelona. *IAHS Publ.*, No. 262, 363-369
- **Veldkamp, R., Henckens, G., Langeveld, J., & Clemens, F.** (2002) Field data on time and space scales of transport processes in sewer systems. In E. W. Strecker & W. C. Huver (Eds.), *Urban Drainage 2002* (Vol. 112, pp. 293–293). Portland, Oregon: Asce. doi:10.1061/40644(2002)293

- **Verbanck, M., Vanderborcht, J.-P., & Wollast, R.** (1989) Major ion content of urban wastewater: Assessment of per capita loading. *Water Pollution Control Federation*, 61(11/12).
 - **Vipulanandan et ozgurel gurkan 2004**Two Dimensional Model Study on Infiltration Control at a Lateral Pipe Joint Using Acrylamide Grout Conference Paper · August 2005 DOI: 10.1061/40800(180)50 ·
 - **Vollertsen, J. and Hvitved-Jacobsen, T.** (2003) Exfiltration from gravity sewers: a pilot scale study. *Water sci. technol.*, 47(4), 69 – 76
 - **WEISS G., BROMBACH H., HALLER B.** Infiltration and inflow in combined sewer systems: long term analysis. *Water Science and Technology*, Vol. 45, N°7.
 - **Wolf, L.** (2005) A Decision Support System for Urban Groundwater Resource Sustainability, Proc. 10th Int. Conf on Urban Drainage, Copenhagen.
 - **Wolf, L., DeSilva, D., Klinger, J., Moglia, M., Held, I., Burn, S., Sadler, P., Tjadraatmatdja, G., Gould, G., Eiswirth, M., and Hötzl, H.** (2005a). AISUWRS Work-package 8 Leakage Rates. CSIRO &AGK Commissioned Report, <http://www.urbanwater.de>.
- Yan, J., and Vairavamoorthy, K.** _2003_. “Fuzzy approach for pipe condition assessment.” *Proc., New Pipeline Technologies, Security, and Safe*

ANNEXES

ANNEXE 1 : Les résultats d'applications des méthodes d'estimation sur les points de mesure :

1.1. Les résultats des méthodes d'estimation journalière sur les points de mesure :

Point M2-2						
JOUR	M1	M2	M3	M5	M6	M7
09-déc	0	0	0	0	4396,877973	3294,669784
10-déc	0	0	0	0	14925,88919	8828,652563
11-déc	0	0	0	0	8765,321405	5782,139178
12-déc	3948,7	5928,934963	5740,371203	4359,162391	5698,88064	4081,048876
13-déc	2973,7	5169,912958	5005,489123	3841,88443	4969,31018	3646,389909
14-déc	0	0	0	0	13484,70693	8146,324649
15-déc	0	0	0	0	14423,79507	8592,588603
16-déc	0	0	0	0	19616,09191	10964,83623
17-déc	0	0	0	0	23194,35441	12531,51095
18-déc	8578,7	9533,316381	9230,118928	6729,326354	9163,404978	5991,373678
19-déc	5968,7	7501,472861	7262,896129	5409,267951	7210,400978	4941,552883
20-déc	4752,7	4574,372616	4428,889337	2669,175065	4049,968882	2390,398443
21-déc	3365,7	5475,078729	5300,949406	4050,744569	5262,634919	3822,863454
22-déc	3188,7	5337,287042	5167,540043	3956,589787	5130,18982	3743,478185
23-déc	3274,7	5404,236675	5232,360412	4002,368209	5194,541676	3782,109826
24-déc	3208,7	5352,856724	5182,614548	3967,241174	5145,155368	3752,47254
25-déc	3236,7	5374,654279	5203,718854	3982,147771	5166,107135	3765,054176
26-déc	2931,7	5137,216626	4973,832664	3819,433058	4937,88253	3627,33728
27-déc	2615,7	4891,215648	4735,655498	3650,043651	4701,426873	3483,052173

Point M2-3						
JOUR	M1	M2	M3	M5	M6	M7
09-déc	0	3660,201527	0	0	0	2087,395843
10-déc	0	3771,477252	0	0	0	2087,505736
11-déc	0	4325,056489	0	0	0	5272,043856
12-déc	-3103,5	4114,402443	4021,804453	2249,07657	3947,002776	2980,998382
13-déc	-1095,5	3898,149618	3810,418575	5073,224151	3427,442748	2070,603853
14-déc	0	4097,606107	0	0	0	2694,687531
15-déc	0	4733,067481	0	0	0	4148,549562
16-déc	0	4283,065649	0	0	0	2435,55532
17-déc	0	4454,528244	0	0	0	2122,323486
18-déc	-1180,5	4520,313893	4418,580534	4304,095879	4146,038515	2622,327895
19-déc	452,5	3723,187786	3639,394402	7272,529754	3017,531575	1749,682629
20-déc	-284,5	3892,55084	3804,945802	6133,00455	3310,489591	1938,389133
21-déc	-738,5	3586,01771	3505,31145	5865,615293	3024,065579	1789,231774
22-déc	332,5	2985,548702	2918,356489	7890,324146	2195,66898	1339,693812
23-déc	260,5	3723,887634	3640,078499	7021,070321	3044,508675	1767,749301
24-déc	-315,5	3588,117252	3507,36374	6413,229943	2968,769604	1740,978901
25-déc	-2029,5	3397,058931	3320,605344	4394,635536	2985,385149	1854,031958
26-déc	0	3592,316336	3511,468321	3646,029881	3264,677654	2120,182246
27-déc	-2123,5	3348,069618	3272,718575	4325,21954	2942,533657	1833,072868

Point M2-15						
JOUR	M1	M2	M3	M5	M6	M7
09-déc	0	0	0	0	3448,573072	2761,747883
10-déc	0	0	0	0	22990,48715	12946,82588
11-déc	0	0	0	0	10643,57168	7020,764424
12-déc	4948,6	7669,440774	7697,314044	5616,45013	7412,182698	5239,303105
13-déc	4516,6	7322,726833	7349,340032	5382,649302	7077,098674	5044,790616
14-déc	0	0	0	0	22063,57648	12530,91373
15-déc	0	0	0	0	21279,38678	12176,44021
16-déc	0	0	0	0	28482,14197	15353,88762
17-déc	0	0	0	0	29571,16505	15821,56966
18-déc	3313,6	6357,224819	6380,329065	4725,141864	6143,982749	4490,980748
19-déc	1359,6	4788,986301	4806,391053	3634,519718	4628,348069	3546,358942
20-déc	1134,6	4608,406124	4625,154588	3506,905451	4453,825141	3433,351363
21-déc	1393,6	4816,273973	4833,777897	3653,764321	4654,720424	3563,351532
22-déc	858,6	4386,89444	4402,837858	3349,732885	4239,743682	3293,366686
23-déc	44,6	3733,595488	3747,164602	2881,869321	3608,358509	2871,053006
24-déc	-2,4	3695,874295	3709,306318	2854,646608	3571,902608	2846,205766
25-déc	-37,4	3667,784045	3681,113979	2834,358876	3544,754597	2827,667726
26-déc	-225,4	3516,899275	3529,680844	2725,154898	3398,930994	2727,57467
27-déc	-167,4	3563,448832	3576,399577	2758,887219	3443,919127	2758,548523

Point M2-16						
JOUR	M1	M2	M3	M5	M6	M7
09-déc	0	0	0	0	0	0
10-déc	0	0	0	0	0	0
11-déc	0	0	0	0	0	0
12-déc	0	0	0	0	0	0
13-déc	0	0	0	0	0	0
14-déc	0	0	0	0	0	0
15-déc	0	0	0	0	0	0
16-déc	0	0	0	0	0	0
17-déc	0	0	0	0	0	0
18-déc	4054,8	3807,791	4501,825	2901,188	2842,549	3663,763
19-déc	2285,8	2422,926	2864,546	1900,618	1929,248	2331,28
20-déc	1755,8	2008,015	2374,009	1592,607	1636,673	1932,062
21-déc	1860,8	2090,214	2471,191	1653,985	1695,472	2011,153
22-déc	1445,8	1765,331	2087,092	1410,279	1460,45	1698,558
23-déc	1365,8	1702,703	2013,049	1362,942	1414,301	1638,299
24-déc	1382,8	1716,011	2028,783	1373,011	1424,132	1651,104
25-déc	1306,8	1656,514	1958,442	1327,951	1380,081	1593,857
26-déc	1425,8	1749,674	2068,581	1398,456	1448,939	1683,493
27-déc	1598,8	1885,107	2228,7	1500,481	1547,928	1813,804

Point P01						
JOUR	M1	M2	M3	M5	M6	M7
09-déc	0	0	0	0	3750,458	6441
10-déc	0	0	0	0	8237,165	16849,26
11-déc	0	0	0	0	4352,674	7762,84
12-déc	462	7962,682	8296,738	4917,27	4155,703	7326,094
13-déc	976	8286,712	8634,361	5090,075	4290,348	7624,218
14-déc	0	0	0	0	7149,842	14250,82
15-déc	0	0	0	0	7200,304	14370,88
16-déc	0	0	0	0	9946,704	20963,26
17-déc	0	0	0	0	9405,518	19658,82
18-déc	2659	9347,689	9739,848	5647,091	4725,835	8600,373
19-déc	2059	8969,444	9345,735	5450,013	4571,453	8252,368
20-déc	2920	9512,225	9911,288	5732,319	4792,718	8751,756
21-déc	1341	8516,811	8874,113	5212,004	4385,464	7835,921
22-déc	2091	8989,617	9366,755	5460,565	4579,71	8270,928
23-déc	2463	9224,129	9611,105	5582,89	4675,502	8486,692
24-déc	2010	8938,554	9313,549	5433,846	4558,805	8223,947
25-déc	710	8119,023	8459,638	5000,81	4220,774	7469,936
26-déc	381	7911,619	8243,532	4889,918	4134,406	7279,113
27-déc	432	7943,77	8277,032	4907,144	4147,818	7308,693

Point P03		
JOUR	M1	M4
09-déc	0	1211
10-déc	0	1211
11-déc	0	1211
12-déc	1393	1211
13-déc	385	1211
14-déc	0	385
15-déc	0	385
16-déc	0	385
17-déc	0	385
18-déc	1851	385
19-déc	655	385
20-déc	1492	385
21-déc	822	385
22-déc	-556	385
23-déc	1411	-556
24-déc	1819	-556
25-déc	4372	-556
26-déc	2739	-556
27-déc	2140	-556

1.2. Les résultats d'applications des méthodes d'estimation Annuelle /saisonnaire sur les points de mesure :

JOUR	Point M2-2		Point M2-3		Point M2-15		Point P01	
1	2208,7	4101	-4640,5	-893,22	-225,4	1428,1	-1064	1648
2	2615,7	4101	-3266,5	-893,22	-167,4	1428,1	381	1648
3	2931,7	4101	-3103,5	-893,22	-161,4	1428,1	432	1648
4	2973,7	4101	-2589,5	-893,22	-37,4	1428,1	462	1648
5	3188,7	4101	-2450,5	-893,22	-2,4	1428,1	710	1648
6	3208,7	4101	-2123,5	-893,22	44,6	1428,1	976	1648
7	3236,7	4101	-2089,5	-893,22	858,6	1428,1	1215	1648
8	3274,7	4101	-2029,5	-893,22	1134,6	1428,1	1341	1648
9	3365,7	4101	-1680,5	-893,22	1359,6	1428,1	2010	1648
10	3132,7	4101	16554,5	-893,22	1292,6	1428,1	1831	1648
11	2832,7	4101	15554,5	-893,22	992,6	1428,1	1731	1648
12	2332,7	4101	13854,5	-893,22	892,6	1428,1	1531	1648
13	2132,7	4101	12554,5	-893,22	692,6	1428,1	1331	1648
14	1732,7	4101	11354,5	-893,22	592,6	1428,1	931	1648
15	1332,7	4101	9554,5	-893,22	492,6	1428,1	881	1648
16	1132,7	4101	9354,5	-893,22	442,6	1428,1	831	1648
17	782,7	4101	7054,5	-893,22	392,6	1428,1	531	1648
18	332,7	4101	5554,5	-893,22	292,6	1428,1	331	1648
19	0	4101	0	-893,22	0	1428,1	0	1648

ANNEXE 2 : les résultats de la modélisation de Monte Carlo

2.1. Les débit exfiltrés en fonction de la charge hydraulique croissante

H	Probabilité	95%		5%	
		Q min	Q max	Q min	Q max
0,1 m		4,50239E-06	3,59283E-05	4,04177E-05	8,98013E-05
0,3 m		2,31829E-05	0,00018502	0,00020814	0,000462455
0,5 m		5,11349E-05	0,000408282	0,000459303	0,001020535
0,7 m		8,6744E-05	0,000692525	0,000779066	0,001731008
0,9 m		0,000130591	0,001042145	0,001172367	0,00260481
1,1 m		0,00018209	0,001453784	0,001635454	0,00363383
1,3 m		0,000240697	0,001921831	0,002161993	0,004803775
1,5 m		0,000312836	0,00249712	0,00280916	0,006241606
1,7 m		0,000392127	0,003130154	0,003521301	0,007823914
1,9 m		0,000507128	0,004048813	0,004554768	0,010120274
2 m		0,000607209	0,004845068	0,005450477	0,012109969

2.2. Les débit exfiltrés en fonction de l'épaisseur de la zone de colmatage croissante

Z	Probabilité	95%		5%	
		Q min	Q max	Q min	Q max
0,01 m		0,000548806	0,00603395	0,006582464	0,010970579
0,02 m		0,000308914	0,003396968	0,003705774	0,006176217
0,03 m		0,000202951	0,002229126	0,002431743	0,004052683
0,04 m		0,000154783	0,001699454	0,001853921	0,003089657
0,05 m		0,000123184	0,001354712	0,001477864	0,002463087
0,06 m		0,000100475	0,001103641	0,001203957	0,00200649
0,07 m		8,68586E-05	0,000953751	0,00104044	0,001733954
0,08 m		7,6012E-05	0,000835917	0,000911907	0,001519831
0,09 m		6,10422E-05	0,000671283	0,000732307	0,0012205
0,1 m		6,91056E-05	0,000759914	0,000828994	0,001381641

2.3. Les débit exfiltrés en fonction de la conductivité de la zone de colmatage croissante

K	Probabilité	95%		5%	
		Q min	Q max	Q min	Q max
10^{-5} m/s		0,000591685	0,003550108	0,004141793	0,01183369
$5 \cdot 10^{-5}$ m/s		0,000306305	0,001837831	0,002144136	0,00612610
10^{-6} m/s		5,87777E-05	0,000352666	0,000411443	0,00117555
$5 \cdot 10^{-6}$ m/s		3,05411E-05	0,000183247	0,000213788	0,00061082
10^{-7} m/s		6,07401E-06	3,64441E-05	4,25181E-05	0,00012148
$5 \cdot 10^{-7}$ m/s		2,98306E-05	0,000178983	0,000208814	0,00059661
10^{-8} m/s		6,22136E-07	3,68647E-06	4,29934E-06	1,226E-05

2.4. Les débit exfiltrés avec leur probabilité lors d'un écoulement a débit maximum (D1500)

BINS (Q _{ex})	probabilité	Nombre d'occurrence	probabilité cumulée
4,8762E-07	2,00004E-05	1	0,002
0,00019919	0,274125483	13706	26,83454
0,0003979	0,274045481	13702	53,60107
0,00059661	0,182743655	9137	72,38345
0,00079531	0,090581812	4529	81,73363
0,00099402	0,053081062	2654	87,05174
0,00119273	0,034860697	1743	90,64181
0,00139143	0,02298046	1149	93,02386
0,00159014	0,018040361	902	94,7539
0,00178884	0,012300246	615	96,06992
0,00198755	0,009880198	494	97,03594
0,00218626	0,00748015	374	97,77196
0,00238496	0,005800116	290	98,36597
0,00258367	0,003720074	186	98,81198
0,00278238	0,003140063	157	99,17398
0,00298108	0,002460049	123	99,45399
0,00317979	0,001880038	94	99,65999
0,00337849	0,001380028	69	99,796
0,0035772	0,000740015	37	99,898
0,00377591	0,000540011	27	99,97
0,00397461	0,000200004	10	100

2.5. Les débit exfiltrés avec leur probabilité lors d'un écoulement a débit minimum (D1500)

BINS (Q _{ex})	probabilité	Nombre d'occurrence	probabilité cumulée
1,6803E-08	0,00002	1	0,002
7,1354E-06	0,26798	13399	26,8
1,4254E-05	0,27182	13591	53,982
2,1373E-05	0,1866	9330	72,642
2,8491E-05	0,09074	4537	81,716
3,561E-05	0,05396	2698	87,112
4,2729E-05	0,0345	1725	90,562
4,9847E-05	0,02548	1274	93,11
5,6966E-05	0,01726	863	94,836
6,4085E-05	0,01258	629	96,094
7,1203E-05	0,01068	534	97,162
7,8322E-05	0,00698	349	97,86
8,544E-05	0,00592	296	98,452
9,2559E-05	0,0046	230	98,912
9,9678E-05	0,0033	165	99,242
0,0001068	0,00254	127	99,496
0,00011391	0,00216	108	99,712
0,00012103	0,00148	74	99,86
0,00012815	0,00084	42	99,944
0,00013527	0,00038	19	99,982
0,00014239	0,00018	9	100

