

Higher National School of Hydraulic

The Library

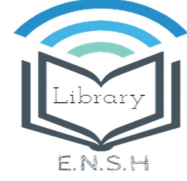
Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

**Modélisation des écoulements d'eaux parasites et leurs impacts dans le collecteur d'assainissement.**

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 7-0002-12

APA Citation ( APA توثيق ):

**Rezig, Amina (2012). Modélisation des écoulements d'eaux parasites et leurs impacts dans le collecteur d'assainissement[Thèse de magister, 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Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...)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 بتمكين الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات بيداغوجية، مقالات الدوريات، 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.

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE  
ARBAOUI ABDELLAH

N° d'ordre.....

Série.....

**MEMOIRE DE MAGISTER**

**Option : Génie de l'eau**

Présenté par :

**Amina REZIG**

**Thème**

**Modélisation des écoulements d'eaux parasites et leurs impacts dans  
le collecteur d'assainissement**

Devant le jury composé de :

|                   |          |                            |                              |                   |
|-------------------|----------|----------------------------|------------------------------|-------------------|
| <b>Président</b>  | <b>:</b> | <b>Mme B. TOUAIBIA</b>     | <b>Professeur</b>            | <b>ENSH Blida</b> |
| <b>Rapporteur</b> | <b>:</b> | <b>Mr B. SALAH</b>         | <b>Maitre de conférence</b>  | <b>ENSH Blida</b> |
| <b>Examineurs</b> | <b>:</b> | <b>Mr B. REMINI</b>        | <b>Professeur</b>            | <b>Univ Blida</b> |
|                   |          | <b>Mr M. K.MIHOUBI</b>     | <b>Maitre de conférence</b>  | <b>ENSH Blida</b> |
|                   |          | <b>Mr O. KHODJET KESBA</b> | <b>Maitre de conférence</b>  | <b>ENSH Blida</b> |
| <b>Invités</b>    | <b>:</b> | <b>Mr A. AIT AMARA</b>     | <b>Directeur MRE</b>         |                   |
|                   |          | <b>Mme H. MEDDI</b>        | <b>Maitre de conférences</b> | <b>ENSH Blida</b> |

**Soutenu le 01 / 02 /2012**

## REMERCIEMENTS

Je m'incline et me prosterne devant mon Créateur, pour m'avoir guidé et appris tout ce que je sais. Devant lui, je me prosterne encore pour tous les biens qu'il m'a gratifié en me créant musulmane et en m'aidant à le rester pour toujours, lui le réalisateur de tous mes vœux.

Pour sa disponibilité, ses conseils et sa patience, je remercie profondément mon promoteur Monsieur SALAH Boualem, Maître de conférence -A- à l'Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique Blida, qui a dirigé avec rigueur ce travail. Il a su prendre de son temps pour me guider et me faire part de son savoir afin de mener à bien ce travail.

Je remercie vivement madame Bénina TOUAIBIA, Professeur à l'ENSH Blida, pour avoir accepté la présidence de mon jury de soutenance.

J'adresse également mes remerciements aux membres du jury, Monsieur REMINI.B de l'université de Blida, Messieurs MIHOUBI M.k et KHODJET KESBA .O de l'ENSH Blida pour honorer ma soutenance et pour l'effort fourni afin de juger ce travail.

Ma gratitude va pareillement à Monsieur Claude JOANNIS responsable de la section hydrologie urbaine de la division eau et environnement du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Bouguenais, France, pour m'avoir fourni des documents nécessaires à ma thèse.

Très chaleureusement je remercie Monsieur FARRAH, mon ex Directeur de l'ADE, unité de Bouira, pour sa compréhension et son soutien durant mes années d'étude de Magistère.

Je suis particulièrement reconnaissante envers ma mère, ma famille et mon mari, qui n'ont cessé de me soutenir et valoriser ce travail.

Qu'il me soit permis de remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

*A ma chère maman,  
A mon mari,  
Je dédie ce travail.*

## Résumé

Les systèmes d'évacuation en assainissement, mal entretenus ou présentant des anomalies, transportent généralement des quantités d'eaux parasites ayant diverses origines dont la détermination s'avère difficile.

D'après la littérature, la présence ou la fuite des eaux parasites au niveau des collecteurs d'assainissement, mal gérés, pollue les nappes et perturbe le fonctionnement des stations d'épuration. L'intrusion ou l'extrusion de ces eaux à débit variable, dans le collecteur, présente également un impact mécaniste sur la détermination des paramètres prépondérants (vitesse, hauteur d'eau) lors d'un régime transitoire ainsi provoqué et, rend souvent difficile leur détermination.

Dans l'hypothèse d'une intrusion supposée uniformément répartie le long du collecteur, notre travail consiste d'abord à modéliser ce débit, d'une façon approchée, puis à déterminer le couple hauteur – vitesse en se basant sur les équations de Saint Venant.

D'un intérêt primordial, cette étude est utile non seulement pour le dimensionnement des collecteurs d'assainissement mais également pour le calage des ouvrages nécessaires à la gestion tels que les déversoirs d'orage, les déversoirs by-pass, etc.....

**Mots clés** : eaux claires parasites, réseau d'assainissement, intrusion des ECP, réhabilitation de réseau d'assainissement, loi de débit d'orifices.

## **Abstract**

The systems of evacuation in cleansing, badly maintained or presenting anomalies, generally transport parasitic quantities of water having various origins whose determination proves to be difficult.

According to the literature, the presence or the leakage of parasitic water on the level of the collectors of cleansing which are badly managed, pollutes the tablecloths and disturbs the operation of the stations of purification. The intrusion or the extrusion of these waters with variable flow, in the collector, also presents an impact mechanism on the determination of the dominating parameters (speed, height of water) during a transitory mode thus caused and, make often difficult their determination.

On the assumption of an intrusion supposed uniformly distributed along the collector, our work initially consists in modelling this flow, in an approached way, and thereafter with a determination of the couple height – speed while being based on the equations of Saint Venant.

This study is useful primarily not only for the dimensioning of the collectors of cleansing but also for the wedging of the engineering constructions which are necessary to management such as the rain spillways, the by-pass spillways, etc.....

**Key words:** parasitic clear waters, network of cleansing, intrusion of parasitic water, rehabilitation of network of cleansing, law of orifice flow.

## ملخص

تنقل عادة أنظمة الصرف الصحي التي تعاني من سوء الصيانة أو مشاكل تقنية، كميات من المياه المتطفلة التي تأتي عن طريق عدة مسببات صعبة التحديد. وفقا للمراجع ، إن وجود أو تسرب المياه المتطفلة المتواجدة بقنوات الصرف الصحي ذات التسيير السيئ يلوث المياه الجوفية و يعطل عمل محطات التطهير ، كما أن دخول أو خروج هذه المياه بتدفق متغير في القناة يؤثر على تحديد المعالم الراجحة ( السرعة، ارتفاع المياه) خلال النظام الانتقالي الناتج مما يؤدي إلى صعوبة تحديدهم.

على فرضية تسرب موزع بشكل متجانس على طول القناة ، يتضمن عملنا نمذجة هذا التدفق بطريقة تقريبية ثم تحديد الثنائي السرعة- ارتفاع المياه اعتمادا على معادلات Saint Venant.

الفائدة الأساسية لهذه الدراسة ليس فقط تصميم قنوات الصرف الصحي و إنما ضبط المنشآت الضرورية كمصب مياه العواصف و المصب الجانبي...الخ.

**الكلمات الجوهرية :** المياه الصافية المتطفلة، قنوات الصرف الصحي، دخول المياه المتطفلة، إعادة بناء قنوات الصرف الصحي، قانون التدفق عبر فوهة.

## TABLE DES MATIERES

|   |    |
|---|----|
| <b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....  | 1  |
| <b>CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>   |    |
| 1-1 Introduction.....   | 3  |
| 1-2 Travaux antérieurs.....   | 4  |
| 1-2-1 Contexte hydrologique.....  | 5  |
| 1-2-2 Contexte hydraulique.....   | 11 |
| 1-2-3 Contexte Chimique (ou par l'étude de la dilution).....  | 13 |
| A- Méthode des données d'Imhoff.....  | 14 |
| B- Méthode suisse.....  | 15 |
| C- Méthode Horizon ou méthode hybride.....  | 16 |
| 1-3-Conclusion.....   | 17 |
| <b>CHAPITRE 2: PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR<br/>LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT</b> |    |
| 2-1- Introduction.....  | 18 |
| 2-2-Définition des eaux claires parasites.....  | 18 |
| 2-3-Classification des eaux parasites claires (EPC).....  | 19 |
| 2-3-1-Classification par répartition dans l'espace.....   | 19 |
| A-Les eaux parasites claires de captage (EPC).....  | 19 |
| B- Les eaux parasites claires d'infiltration (EPI).....   | 21 |
| 2-3-2- Classification par répartition dans le temps.....  | 22 |
| 2-4 -Origine des eaux parasites claires.....  | 23 |
| 2-4-1-Les erreurs de conception.....  | 24 |
| 2-4-2-les erreurs de réalisation.....   | 24 |
| 2-4-3-Les erreurs de gestion des ouvrages.....  | 24 |
| 2-5-Impact des eaux parasites claires sur le fonctionnement du système<br>d'Assainissement.....     | 30 |
| 2-5-1- Impact des eaux parasites claires sur les réseaux.....                                       | 30 |
| 2-5-2- Impact des ECP sur fonctionnement des ouvrages épuratoires.....                              | 33 |



|  |    |
|--|----|
| 2-5-3- Impact des eaux parasites claires sur la qualité des milieux naturels.....                                      | 33 |
| 2-5-4-Les impacts financiers de la présence d'eaux claires parasites.....  | 34 |
| 2-6-Les études diagnostics des réseaux d'assainissement et les solutions palliatives au<br>eaux claires parasites..... | 34 |
| 2-6-1-Méthodologie des études diagnostics.....   | 34 |
| • Première phase.....  | 34 |
| • Deuxième phase.....  | 35 |
| • Troisième phase.....   | 35 |
| 2-6-2-Les solutions aux eaux claires parasites.....  | 36 |
| A- Interventions sur les réseaux.....  | 37 |
| B- Interventions au niveau de la station d'épuration.....  | 38 |
| 2-7-Conclusion.....  | 38 |

### **CHAPITRE 3 : MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT**

|   |    |
|---|----|
| 3-1-Introduction.....   | 39 |
| 3-2-Facteurs influençant le débit d'intrusion d'ECP.....  | 40 |
| 3-2-1-Coefficient de vitesse : $C_v$ .....  | 40 |
| 3-2-2-Coefficient de contraction : $C_c$ .....  | 42 |
| 3-2-3-Coefficient de viscosité.....   | 42 |
| 3-2-4-Coefficient de colmatage ( $C_{cl}$ ).....  | 43 |
| 3-3-Proposition d'une Modélisation du débit d'infiltration d'eaux claires parasites<br>(ECP)..... | 43 |
| 3-3-1-Cas de l'infiltration.....  | 43 |
| 3-3-2-Cas de l'exfiltration.....  | 46 |
| 3-4-Conclusion.....   | 47 |

### **CHAPITRE 4 : MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS INFLUENCE DU DEBIT D'INTRUSION MODELISE**

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 4-1- Introduction.....               | 48 |
| 4-2- Hypothèses et équations.....    | 48 |
| 4-2-1- l'équation de continuité..... | 49 |

|   |           |
|---|-----------|
| 4-2-2- L'équation dynamique.....  | 53        |
| 4-3-Conclusion.....   | 58        |
| <b>CHAPITRE 5 : METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE</b>   |           |
| 5-1- Introduction.....  | 59        |
| 5-2-Equations aux caractéristiques.....   | 59        |
| 5-3 -Solution généralisée du régime transitoire.....  | 61        |
| 5-4- Différentes méthodes.....  | 63        |
| 5-4-1-Méthode des caractéristiques.....   | 63        |
| 5-4-2 - Méthode des différences finies.....   | 65        |
| 5-4-2-1-schéma explicite.....   | 66        |
| a-Schéma de Lax-Wendroff .....  | 66        |
| b- Schéma de Mac- Cormack .....   | 69        |
| c- Schéma de Mortti's Lamda .....   | 69        |
| d- Schéma de Gabutti .....  | 70        |
| 5-4-2-2-Schéma Implicite .....  | 71        |
| 5-4-3 -Méthodes des éléments Finis.....   | 72        |
| 5-5-Conclusion.....   | 74        |
| <b>CHAPITRE 6 : PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION<br/>LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE</b> |           |
| 6-1-Introduction.....   | 75        |
| 6-2-Système d'équations de base.....  | 76        |
| 6-3-Interpolation numérique.....  | 78        |
| 6-4 – Interpolation temporelle.....   | 81        |
| 6-5-Interpolation spatiale.....   | 84        |
| 6-6-Détermination de l'erreur due à l'interpolation temporelle.....   | 84        |
| 6-7-Amortissement numérique.....  | 85        |
| 6-8- . La dispersion numérique.....   | 89        |
| 6-9- Conclusion.....  | 94        |
| <b>CONCLUSION GENERALE.....</b>   | <b>95</b> |
| Références bibliographiques.....  | 97        |
| Annexe .....  | 100       |

## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1-1 : Schéma descriptif de l'état des canalisations influencées par l'exfiltration ou l'infiltration des eaux parasites..... | 8  |
| Figure 1-2 : Autres types de défauts d'étanchéité.....  | 9  |
| Figure 1-3 : Organigramme du modèle SEPI1, Belhadj (1994).....  | 10 |
| Figure 1-4 : Profil en travers du tissu urbain schématisé par BERTHIER(1999) pour modéliser la transformation pluie/débit.....      | 12 |
| Figure 2-1: Types de fissurations des collecteurs d'assainissement.....   | 23 |
| Figure 2-2: Exemple de fissure circulaire relevée sur un réseau d'assainissement d'après Biseau et al. (1991).....                  | 25 |
| Figure 2-3 : Exemple de joints déboîtés d'après Biseau et al. (1991).....   | 25 |
| Figure 2-4: Déformation d'une conduite fissurée sous l'influence de l'infiltration et de l'exfiltration (WEF, 1994).....            | 28 |
| Figure 2-5: Affaissement d'une conduite sous l'influence de l'infiltration et de l'exfiltration (WEF, 1994).....                    | 29 |
| Figure 2-6: Types de défauts d'emboîtement et de déboîtement au niveau des collecteurs .....  | 30 |
| Figure 3-1 : Différents valeurs de K en fonction du type de sol.....  | 41 |
| Figure 3-2 : Intrusion des eaux parasites a travers la fissure.....   | 44 |
| Figure 4-1 : tronçon de collecteur avec débit d'intrusion.....  | 49 |
| Figure 4-2- Section mouillée dans un collecteur d'assainissement.....   | 51 |
| Figure 4-3- Représentation d'une trajectoire d'un filet liquide .....   | 54 |
| Figure 5-1 : Représentation du régime transitoire dans un collecteur.....   | 61 |
| Figure 5-2 : Variation de la fonction « F ».....  | 61 |
| Figure 5-3 Schéma de la méthode des caractéristiques.....   | 64 |
| Figure 5-4 : Schéma de Lax- Wendroff.....   | 67 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 6-1 : Représentation du maillage de discrétisation .....                                  | 77 |
| Figure 6-2 : Interpolation entre deux points.....  | 82 |
| Figure 6-3 : amortissement numérique R1, en fonction de $\epsilon$ , $T=0,1\text{sec}$ .....     | 86 |
| Figure 6-4 : amortissement numérique R1, en fonction de $\epsilon$ , $T=0,125\text{sec}$ .....   | 87 |
| Figure 6-5 : amortissement numérique R1, en fonction de $\epsilon$ , $T=0,01\text{sec}$ .....    | 87 |
| Figure 6-6:amortissement numérique R1, en fonction du nombre de pas de l'espace<br>jk ,m=2.....  | 88 |
| Figure 6-7 : amortissement numérique R1, en fonction du nombre de pas de l'espace<br>jk,m=4..... | 88 |
| Figure 6-8 : dispersion numérique, $\epsilon=0,1$ ; m variable.....                              | 91 |
| Figure 6-9 : dispersion numérique, pour m=0,1 ; $\epsilon$ variable.....                         | 91 |
| Figure 6-10 : dispersion numérique, pour $\epsilon=0,75$ ; m variable.....                       | 92 |
| Figure 6-11 : dispersion numérique, pour $\epsilon=0,25$ ; m variable.....                       | 92 |
| Figure 6-12 : dispersion numérique, $\epsilon=0,9$ ; m variable.....                             | 93 |

## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1-1 : Comparaison des différents modèles hydrologiques des eaux parasites dans les réseaux séparatifs ou unitaires.....    | 6  |
| Tableau 1-2 : Type et nombre de défauts recensés sur un échantillon représentant un linéaire de 49281km (CSTB et AGHTM, 1989)..... | 7  |
| Tableau 2-1 : Eaux considérées comme de captage pénétrant dans divers réseaux.....   | 18 |
| Tableau 2-2: Classification des ECP en fonction du temps de réponse à la pluie (LROP, 1981).....                                   | 20 |
| Tableau 2-3 : Les facteurs qui influencent la dégradation structurelle des réseaux d'assainissement d'après Davies (2001).....     | 23 |
| Tableau 3-1 : Ordre de grandeur de la viscosité en fonction de la température.....   | 37 |

## NOMENCLATURE

- $a$  : La célérité d'onde (m /s) ;
- $C_v$  : Coefficient de vitesse ;
- $C_c$  : Coefficient de contraction ;
- $C_{vis}$  : Coefficient de viscosité ;
- $C_{cl}$  : Coefficient de colmatage ;
- $D$  : Diamètre de la section transversale du collecteur (m) ;
- $h$  : Hauteur d'eau dans le collecteur (m) ;
- $\Delta h$  : Perte de charge a travers le drain (m) ;
- $i$  : Pente du collecteur ;
- $j$  : Perte de charge linéaire de l'écoulement ;
- $k$  : Perméabilité du sol (m/s) ;
- $Q_{ex}$  : Débit d'extrusion d'eaux ( $m^3 S^{-1}$ ) ;
- $Q_{int}$  : Débit d'intrusion d'eaux claires parasites ( $m^3 S^{-1}$ ) ;
- $r$  : Rayon de la section transversale du collecteur (m) ;
- $S_o$  : Surface de l'orifice ( $m^2$ ) ;
- $S_m$  : Section mouillée de la conduite d'assainissement ( $m^2$ ) ;
- $V$  : Vitesse d'écoulement (m/s) ;
- $Z$  : Cote du radier (m) ;
- $\xi$  : Paramètre de forme ;
- $\rho$  : Masse volumique de l'eau ( $Kg /m^3$ ).

## INTRODUCTION GENERALE

Les réseaux d'assainissement ont deux fonctions : l'évacuation et la collecte des effluents .L'évacuation doit permettre d'éloigner d'une part, les eaux usées pour des raisons sanitaires, et d'autre part les eaux pluviales pour la protection des biens et des personnes .la collecte doit permettre de rassembler toutes les eaux polluées pour les rejeter, en général après un traitement approprié dans des conditions qui n'affectent pas le milieu récepteur.

Comme tout réseau technique urbain, les réseaux d'assainissement sont en interaction permanente avec leur environnement. Suite à des perturbations géotechniques (tassement, érosion,...), un ouvrage enterré peut subir des dégradations structurelles : déformation de sa géométrie, fissurations, déboîtements, effondrement de radier, etc. Inversement les défauts générés par l'environnement d'un collecteur ont un impact nocif sur ce dernier en raison de l'exfiltration d'effluents qui entraîne un risque de contamination des sols, des eaux souterraines et des eaux de surface, et en raison de l'infiltration d'eaux claires parasites qui augmente la fréquence des surverses et diminue le rendement des stations d'épuration par la dilution des effluents bruts.

De nombreuses publications font l'état de la dégradation des équipements urbains et soulignent la crise des infrastructures qui touche l'ensemble des réseaux vétustes.

Présentée comme le résultat d'un vieillissement avancé et/ou d'un mauvais entretien, la dégradation des réseaux est illustrée dans les pays par des chiffres alarmants et perçue comme une menace pour le développement futur des villes. Dans certains pays , depuis les années 1980, des études nombreuses ont démontré la dégradation des performances de traitement des stations d'épuration. Elles ont abouti par ailleurs au constat d'un sur-volume d'eau dans le cas des réseaux séparatifs. Ce sur-volume, qui ne peut s'expliquer uniquement par l'apport des eaux usées de temps sec, serait dû à la présence d'eaux claires parasites dans le réseau (infiltrations d'une part, et raccordements de collecteur d'eaux usées avec le réseau d'eaux pluviales non conformes d'autre part).

C'est dans ce contexte que de nombreuses recherches sont engagées et que des mesures sont prises visant à enrayer les manifestations de ces phénomènes. Commençant par la mise en place du diagnostic du réseau d'assainissement puis par la quantification et la modélisation des apports d'eaux claires parasites.

Notre travail s'inscrit dans cette problématique et s'appuie, donc, en premier lieu sur une étude bibliographique ou une synthèse des connaissances acquises sur les processus qui régissent ces phénomènes.

Dans une seconde partie, nous exposons des généralités sur les problèmes d'intrusion des eaux parasites pour les classer selon différentes catégories faisant référence à leur variabilité spatiotemporelle. Il est à signaler également leur impact sur les systèmes d'assainissement.

Pour solutionner ce problème compliqué, une modélisation du débit d'intrusion d'eaux claires parasites sera proposée pour pouvoir modéliser l'écoulement d'eau dans le collecteur d'assainissement ; et nous terminons ce travail par une présentation des différentes méthodes numériques adéquates à la solution du régime transitoire.



# Chapitre 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION  
DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

### **1-1-Introduction :**

Le système d'assainissement est l'ensemble des éléments qui interviennent dans l'action d'évacuation des eaux usées et ou pluviales (réseau unitaire ou séparatif), en commençant par les éléments de collecte (collecteurs), pour arriver aux éléments de transfert et de traitement (stations d'épuration).

On considère comme eaux claires parasites (ECP), l'ensemble des eaux non polluées parvenant de manière incontrôlable dans le réseau d'assainissement. Ces eaux dont l'écoulement est constant ne doivent pas être véhiculées dans les collecteurs, directement à une station d'épuration.

La présence d'eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement pose de nombreux problèmes. En effet, ces eaux diminuent l'efficacité de la station d'épuration des eaux usées (STEP) et accroissent ainsi les charges polluantes rejetées, tout en augmentant les coûts d'exploitation.

Les réseaux d'assainissement, quelque 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.

Certains modèles de conception existants déjà, sont élaborés pour standardiser la quantification des volumes d'eaux parasites. Ils ont été transposés sur plusieurs sites et leurs procédures d'optimisation ont été améliorées. Utilisés également comme outil de dimensionnement, ces modèles peuvent être utilisés pour caractériser et comparer des sites, ou pour les suivre dans le temps.

Dans un cas particulier, les modèles en question ont permis de mettre en évidence l'inefficacité, en termes de débit à l'exutoire, de travaux d'étanchéification. L'approche hydrologique n'étant pas suffisante pour prévoir ou expliquer ces inefficacités, une approche plus physique du phénomène de l'infiltration a été développée.

Cette approche hydraulique consiste en une modélisation des écoulements en milieu poreux à l'échelle du tronçon, en régime permanent et saturé. Les défauts d'étanchéité sont schématisés par des puits de petits diamètres dont le débit suit une loi, dépendant de la charge hydraulique à proximité du défaut.

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

Les écoulements dans le milieu poreux, des limites du système vers le voisinage des défauts, sont modélisés à l'aide de la loi de Darcy et de l'hypothèse de Dupuit. L'étude du modèle, par la relation défaut-milieu poreux, a mis en évidence plusieurs modes de fonctionnement selon la prépondérance des pertes de charge dues au milieu poreux ou au défaut. L'étude des interrelations entre défauts a permis de définir la notion de report de débit et de montrer l'existence de ce report dans un cas particulier de sol limitant.

Le mesurage de l'infiltration des eaux parasites dans les réseaux d'assainissement permet d'évaluer les différents impacts, leur appréciation pouvant permettre à un gestionnaire de mettre en œuvre les actions nécessaires pour maintenir ou améliorer la performance technique, environnementale et économique de son système d'assainissement.

On peut donc apprécier l'intérêt d'utiliser les eaux parasites comme indicateur pour l'aide à la décision en matière de réhabilitation des réseaux d'assainissement, il est nécessaire de réaliser une synthèse des connaissances acquises sur les processus qui régissent ces phénomènes et un recensement des méthodes de mesurage développées à ce jour.

### **1-2- Travaux antérieurs:**

Au début des études de recherche sur les eaux parasites, les chercheurs scientifiques s'intéressaient à ce problème en tant que anomalie dans les réseaux d'assainissement qui favorise la détérioration de ce dernier, mais par la suite on s'intéressait plutôt à détecter la provenance de ces eaux, à les quantifier et aussi à proposer des solutions pour lutter contre leurs conséquences. Dans ce contexte, Catherine Triantafillou (1987), a étudié la dégradation et la réhabilitation des réseaux d'assainissement.

Dans ce domaine Les travaux antérieurs se sont surtout axés sur les méthodes de modélisation des eaux parasites notamment celle hydrologique, leur quantification et leur limitation ou leur élimination efficace.

La quantification est évidente pour la phase de diagnostic mais elle est sous-tendue quand il s'agit de dimensionnement ou d'efficacité des actions engagées ; elle repose sur une approche descriptive, du type hydrologique car elle dépend directement du contexte climatique. Quant aux problèmes d'élimination et d'efficacité, ils reposent sur une approche

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

plus physique, de type hydraulique ainsi après quelques éléments bibliographiques propres à chaque approche, nous fixerons les objectifs détaillés de ce travail de recherche.

### **1-2-1- Contexte hydrologique :**

La manière la plus directe de quantifier les eaux parasites est la mesure du débit brut auquel on soustrait le débit estimé d'eaux usées. Mais devant la forte variabilité temporelle des débits d'eaux parasites d'infiltration, à différentes échelles de temps (de l'échelle inter-horaire, à l'échelle interannuelle), de simples campagnes de mesures, sur quelques semaines, ne suffisent pas à caractériser les eaux parasites.

Ainsi, une des difficultés est de caractériser cette forte variabilité en fonction de la principale donnée : la pluie mais la relation pluie/débit n'est pas évidente. Le réseau garde en mémoire l'histoire hydrologique du site : les débits d'eaux parasites ne dépendent pas seulement des pluies précédant de quelques heures, mais aussi des événements antérieurs plus anciens (quelques jours ou quelques semaines). [1]

Pour modéliser les débits d'eaux parasites provenant plus ou moins directement de la pluie, différents modèles hydrologiques, du type conceptuel, à réservoirs, ont été développés au cours de cette dernière décennie. (Tableau 1-1)

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS  
D'EAUX PARASITES**

|                                  | <b>Australie</b>  | <b>Canada</b>  | <b>Suède</b>   | <b>France</b>   |
|----------------------------------|---|--|--|---|
| Nom                              | Rorb  | Othymo   | Nam  | SEPII   |
| Auteurs                          | Mein et<br>Apostolidis  | Wisner et al   | Gustafsson et al   | Belhadj et al   |
| Publication                      | 1993  | 1993   | 1991   | 1994  |
| Nb de<br>réservoirs              | 2   | 3  | 4  | 3   |
| Nb<br>paramètres                 | 3 ou 4  | /  | 13   | 6   |
| Type de<br>réseau                | Séparatif   | Unitaire et<br>sem1-<br>séparatif  | Unitaire et<br>séparatif                                       | Séparatif   |
| Composantes<br>du<br>Débit total | Eaux usées<br>Eaux de captage<br>Drainage lent<br>Drainage rapide           | Eaux usées<br>Pluvial direct<br>Pluvial<br>indirect                                | Eaux usées<br>Pluvial direct<br>Pluvial indirect               | Eaux usées<br>Eaux de<br>captage<br>Drainage lent<br>Drainage<br>rapide |
| Application                      | BV de 67 km <sup>2</sup> ,<br>Divisé en 20<br>Sous bassins                  | BV de 10<br>km <sup>2</sup>  | Nombreux BV,<br>1 km <sup>2</sup> à 250<br>km <sup>2</sup>     | Petits BV (0.1<br>et 0.3 km <sup>2</sup> )                              |
| Remarques                        | Modèle simple,<br>Mais fonctionne<br>Pour des événements<br>Pluvieux isolés | Modèle peu<br>détaillé et<br>distinction<br>entre les<br>composantes<br>peu clairs | Modèle très<br>complet, mais<br>difficile à<br>mettre en œuvre | Modèle en<br>cours de<br>développement                                  |

Tableau 1-1 : Comparaison des différents modèles hydrologiques des eaux parasites dans les réseaux séparatifs ou unitaires. [2]

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES

L'étude bibliographique montre que des enquêtes sont menées par l'AGHTM (1989) pour mieux connaître l'état structurel et fonctionnel des réseaux d'assainissement. Pour tout type de réseau pris en compte, il a été recensé qu'auprès de 1106 gestionnaires, pour un linéaire total de 49281 km, le nombre de défauts observés sur cet échantillon du patrimoine réseaux d'assainissement est représenté dans le tableau 1-2.

| Défauts ou dégradations | Nombre | Pourcentage |
|-------------------------|--------|-------------|
| Obstacle pénétrant      | 42     | 10,8        |
| Eaux parasites          | 114    | <b>29,3</b> |
| Exfiltration            | 39     | <b>10,0</b> |
| Ensablement             | 22     | 5,7         |
| Affaissement            | 25     | 6,4         |
| Ecrasement              | 17     | 4,4         |
| Corrosion               | 24     | 6,2         |
| Rugosité                | 17     | 4,4         |
| Abrasion                | 8      | 2,0         |
| Fissuration             | 60     | 15,4        |
| Contre pente            | 21     | 5,4         |
| Total                   | 389    | 100         |

Tableau 1-2 : Type et nombre de défauts recensés sur un échantillon représentant un linéaire de 49281 km. [3]

Selon le tableau 1-2 près de 40 % des défauts décrits sont dus aux infiltrations et aux exfiltrations observées. Le mesurage des eaux parasites constitue donc un indicateur de l'état structurel des réseaux d'assainissement qui peut permettre de définir des stratégies de réhabilitation pour d'une part préserver l'intégrité structurelle des réseaux d'assainissement existants, et d'autre part réduire ou éviter les risques d'impact de l'infiltration de ces eaux dans les milieux naturels. (figure1-1 et figure 1-2)

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**


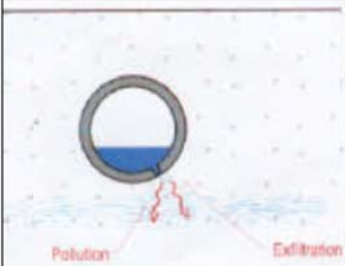
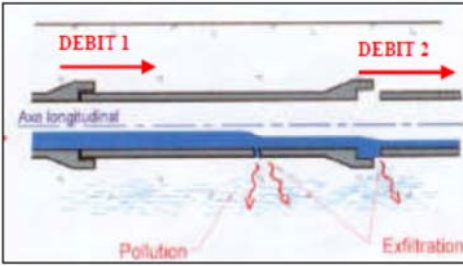
| Nom   | Matériaux affectés   | Schéma descriptif  |  |
|---|--|--|--|
| Infiltration => ruissellement - jaillissement | ⇒ Structure : canalisation en béton (et maçonnerie)<br>⇒ Joints : toutes natures |  |  |
| Exfiltration                                  | Tous matériaux et assemblages présentant des défauts d'étanchéité                |   |  |

Figure 1-1 : Schéma descriptif de l'état des canalisations influencées par l'exfiltration ou l'infiltration des eaux parasites.

Dans leurs travaux de recherche, Wisner et al (1993), Gustafson et al (1991) se sont intéressés d'abord aux réseaux séparatifs par la suite aux réseaux unitaires. [4]

Belhadj (1994) a établi Le modèle SEPI1 qui a été utilisé pour des petits bassins versants alors que les deux autres ont été appliqués à des bassins de plusieurs km<sup>2</sup>. Ces derniers ont été également couplés à des modèles hydrauliques d'écoulement en conduite pour pouvoir assembler les sous bassins versant d'une grande ville. Mais ils prennent en compte des degrés de complexité différents d'un modèle assez simple créé par Mein et Apostolidis (1993), qui ne fonctionne que sur des événements pluvieux isolés, à un modèle plus complet et donc plus complexe celui de Gustafsson et al. (1991), qui utilise un grand nombre de paramètres.

Le modèle SEPI1 reste plus spécifique au réseau séparatif et aux infiltrations, et à priori aux petits bassins versants.

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

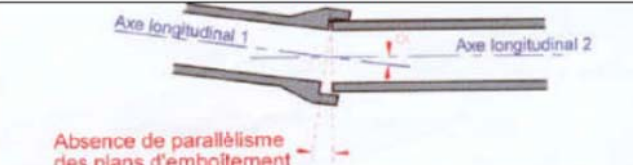
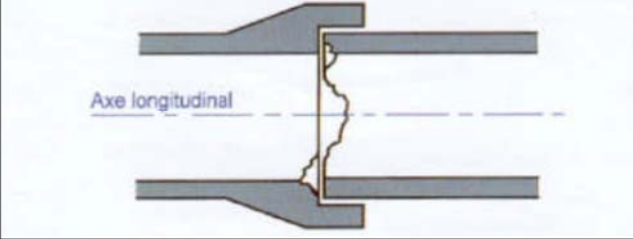

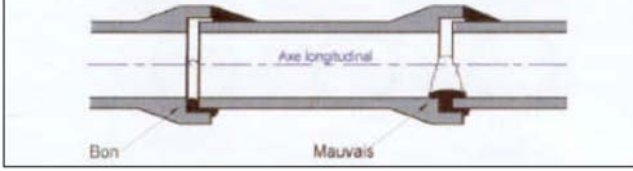
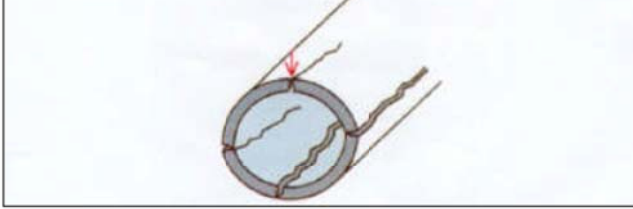
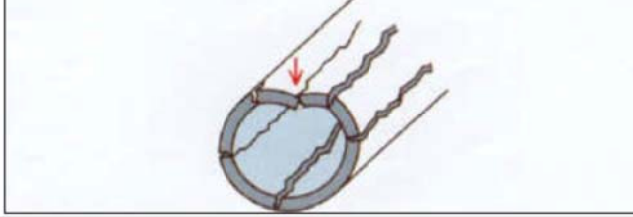
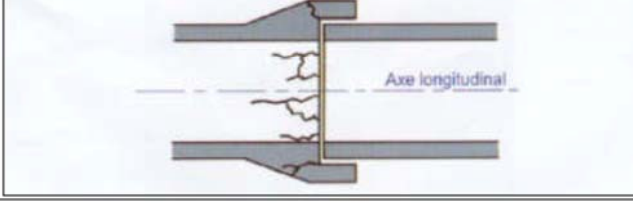
| Nom   | Matériaux affectés   | Schéma descriptif   |
|---|--|---|
| Déviation angulaire   | ⇒ Tous matériaux assemblés par emboîtement<br>⇒ Défaut majeur pour les tuyaux en béton |  <p>Axe longitudinal 1</p> <p>Axe longitudinal 2</p> <p>Absence de parallélisme des plans d'emboîtement</p> |
| Epaufiture  | Tuyaux en béton, béton armé, amiante ciment, revêtement de tuyaux en fonte             |  <p>Axe longitudinal</p>  |
| Joints défectueux / Elastomère                                    | Tous matériaux assemblés avec des joints élastomères                                   |  <p>Joint resté dans l'emboîture</p> <p>Joint sorti de son logement</p> <p>Joint pendante</p>               |
| Joints défectueux / mortier, corde imprégnée...                   | Tous matériaux assemblés avec des joints réalisés in situ                              |  <p>Axe longitudinal</p> <p>Bon</p> <p>Mauvais</p>   |
| Ecrasement vertical ou latéral                                    | Tous matériaux   |   |
| Affaissement de voûte (ovalisation des canalisations circulaires) | Tous matériaux   |   |
| Eclatement  | Tous matériaux notamment le béton armé et le grès                                      |  <p>Axe longitudinal</p>  |

Figure 1-2- Autres types de défauts d'étanchéité.



**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

Il distingue plus précisément les eaux parasites d'infiltration, qu'il modélise, des eaux parasites de captage et des eaux usées, qu'il estime à l'aide des méthodes sommaires ; il se concentre donc uniquement sur le phénomène d'infiltration par les défauts d'étanchéité.

Jusqu'ici, ce modèle a été développé et calé, mais sa validation sur plusieurs sites reste à faire.

Le modèle SEPI1 est conceptuel à 3 réservoirs et 6 paramètres (figure 1-3) et s'inspire des modèles hydrologiques pluie/débit connus, en particulier du type GR2 mis au point par Michel et Edijatno, (1989). Il fonctionne au pas de temps horaire ou journalier.

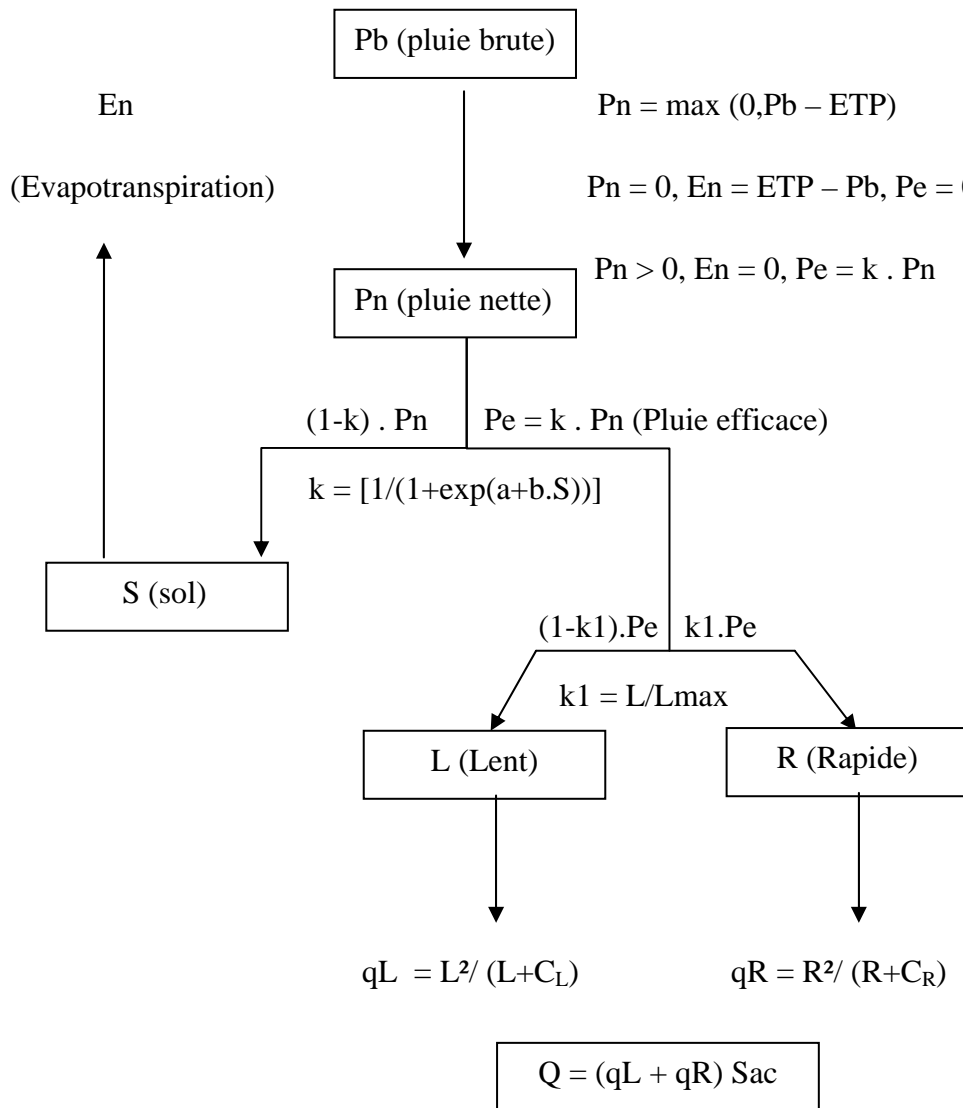


Figure 1-3 : Organigramme du modèle SEPI1, Belhadj (1994). [5]

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

Le modèle SEPI1 permet de quantifier des volumes d'eaux parasites d'infiltration, à partir de chroniques de pluie et d'évapotranspiration potentielle. Ce modèle fonctionne au pas de temps horaire, mais il peut aussi fonctionner à différents pas de temps (6h, 12h ou 24h).

Les résultats du calage sont indépendants du critère d'ajustement et de la méthode d'optimisation, au moins pour le site étudié par Belhadj.

Par ailleurs, une période de 3 mois (au pas de temps horaire) permet de caler correctement le modèle, à condition que la période soit représentative des différents contextes hydrologiques.

Mais ce type de modèle reste très descriptif et ne permet pas de répondre à toutes les questions ni de résoudre tous les problèmes d'infiltration. En effet s'il permet de réaliser en grande partie la phase de diagnostic, il ne permet pas toujours de choisir les bonnes solutions, et surtout de prévoir l'efficacité des actions à engager. [5]

### **1-2-2 -Contexte hydraulique :**

Dans le contexte hydraulique, Pour aborder le choix des bonnes solutions ou l'efficacité des actions à engager, il est nécessaire d'avoir une approche plus explicative du phénomène d'infiltration et notamment de l'élimination ou de la limitation des infiltrations.

Physiquement il serait intéressant de savoir quel est le rôle des différents éléments du système : sol, tranchée, défauts d'étanchéité ; et en particulier comment ils limitent l'infiltration.

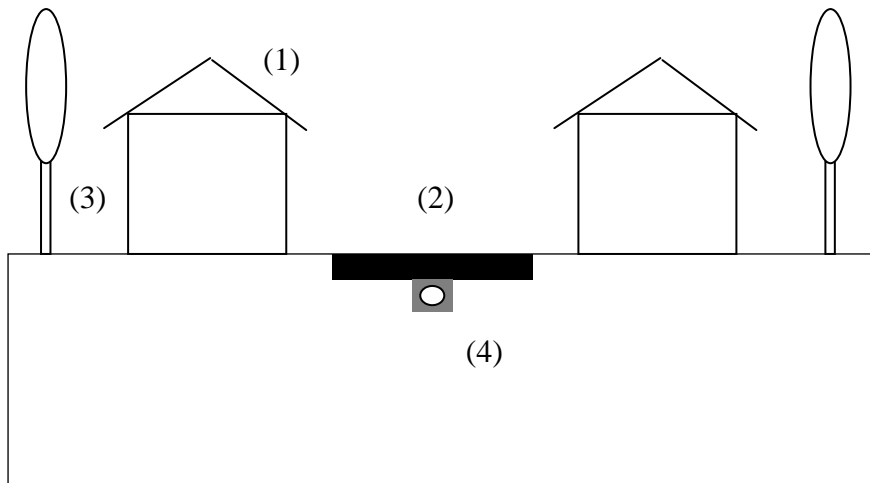
De plus cette question est intimement liée à la problématique de l'efficacité des travaux d'étanchéification. En effet, l'évaluation de cette efficacité est d'autant plus difficile après réhabilitation qu'il serait beaucoup plus intéressant, pour le maître d'ouvrage, de pouvoir l'estimer avant d'engager ces travaux.

Le fonctionnement hydraulique de système drainant ou infiltrant a été abordé par quelque domaines différents : en milieu urbain ou rural.

D'un point de vue physique, l'infiltration dans les réseaux, en milieu urbain, est assez peu étudiée. Quelques travaux émergent néanmoins BERTHIER (1999) et GOMIS (1998), dont les objectifs principaux ne sont pas toujours l'étude des eaux parasites.

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES

BERTHIER, dans son approche physique de la transformation pluie/débit en milieu urbain, modélise le bassin versant par un profil en travers constitué d'un milieu poreux (le sol), de surfaces perméables (pelouses) et imperméables (toitures ou chaussées) et d'un réseau. (figure 1-4). [6]



- (1) Toiture imperméable
- (2) Chaussée peu perméable
- (3) Surface naturelle très perméable
- (4) Tranchée d'assainissement (drainage du sol)

Figure 1-4: Profil en travers du tissu urbain schématisé par BERTHIER(1999) pour modéliser la transformation pluie/débit.

Les écoulements en milieu poreux non saturés sont modélisés numériquement à l'aide d'un code de calcul aux éléments finis (CESAR du LCPC).

L'entrée du modèle est la pluie et, la sortie est le débit évacué sous forme de ruissellement et d'infiltration dans le réseau. Ce dernier est schématisé par une surface de suintement, générant un débit lorsque le niveau de saturation du sol est au dessus du réseau. Le mécanisme d'infiltration mis ainsi en évidence est plus proche de celui d'un drain que de celui d'un défaut d'étanchéité. Par ailleurs, ce modèle ne permet pas d'aborder la dimension longitudinale du réseau, et donc d'éventuelles interactions longitudinales, en partie à l'origine de notre problème.

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

Plus proche de nos préoccupations, Gustafsson et Winberg (1995) ont utilisé un modèle complexe mais assez complet (Mike SHE) pour résoudre un problème pratique directement lié aux infiltrations dans les réseaux.

Dans le cas d'une petite commune suédoise (250 habitant) la présence importante d'eaux parasites dans le réseau d'assainissement empêchaient le bon fonctionnement de la station d'épuration (arrêt fréquent en période hivernale à cause des surcharges hydrauliques). Des travaux de réhabilitation sur environ 70% du réseau se sont avérés quasiment inefficaces.

L'étanchéification d'une partie du réseau a été compensée par une montée du niveau de la nappe, apportant ainsi plus d'eau aux défauts non étanchés. Pour résoudre ce problème, Gustafsson et Winberg proposent de mettre en compétition avec le réseau d'assainissement un réseau de drainage, permettant de rabattre la nappe et de réduire ainsi les infiltrations dans le réseau d'assainissement de 75%.

Selon Mike SHE, les infiltrations sont modélisées par un débit (fonction linéaire de la charge hydraulique) soutiré dans chaque maille du modèle ou le réseau est présent. Ainsi ce modèle permet de mettre en compétition deux types de réseaux drainants au sein d'un bassin versant. Mais il reste difficile de mettre en œuvre un grand nombre de paramètres puisque le mécanisme d'infiltration dans les réseaux est modélisé grossièrement par des mailles de 400m<sup>2</sup>.

### **1-2-3-Contexte Chimique (ou par l'étude de la dilution) :**

La présence d'eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement provoque une diminution de la concentration des polluants dans les eaux usées en raison de la dilution des effluents.

La mesure de la teneur en polluants dans les eaux usées peut permettre de reproduire le cycle journalier des apports d'eaux usées strictes caractérisés généralement par deux périodes de pointe respectivement en début de soirée et de matinée. En effet, la teneur en polluants observe les mêmes variations que le débit total mesuré.

Selon la méthode chimique utilisée, le débit d'eaux usées strictes est évalué :

- A l'échelle journalière en considérant des valeurs de référence du rejet moyen journalier de polluants par habitant : méthode des données d'Imhoff ;

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

- En continu par l'utilisation de capteurs spécifiques in situ ou par analyse sur des échantillons successifs d'eaux usées : méthode suisse ;
- A l'échelle des périodes diurne et nocturne par comparaison du débit moyen total et des teneurs moyennes en polluants durant ces deux périodes respectives : méthode hybride ou méthode horizon.

Les méthodes chimiques reposent sur les hypothèses que le débit d'eaux claires parasites et la teneur de certains polluants dans les eaux usées strictes restent constants au cours d'une journée et que la pollution véhiculée par ces eaux est négligeable.

Le choix des polluants ou des espèces chimiques dépend des conditions suivantes :

- Procédure d'analyse simple (en laboratoire ou en continu par des capteurs spécifiques) ;
- Absence de dégradation biologique dans les réseaux d'assainissement ;
- Absence ou présence de ces polluants en quantité négligeable dans les eaux parasites et dans les eaux potables ;
- Flux journalier de polluant constant.

### **A- Méthode des données d'Imhoff :**

Les données d'Imhoff reposent sur une analyse statistique des rejets d'eaux usées strictes qui permet de définir des valeurs moyennes de rejets journaliers par habitant. En comparant ces valeurs théoriques, dites aussi « ratio standard » ou « concentration standard », avec celles mesurées en réseau d'assainissement, on peut en déduire le débit d'eaux claires parasites (ECP). [7]

#### **➤ Avantages et inconvénients :**

La méthode des données d'Imhoff est très simple à appliquer. Cependant les résultats obtenus sont très approximatifs. En effet le choix de valeurs de référence fixes pour les rejets moyens journaliers par habitant ne prend pas en compte la variabilité du débit journalier d'eaux usées strictes.

L'inconvénient de cette méthode réside dans l'hypothèse que les ECP ont une teneur en polluants négligeable. En effet, les eaux souterraines susceptibles de s'infiltrer pourraient

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES

présenter une teneur en polluants non négligeable en raison de l'exfiltration d'eaux usées et des diverses sources de recharges des aquifères urbains.

### **B-Méthode suisse :**

Selon Hager et al. (1985), l'estimation du débit d'ECP repose sur une analyse couplée des hydrogrammes et pollutogrammes obtenus par la mesure en continu des paramètres suivants : [8]

- Le débit journalier de temps sec  $Q_T$  ( $m^3/h$ ) ;
- La concentration en polluant :  $C_T$  : (g/l).

L'analyse de ces séries de données permet de déterminer les différentes variables qui sont utilisées pour le calcul du débit d'eaux claires parasites :

- Le débit total moyen journalier en temps sec :  $Q_T, m$  ( $m^3/h$ ) ;
- Le débit total minimum journalier en temps sec :  $Q_T, \min$  ( $m^3/h$ ) ;
- La concentration moyenne journalière en polluant :  $C_T, m$  (g/l) ;
- La concentration minimum journalière en polluant :  $C_T, \min$  (g/l) ;
- Le flux de polluant ou le débit massique :  $S$  (kg/h).

### ➤ **Avantages et inconvénients :**

La méthode suisse développée par Hager *et al.* (1985) n'utilise pas de valeur de référence du rejet journalier moyen de polluants par habitant, une enquête pour le recensement des habitants n'est donc pas nécessaire.

Les auteurs préconisent des conditions favorables pour l'utilisation de cette méthode et donnent quelques conseils pratiques :

- Période préférentielle : soit avril-octobre en excluant les jours de vacances, soit en hiver si ce dernier est sec.
- Choix des jours : le samedi et le dimanche ;
- Choix des nuits : samedi à dimanche et de dimanche à lundi ;
- Bien différencier les bassins versants ;
- Vérifier l'absence d'apports industriels,

En raison du protocole expérimental qui nécessite des mesures en continu des polluants ou de nombreux prélèvements, cette méthode est difficilement applicable dans le cadre d'une étude diagnostic de réseau d'assainissement, ainsi que pour l'estimation des eaux parasites claires sur le long terme.

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES

### **C-Méthode Horizon ou méthode hybride :**

Cette méthode a été utilisée au cours d'une étude diagnostic réalisée par le bureau d'étude Horizon (1992) sur le bassin versant Pierre-Bénite (Grand Lyon). La méthode Horizon est intéressante car le rapport nyctéméral déterminé classiquement à partir de mesures de débit est aussi calculé à partir de mesures de polluants.

Des échantillons moyens diurnes et nocturnes sont constitués pour la mesure de polluants, généralement DCO et DBO. [9]

#### ➤ **Avantages et inconvénients :**

Les propriétés de la méthode Horizon sont voisines de celles de la méthode chimique développée par Hager *et al.* (1985), l'avantage principal étant de ne pas utiliser de valeur de référence du rejet journalier par habitant.

Cependant, l'application de la méthode Horizon ne nécessite pas un protocole d'échantillonnage complexe puisque seuls deux échantillons moyens prélevés respectivement sur une période diurne et une période nocturne choisie soigneusement sont nécessaires.

A l'instar de la méthode de Hager *et al.* (1985), la méthode Horizon présente un inconvénient lié à l'hypothèse que la teneur en polluant est négligeable dans les eaux parasite claires (ECP). [10]

## **ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA MODELISATION DES ECOULEMENTS D'EAUX PARASITES**

### **1-3-Conclusion :**

Les différentes méthodes présentées dans ce chapitre reposent sur la soustraction d'un débit estimé d'eaux usées strictes au débit total par temps sec. Le débit d'eaux usées strictes ou domestiques est apprécié soit à partir des relevés de consommation d'eau potable, soit à partir de données de débit en nappe basse, soit en fonction du nombre d'habitants connectés au réseau, soit à partir de mesures de polluants, soit en fonction des caractéristiques du réseau étudié. Les hypothèses de calcul sont plus ou moins différentes et plus ou moins approximatives en raison de la non prise en compte de la variabilité des apports d'eaux usées strictes, et de l'utilisation de valeurs de référence définies empiriquement en fonction des caractéristiques du réseau d'assainissement étudié.

En conclusion, il existe de nombreuses méthodes pour estimer les ECP (eaux claire parasites), mais aucune n'est parfaite et ne peut être généralisée pour tous les contextes. Toutefois, on peut utiliser simultanément certaines de ces méthodes sur un même site en fonction de la diversité et de la nature des données disponibles.

L'intérêt d'appliquer simultanément plusieurs méthodes est que les différentes estimations obtenues permettent de mieux apprécier l'ordre de grandeur des volumes d'ECP. De plus, cela permet de réaliser des études comparatives qui apportent beaucoup d'informations sur les conditions d'emploi et de validité des méthodes.



# Chapitre 2

PROBLEMATIQUE ET IMPACTS DES EAUX  
PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

### **2-1- Introduction :**

Les réseaux d'assainissement ou collecteurs ont pour fonction de collecter et de transporter les eaux usées pluviales et domestiques. Leur évaluation est devenue de plus en plus difficile à cause des infiltrations des eaux parasites.

Le mesurage de l'infiltration d'ECP est utilisé dans le cadre des études diagnostics de réseaux d'assainissement afin de quantifier les volumes concernés puisque ils diminuent l'efficacité de la station d'épuration (STEP) et accroissent les charges polluantes rejetées.

Avant d'étudier leur quantification de façon détaillée, nous allons définir les expressions : eaux parasites, eaux d'infiltration et eaux de captage.

Dans la suite, on s'intéresse principalement aux eaux claires parasites qui sont les plus préjudiciables pour l'assainissement urbain, et l'épuration des eaux usées.

### **2-2-Définition des eaux claires parasites :**

Les eaux parasites dans un réseau d'assainissement sont définies comme tout apport dont la présence ne répond pas à la vocation initiale des ouvrages, qui, pour les réseaux séparatifs, eaux usées et eaux pluviales, est de collecter respectivement des effluents domestiques voire industriels et des eaux de ruissellement ; les réseaux unitaires assurant pour leur part une fonction mixte. Elles sont qualifiées de parasites en raison de leur présence indésirable de par leur quantité et leur qualité qui influent considérablement sur le transport et le traitement des eaux usées.

Dans les réseaux d'eaux usées, certaines de ces eaux parasites sont qualifiées de claires, car elles sont considérées comme « propres » par rapport aux eaux usées strictes (effluents domestiques et industriels). Les eaux parasites non claires sont issues de rejets industriels non conformes ou, dans le cas des réseaux séparatifs eaux pluviales, de raccordements illicites d'eaux usées. Dans la suite, on s'intéresse principalement aux eaux claires parasites qui sont les plus préjudiciables pour l'assainissement urbain, en particulier pour l'épuration des eaux usées. [11]

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

### **2-3- Classification des eaux parasites claires (EPC) :**

Ce sont des eaux, autres que les eaux usées d'origine domestique, commerciale ou industrielle, qui pénètrent dans un réseau d'égout : Il s'agit des eaux d'infiltration et les eaux de captage. On considère en général que le débit d'eau d'infiltration constitue la portion constante de débit d'eau parasite et que le débit d'eau de captage en est la portion variable.

Les apports d'eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement ont des origines diverses et des comportements variables dans le temps et dans l'espace. Les eaux parasites claires sont donc classées généralement en différentes catégories faisant référence à leur variabilité spatio-temporelle. [12]

#### **2-3-1- Classification par répartition dans l'espace :**

Ce type de classification permet de distinguer d'une part les apports ponctuels facilement localisables, et d'autre part les apports diffus pour lesquels les points de pénétration sont multiples, de dimensions variables et dispersés sur toute la longueur du collecteur. A partir de cette répartition spatiale des apports, on distingue classiquement deux grands types d'eaux parasites claires.

##### **A-Les eaux parasites claires de captage (EPC) :**

Ce sont des eaux parasites claires pénétrant dans un réseau d'égout de façon intermittente surtout en période de pluie et dues à diverses pratiques illicites, comme le raccordement au réseau d'égout sanitaire de drains de fondation, de bouches d'égout ou d'égout pluviaux. Ils sont de deux types :

- Apports quasi permanents : eau de source ou de drainage ;
- Apports temporaires : eaux pluviales des surfaces imperméables.

Les eaux de captage peuvent également pénétrer par les trous de levage des tampons des regards situés dans les légers affaissements du terrain et le détournement dans les égouts pluviaux de ruisseaux, et même de fossés qui coulent par temps sec. En revanche, le débit d'eau que les fossés transportent par temps de pluie fait partie du débit pluvial que le réseau d'égout pluvial doit transporter.

**PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

Idéalement, un réseau d'égout sanitaire ne devrait transporter que les eaux d'égout provenant des usagers. Ceci pousse l'ingénieur concepteur à se préoccuper de l'étanchéité d'un réseau d'égout nouvellement conçu. C'est pourquoi, dans un réseau non étanche vétuste, les débits d'eau de captage sont souvent très importants. Nous présentons succinctement les divers types de réseaux recevant les eaux de captage à travers le tableau 2-1.

| Provenance des eaux                                   | Type de réseaux  |           |          |
|---|------------------|-----------|----------|
|   | Pseudo-séparatif | sanitaire | unitaire |
| Fossés qui coulent par temps sec(débit par temps sec) | Oui              | oui       | oui      |
| Drains de fondation                                   | Non              | oui       | oui      |
| Bouches d'égout                                       | Oui              | oui       | non      |
| Système de refroidissement                            | Oui              | oui       | non      |

Tableau 2-1 : Eaux considérées comme de captage pénétrant dans divers réseaux. [13]

Il s'ensuit la plupart du temps un dépassement de la capacité des postes de pompage et , parfois, des déversements d'eaux usées non traitées dans le cours d'eau par l'intermédiaire des structures conçues à cette fin , comme des déversoirs ou des poste de pompage.

De plus ces eaux parasites peuvent provoquer des refoulements dans le réseau. On distingue le captage direct formé du débit qui suit immédiatement une précipitation, et le captage indirect qui se produit durant les deux derniers jours qui suivent la précipitation.

On mesure les débits d'eaux de captage et on identifie les sources de ces eaux en effectuant des mesures de débits instantanés ou en continuant en période de pluie et des injections du territoire par temps sec et par temps de pluie, et en recourant à diverses autres techniques comme les essais au traceur et à la fumée. Dans un nouveau réseau sanitaire, le débit d'eau de captage devrait être nul.

On tolère cependant un débit pouvant atteindre 25 litre/personne lorsque le réseau est neuf ; après 15 ans ou 20 ans, on s'attend à ce que ce débit atteigne 50 litres/personne. Dans un réseau existant, on doit réduire ce débit au maximum.

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

### **B- Les eaux parasites claires 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 composantes saisonnières : 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 composantes événementielles : 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).

Les eaux d'infiltration, d'origine souterraine, sont soumises à de fluctuations qui s'étendent sur plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Elles constituent des apports qu'on juge continus et constants : c'est pourquoi on considère que le débit d'eaux d'infiltration constitue la portion constante du débit d'eaux parasites. [14]

On mesure le débit d'eau d'infiltration surtout lorsque le niveau de la nappe phréatique est élevé, par temps sec au moins deux jours après la cessation de la pluie lorsque les débits d'eaux usées de diverses provenances sont minimaux.

La présence d'eaux parasites dont les eaux d'infiltration font partie, augmente les coûts de transport et d'épuration des eaux usées.

On tente donc de réduire au maximum le volume de ces eaux en améliorant l'étanchéité des réseaux en effet dans un nouveau réseau, le débit d'eaux d'infiltration devrait être nul. Malheureusement , les travaux et les matériaux de construction n'étant pas parfaits , on est obligé d'accepter un certain degré d'infiltration bien inférieur à celui du passé.

On considère en général que le débit d'eau d'infiltration dans un nouveau réseau est fonction du diamètre des conduites et de leur longueur. Dans un réseau d'égout vétuste refait, le débit d'eau d'infiltration est en général très élevé ; il suffit donc à lui seul pour diluer les eaux usées de façon inacceptable. C'est-à-dire pour les rendre pratiquement impossibles à épurer de façon économique. Il faut donc procéder à une réfection du réseau d'égouts afin de réduire un tel débit.

## PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT

En général on n'applique aucun facteur de pointe au débit d'eau d'infiltration. Toutefois, si des mesures effectuées sur le terrain montrent des variations importantes de ce débit, on peut dans le calcul des débits de pointe, utiliser le facteur de pointe calculé à partir de ces mesures de l'infiltration (infiltration maximale sur l'infiltration moyenne).

### 2-3-2- Classification par répartition dans le temps :

Ce type de classification permet de distinguer les apports permanents qui sont constants ou qui ne subissent que de faibles variations annuelles et les apports non permanents dont les variations sont fonction de l'intensité de la pluie, des hauteurs de pluies antécédentes, ou plus généralement de la saisonnalité.

Le Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien (LROP) aborde la dimension temporelle des apports parasites en considérant le temps de réponse à la pluie ou l'échelle de temps des variations de débit. Il a été proposé la classification suivante (tableau 2-2) :

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

Tableau 2-2: Classification des ECP en fonction du temps de réponse à la pluie. [15]

**PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

**2-4 -Origine des eaux parasites claires:**

Les défauts d'étanchéité dans les réseaux sont à l'origine des eaux claires parasites. Ces défauts sont présents dans les conduites principales et dans les canalisations de branchement, aussi bien en domaine public qu'en domaine privé.

De plus, ils sont difficilement localisables comme par exemple les joints défectueux, les fissures (figure2-1), les cassures, etc. Ces défauts d'étanchéité sont liés à la dégradation d'un ouvrage en lien avec sa conception, sa réalisation et sa gestion. [16]

| Nom  | Matériaux affectés  | Schéma descriptif |
|--|---|-------------------|
| Fissure longitudinale fermée   | Béton armé et non armé, grès vernissé   |                   |
| Fissure longitudinale ouverte (cassure) avec ou sans rejet             | Béton armé et non armé, grès vernissé   |                   |
| Fissure transversale (circulaire) ouverte (cassure) avec ou sans rejet | Tuyaux de grande longueur et de petit diamètre en béton armé ou non de fibre ciment |                   |
| Fissure hélicoïdale (biaise) fermée                                    | Béton armé et non armé, PVC, grès vernissé  |                   |
| Fissure hélicoïdale (biaise) ouverte (cassure) avec ou sans rejet      | Béton armé et non armé, PVC, grès vernissé  |                   |

Figure 2-1- Types de fissurations des collecteurs d'assainissement.

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

### **2-4-1-Les erreurs de conception :**

Elles résultent généralement d'une sous-évaluation des charges statiques et dynamiques auxquelles seront soumises les canalisations. Il peut arriver que les singularités hydrauliques soient mal conçues (chutes, changements de diamètre, coudes...). Ce type d'erreur peut engendrer la formation de fissures et de cassures, voire la rupture et l'effondrement des canalisations. De plus, le risque géotechnique lié à la stabilité du terrain fait l'objet d'une considération limitée.

L'encaissant est soumis à des contraintes extérieures auxquelles il doit résister. Les tassements différentiels et les mouvements de terrain peuvent conduire à des fissures, des dis-jointements et des désalignements des canalisations.

Les pentes trop élevées peuvent entraîner une usure prématurée des collecteurs par érosion mécanique. Il peut se développer aussi une érosion chimique si la structure des canalisations est incompatible avec l'agressivité des effluents transportés ou avec le milieu environnant.

### **2-4-2-les erreurs de réalisation :**

Elles résultent de mauvais lits de pose ou d'inadéquations des matériaux utilisés pour la tranchée d'assainissement, d'emboîtement défectueux des canalisations et de l'inadaptation ou parfois même de l'absence de joints.

### **2-4-3-Les erreurs de gestion des ouvrages :**

Elles résultent de la collecte et du transport d'effluents agressifs chimiquement et/ou mécaniquement ou de l'exécution des travaux au voisinage des collecteurs.

En effet la détérioration des canalisations peut être la conséquence des interventions dans le sous-sol des voies concernant principalement les réseaux d'alimentation en eau, gaz, électricité, téléphone, etc.

De plus la mise en charge fréquente des collecteurs ou la présence excessive d'eaux parasites peut provoquer l'élargissement des fissures, la rupture des joints, etc. La pénétration des racines à l'intérieur des ouvrages par des joints non étanches ou des fissures peut provoquer une obstruction partielle des canalisations, voire des dislocations.



## Chapitre 2 :

### PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT

Les défauts d'étanchéité sont des désordres structuraux de nature et de taille très diverses ; les deux principaux types de défaut selon Biseau sont:

- les déboitements ou décalages des tuyaux ;
- les fissures ou cassures. (figures 2-2 et 2-3).

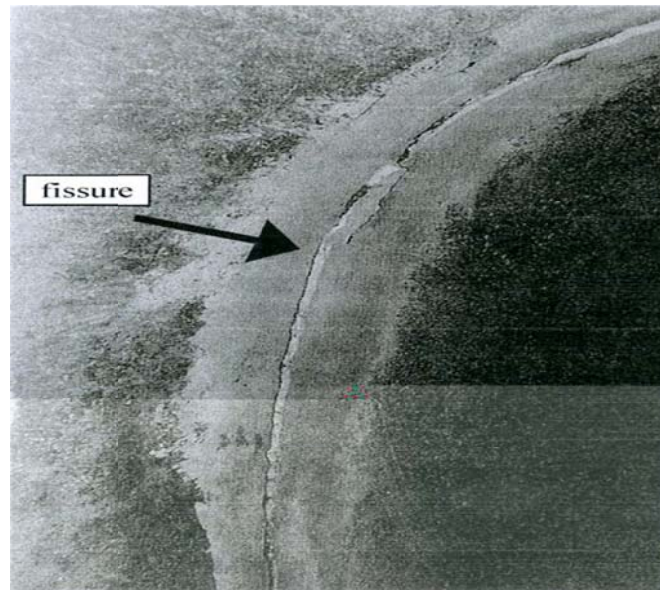


Figure 2-2: Exemple de fissure circulaire relevée sur un réseau d'assainissement . [17]

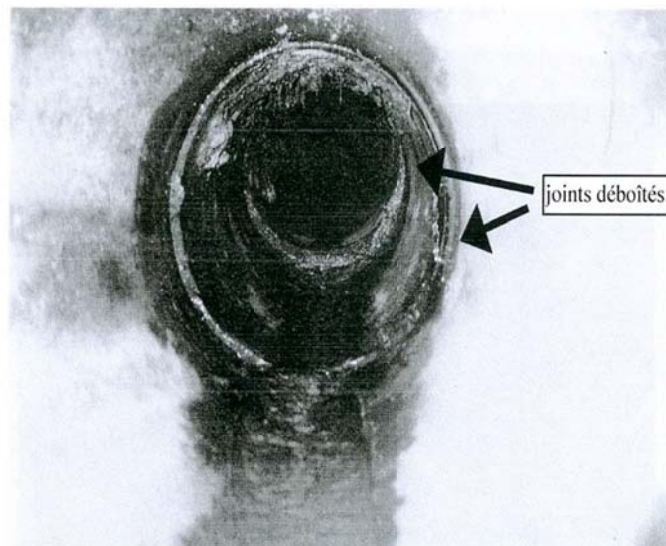


Figure 2-3 : Exemple de joints déboîtés. [17]

**PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

Les facteurs de dégradation des réseaux d'eau potable agissent aussi sur la dégradation des réseaux d'assainissement ; Cependant certains facteurs ou la réponse d'un ouvrage à un facteur de dégradation sont spécifiques à un type de réseau et à son usage.

Par exemple, les réseaux d'eau potable sont sous pression et les matériaux utilisés sont différents (fonte, acier, PVC...etc.) alors que les réseaux d'assainissement fonctionnent la plupart du temps à surface libre excepté lors d'événements pluvieux importants, et les matériaux utilisés sont en général du béton, du ciment, de la fonte, du PVC ou du grès.

Les réseaux d'assainissement et les réseaux d'eau potable ne réagissent pas de manière identique aux sollicitations internes et externes. Davies (2001) identifie 28 facteurs qui peuvent contribuer à la dégradation des réseaux d'assainissement, ils sont présentés dans le tableau 2-3 .

**PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

| Caractéristiques de construction | Caractéristiques locales externes            | Autres facteurs                |
|----------------------------------|--|--------------------------------|
| Méthode de construction          | Occupation des sols                          | Présence de rats               |
| Savoir faire                     | Charge superficielle                         | Caractéristiques des effluents |
| Diamètre de la conduite          | Type de surface                              | Entretien inadapté             |
| Epaisseur de la couverture       | Mouvement de sol                             | Historique des investissements |
| Lit de pose                      | Entretien par les services publics           | Age                            |
| Matériaux de la conduite         | Régime des eaux souterraines                 | Hauteur de sédiments           |
| Longueur d'une unité de conduite | Infiltration/exfiltration                    | Surcharge hydraulique          |
| Nivellement                      | Propriétés du sol encaissant                 |                                |
| Branchements                     | Pénétration de racines                       |                                |
| Type de joints                   | Fuites et casses sur le réseau d'eau potable |                                |
| Qualité des remblais             |  |                                |

Tableau 2-3 : Les facteurs qui influencent la dégradation structurelle des réseaux d'assainissement .[18]

Du point de vue des praticiens (Davies, 2001), les facteurs de dégradation des réseaux d'assainissement dont l'influence est prédominante sont les suivants :

- l'occupation des sols ;
- l'âge des collecteurs ;
- l'historique des investissements ;
- l'épaisseur de la couverture ;
- la nature du sol encaissant ;
- le diamètre des collecteurs ;
- la norme de construction ;
- les branchements.

**PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES  
D'ASSAINISSEMENT**

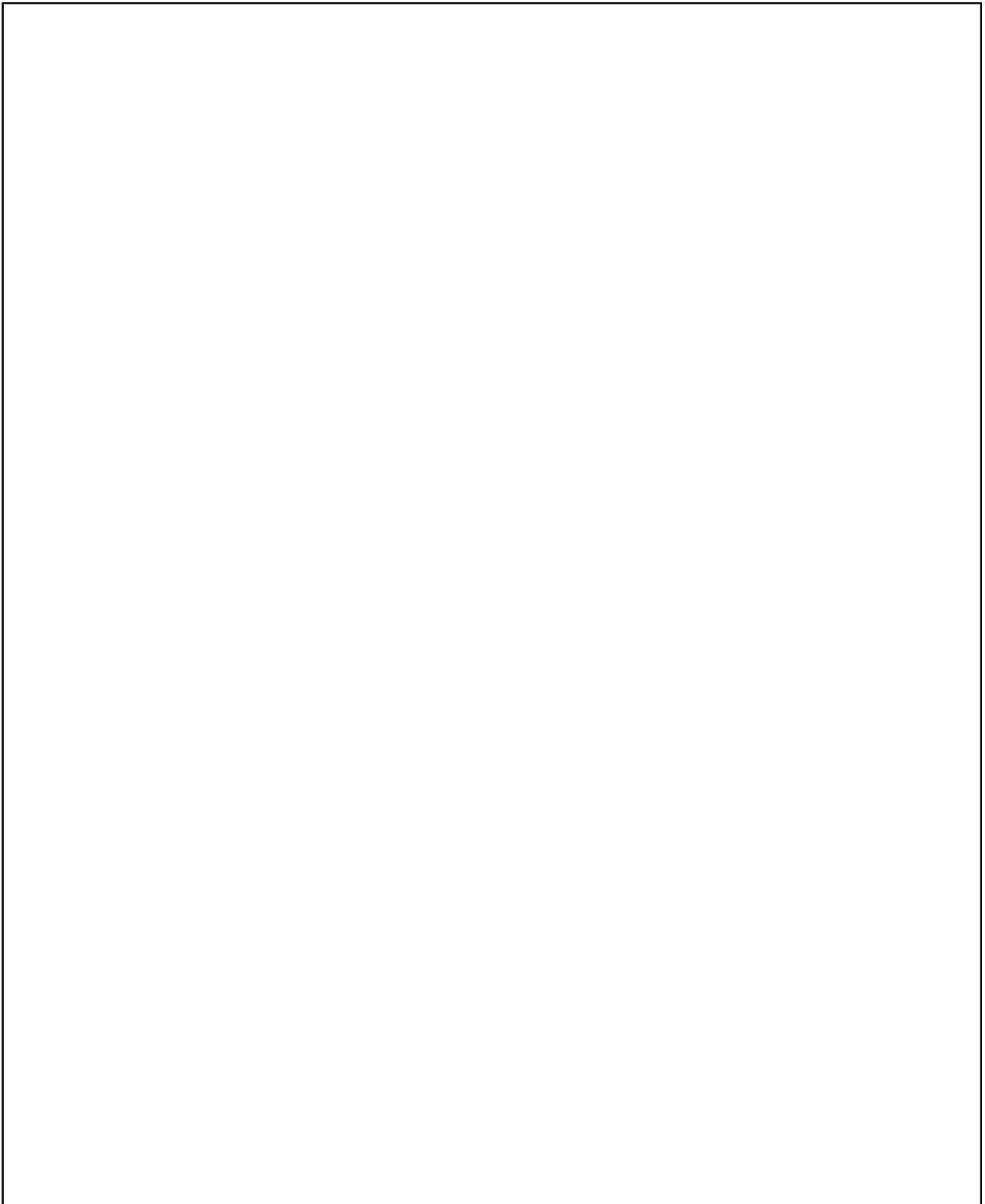


Figure 2-4: Déformation d'une conduite fissurée sous l'influence de l'infiltration et de l'exfiltration (WEF, 1994)

*Chapitre 2 :*

**PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES  
D'ASSAINISSEMENT**



Figure 2-5: Affaissement d'une conduite sous l'influence de l'infiltration et de l'exfiltration  
(WEF, 1994).

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

### **2-5-Impact des eaux parasites claires sur le fonctionnement du système d'Assainissement :**

L'intrusion des eaux parasites claires (EPC) dans les réseaux d'assainissement modifie la quantité et la qualité des effluents par rapport aux données de référence prises en compte lors de la projection et la conception des ouvrages de collecte et de traitement.

Les modifications quantitatives des effluents liées à l'augmentation du débit d'eaux usées lors d'événements pluvieux et en période de hautes eaux sont étudiées à plusieurs échelles de temps. Le pas de temps horaire permet d'apprécier les débits de pointe et l'impact des eaux parasites claires sur les ouvrages dimensionnés sur ce type de critère (tels que : les canalisations, les postes de relèvement, les déversoirs d'orage ; et les ouvrages de traitement à faible temps de séjour).

Les modifications qualitatives des effluents se traduisent par la dilution des effluents bruts par les eaux parasites claires qui entraînent une diminution de l'efficacité épuratoire des ouvrages de traitement

Les apports d'eaux parasites claires peuvent avoir des conséquences majeures sur les réseaux de collecte, les ouvrages de traitement épuratoire et bien évidemment sur les milieux naturels dont la protection est liée à l'efficacité de l'assainissement. Les impacts techniques et économiques qui en résultent doivent donc être étudiés à des niveaux. [7]

#### **2-5-1- Impact des eaux parasites claires sur les réseaux :**

Les impacts des eaux parasites claires (EPC) sur les réseaux de collecte dépendent de la nature et de l'importance des apports, ils se traduisent par :

- a- l'insuffisance de la capacité de transit : elle occasionne des surcharges hydrauliques au niveau des collecteurs et des postes de relèvement. C'est une situation qui se rencontre fréquemment dans les réseaux d'eaux usées comportant des raccordements anormaux de canalisations d'eaux pluviales. Cette saturation du réseau peut entraîner des surverses dans les caves, les sous-sols et parfois même sur la chaussée. Il est important de noter que la présence de ces eaux parasites claires limitera également les futurs raccordements au réseau, réduisant ainsi l'efficacité des investissements qui auront été réalisés.

**PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES  
D'ASSAINISSEMENT**

- b- l'usure accélérée des collecteurs : elle peut être provoquée soit par l'agressivité des effluents parasites (érosion chimique et physique), soit par l'érosion progressive des matériaux de remblais de la tranchée d'assainissement sous l'action d'eaux d'infiltration qui peut provoquer des fissures, des tassements différentiels avec déboîtements des conduites (figure 2-6)...
- c- la surcharge des postes de relèvement : elle entraîne une augmentation des durées de pompage et donc des consommations d'énergie, de plus l'usure mécanique des installations est accélérée.

Chapitre 2 :

**PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

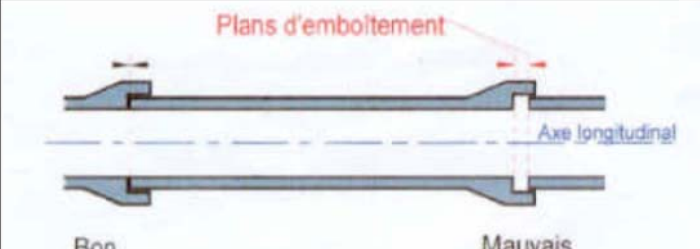
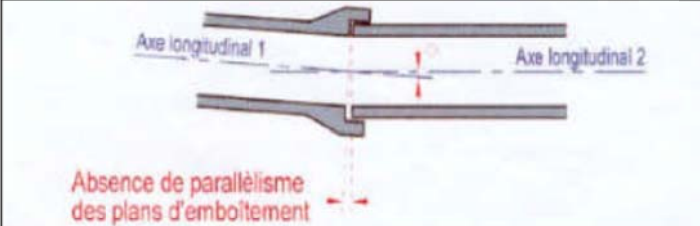
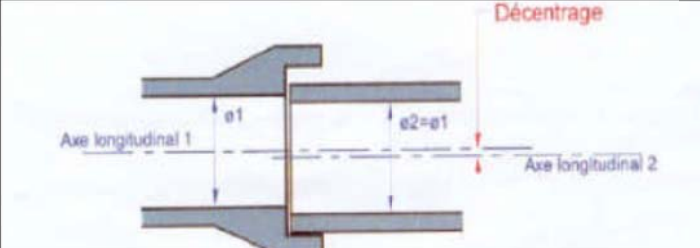
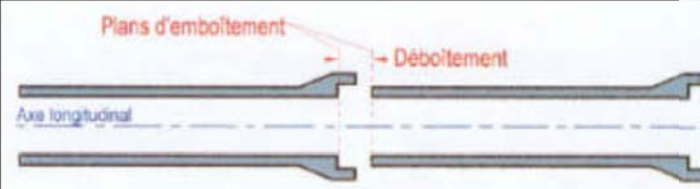

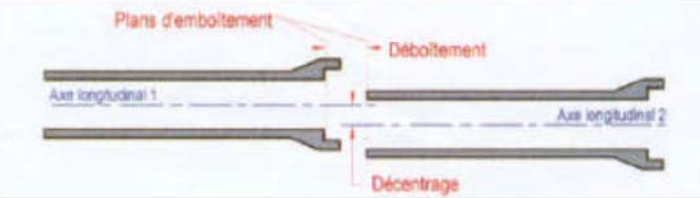
| Nom  | Matériaux affectés   | Schéma descriptif  |
|--|--|--|
| Emboîtement insuffisant                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Tous matériaux assemblés par emboîtement</li> <li>⇒ Défaut majeur pour les tuyaux en béton</li> </ul> |    |
| Emboîtement désaligné (désaxé)                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Tous matériaux assemblés par emboîtement</li> <li>⇒ Défaut majeur pour les tuyaux en béton</li> </ul> |    |
| Emboîtement décentré horizontalement et / ou verticalement | <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Tous matériaux assemblés par emboîtement</li> <li>⇒ Défaut majeur pour les tuyaux en béton</li> </ul> |   |
| Déboîtement longitudinal                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Tous matériaux assemblés par emboîtement</li> </ul>   |  |
| Déboîtement désaligné (désaxé) horizontal et / ou vertical | <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Tous matériaux assemblés par emboîtement</li> </ul>   |  |
| Déboîtement décentré horizontal et / ou vertical           | <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Tous matériaux assemblés par emboîtement</li> </ul>   |  |

Figure 2-6- Types de défauts d'emboîtement et de déboîtement au niveau des collecteurs.



## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

### **2-5-2- Impact des ECP sur le fonctionnement des ouvrages épuratoires :**

En premier lieu, il faut noter que la sensibilité des ouvrages de traitement aux apports d'eaux claires parasites est variable selon le type de procédé épuratoire utilisé. Une étude présentée par l'Agence de Bassin Loire Bretagne en 1982 sur les aptitudes à admettre des surcharges hydrauliques permanentes ou passagères montre par exemple que le lagunage et les lits bactériens peuvent admettre des variations de débit importantes sans dégradation majeure de la qualité des effluents épurés.

En revanche, les procédés plus classiques (boues activées) permettent d'avoir une épuration convenable des effluents dilués dans certaines limites, mais avec un coût de fonctionnement plus élevé. Pour les stations d'épuration (STEP), les conséquences techniques sont de deux types [7] :

- les surcharges hydrauliques : elles peuvent provoquer le dépassement de la capacité hydraulique de la Station d'épuration, engendrant ainsi des rejets directs dans le milieu récepteur d'effluents non traités ;
- la dilution des effluents : elle entraîne une baisse du rendement épuratoire et du temps de séjour. De plus, les pointes de débit importantes dues aux captages d'eaux pluviales et au drainage rapide risquent de nuire à la décantation secondaire des procédés à boues activées et de lessiver le bassin d'aération.

Il s'ensuit un rejet massif de boues et un dysfonctionnement ultérieur de la station qui peut se prolonger sur plusieurs semaines.

### **2-5-3- Impact des eaux parasites claires sur la qualité des milieux naturels :**

Les apports d'eaux claires parasites ont des conséquences sur la qualité des milieux naturels par des rejets plus ou moins fréquents d'effluents bruts ou partiellement traités dans le milieu naturel à différents niveaux :

- le réseau de collecte : surverses dans les caves et sur la voirie ;
- les déversoirs d'orage : l'augmentation des débits en réseau unitaire provoque un fonctionnement plus fréquent des déversoirs d'orage et par conséquent le rejet direct des polluants ;
- à l'amont de la station d'épuration : si la capacité hydraulique est dépassée, le débit excédentaire est rejeté directement dans le milieu naturel ;

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

- à la sortie de la station d'épuration : il y a une augmentation du flux polluant rejeté par diminution du rendement épuratoire.

### **2-5-4-Les impacts financiers de la présence d'eaux claires parasites dans le système d'assainissement:**

Les impacts techniques présentés précédemment ont des conséquences financières immédiates pour les collectivités qui se doivent d'assurer le bon fonctionnement de leur système d'assainissement par :

- la réhabilitation des réseaux pour réduire les volumes d'eaux parasites claires.
- l'augmentation de la taille des ouvrages afin d'accepter les volumes excédentaires liés à la présence d'eaux parasites claires.
- l'augmentation du coût de fonctionnement annuel des stations.

### **2-6-Les études diagnostics des réseaux d'assainissement et les solutions palliatives aux eaux claires parasites :**

Dès le début des années 1970, des méthodes permettant d'évaluer l'efficacité des réseaux d'assainissement et de prévoir la réhabilitation ultérieure des ouvrages dans un contexte excluant les surverses sont définies (Environment Protection Agency, 1975). Au début des années 1980, les Services d'Assistance Technique aux Exploitants de Station d'Épuration (SATESE) observent qu'une grande partie des problèmes constatés sur les stations d'épuration est liée aux réseaux de collecte et en particulier aux apports d'eaux parasites claires . [19]

#### **2-6-1-Méthodologie des études diagnostics :**

La méthodologie suivie dans le cadre des études diagnostics a été développée essentiellement par le Laboratoire Régional de l'Ouest Parisien en 1981. La démarche proposée par Ranchet *et al.* (1982) est composée de trois phases successives :

##### **• Première phase :**

Elle consiste en l'établissement d'un diagnostic global des ouvrages du système d'assainissement dans les zones où les impacts des eaux parasites sont observés. Des visites sur le terrain sont nécessaires pour déterminer les mesures à conduire, leur période, leur durée et leur emplacement. Lorsque les observations de terrain et des mesures instantanées ne

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

permettent pas d'identifier les causes des anomalies, il est intéressant de réaliser des mesures continues caractérisant les apports temporaires et les apports permanents. Ceci permet aussi de classer les eaux parasites en fonction de leur temps de réponse à la pluie.

### **• Deuxième phase :**

Elle repose sur l'analyse de campagnes de mesures, principalement des chroniques pluie-débit au pas de temps horaire ou journalier complétées parfois de mesures de polluants dont le but est :

- la quantification globale des apports d'eaux parasites et l'évaluation de leurs impacts ;
- l'identification et la hiérarchisation de ces apports pour aboutir à une répartition par secteurs géographiques et par type d'eaux parasites.

L'objectif de la hiérarchisation est de réduire les champs d'investigation en localisant les parties du réseau les plus défectueuses afin d'éviter la vérification systématique de l'ensemble du réseau qui est très onéreuse.

Pour se faire, un bassin versant est divisé en plusieurs sous-bassins versants à l'exutoire desquels des points de mesure en continu du débit sont installés (capteur hauteur-vitesse, déversoir à seuil) ainsi que des préleveurs automatiques afin de prélever des échantillons d'eaux usées pour des analyses qualitatives.

Le découpage du réseau repose sur ses caractéristiques intrinsèques (âge, conception), son environnement proche (hydrogéologie, population) et sur l'expérience (ensemble des raccordements effectués). La hiérarchisation des sous-bassins est faite en fonction de leur sensibilité en déterminant la répartition du volume d'eaux parasites sur le linéaire étudié et en fonction de leur contribution au volume total d'eaux parasites claires sur l'ensemble du bassin versant.

### **• Troisième phase :**

Elle consiste en la localisation précise des différentes sources d'apports parasites par l'emploi de techniques spécifiques. On trouve :

- les tests à la fumée permettant de localiser les branchements non conformes d'eaux pluviales sur les réseaux séparatifs eaux usées ;
- le contrôle aux colorants utilisé pour localiser les branchements d'origines diverses tels que les raccordements de fossés et de surverses des plans d'eaux, les

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

apports de qualité non conforme vis à vis du réseau ou de la station d'épuration, etc. ;

- l'inspection télévisée permettant pour les réseaux d'eaux usées non visitables de localiser des défauts d'étanchéité à l'origine des apports par infiltration.

Ces trois phases d'investigation sont suivies par une phase d'étude et de comparaison des différentes solutions permettant de réduire l'impact des eaux claires parasites sur les réseaux d'assainissement afin d'élaborer un programme d'aménagement.

### **2-6-2-Les solutions palliatives aux eaux claires parasites :**

Après avoir procédé à la quantification, l'identification et la localisation des apports d'eaux parasites claires, les gestionnaires des réseaux d'assainissement sont contraints de prendre un certain nombre de mesures pour limiter leurs nuisances si les volumes quantifiés d'eaux claires parasites dépassent un certain seuil de tolérance.

La présence des eaux claires parasites est tolérable en dessous d'un seuil établi et fixé par l'expérience acquise au cours des différentes études diagnostics.

Selon les pays ce seuil est très variable et est exprimé de différentes manières. [20]

Pour les réseaux séparatifs eaux usées domestiques et les réseaux unitaires, l'apport d'eaux claires parasites en période de nappe haute est considéré comme excessif à partir d'un volume journalier de 320 L/hab. Pour les égouts industriels, le seuil est exprimé par référence à la surface du réseau, il est de 1400 L/jour/cm de diamètre de collecteur/km linéaire.

Aux Etats-Unis, la limite est fixée à  $1,9 \text{ m}^3/\text{jour}/\text{diamètre (cm)}/\text{km}$ . Si ce niveau est dépassé une étude économique est nécessaire et des apports supérieurs à  $5 \text{ m}^3/\text{jour}/\text{diamètre (cm)}/\text{km}$  contraignent les gestionnaires à réhabiliter le réseau.

En France, les normes sont relatives aux protocoles de réception des réseaux d'assainissement. La méthode repose sur l'évaluation du volume d'appoint nécessaire sur 30 minutes pour maintenir un tronçon de réseau en charge.

D'après Biseau pour les collecteurs de diamètre inférieur à 40 cm le seuil est fixé à  $0,4 \text{ l}/\text{m}^2$ , et pour les collecteurs de diamètre supérieur à 40 cm la limite est fixée à 0,4 % du volume de la conduite .

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

Les différentes solutions palliatives aux eaux claires parasites sont présentées et répertoriées selon le niveau d'intervention et selon la nature des apports parasites.

### **A- Interventions sur les réseaux :**

#### ➤ Elimination des eaux parasites de captage :

La suppression des eaux parasites de captage peut être effectuée par des travaux de nature très variée comme :

- le détournement des ruisseaux ou des sources : assez complexe dans le centre des agglomérations en raison des contraintes de POS et de circulation ;
- la remise en conformité des raccordements ;
- l'élimination des drainages clandestins ;
- le remplacement des tampons non étanches dans les zones submersibles ;
- l'automatisation des déversoirs d'orage : par alignement de leur cote aux variations du milieu récepteur pour éviter les intrusions de ce dernier dans le réseau.

#### ➤ Elimination des eaux parasites d'infiltration :

Elles sont plus difficiles à supprimer en raison de leur caractère diffus, mais aussi à cause de la modification des écoulements souterrains entraînés par les travaux. Il existe actuellement de nombreuses techniques de rénovation des réseaux qui permettent pour la plupart d'assurer une bonne étanchéité des canalisations, parmi lesquelles on peut citer :

- le chemisage : une gaine souple est insérée, plaquée, puis rigidifiée à l'intérieur de la conduite en place ;
- les projections : un robot assure la projection par centrifugation d'un revêtement continu ou localisé sur la paroi ;
- le tubage : ce type d'action rassemble de nombreuses techniques dont le point commun est la constitution d'un revêtement continu, partiel ou total relié, à l'ancien ouvrage par un coulis à base de ciment.

## **PROBLEMATIQUE ET IMPACT DES EAUX PARASITES SUR LES SYSTEMES D'ASSAINISSEMENT**

### **B- Interventions au niveau de la station d'épuration :**

Les actions sur les STEP constituent un complément aux actions réalisées sur les réseaux de collecte. Ces interventions peuvent aller de l'amélioration des capacités d'exploitation de la station existante à la conception d'une nouvelle station plus performante.

Dans le cas des stations à boues activées, les principales interventions envisageables concernent les débits de pointe et leur impact sur la décantation secondaire par le surdimensionnement des bassins de décantation, sa modulation, le maintien de faibles taux de boues dans le bassin d'aération, la gestion du volume variable de ce dernier et l'amélioration de l'hydraulique des ouvrages .[7]

### **2-7-Conclusion :**

Les réseaux d'assainissements peuvent être le siège de dysfonctionnements causé par les eaux parasites, dont l'impact s'avère nuisible pour le milieu naturel ou la station de pompage. L'étude diagnostic des réseaux a pour objectif de déceler ces problèmes.

Les différentes solutions palliatives aux eaux claires parasites sont présentées et répertoriées selon le niveau d'intervention et selon la nature des apports parasites. Il s'agit de techniques qui visent à éliminer les eaux claires parasites par traitement à la source. Il existe aussi des techniques qui visent seulement à éliminer les effets nuisibles des eaux parasites claires, techniques plus intéressantes d'un point de vue économique.

Cependant il faut souligner que certaines de ces actions ne font que reporter le problème en aval, en particulier les solutions visant à réduire les volumes surverses qui doivent être concordantes avec la capacité hydraulique de la STEP.

# Chapitre 3

MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX  
PARASITES DANS LE COLLECTEUR  
D'ASSAINISSEMENT

## MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT

### 3-1-Introduction :

Dans le domaine d'assainissement, Le fonctionnement d'un collecteur peut être soit en écoulement à surface libre, en charge, ou partiellement à surface libre et partiellement en charge.

Dans ce qui suit, on s'intéresse à la première situation qui, en cas de défaut d'étanchéité, peut générer soit une intrusion soit une extrusion des eaux parasites. Cette situation perturbe l'écoulement et peut provoquer un régime hautement transitoire.

Dans le chapitre précédent, il a été indiqué que les solutions, pour lutter contre les apports des eaux claires parasites, leur impact sur les collecteurs d'assainissement et, les stations d'épuration nécessitent la quantification de ces apports. Une modélisation du débit de ces eaux en cas d'infiltration ou d'exfiltration trouve sa justification dans ce présent chapitre.

En première approche on considère la fissuration comme étant un orifice, à travers lequel se produit soit l'infiltration soit l'exfiltration.

En pratique à l'entrée de l'eau à travers l'orifice, les lignes de courant convergent et créent une résistance. Ainsi la perte de charge totale de l'infiltration à travers ce dernier peut être décrite comme la somme de pertes de charge associées principalement à deux résistances :

- Une résistance radiale due à la convergence des lignes de courant vers l'orifice qui ne dépend que du milieu (sol) entourant le collecteur fissuré et du rayon de l'orifice ;
- Une résistance d'entrée qui ne dépend que de la nature du drain.

Dans ses travaux de recherche, Dierrickx (1980) définit cette dernière comme étant la différence entre la résistance totale à l'écoulement vers le drain et la résistance radiale vers un drain idéal de même diamètre. Deux méthodes sont utilisées pour calculer le coefficient global de la perte de charge, à savoir:

- Une première méthode théorique qui donne des solutions analytiques ou numériques longues et complexes ;
- Une deuxième méthode analogique, à partir d'un modèle physique en cuve, qui fournit des solutions semi-empiriques.

Dans le cas des tranchées d'infiltration, DUCHENE et MCBEAN (1992) ont montré que la loi de débit pour un drain dont la structure des perforations est parallèle à l'axe du drain, est celle des orifices déduit de Bernoulli. Pour les drains annelés dont l'arrangement des



## MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT

perforations est spiral, le cas Bernoulli ne peut plus être utilisé. Les auteurs ont alors ajusté une loi expérimentalement :

$$q = 13,2.\Delta h^{0,65} \quad (1)$$

Avec :

$\Delta h$  : perte de charge a travers l'orifice.

### 3-2-Facteurs influençant le débit d'intrusion d'ECP :

Il est assez difficile d'évaluer ni d'estimer les facteurs influençant le débit d'intrusion. Ces facteurs sont variables suivant la situation du collecteur vis-à-vis du niveau de la nappe et de la texture du sol entourant le collecteur. La détermination des coefficients de débit est tributaire de ces facteurs dans le temps, suivant la teneur des eaux soient transportées de l'extérieur. Le facteur colmatage reste le principal facteur à déterminer qui change considérablement le coefficient de débit ou de vitesse. Pour cerner le problème de la modélisation d'intrusion, et avoir une approche plus réaliste du phénomène, nous proposons quelques coefficients caractérisant le débit d'intrusion à travers des fentes de fissuration.

#### 3-2-1-Coefficient de vitesse (Cv) :

Puisque le réservoir de notre orifice représente le sol, la loi appliquée est celle de DARCY qui permet de relier un débit à un gradient de pression appliqué au fluide grâce à un paramètre caractéristique du milieu traversé : la perméabilité  $k$ . Cette dernière correspond à l'aptitude du milieu poreux à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression.

Pour prendre en considération les pertes de charge dans la section contractée on introduit le coefficient de vitesse  $C_v$  qui est le rapport de la vitesse réelle  $V_c$  (dans la veine contractée) et la vitesse idéale  $V_i$  on déduit que :

$$C_v = \frac{V_c}{V_i} = \sqrt{\frac{H_c}{H_0}} \quad (2)$$

$$V_i = k \cdot i \quad (3)$$

**MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT**

Avec :

k : perméabilité du sol ;

i : gradient hydraulique ;

H : différence entre l'écoulement dans l'orifice et un plan de référence.

On aura donc :

$$C_v = \frac{V_c}{V_i} = \frac{\sqrt{2gH_c}}{Ki} \quad (4)$$

On remarque donc que ce coefficient dépend de la perméabilité du sol et donc du type de sol.

➤ **Classes de perméabilité des sols :**

Le taux de perméabilité du sol s'exprime généralement soit, en centimètres par heure (cm/h), en millimètres par heure (mm/h) ou en centimètres par jour (cm/j), soit en tant que coefficient de perméabilité, en mètres par seconde (m/s) ou en centimètres par seconde (cm/s).

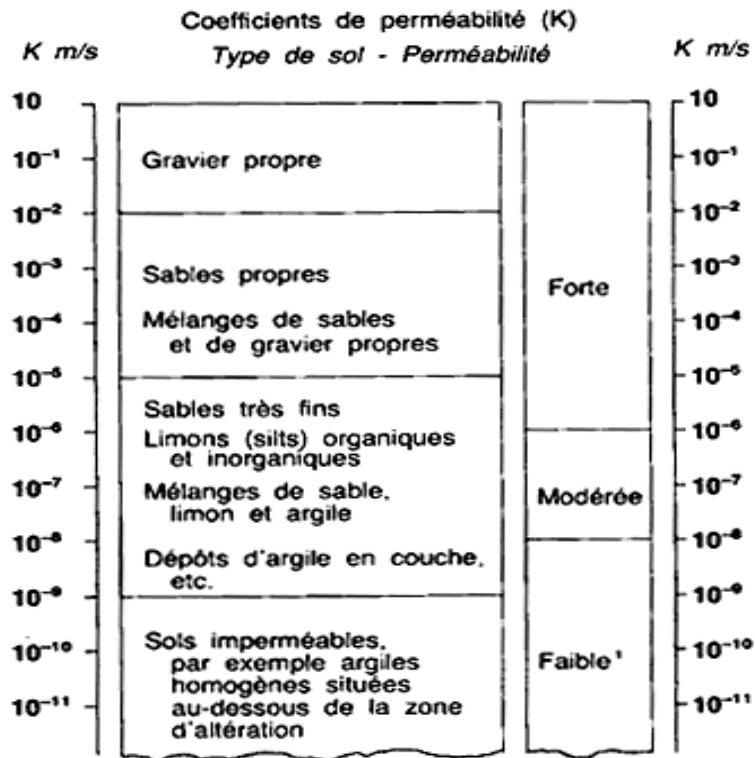


Figure 3-1 : Différents valeurs de K en fonction du type de sol. [21]

**MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT**

**3-2-2-Coefficient de contraction (Cc):**

Dans le domaine de l'interaction sol collecteur, les fissures peuvent prendre différentes formes d'ouverture ( $S_0$ ) et différents itinéraires. Le degré de colmatage est également différent d'une ouverture à l'autre, d'autant plus dans le temps. Il est donc très délicat d'évaluer la section de passage du fait de la présence des particules solides retenues au niveau de l'orifice. Certainement la section de passage sera plus réduite que la section de l'ouverture  $S_0$ . Il en résulte donc un rapport entre cette section de passage  $S_p$  et la section d'ouverture qu'on note comme étant le coefficient de contraction.

$$C_c = \frac{S_p}{S_o} \quad (5)$$

**3-2-3-Coefficient de viscosité (C<sub>vis</sub>):**

La viscosité d'un liquide est sa caractéristique d'être plus ou moins fluide ou, en d'autres termes, d'opposer plus ou moins de résistance au pompage ou au passage au travers d'un orifice ou d'un tuyau.

La température exerce une grande influence sur la viscosité ; si la température augmente la viscosité diminue et vice versa.

Si on prend en considération ce paramètre et par son biais la température de l'eau, on introduit le coefficient de viscosité qui est le rapport de la viscosité des eaux parasites  $V_P$  sur la viscosité des eaux dans le collecteur  $V_C$  :

$$C_{vis} = \frac{V_P}{V_C} \quad (6)$$

| Température de l'eau | h (Pa·s)                  |
|----------------------|---------------------------|
| (0 °C)               | 1,787 x 10 <sup>-3</sup>  |
| (20 °C)              | 1,002·x 10 <sup>-3</sup>  |
| (100 °C)             | 0,2818·x 10 <sup>-3</sup> |

Tableau 3-1- Ordre de grandeur de la viscosité en fonction de la température. [22]

## **MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT**

### **3-2-4-Coefficient de colmatage (Ccl):**

Lorsque le collecteur d'assainissement est fissuré, le colmatage des orifices devient essentiel et important, il s'accompagne généralement d'une diminution de débit d'intrusion. Le coefficient de colmatage dépend donc de la nature de la granulométrie présente au niveau de l'orifice. Dans l'établissement du modèle mathématique en assainissement, ce coefficient est représenté par l'existence d'une éponge au niveau de l'orifice représentant un milieu poreux subissant un colmatage dans le temps.

### **3-3-Proposition d'une Modélisation du débit d'eaux claires parasites (ECP) :**

#### **3-3-1-Cas de l'infiltration (débit d'intrusion) :**

Dans le domaine de la gestion des réseaux d'assainissement, il a été constaté pratiquement que les intrusions des eaux parasites claires se font soit à travers des fissures produites longitudinalement, radialement ou provoquées d'une manière hélicoïdale.

Généralement ces intrusions sont importantes au niveau des points de raccordement et plus particulièrement les joints disloqués suite à des tassements différentiels, changement de pente...etc. La forme des ouvertures engendrées par ces points d'intrusion est assez compliquée à déterminer, ce qui rend difficile l'évaluation du débit entrant ou sortant, dans le temps, du fait non seulement du colmatage mais également de la charge polluante. Cette difficulté réside soit en phase d'intrusion soit en phase d'extrusion. Pour simplifier notre travail, on suppose que :

- la paroi de la clé du collecteur d'assainissement est percée par un orifice représentant ainsi la fissuration ;
- Cet orifice est alimenté par un drain idéal raccordé au collecteur et présentant une certaine résistance totale ;
- Convergence des lignes de courant vers l'orifice avec un régime laminaire ;
- L'intrusion d'eaux parasites se fait sous une certaine charge, par exemple le niveau de la nappe est supérieur à la clé du collecteur.

**MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT**

Notre système physique est donc représenté comme étant un collecteur recevant un branchement idéal qui véhicule les eaux parasites claires. (Figure 3-2)

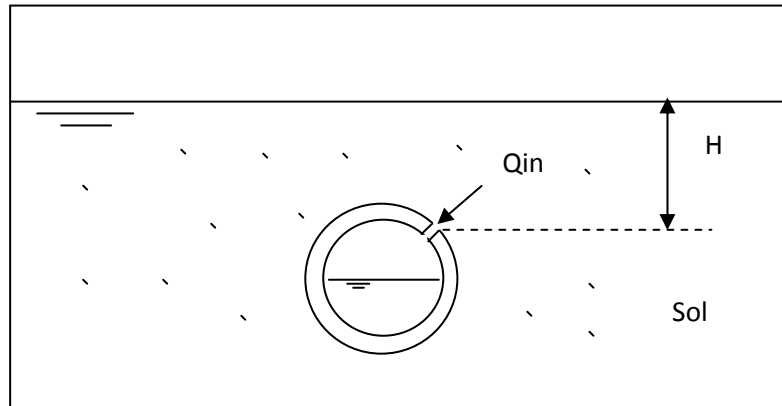


Figure 3-2 : Intrusion des eaux parasites à travers la fissure.

Durant la présence des eaux parasites autour du collecteur, il en résulte un écoulement de type radial, supposé laminaire caractérisé par des lignes de courant se dirigeant vers l'orifice, et engendrant ainsi une perte de charge du type :

$$\Delta H_r = R_r Q_{in} \quad (7)$$

Avec :

$$R_r = \frac{1}{2\pi K} \ln \frac{y}{y_0} \quad (8)$$

Ou :

$\Delta H_r$  : Perte de charge radiale (m) ;

$R_r$  : Résistance radiale ( $m^{-1}s$ ) ;

$Q_{int}$  : débit /mètre de drain ( $m^2s^{-1}$ ) ;

$K$  : perméabilité du milieu ( $ms^{-1}$ ) ;

$y_0$  : rayon du drain (m) ;

$y$  : rayon d'un cylindre équipotentiel coaxial au drain (m).

**MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT**

La perte de charge correspondante à l'entrée du collecteur à travers l'orifice, s'écrit :

$$\Delta H_e = R_e Q_{in} \quad (9)$$

$R_e$  : résistance à l'entrée du collecteur ( $m^{-1}s$ ) .

la résistance totale à l'écoulement vers les collectrices et définie comme étant la somme des deux résistances précédentes :

$$R_t = R_r + R_e \quad (10)$$

Et la perte de charge totale s'écrit :

$$\Delta H_t = R_t Q_{in} \quad (11)$$

Ou encore :

$$\Delta H_t = \left[ R_e + \frac{1}{2\pi K} \ln \frac{y}{y_0} \right] Q_{in} \quad (12)$$

Dans ce cas, la loi de débit  $Q(h)$  utilisée est linéaire, et les lois obtenues sont de type Bernoulli :

$$Q(h) = C S_o \sqrt{2g\Delta h} \quad (13)$$

Avec :

$C$  : coefficient de débit ;

$S_o$  : surface de l'orifice ( $m^2$ ).

L'étude montre que le coefficient de débit ( $C$ ) dépend plus de la répartition de la granulométrie au voisinage de l'orifice, que de la conductivité hydraulique du milieu poreux ; la taille des orifices est du même ordre de grandeur que la taille des graves constituant les milieux poreux ; Ainsi la perte de charge totale est essentiellement due à l'orifice. On peut donc dire que ce coefficient est le produit de certains coefficients à savoir :

- Un coefficient qui caractérise la contraction du débit d'intrusion ( $C_c$ );
- Un coefficient de viscosité ( $C_{vis}$ ) ;
- Un Coefficient de vitesse ( $C_v$ ) ;
- Un Coefficient de colmatage ( $C_{cl}$ ).

**MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT**

On peut donc écrire finalement :

$$C = C_c C_{vis} C_v C_{cl} \quad (14)$$

Et la relation proposée pour l'évaluation du débit sera :

$$Q_{int} = C_c C_{vis} C_v C_{cl} S_0 \sqrt{2g\Delta h} \quad (15)$$

Dans cette proposition de modélisation, le débit d'intrusion est tributaire de plusieurs coefficients caractérisant soit la géométrie de l'ouverture de l'orifice, soit le mode et le degré du colmatage (voir même la charge polluante des eaux usées dans le cas d'une exfiltration). Prenant en considération tous les facteurs cités auparavant ; Le débit  $Q_{in}$  d'infiltration sera amoindri.

**3-3-2-Cas de l'exfiltration (débit d'extrusion) :**

L'exfiltration a lieu quand le collecteur d'assainissement est en charge ou plein non en charge, et même à surface libre. L'écoulement à travers l'orifice sera donc noyé ou dénoyé tout dépend du niveau de la nappe à l'aval de ce dernier. [23]

Dans le domaine pratique, on peut avoir soit le niveau de la nappe est inférieur au niveau du fond du collecteur, il s'agit d'un écoulement dénoyé, soit la clé du collecteur se trouve inférieure au niveau de la nappe et il s'agit d'un écoulement noyé.

Le coefficient de débit diffère d'un cas à l'autre en effet Les constatations pratiques révèlent que l'écoulement dans le collecteur est également sujet à la variation de température due par exemple à la fermentation et à la présence des eaux chaudes rejetées. Dans ce cas, l'écoulement sera conditionné par l'effet de la viscosité à travers l'orifice qui est représenté par un coefficient  $C_{vis}$ .

L'exfiltration d'eau vers le sol a été étudiée pour différentes applications, notamment pour les tranchées d'infiltration et les chaussées à structure réservoir.

Pour le cas d'Écoulement dénoyé :

$$Q_{ex} = C_0 C_{vis} C_{cl} m S_0 \sqrt{2g\Delta h} \quad (16)$$

## MODELISATION DE L'INTRUSION DES EAUX PARASITES DANS LE COLLECTEUR D'ASSAINISSEMENT

Pour le cas d'écoulement noyé :

$$Q_{ex} = C_0 C_{vis} C_{cl} S_0 \sqrt{2g(h-z)} \quad (17)$$

Avec :

$Q_{ex}$ : débit par unité de longueur ( $m^2 S^{-1}$ ) ;

$m$  : coefficient semblable à un coefficient de contraction ;

$S_0$ : section des fontes par unité de longueur de drain (m) ;

$C_0$ : fonction dépendant de la géométrie du drain et de la répartition des fontes ;

$\Delta h$ : charge par rapport au fond du drain(m) ;

$h-z$  : différence de charge entre l'intérieur et l'extérieur du drain(m).

### 3-4-Conclusion :

La théorie des écoulements à travers des orifices a servi de base pour le raisonnement de ce chapitre. Le collecteur a été considéré par hypothèse comme un réservoir recevant un débit dans le cas d'une intrusion et donnant un débit dans le cas d'une extrusion.

Néanmoins il a été constaté que le coefficient de débit diffère selon le cas sous l'effet des différents facteurs énumérés. L'estimation de ces coefficients reste toujours au centre des problèmes qui préoccupent les chercheurs dans ce domaine.

A travers l'étude bibliographique, les travaux antérieurs révèlent quelques divergences chez les auteurs dans la fonction explicite du coefficient global de débit qui reste toujours assez difficile à déterminer dans le temps.

Cette difficulté réside du fait de la granulométrie et de la contraction de l'écoulement à travers l'orifice en présence de grains fins retenus au niveau de la section de passage. Dans ce cas l'influence du colmatage trouve sa justification d'où le coefficient de colmatage. Après raisonnement, et analyse des travaux antérieurs, nous avons proposé quelques coefficients afin de s'approcher de la réalité.



# Chapitre 4

MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE  
COLLECTEUR SOUS INFLUENCE DU DEBIT  
D'INTRUSION MODELISE

## MODELISATION DE L'ÉCOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS INFLUENCE DU DÉBIT D'INTRUSION MODELISÉ

### 4-1- Introduction:

L'étude mathématique des écoulements à surface libre en régime transitoire n'est pas une discipline scientifique récente. Elle a débuté il y a déjà plus de 200 ans lors de l'essor de l'ensemble des théories mécaniques, avec les travaux de Laplace en 1776 et de Lagrange vers 1781 sur la propagation des ondes à la surface des canaux. Dès 1871, Barré de Saint-Venant a formulé mathématiquement, par un système d'équations différentielles, le mouvement des eaux à surface libre pouvant faire l'objet d'une description filaire. Depuis lors, ces équations servent de base aux modèles mathématiques d'écoulement à surface libre en rivière, en canaux et en réseau d'assainissement d'après Kovac (1988).

Pour modéliser la propagation des écoulements en réseau d'assainissement, on distingue classiquement deux grandes familles de modèles :

- les modèles issus de la mécanique des fluides et de l'hydraulique, appelés modèles hydrodynamiques, dérivés du modèle complet de Barré de Saint-Venant (1871) ;
- les modèles issus de la dynamique des systèmes, appelés souvent modèles globaux ou conceptuels, du type Muskingum ou réservoir linéaire par exemple.

Dans ce travail, on s'intéresse à la modélisation hydrodynamique de l'écoulement dans un collecteur sous influence du débit d'intrusion modélisé, en considérant la section mouillée réelle du collecteur. On suppose que ce débit d'intrusion avec apport localisé crée une onde de perturbation caractérisant la déformation de la surface libre qui s'ajoute à celle créée naturellement par le débit initial avant intrusion.

### 4-2- Hypothèses et équations :

Dans ce chapitre on s'intéresse à la modélisation hydrodynamique à partir du système de Barré de Saint-Venant ; en considérant l'équation de continuité, et l'équation dynamique, tenant compte du débit d'intrusion d'eaux parasites claires.

Notre raisonnement se base sur quelques hypothèses imposées, à savoir :

- L'écoulement dans le collecteur d'assainissement est à surface libre non permanent ;
- L'écoulement est considéré comme monodimensionnel selon l'axe Ox ;
- L'eau est supposée incompressible ;

**MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS INFLUENCE DU DEBIT D'INTRUSION MODELISE**

- L'écoulement dans le collecteur d'assainissement est perturbé par un débit d'intrusion d'eaux parasites extérieures ;
- L'écoulement est supposé non stratifié en négligeant l'influence rhéologique.

**4-2-1-L'équation de continuité :**

On considère un tronçon de collecteur de longueur  $\Delta x$  subissant un débit d'intrusion  $Q_{in}$  durant un intervalle de temps  $\Delta t$ , (Figure 4-1), la méthode des bilans de volumes stockés appliquée sur ce dernier donne ce qui suit :

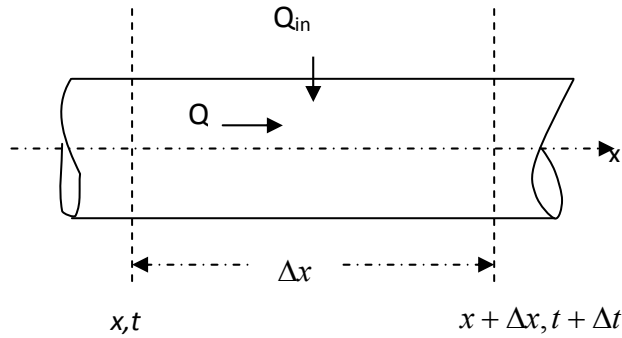


Figure 4-1 : tronçon de collecteur avec débit d'intrusion

$$V_s(t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} Q(x, t) dt + \int_x^{x+\Delta x} S(x, t) dx - \int_t^{t+\Delta t} Q(x + \Delta x, t) dt + \int_t^{t+\Delta t} Q_{in}(t) dt \quad (1) [24]$$

Ce volume s'exprime aussi sous la forme :

$$V_s(t + \Delta t) = \int_x^{x+\Delta x} S(x, t + \Delta t) dx \quad (2)$$

Avec :

$S(x, t)$  : la section mouillée variable dans le temps et dans l'espace ;

En égalisant (1) et (2) et après simplification, on obtient :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = Q_{in}(t) \quad (3)$$

**MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DEBIT D'INTRUSION MODELISE**

Pour notre raisonnement, on considère un collecteur d'assainissement partiellement rempli caractérisé par une section mouillée  $S_m$  influencée par une hauteur d'eau (h), (Figure 4-2), On peut donc écrire :

$$S_m = \pi r^2 - \frac{\varphi}{360} \pi r^2 + r^2 \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \quad (4)$$

En fonction de la profondeur « h », on peut écrire :

$$\begin{aligned} \cos \frac{\varphi}{2} &= \frac{y}{r} = \frac{h-r}{r} = \frac{h}{r} - 1 \\ \sin \frac{\varphi}{2} &= \frac{x}{r} = \frac{\sqrt{r^2 - (h-r)^2}}{r} = \sqrt{\frac{2h}{r} - \frac{h^2}{r^2}} \\ \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} &= \frac{2h}{D} \left( \frac{2h}{D} - 1 \right) \sqrt{\frac{D}{h} - 1} \end{aligned}$$

Tenant compte du paramètre de forme :  $\xi = \frac{h}{D}$ , on obtient la section mouillée :

$$S_m = \pi r^2 - \frac{\varphi}{360} \pi r^2 + r^2 \frac{2h}{D} \left( \frac{2h}{D} - 1 \right) \sqrt{\frac{D}{h} - 1} \quad (5)$$

Ou bien :

$$S_m = \pi r^2 \left[ 1 - \frac{\varphi}{360} + \frac{2\xi}{\pi} (2\xi - 1) \sqrt{\frac{1}{\xi} - 1} \right] \quad (6)$$

Avec :

D : Diamètre de la section transversale du collecteur ;

r : rayon de la section transversale du collecteur ;

**MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DEBIT D'INTRUSION MODELISE**

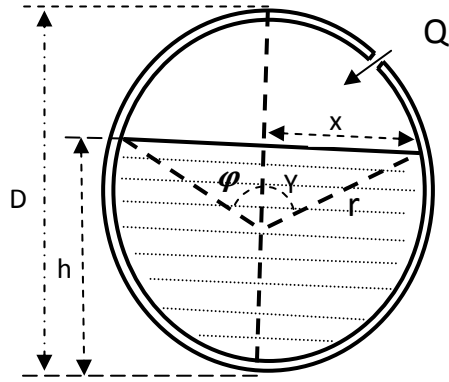


Figure 4-2: Section mouillée dans un collecteur d'assainissement.

En posant :

$$\frac{\varphi}{360} = \frac{\varphi}{2 \times 180} = \frac{1}{180} \arccos \frac{h-r}{r} = \frac{1}{\pi} \arccos \left( \frac{h}{r} - 1 \right) = \frac{1}{\pi} \arccos (2\xi - 1)$$

On trouve :

$$S_m = \pi r^2 \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos (2\xi - 1) + \frac{2\xi}{\pi} (2\xi - 1) \sqrt{\frac{1}{\xi} - 1} \right] \quad (7)$$

En remplaçant l'expression de la section mouillée dans l'équation (3), on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos (2\xi - 1) + \frac{2\xi}{\pi} (2\xi - 1) \sqrt{\frac{1}{\xi} - 1} \right] + \\ \frac{\partial}{\partial x} v \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos (2\xi - 1) + \frac{2\xi}{\pi} (2\xi - 1) \sqrt{\frac{1}{\xi} - 1} \right] = \frac{Q_{int}}{\pi r^2} \end{aligned} \quad (8)$$

Après simplification, l'équation (8) devient :

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - (2\xi - 1)^2}} + \sqrt{\frac{1}{\xi} - 1} \left( (4\xi - 1) - \frac{(2\xi - 1)}{(2 - 2\xi)} \right) \right]}_{\alpha} \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + v \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + \\ \underbrace{\frac{\partial v}{\partial x} \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \arccos (2\xi - 1) + \frac{2\xi}{\pi} (2\xi - 1) \sqrt{\frac{1}{\xi} - 1} \right]}_{\beta} = \frac{Q_{in}}{\pi r^2} \end{aligned} \quad (9)$$

**MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DEBIT D'INTRUSION MODELISE**

La théorie de Stocker [24], propose de calculer la célérité d'onde « a » en écoulement à surface libre par la relation suivante :

$$a = \sqrt{g \frac{S_m}{S'_m}} \quad (10)$$

Ou :  $S'_m$  représente la dérivée de la section mouillée dans le collecteur.

On obtient comme dérivée :

$$S'_m = r^2 \left[ \frac{2}{\sqrt{1-(2\xi-1)^2}} + 2\sqrt{\frac{1}{\xi}-1} \left( (4\xi-1) - \frac{(2\xi-1)}{(2-2\xi)} \right) \right] \quad (11)$$

Par conséquent, on obtient :

$$a = \sqrt{g \frac{\pi \left[ 1 - \frac{1}{\pi} ar \cos(2\xi-1) + \frac{2\xi}{\pi} (2\xi-1) \sqrt{\frac{1}{\xi}-1} \right]}{\left[ \frac{2}{\sqrt{1-(2\xi-1)^2}} + 2\sqrt{\frac{1}{\xi}-1} \left( (4\xi-1) - \frac{(2\xi-1)}{(2-2\xi)} \right) \right]}} \quad (12)$$

Par ailleurs, nous avons :

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = S'_m \frac{\partial \xi}{\partial t} = r^2 \left[ \frac{2}{\sqrt{1-(2\xi-1)^2}} + 2\sqrt{\frac{1}{\xi}-1} \left( (4\xi-1) - \frac{(2\xi-1)}{(2-2\xi)} \right) \right] \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (13)$$

$$\frac{\partial S_m}{\partial x} = S'_m \frac{\partial \xi}{\partial x} = r^2 \left[ \frac{2}{\sqrt{1-(2\xi-1)^2}} + 2\sqrt{\frac{1}{\xi}-1} \left( (4\xi-1) - \frac{(2\xi-1)}{(2-2\xi)} \right) \right] \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (14)$$

La relation (10) donne :

$$a^2 = g \frac{S_m}{S'_m}$$

Après dérivation de la relation (10), on obtient :

$$\begin{cases} 2a \frac{\partial a}{\partial x} = g \left( 1 - \frac{S_m S_m''}{S_m'^2} \right) \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ 2a \frac{\partial a}{\partial t} = g \left( 1 - \frac{S_m S_m''}{S_m'^2} \right) \frac{\partial \xi}{\partial t} \end{cases} \quad (15)$$

**MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DEBIT D'INTRUSION MODELISE**

On pose :  $k = 1 - \frac{S_m S_m''}{S_m'^2}$

$$\begin{cases} 2a \frac{\partial a}{\partial x} = gk \frac{\partial \xi}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{kg} 2a \frac{\partial a}{\partial x} \\ 2a \frac{\partial a}{\partial t} = gk \frac{\partial \xi}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{1}{kg} 2a \frac{\partial a}{\partial t} \end{cases} \quad (16)$$

L'expression (9) devient :

$$\alpha \left( \frac{\partial \xi}{\partial t} + v \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + \beta \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{Q_{int}}{\pi r^2} \quad (17)$$

En tenant compte de l'expression (16), l'expression (17) devient :

$$2 \frac{\partial a}{\partial t} + 2v \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\beta}{\alpha} \frac{kg}{a} \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kg}{\alpha a} \frac{Q_{int}}{\pi r^2} \quad (18)$$

Remarquons que le rapport  $\frac{\beta}{\alpha}$  n'est autre que le rapport  $\frac{S_m}{S_m'}$  de la relation (10), on peut donc

écrire en définitive :

$$2 \frac{\partial a}{\partial t} + 2v \frac{\partial a}{\partial x} + ka \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kg}{\alpha a} \frac{Q_{int}}{\pi r^2} \quad (18')$$

**4-2-2- L'équation dynamique :**

L'équation de Navier-Stokes définie par les variables d'Euler (Carlier, 1986 ; Lencastre, 1996 ; Graf et Altinakar, 1993, 1996) sert de base pour la détermination de l'équation dynamique et s'écrit comme suit:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{\rho} grad P^* + \vec{f} \quad (19)$$

**MODELISATION DE L'ÉCOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DÉBIT D'INTRUSION MODELISÉ**

Avec :

$v$  : vitesse d'écoulement ;

$\rho$  : masse volumique de l'eau ;

$P^*$  : pression totale ;

$f$  : forces de frottement.

Pour un filet liquide, ayant une trajectoire caractérisée par un rayon de courbure  $R_c$ , avec «  $s$  » sa tangente et «  $n$  » sa normale en un point «  $T$  », on peut écrire :

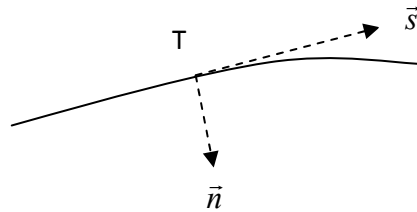


Figure 4-3: Représentation d'une trajectoire d'un filet liquide.

En projetant l'expression (19) sur ces deux axes, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{\partial v_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial s} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial s} - f_s \\ \frac{\partial v_n}{\partial t} + \frac{v_s^2}{R_c} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial n} - f_n \end{cases} \quad (20)$$

Dans notre cas, la vitesse d'écoulement n'est pas permanente, on peut donc d'une part poser :  $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$ , et d'autre part on suppose par hypothèse que la pente du sol ou de la canalisation est faible et que les filets liquides sont parallèles entre eux avec une répartition hydrostatique. Le système (20) se simplifie en assimilant «  $s$  » à «  $x$  » et devient avec :

$$R_c \rightarrow \infty$$

$$f_n = 0, \frac{\partial v_n}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{\partial P^*}{\partial n} = 0$$



**MODELISATION DE L'ÉCOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DÉBIT D'INTRUSION MODELISÉ**

Et par conséquent :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x} - f$$

La pression totale  $P^*$  s'exprime comme suit :

$$P^* = P_{atm} + \rho g (Z + h)$$

Avec :

$h$  : hauteur d'eau dans le collecteur ;

$Z$  : cote du radier ;

$P_{atm}$  : pression atmosphérique.

En dérivant cette équation on obtient :

$$\frac{\partial P^*}{\partial x} = \frac{\partial P_{atm}}{\partial x} + \rho g \frac{\partial Z}{\partial x} + \rho g \frac{\partial h}{\partial x}$$

Le premier terme du deuxième membre s'annule et en posant  $i = \frac{\partial Z}{\partial x}$  comme pente du collecteur, on obtient ainsi :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = +gi - f$$

Avec :  $f = gj$ , la force de frottement (perte de charge) due à la rugosité de la paroi, finalement on obtient :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = +g(i - j) \quad (21)$$

Les expressions (18') et (21) représentent le système d'équations de Saint Venant pour un écoulement à surface libre dans un collecteur avec intrusion d'un débit d'eaux parasites :

$$\begin{cases} 2 \frac{\partial a}{\partial t} + 2v \frac{\partial a}{\partial x} + ka \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{kg}{\alpha a} \frac{Q_{int}}{\pi r^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = +g(i - j) \end{cases} \quad (22)$$

**MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DEBIT D'INTRUSION MODELISE**

On note que le terme  $h$  du système (22) peut s'écrire comme suit :

$$h = \xi D \quad (23)$$

En remplaçant l'expression (23) dans le système d'équations (22) et en additionnant membre à membre les deux équations, on obtient :

$$2a \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \left( v + \frac{g}{2a} \xi D \right) \frac{\partial}{\partial x} \right] + v \left[ \frac{\partial}{\partial t} + (ka + v) \frac{\partial}{\partial x} \right] = \frac{kg}{\alpha a} \frac{Q_{\text{int}}}{\pi r^2} + g(i - j) \quad (24)$$

En retranchant membre à membre les deux équations du même système, on obtient :

$$2a \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \left( v - \frac{g}{2a} \xi D \right) \frac{\partial}{\partial x} \right] - v \left[ \frac{\partial}{\partial t} + (v - ka) \frac{\partial}{\partial x} \right] = \frac{kg}{\alpha a} \frac{Q_{\text{int}}}{\pi r^2} - g(i - j) \quad (25)$$

Par ailleurs nous avons selon l'expression (10):  $a \frac{S'_m}{S_m} = \frac{g}{a}$ , les expressions (24) et (25)

deviennent respectivement :

$$\left\{ \begin{aligned} 2a \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \left( v + a \frac{S'_m}{2S_m} \xi D \right) \frac{\partial}{\partial x} \right] + v \left[ \frac{\partial}{\partial t} + (ka + v) \frac{\partial}{\partial x} \right] &= \frac{kg}{a} \frac{Q_{\text{int}}}{\pi r^2 \alpha} + g(i - j) \end{aligned} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 2a \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \left( v - a \frac{S'_m}{2S_m} \xi D \right) \frac{\partial}{\partial x} \right] - v \left[ \frac{\partial}{\partial t} + (v - ka) \frac{\partial}{\partial x} \right] &= \frac{kg}{a} \frac{Q_{\text{int}}}{\pi r^2 \alpha} - g(i - j) \end{aligned} \right. \quad (27)$$

Tenant compte de la relation (15), et en divisant par  $k$ , on obtient :

$$\frac{2}{k} \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{g}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{D2a}{kg} \frac{\partial a}{\partial t}$$

Et :

$$\left\{ \begin{aligned} 2 \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \left( v + \frac{aD}{k} \right) \frac{\partial}{\partial x} \right] a + v \left[ \frac{\partial}{\partial t} + (ka + v) \frac{\partial}{\partial x} \right] &= g(i - j) + kg \frac{Q_{\text{int}}}{aS'_m} \\ 2 \left[ \frac{\partial}{\partial t} + \left( v - \frac{aD}{k} \right) \frac{\partial}{\partial x} \right] a - v \left[ \frac{\partial}{\partial t} + (v - ka) \frac{\partial}{\partial x} \right] &= -g(i - j) + kg \frac{Q_{\text{int}}}{aS'_m} \end{aligned} \right. \quad (28)$$

**MODELISATION DE L'ECOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DEBIT D'INTRUSION MODELISE**

Finalement on aboutit à :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{k} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{g}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{g}{k} (i-j) - \frac{gQ_{in}}{aS'_m} = -\frac{2a}{k} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{D2a}{k^2} \frac{\partial a}{\partial x} - \frac{v}{k} \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial a}{\partial x} \\ -\frac{1}{k} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{g}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{g}{k} (i-j) - \frac{gQ_{in}}{aS'_m} = -\frac{2a}{k} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{D2a}{k^2} \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{v}{k} \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial a}{\partial x} \\ \frac{dx}{dt} = v \pm \frac{a}{k} \end{array} \right. \quad (29)$$

On constate que la variation des paramètres a et v est très faible en fonction de la longueur « x » et que :  $\frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial t}$ , on peut donc écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = v + \frac{a}{k} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{kg}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{kgQ_{in}}{aS'_m} = g(i-j) \end{array} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = v - \frac{a}{k} \\ \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{kg}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{kgQ_{in}}{aS'_m} = g(i-j) \end{array} \right. \quad (30')$$

**MODELISATION DE L'ÉCOULEMENT DANS LE COLLECTEUR SOUS  
INFLUENCE DU DÉBIT D'INTRUSION MODELISÉ**

**4-3-Conclusion :**

A travers la littérature, il a été constaté que le système d'équations aux caractéristiques découlant des équations de Saint Venant, décrit le phénomène d'écoulement transitoire sans tenir compte du débit d'apport en général (débit d'intrusion).

Dans ce chapitre , il a été proposé un système d'équations présentant des courbes aux caractéristiques tenant compte du débit d'intrusion d'eaux parasites dans un collecteur circulaire à écoulement à surface libre. Ce système, constituant un modèle mécaniste, décrit le régime transitoire engendré sous l'influence du débit d'intrusion déjà modélisé dans le chapitre précédent.

Il a été constaté à travers ce modèle que le débit d'intrusion et la célérité d'onde interviennent avec le rapport «  $k$  » de la section mouillée  $S_m$  sur sa dérivée dans le système d'équation (puisque la célérité d'onde est en fonction de ce rapport d'une façon générale).

Ce système d'équations sert de base pour l'étude mécaniste d'un écoulement non permanent à surface libre véhiculé dans un collecteur de forme quelconque puisque c'est une question de détermination de la célérité d'onde en fonction de la section mouillée sous l'influence d'un débit d'intrusion d'eaux parasites claires à travers un orifice régis par plusieurs coefficients de débits.

# Chapitre 5

METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME  
TRANSITOIRE

## METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE

### 5-1- Introduction :

Dans ce chapitre on donne un aperçu descriptif de certaines méthodes décrivant le régime transitoire. Plusieurs méthodes numériques ont été développées, toutes basées sur les équations de Saint Venant qui sont un système d'équations différentielles partielles de 1<sup>er</sup> ordre de type hyperbolique.

Ces méthodes qu'elles soient graphiques, analytiques ou numériques, permettent toutes de quantifier le phénomène transitoire avec plus ou moins d'exactitude selon leurs hypothèses (les variations de pressions ou de hauteurs d'eau et de débit dans le temps et dans l'espace) Parmi ces méthodes on peut citer :

- Méthode arithmétique ;
- Méthode graphique ;
- Méthode algébrique ;
- Méthode de différences finies ;
- Méthode d'éléments finis ;
- Méthode des caractéristiques.

Pour les écoulements transitoires des liquides engendrés dans une conduite, la méthode des caractéristiques est généralement considérée comme une méthode numérique jugée plus efficace et précise par rapport à d'autres.

Avant de décrire certaines méthodes on a jugé nécessaire de formuler la solution généralisée des équations du régime transitoires.

### 5-2-Equations aux caractéristiques :

En utilisant les deux équations de Saint Venant qui sont respectivement l'équation de continuité et l'équation dynamique : [25]

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{g}{a^2} \left( \frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g(\sin \alpha + j) \quad (2)$$

En multipliant la première équation par  $a$ , on obtient :

$$a \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{g}{a} \left( \frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = -g(\sin \alpha + j) \quad (4)$$

$j$  : désigne le gradient de perte de charge.

En additionnant, puis en retranchant les deux équations on obtient le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial v}{\partial t} + (a+v) \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{g}{a} \left( \frac{\partial h}{\partial t} + (a+v) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = -g(\sin \alpha + j) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + (v-a) \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{g}{a} \left( \frac{\partial h}{\partial t} + (v-a) \frac{\partial h}{\partial x} \right) = -g(\sin \alpha + j) \end{cases} \quad (5)$$

Si on interprète la 1<sup>ère</sup> équation, on dira que la quantité :  $\frac{\partial v}{\partial t} + (a+v) \frac{\partial v}{\partial x}$  exprime la dérivée totale par rapport au temps de la vitesse  $\frac{dv}{dt}$  et de même pour la quantité  $\frac{\partial h}{\partial t} + (a+v) \frac{\partial h}{\partial x}$  qui exprime la dérivée totale de  $\frac{dh}{dt}$ .

Ceci se traduit, pour un observateur se déplaçant sur un trajet  $\frac{dx}{dt} = v \pm a$  par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \pm a \\ \frac{dv}{dt} \pm \frac{g}{a} \frac{dh}{dt} = -g(\sin \alpha + j) \end{cases} \quad (6)$$

En négligeant la vitesse du fluide «  $v$  » devant la célérité d'onde «  $a$  », on obtient le système :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \pm a \\ \frac{1}{g} dv \pm \frac{1}{a} dh = -(\sin \alpha + j) dt \end{cases} \quad (7)$$

On déduit donc :  $a \cdot dt = \pm dx$

Nous avons :  $\sin \alpha = -dz / dx$

En multipliant cette équation par  $\pm 1$ , on obtient :

$$\pm \frac{1}{g} dv + \frac{1}{a} dh + \frac{1}{a} dz = j dt \quad (8)$$

On pose :  $dh + dz = dH$

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

On obtient donc le système final :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \pm a \\ \frac{1}{a}dH \pm \frac{1}{g}dv = jdt \end{cases} \quad (9)$$

En remplaçant le débit Q par V S, On obtient ce qui suit:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \pm a \\ \frac{1}{a}dH \pm \frac{1}{gS}dQ = jdt \end{cases} \quad (10)$$

**5-3-Solution généralisée du régime transitoire :**

On considère un régime transitoire engendré par un écoulement à surface libre dans un collecteur d'axe « x », figure 5-1.

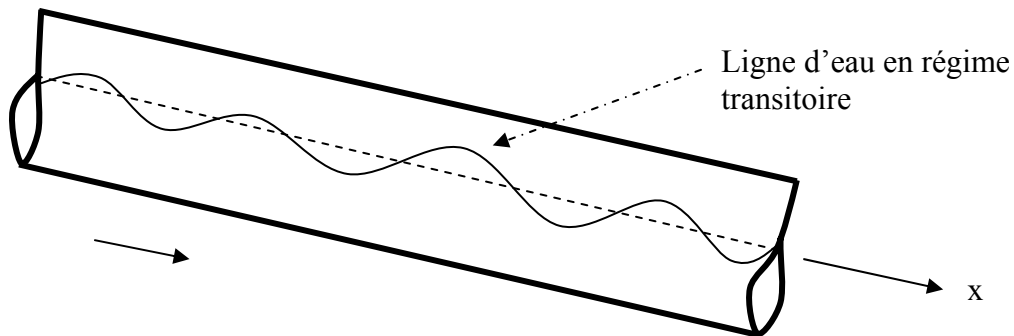


Figure 5-1 : Représentation du régime transitoire dans un collecteur

On désigne par F l'un des paramètres de l'écoulement (vitesse, hauteur,...), (figure (5-2))

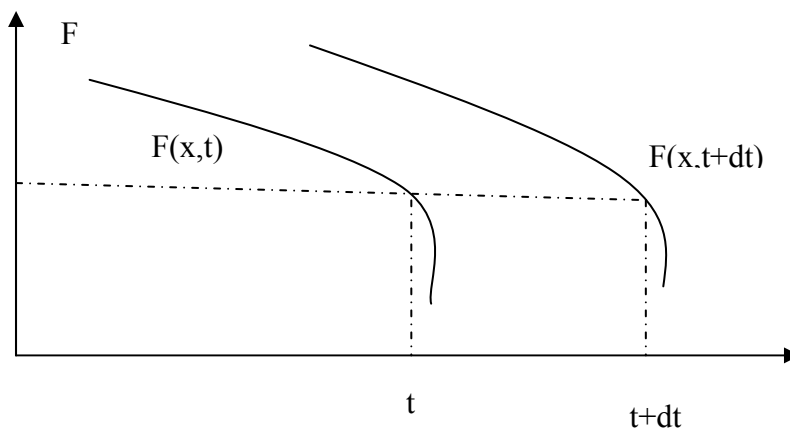


Figure 5-2 : Variation de la fonction « F »



**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

Cette figure montre la répartition de F le long du collecteur à un instant t visualisée par la courbe  $F(x, t)$ , plus tard par la courbe  $F(x, t+dt)$ . par imagination, on dispose de plusieurs observateurs équipés d'appareils de mesure nécessaires et se propageant dans la conduite par leur propre célérité relative « c » mesurée par rapport à l'écoulement. [26]

Si v est la vitesse absolue de l'écoulement, alors celle de l'observateur ( $v \pm a$ ), le signe + pour une propagation dans le sens de l'écoulement et le signe (-) pour le cas inverse.

Au point (x) et à l'instant t, la particule M du liquide se déplaçant à la vitesse v et possédant la quantité F du paramètre intéressé.

Et partant du point x à l'instant t l'observateur  $a \neq 0$  qui accompagne la particule M constatera une variation dF durant le temps dt et le déplacement v dt soit :

$$dF = \left( \frac{\partial F}{\partial t} + v \frac{\partial F}{\partial x} \right) dt \quad (11)$$

-Pour un observateur  $a \neq 0$  durant le temps dt se déplace de ( $v \pm a$ ) et constatera une variation dF soit :

$$d_0 F = \left( \frac{\partial F}{\partial t} + (v \pm a) \frac{\partial F}{\partial x} \right) dt \quad (12)$$

En retranchant ces deux équations on obtient :

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \pm \frac{1}{adt} (d_0 F - dF) \quad (13)$$

Ce qui permet de transformer les dérivées partielles en dérivées totales.

En appliquant cette équation aux paramètres, vitesse « v » et hauteur « h », on obtient:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\pm adt} (d_0 v - dv) \quad (14)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{\pm adt} (d_0 h - dh) \quad (15)$$

La combinaison de l'équation (13) avec l'équation de continuité donne

$$d_0 v - dv = \pm \frac{adS}{S} \quad (16)$$

La combinaison de l'équation (15) avec l'équation dynamique, donne.

$$dv = \frac{g}{\pm a} (d_0 h - dh) - g(\sin \alpha + j) dt \quad (17)$$

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

En additionnant les équations 16 et 17 on trouve :

$$d_0 h - \frac{a}{g} d_0 v + a(\sin \alpha + j) dt = \left( 1 \pm \frac{cdS}{Sdh} \right) dh \quad (18)$$

L'expression (18) représente l'équation différentielle aux dérivées totales.

**5-4-Différentes méthodes :**

**5-4-1-Méthode des caractéristiques :**

Considérons l'équation de continuité et l'équation de mouvement sans frottement que nous multiplions par  $\pm a/gS$ : [27]

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{a^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \pm \frac{a}{gS} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial h}{\partial x} \right) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

En combinant ces deux équations par addition et soustraction, nous obtenons:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( h \pm \frac{aQ}{gS} \right) \pm a \frac{\partial}{\partial x} \left( h \pm \frac{aQ}{gS} \right) = 0 \quad (20)$$

Cette forme est égale à la dérivée totale par rapport au temps de  $\left( h \pm \frac{aQ}{gS} \right)$  :

$$\frac{d}{dt} \left( h \pm \frac{aQ}{gS} \right) = 0 \quad (21)$$

Si :  $\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (22)$

Dans un plan x, t, l'équation (22) représente des courbes (ici des droites) sur lesquelles le système (21) est vérifié. L'intersection de ces deux droites définit donc une solution du système d'équations (Figure 5-3).

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

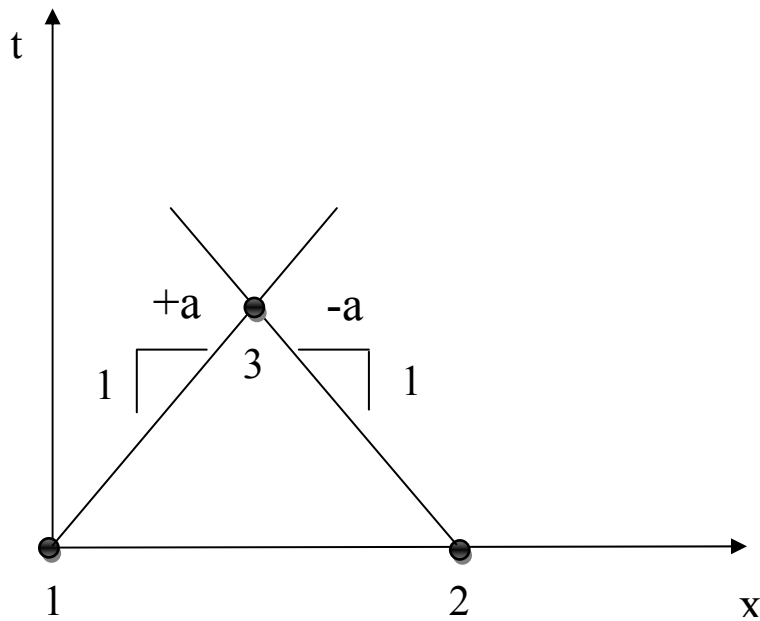


Figure 5-3 Schéma de la méthode des caractéristiques.

Ainsi, si les points 1 et 2, situés au temps initial, représentent des positions où les valeurs des pressions et débits sont connus, alors il sera possible de calculer les valeurs au point 3, situé en  $\Delta x/2$  et  $\Delta t/2$  en considérant une forme différentielle du système (21):

$$\frac{\Delta}{\Delta t} \left( h \pm \frac{aQ}{gS} \right) = 0 \quad (23)$$

La méthode des caractéristiques ou plus exactement des équations aux caractéristiques déjà vu plus haut découle de l'équation de continuité et de l'équation de la dynamique. En effet les deux équations différentielles partielles régissant le phénomène transitoire sont transformées par la méthode des caractéristiques en quatre équations différentielles totales.

Pour le calcul du régime transitoire par un programme informatique les équations aux caractéristiques sont exprimées en différences finies, pour un intervalle de temps spécifié. Toutefois l'analyse de ce régime par cette méthode peut se faire manuellement, néanmoins c'est une procédure de calcul extrêmement longue. Cette méthode présente certains avantages à savoir :

- Le critère de stabilité de la méthode est fermement établi, c'est à dire que la précision et l'exactitude des résultats sont assurées ;
- Les conditions aux limites sont facilement programmables ;
- les systèmes hydrauliques les plus complexes peuvent être manipulés facilement (relativement à d'autres méthodes) ;

## METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE

- La programmation des équations est très aisée ;
- C'est une méthode assez détaillée qui permet d'avoir les caractéristiques de l'écoulement en n'importe quel point de la conduite et à n'importe quel temps.

D'autre part la méthode des caractéristiques nécessite l'emploi d'un schéma d'interpolation, lorsqu'un réseau multi-branches est composé de plusieurs conduites avec des propriétés très différentes, ou lorsque les termes non linéaires des équations principales sont importants ou dans le cas des écoulements diphasiques.

### 5-4-2-Méthode des différences finies :

Cette méthode consiste à remplacer les opérateurs différentiels par des opérateurs basés sur des intervalles de temps et d'espace finis  $\Delta t$  et  $\Delta x$ , puis à résoudre le système d'équations algébriques ainsi obtenu en tenant compte des conditions initiales et aux limites.

Pour chaque position  $i$  sur l'axe  $x$ , on peut écrire ces deux équations en mettant en évidence les variables à évaluer au temps  $t+\Delta t$ . Il devient alors facile d'illustrer la méthode au moyen d'un chiffrier électronique.

Cette méthode peut être utilisée pour résoudre n'importe quel problème d'écoulement non permanent. Elle est généralement appliquée dans les problèmes d'écoulement à surface libre non permanent, cependant elle peut servir pour résoudre les problèmes de coup de bélier

Le domaine d'application de la méthode aux différences finies possède la possibilité de développer des schémas implicites aux différences finies centrées et explicites.

Les schémas aux différences finies explicites admettent une interprétation par les équations caractéristiques. [28]

On préfère le schéma explicite, puisque les équations qui interviennent sont non linéaires. Les schémas aux différences finies peuvent présenter des avantages certains lorsque la géométrie de problème est simple, l'inconvénient principal de ces schémas réside dans le fait de prendre en compte les conditions limites qui s'intègrent au contraire dans le cas de la méthode des éléments finis.

Ces schémas aux différences finies ont la réputation de dépendre du problème considéré si bien qu'il n'existe pas aujourd'hui de codes de calcul généraux utilisant le principe des différences finies. Le choix et la construction d'un schéma aux différences dépendent de plusieurs facteurs, telles que la précision, la stabilité et la meilleure incorporation d'importants principes physiques par exemple : les lois de conservation.

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

**5-4-2-1-Schémas explicites :**

Quatre méthodes sont couramment utilisées.

**a-Schéma de Lax-Wendroff :**

La description synthétique du schéma de Lax. Wendroff considère au départ l'équation de continuité et l'équation dynamique (méthode généralement utilisée pour les canaux): [29]

-Equation de continuité :

$$\frac{\partial(Bh)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = U_p B \quad (24)$$

B : largeur du plan d'eau

h : profondeur d'eau

-Equation de quantité de mouvement :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + g \frac{\partial L}{\partial x} + gA(S_f - S_0) - \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t A \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q}{A} \right) \right) = -U_p \frac{Q}{h} \quad (25)$$

Les deux équations peuvent s'écrire synthétiquement comme suit :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + S + D = P \quad (26)$$

Ou

- U, est le vecteur solution ;
- F, le vecteur des termes de flux ;
- S, le vecteur des termes source ;
- D, le vecteur des termes de diffusion ;
- P, le vecteur des termes de production ;
- A : section mouillée ;
- L : longueur du domaine étudié.

$$\text{Avec : } U = \begin{pmatrix} Bh \\ Q \end{pmatrix} ; \quad F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + g \frac{Bh^2}{2} \end{pmatrix} ; \quad S = \begin{pmatrix} 0 \\ g \left( \frac{n^2 |Q|}{R_h^{4/3}} - AS_o \right) \end{pmatrix}$$

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

$$D = \left[ -\frac{\partial}{\partial x} \left( 0 \frac{\partial \left( \frac{Q}{A} \right)}{\partial x} \right) \right] \quad ; \quad P = \begin{pmatrix} U_p B \\ U_p \frac{Q}{h} \end{pmatrix}$$

Où :

$n = 1/K_{st}$  coefficient de Manning

$K_{st}$  : coefficient de Strickler.

$R_h$  : rayon hydraulique au droit d'un profil.

La forme variationnelle du système est donnée par :

$$W = \int_L (U^{t+\Delta t} - U^t) dx + \Delta t \int_L \left( \frac{\partial F^{t+\frac{\Delta t}{2}}}{\partial x} + S^{t+\frac{\Delta t}{2}} - P^{t+\frac{\Delta t}{2}} + D^t \right) dx = 0 \quad (27)$$

Le schéma de Lax- Wendroff comporte une étape de prédiction suivie d'une étape de correction. Ces deux étapes sont incluses dans une même boucle sur les éléments suivant le schéma de la figure 5-4.

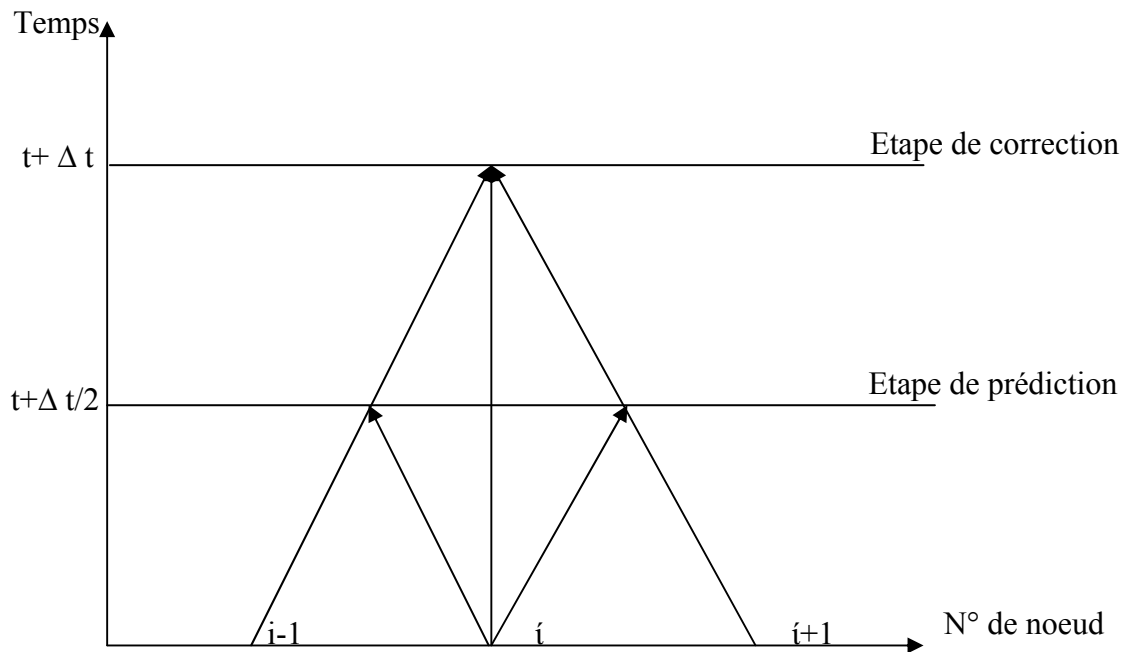


Figure 5-4 : Schéma de Lax- Wendroff.

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

a-Etape de prédiction :

Les valeurs  $U^{t+\frac{\Delta t}{2}}$ ,  $F^{t+\frac{\Delta t}{2}}$ ,  $S^{t+\frac{\Delta t}{2}}$ ,  $P^{t+\frac{\Delta t}{2}}$  sont moyennées par élément à l'instant  $t + \frac{\Delta t}{2}$

comme suit, à partir des expressions (26) et (27) pour obtenir donc:

$$U^{t+\frac{\Delta t}{2}} = U^t - \frac{\Delta t}{2} \left( \frac{\partial F^t}{\partial x} + S^t - P^t \right) \quad (28)$$

Les termes de diffusion ne sont pas pris en compte à ce niveau.

b-Etape de correction :

La forme variationnelle est utilisée sur le domaine de longueur L :

$$W = \int_L \delta U (U^{t+\Delta t} - U^t) dx - \Delta t \int_L \frac{\partial \delta U}{\partial x} \left( F^{t+\frac{\Delta t}{2}} + \overline{D^t} \right) dx + \Delta t \int_L \partial U \left( S^{t+\frac{\Delta t}{2}} - P^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right) dx + \left[ \delta U \Delta t \left( \overline{D^t} + F^{t+\frac{\Delta t}{2}} \right) \right]_{x=0}^{x=L} = 0 \quad (29)$$

Avec :  $\overline{D^t} = A^t V^t \frac{\partial \left( \frac{Q}{A} \right)^t}{\partial x}$  et  $\delta U$  la fonction de pondération de Galerkin.

Les avantages que procure ce schéma sont :

- En premier lieu, les capacités de stockage nécessaire restent faibles puisque le schéma ne nécessite d'assembler que la seule matrice masse (devant le terme temporel) ; les autres entités étant des vecteurs ;
- Par ailleurs, les deux premières étapes peuvent être assemblées dans une même boucle sur les éléments.

Lax et Wendroff (1960) ont présenté un algorithme numérique à deux pas de précision d'onde permettant la résolution sur ordinateur de l'évolution transitoire des écoulements.

L'établissement de cet algorithme est basé sur le caractère conservatif des équations aux dérivées partielles qui représentent l'écoulement, ce qui présente l'avantage d'essayer de préserver les propriétés de conservation des quantités de masse, de mouvement et d'énergie dans ces approximations aux différences.

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

Ceci permet de minimiser l'erreur faite sur ces derniers. Cependant si la procédure d'interpolation est performante à chaque maillage de points et pour chaque pas de temps sans se soucier si les distributions spatiales ont en besoins.

Les schémas explicites étudiés par M.H Chaudry et M.Y.Hussaini sont représentés par la méthode de Mac –Cormack (1971), le schéma de Lamda et le schéma de Gabutti (1983). Ces schémas sont introduits pour résoudre les équations différentielles, partielles hyperboliques quasi-linéaires décrivant le phénomène du régime transitoire en phase de fermeture dans une conduite. Soit donc une brève description des trois schémas cités :

**b- Schéma de Mac-Cormack :**

Le schéma de Mac-Cormack est un schéma précis du 2<sup>ème</sup> ordre et comprend deux étapes : prédiction et correction, des approximations à différences finies sont utilisées pour deux alternatives :

*1<sup>ère</sup> alternative* : les approximations aux différences finies des pas suivants sont utilisées dans la partie prédicteur, et des approximations aux différences finies dans le pas avant sont utilisées dans la partie correctrice.

*2<sup>ème</sup> alternative* : les approximations aux différences finies dans le pas précédent sont utilisées dans la partie prédiction et les différences finies dans le pas suivant dans la partie correction. [30]

Ce schéma recommande l'utilisation de la 1<sup>ère</sup> alternative à une étape de temps et la 2<sup>ème</sup> pendant la prochaine étape de temps suivie par la 1<sup>ère</sup> alternative encore une fois.

**c- Schéma de Mortti's Lamda :**

Les équations de Saint Venant sont transformées dans les axes de mouvement des perturbations afin d'utiliser les différences finies durant les parties de prédiction et de correction. Le schéma de Lamda se base sur les équations suivantes qui régissent le phénomène du régime transitoire. [26]

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gS} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{30}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gS \frac{\partial h}{\partial x} + R|Q|Q = 0 \tag{31}$$

En multipliant l'équation 31 par  $\mathcal{G}$  et en additionnant celle-ci avec l'équation 30 on aboutit à :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathcal{G}gS \frac{\partial h}{\partial x} + \mathcal{G} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{a^2}{\mathcal{G}gS} \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \mathcal{G}R|Q|Q = 0 \tag{32}$$



**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

$$\text{Soit : } \vartheta gS = \frac{dx}{dt} = \frac{a^2}{\vartheta gS} \quad ; \quad \vartheta = \pm \frac{a}{gS}$$

Cette dernière représente les directions des caractéristiques.

$$\partial^+ = \frac{dx}{dt} = +a \quad : \text{Caractéristique positive ;}$$

$$\partial^- = \frac{dx}{dt} = -a \quad : \text{Caractéristique négative.}$$

Ce qui permet d'écrire l'expression :

$$\begin{cases} \left( \frac{\partial h}{\partial t} + \lambda^+ \frac{\partial h^+}{\partial x} \right) + \frac{a}{gS} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda^+ \frac{\partial Q^+}{\partial x} \right) + \frac{aR}{gS} Q|Q| = 0 \\ \left( \frac{\partial h}{\partial t} + \lambda^- \frac{\partial h^-}{\partial x} \right) + \frac{a}{gS} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda^- \frac{\partial Q^-}{\partial x} \right) + \frac{aR}{gS} Q|Q| = 0 \end{cases} \quad (33)$$

**d- Schéma de Gabutti :**

Dans ce schéma, les dérivées partielles sont remplacées par les approximations aux différences finies suivantes :

-Partie prédiction : cette partie est présentée comme suit [29]

$$\begin{aligned} f_x^+ &= \frac{f_i^j + f_{i-1}^j}{\Delta x} ; \\ f_x^- &= \frac{f_{i+1}^j - f_i^j}{\Delta x} \end{aligned} \quad (34)$$

Le terme  $f$  représente le débit  $Q$  et la charge  $h$ .

En tenant compte de ces approximations aux différences finies, on obtient les valeurs prédites du débit  $Q$  et de la charge  $h$  :

$$Q_i^{j+1} = Q_i^j - \Delta t \left[ \frac{1}{2} \frac{gS}{a} (\lambda^+ h_x^+ - \lambda^- h_x^-) + \frac{1}{2} (\lambda^+ Q_x^+ + \lambda^- Q_x^-) + R Q_i^j |Q_i^j| \right] \quad (35)$$

$$h_i^{j+1} = h_i^j - \Delta t \left[ \frac{1}{2} (\lambda^+ h_x^+ + \lambda^- h_x^-) + \frac{1}{2} \frac{a}{gS} (\lambda^+ Q_x^+ - \lambda^- Q_x^-) \right] \quad (36)$$

-Partie correction :

$$f_x^+ = \frac{f_i^j + f_{i-1}^j}{\Delta x} ; f_x^- = \frac{f_{i+1}^j - f_i^j}{\Delta x} \quad (37)$$

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

En utilisant ces approximations aux différences finies et tenant compte des relations, les paramètres  $h_i$  et  $Q_i$  sont calculés comme suit :

$$Q_i^{j+1} = Q_i^j + \frac{1}{2} \Delta t (Q_i^* + Q_i) \quad (38)$$

$$h_i^{j+1} = h_i^j + \frac{1}{2} \Delta t (h_i^* + h_i) \quad (39)$$

**5-4-2-2-Schéma Implicite :**

Dans la méthode des différences finies, la conduite est divisée en tronçon et la résolution des équations se fait simultanément pour le système entier par chaque pas de temps qui consiste à remplacer les dérivées partielles par des formules aux différences établies en des points intermédiaires entre le niveau de temps  $n$  et le niveau  $n+1$ .

Le principe avantage de la méthode est que le pas de temps n'est pas limité au pas de temps courant pour la stabilité de la solution cependant, la condition pas de temps –distance est un besoin dans la résolution de la majorité des écoulements transitoires. A partir des équations de continuité et de mouvement on a :

$$\begin{cases} h_n + \frac{Q_t}{gS} + \frac{Q^2}{2gDS^2} = 0 \\ h_t + \frac{a^2}{gS} Q_n = 0 \end{cases} \quad (40)$$

Si on applique le schéma implicite centré ; Les équations sont placées en différences finies, comme suit :

$$\frac{h'_B + h_B - h'_A - h_A}{2\Delta x} + \frac{Q'_A + Q'_B - Q_A - Q_B}{2gS\Delta t} + \int \frac{(Q_A + Q_B)^2}{2gDS^2} = 0 \quad (41)$$

$$\frac{h'_A + h'_B - h_A - h_B}{2\Delta t} + \frac{a^2}{gS} \frac{Q'_B + Q_B - Q'_A - Q_A}{2\Delta x} = 0 \quad (42)$$

Après réarrangement de ces équations on obtient :

$$h'_B - h'_A + \frac{B}{C_r} (Q'_A + Q'_B) = C_1 \quad (43)$$

$$h'_B + h'_A + BC_r (Q'_B - Q'_A) = C_2 \quad (44)$$

Avec :  $B = \frac{a}{gS}$  : impédance caractéristique ;

$$C_r = \frac{a\Delta t}{\Delta x} : \text{Nombre de Courant.}$$

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

Et les constantes deviennent :

$$\begin{cases} C_1 = \int \frac{(Q_A + Q_B)^2}{2gDS^2} + (h_B - h_A) + \frac{B}{C_r}(Q_A + Q_B) \\ C_2 = h_A + h_B + C_r B(Q_B - Q_A) \end{cases} \quad (45)$$

On suppose que les conditions aux points A et B sont connues .Nous avons donc quatre inconnues pour les deux équations .Deux équations sont valables pour chaque pas de temps en plus des conditions aux limites.

**5-4-3 Méthodes des éléments Finis :**

La méthode d'éléments finis a été largement utilisée dans différents problèmes d'écoulement, et a trouvé une large application dans le domaine des solides et les problèmes de mécanique des fluides cependant son succès dans l'informatique des transitoires dans les conduites n'est pas établi.

Il y a une motivation considérable d'utiliser cette méthode ; cependant, pour les applications utilisées prouvent une grande flexibilité des valeurs mesurées des différentes propriétés.

La méthode des résidus mesurés doit être généralement utilisée. La fonction déterminée (fonction obtenue) est substituée normalement par l'équation différentielle qui n'est pas égale à la solution exacte ; la différence étant le reste.

Ce résidu, multiplié par la fonction mesurée, égale au résidu mesuré. La méthode d'éléments finis essaye de tendre les résidus mesurés vers zéro dans un sens large. La particularité de choisir la fonction de mesure prouve les différences des résidus mesurés.

Les fluides transitoires dans lesquels les écoulements variables sont continus et sont sujet à un changement rapide doivent être complètement modélisés.

La méthode des éléments finis a été également considérée par J.P Hufteus et D. Khaletzky (1984) pour résoudre les équations de Navier Stockes, en utilisant la méthode des caractéristiques. [31]

Les méthodes explicites permettent de calculer les valeurs nouvelles de A et B en chaque point de calcul en temps  $t+\Delta t$  en utilisant les valeurs connus en temps  $t$  des points de calcul situés dans le voisinage immédiat du point calculé.

## METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE

A cette fin, on évalue les valeurs des dérivées en calculant les valeurs des seconds membres des équations en ces différents points au temps  $t$ . Toute fois une analyse assez simple montre que les résultats du calcul sont parfaitement aberrant si l'on choisit un intervalle  $\Delta t$  de temps trop grand ;il s'agit d'un phénomène d'instabilité numérique du schéma .pour que les résultats soient corrects ,il faut que la relation entre le pas d'espace et l'intervalle de temps en chaque point de calcul satisfasse à la condition « CFL » du nom de trois mathématiciens : Courant, Friedrich, et Lewy exprimée en termes du nombre de Courant : $C_r < 1$ .

$$C_r = \frac{\Delta t(a + |V|)}{\Delta x} ; \quad a = \left( \frac{gS}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (46)$$

Avec :

- $C_r$  : nombre de courant ;
- $a$  : célérité des petites ondes ;
- $S$  : surface ;
- $D$  : diamètre du collecteur ;

En principe plus la valeur du nombre de courant est proche de l'unité, plus précise est la solution numérique .Mais il suffit d'approcher de trop près l'unité ou de la dépasser pour détruire la solution.

Avec les schémas implicites aux différences finies on peut se libérer de la condition CFL. Pour cela au lieu de calculer les seconds membres des équations au temps  $t$ , on admet que leur valeur est une moyenne pondérée, entre celle qu'ils ont au temps  $t$  et celle qu'ils ont au temps  $t + \Delta t$  .On aboutit alors à un système d'équation algébriques non linéaire à résoudre, on calcule les nouvelles valeurs simultanément pour tous les points de calcul.

La diffusion numérique se comporte une viscosité artificielle et peut sérieusement fausser les résultats lorsqu'on emploie les méthodes implicites.

**METHODES DE SOLUTIONS DU REGIME TRANSITOIRE**

**5-5-Conclusion:**

Dans ce chapitre on a présenté différents méthodes numériques permettent la résolution du régime transitoire.

On peut dire que la méthode des caractéristiques est beaucoup plus maniable et efficace en ses avantages suscités bien qu'elle a ses faiblesses par contre la méthode des différences finies est moins précise que la méthode des caractéristiques, du fait que son exactitude est conditionnée par la stabilité de ses schémas de calcul.

Pour la méthode de différences finies on a cité les schémas de : Lax-Wendroff –de Mac – Cormack, de Mortti's Lamda et de Gabutti.

La méthode des caractéristiques demeure actuellement très utilisée pour le calcul des écoulements non permanents dans des systèmes très complexes.

La faiblesse des méthodes numériques réside dans les erreurs résultantes de l'arrondissement des longueurs partielles entre les nœuds de calcul le long de la conduite.

# Chapitre 6

PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION  
LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME  
TRANSITOIRE

## PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE

### 6-1-Introduction:

La méthode des caractéristiques est une des plus utilisées pour la modélisation des phénomènes de propagation d'onde. En effet, les équations aux dérivées partielles issues des équations différentielles de base sont relativement faciles à calculer et, reflètent l'aspect physique de l'écoulement, notamment au niveau des courbes caractéristiques.

Cependant, cette méthode a ses inconvénients : elle impose souvent un pas de temps commun, limité par le critère de stabilité de la méthode, restreignant la relation entre les paramètres de temps et d'espace.

On sait que l'étude des surpressions dans les systèmes en charge par la méthode Schnyder-Bergeron oblige le projeteur à découper le réseau étudié en longueurs élémentaires. Ces dernières sont choisies de telle façon que les temps de parcours par les ondes des différents tronçons constituant le réseau, soient des multiples entiers d'un temps de parcours élémentaire  $\Delta t$ . [32]

On doit donc choisir le plus grand commun diviseur de toutes les valeurs  $l_i/a_i$ , ( $l_i$  étant la longueur du tronçon  $i$  ;  $a_i$  étant la célérité des ondes dans ce tronçon), caractérisant les différents tronçons du réseau. Ce plus grand commun diviseur peut être très faible et par la suite, la longueur des calculs, avec un faible pas de temps, peut être très grande.

On a donc intérêt à modifier légèrement la longueur de certains tronçons, de manière à trouver un plus grand commun diviseur et alléger ainsi le travail du projeteur et réduire le coût de l'étude. Il existe bien un moyen d'éliminer l'erreur due à la différence entre la longueur réelle du tronçon et la longueur provenant de l'utilisation d'un nombre entier de  $\Delta t$  ; il s'agit de processus d'interpolation ou d'extrapolation utilisé dans certains laboratoires de calcul.

Mais on peut se demander si, dans le cas d'ondes raides, ce système ne dénature pas la forme des ondes et s'il n'y a pas là une source d'erreurs difficilement appréciables.

Une procédure d'interpolation est nécessaire dans la méthode d'intervalles de temps spécifiés. L'interpolation est aussi nécessaire s'il y a une vitesse d'onde variable due aux propriétés des fluides variables, une vitesse dépendante de la pression, ou des propriétés variables des matériaux constituant la paroi.

Les interpolations peuvent être utiles pour maintenir une marche de temps commune dans le système à multiple conduites. Cependant, il y a un désavantage majeur dans l'utilisation d'interpolation puisque l'amortissement artificiel et numérique est introduit dans

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

les résultats. Il est plus critique dans les composants de l'amortissement à haute fréquence dans les transitoires où des changements se produisent dans une marche de temps unique.

L'analyse des erreurs introduites par l'utilisation de la méthode des caractéristiques a été également étudiée en considérant le cas très simple d'une conduite constituée de deux tronçons de caractéristiques différentes. Ainsi ils ont essayé de trouver comment varie l'erreur faite entre le calcul avec le pas  $\Delta t$  correspondant au plus grand commun diviseur réel des temps  $l_i/a_i$ , et un calcul fait avec un pas de temps  $\Delta t$  plus grand correspondant à une disposition un peu différente des deux tronçons .[33]

**6-2-Système d'équations de base :**

Dans le chapitre 4 , il a été déduit deux systèmes présentant des courbes aux caractéristiques qui décrivent le régime transitoire engendré sous l'influence du débit d'intrusion déjà modélisé dans le chapitre 3 .Rappelons que ce système est de la forme :

$$(C^+) \begin{cases} \frac{dx}{dt} = v + \frac{a}{k} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{kg}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{kgQ_{in}}{aS'_m} = g(i-j) \end{cases} \quad (1)$$

$$(C^-) \begin{cases} \frac{dx}{dt} = v - \frac{a}{k} \\ \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{kg}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{kgQ_{in}}{aS'_m} = g(i-j) \end{cases} \quad (2)$$

Où : h, v, x, et, t désignent respectivement la hauteur d'eau (écoulement à surface libre), la vitesse d'écoulement du fluide ; la distance le long de la conduite ; et le temps.

La littérature montre que le régime transitoire est étudié à partir des équations aux caractéristiques (C<sup>+</sup>) et (C<sup>-</sup>) en négligeant d'une part la perte de charge, le débit d'apport latéral, pour une pente faible. D'autre part, le raisonnement considère que les droites aux caractéristiques aboutissent aux nœuds de calcul en discrétisant la longueur du collecteur en pas de calcul  $\Delta x$ .



**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

Dans notre raisonnement, nous supposons que les pertes de charge sont négligeables et que la pente du collecteur est très faible. Nous nous intéressons seulement à l'influence du débit d'apport latéral causé par l'intrusion des eaux parasites qui perturbe le régime d'écoulement à l'intérieur du collecteur. Ainsi le système ci-dessus se réduit à :

$$(C^+) \begin{cases} \frac{dx}{dt} = v + \frac{a}{k} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{kg}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{kgQ_{in}}{aS'_m} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$(C^-) \begin{cases} \frac{dx}{dt} = v - \frac{a}{k} \\ \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{kg}{Da} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{kgQ_{in}}{aS'_m} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

On envisage le cas où les pieds des caractéristiques  $C^+$  et  $C^-$  aboutissent entre deux nœuds limitant un intervalle de temps spécifique ; On peut donc discrétiser ces équations par des différences finies en utilisant un maillage rectangulaire en espace- temps comme le montre la figure 6-1 :

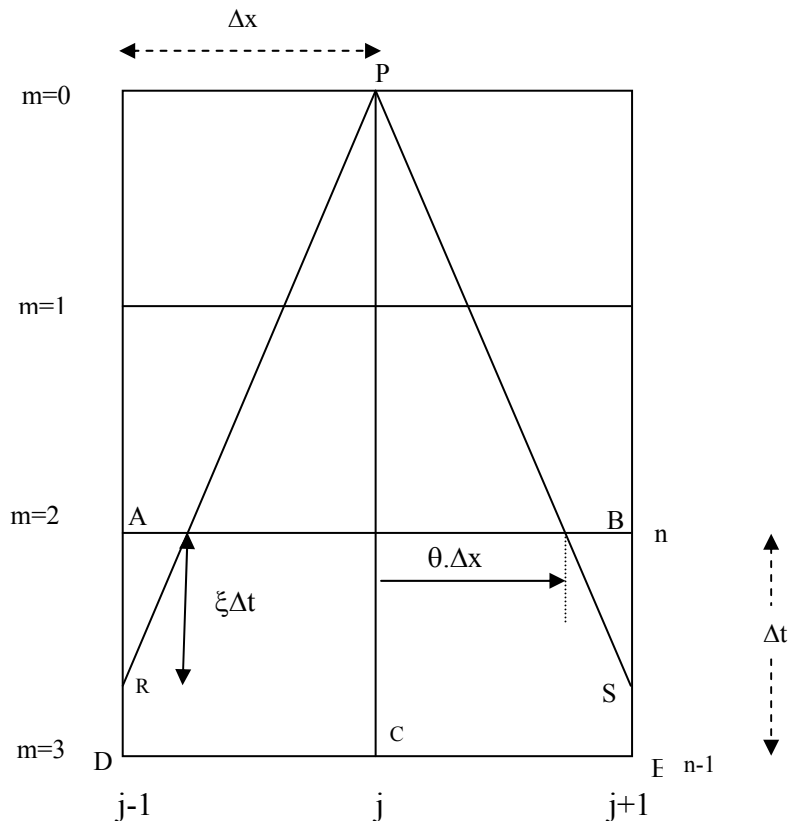


Figure 6-1: Représentation du maillage de discrétisation

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

Les paramètres  $m$  et  $n$  désignent respectivement le coefficient de remontée dans le temps, et le nombre de pas de temps.

**6-3-Interpolation numérique :**

La procédure de la méthode d'interpolation est nécessaire pour définir la position des points inter nodaux. On se sert de l'interpolation linéaire dans le temps qu'on l'applique pour le cas de la Figure 6-1.

Dans de cette figure, les points R et S ne sont pas des nœuds du maillage et leurs valeurs ne sont donc pas connues à la différence des nœuds qui leurs sont adjacents, c'est à dire les nœuds A, B, D, E. Ainsi, on peut se donner une fonction  $\phi$  comme étant la variable ( $h$  ou  $v$ ) et l'interpoler.

On peut écrire en effectuant un développement de Taylor:

$$\phi_{j-1}^m = \phi_R - \xi \Delta t \frac{d\phi_R}{dt}$$

Ou tout simplement :

$$\phi_{j-1}^{m+1} = \phi_R + (1 - \xi) \Delta t \frac{d\phi_R}{dt} \quad (5)$$

Où  $\xi \Delta t$  est le temps qui sépare les points A et R comme les points B et S. Le paramètre  $\xi$  varie entre 0 et 1, et a une grande importance pour le calcul de l'amortissement comme on le voit un peu plus loin.

On trouve ainsi :

$$\phi_R = (1 - \xi) \phi_{j-1}^m + \xi \phi_{j-1}^{m+1} \quad (6)$$

De même, en effectuant ce même raisonnement sur l'autre droite caractéristique, on obtient :

$$\phi_S = (1 - \xi) \phi_{j+1}^m + \xi \phi_{j+1}^{m+1} \quad (7)$$

En injectant (6) et (7) dans les relations précédentes, on trouve le système :

$$h_p - \frac{1}{2}(1 - \xi)(h_A + h_B) - \frac{1}{2}\xi(h_D + h_E) + \frac{a}{2g} [(1 - \xi)(v_B - v_A) + \xi(v_E - v_D)] = \frac{kgQ_{in}}{aS'_m} \quad (8)$$

$$v_p - \frac{1}{2}(1 - \xi)(v_A + v_B) - \frac{1}{2}\xi(v_D + v_E) + \frac{g}{2a} [(1 - \xi)(h_B - h_A) + \xi(h_E - h_D)] = -\frac{kgQ_{in}}{aS'_m} \quad (9)$$

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

La solution de ce système peut se mettre sous la forme d'une série de Fourier, [34] :

$$\phi(x, t) = \phi(j \Delta x, m \Delta t) = \sum_{k=1}^{\infty} \phi_k \exp [i(\sigma_k x + \beta_k t)] \quad (10)$$

Avec :

$$\sigma_k = \frac{k\pi}{L_K} \text{ et } \beta_k = \frac{k\pi}{T}$$

Où :  $\sigma_k$  et  $\beta_k$  désignent les coefficients dans la série de Fourier ;

T désigne la période de l'onde ;

$L_k$ - longueur d'onde au  $k^{\text{ième}}$  harmonique.

En s'intéressant au  $k^{\text{ième}}$  terme, on peut écrire :

$$\phi_A(x, t) = \phi((j-1)\Delta x, m\Delta t) = \phi_k \exp [i(\sigma_k (j-1)\Delta x + \beta_k m\Delta t)] \quad (11)$$

$$\phi_B(x, t) = \phi((j+1)\Delta x, m\Delta t) = \phi_k \cdot \exp [i(\sigma_k (j+1)\Delta x + \beta_k m\Delta t)] \quad (12)$$

$$\phi_D(x, t) = \phi((j-1)\Delta x, (m+1)\Delta t) = \phi_k \cdot \exp [i(\sigma_k (j-1)\Delta x + \beta_k (m+1)\Delta t)] \quad (13)$$

$$\phi_E(x, t) = \phi((j+1)\Delta x, (m+1)\Delta t) = \phi_k \exp [i(\sigma_k (j+1)\Delta x + \beta_k (m+1)\Delta t)] \quad (14)$$

$$\phi_P(x, t) = \phi(j\Delta x, 0) = \phi_k \cdot \exp [i(\sigma_k j\Delta x)], \text{ ou bien :} \quad (15)$$

$$\phi_P(x, t) = \phi(j\Delta x, (m+n)\Delta t) = \phi_k \exp [i(\sigma_k j\Delta x + \beta_k (m+n)\Delta t)] \quad (16)$$

En particulier pour le choix, les coordonnées en espace – temps se comprennent d'autant mieux en regardant la figure 6-1. Ainsi exprimées, on peut donc injecter les nouvelles valeurs de  $\phi_A$ ,  $\phi_B$ ,  $\phi_D$ ,  $\phi_E$  et  $\phi_P$  dans l'équation (8) et (9). On procède aux calculs intermédiaires. Tenant compte de (6) et (7) :

$$\cos(\sigma_k \Delta x) = \frac{\exp(i\sigma_k \Delta x) + \exp(-i\sigma_k \Delta x)}{2} \text{ Et, } \sin(\sigma_k \Delta x) = \frac{\exp(i\sigma_k \Delta x) - \exp(-i\sigma_k \Delta x)}{2i} \quad (17)$$

On obtient après arrangement :

$$\phi_B + \phi_A = \phi_K 2 \cos(\sigma_k \Delta x) \exp(i(\beta_k m\Delta t + \sigma_k j\Delta x)) \quad (18)$$

$$\phi_E + \phi_D = \phi_K 2 \cos(\sigma_k \Delta x) \exp(i(\beta_k (m+1)\Delta t + \sigma_k j\Delta x)) \quad (19)$$

$$\phi_B - \phi_A = \phi_K 2i \sin(\sigma_k \Delta x) \exp(i(\beta_k m\Delta t + \sigma_k j\Delta x)) \quad (20)$$

$$\phi_E - \phi_D = \phi_K 2i \sin(\sigma_k \Delta x) \exp(i(\beta_k (m+1)\Delta t + \sigma_k j\Delta x)) \quad (21)$$

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

Après simplification par  $\exp [i(\beta_k m \Delta t + \sigma_k j \Delta x)]$ , on trouve :

$$h_k \left\{ e^{i\beta_k m \Delta t} - \cos(\sigma_k \Delta x) [1 - \xi + \xi e^{-i\beta_k \Delta t}] \right\} + \frac{a}{g} v_k i \sin(\sigma_k \Delta x) [1 - \xi + \xi e^{-i\beta_k \Delta t}] = \frac{kgQ_{in}}{aS'_m} \quad (22)$$

$$v_k \left\{ e^{i\beta_k m \Delta t} - \cos(\sigma_k \Delta x) [1 - \xi + \xi e^{-i\beta_k \Delta t}] \right\} + \frac{g}{a} h_k i \sin(\sigma_k \Delta x) [1 - \xi + \xi e^{-i\beta_k \Delta t}] = -\frac{kgQ_{in}}{aS'_m} \quad (23)$$

On pose  $\psi = e^{i\beta_k \Delta t}$  qui représente un facteur complexe d'amplification dépendant de la stabilité et de la dispersion du schéma numérique. On peut mettre ce système d'équations sous la forme suivante :

$$\alpha_1 = \Psi^{m+1} - \cos(\sigma_k \Delta x) [(1 - \xi)\Psi + \xi] \quad (24)$$

$$\beta_1 = \sin(\sigma_k \Delta x) [(1 - \xi)\Psi + \xi] \quad (25)$$

L'étude des valeurs propres d'un tel système donne :

$$\lambda_1 = \alpha_1 \pm i\beta_1 \quad (26)$$

Donc on trouve :

$$\Psi^{m+1} - [\Psi(1 - \xi) + \xi] e^{\pm i\sigma_k \Delta x} = 0 \quad (27)$$

On peut définir l'amortissement  $R_1$  comme le module du rapport complexe entre la solution numérique et la solution réelle après un temps précis de parcours de l'onde. C'est la mesure de l'amortissement introduit numériquement.

$$R_1 = |\Psi| e^{j_k(m+\xi)} \quad (28)$$

On peut définir la dispersion  $D$  comme le module du rapport de la vitesse de propagation de la solution numérique et de la vitesse de propagation de la solution réelle. C'est la mesure du degré de dispersion introduit numériquement.

$$D = \frac{R'_2 j_k (m + \xi)}{2\pi \cdot \xi} \quad (29)$$

Avec : 
$$j_k = \frac{L_k}{\Delta x}$$

Où :  $j_k$ - représente le nombre d'intervalles  $\Delta x$  dans l'espace ;

$R_2$ - désigne l'angle de déphasage de la fonction  $\Psi$ .

## PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE

Ces différentes expressions de l'amortissement et de la dispersion se trouvent fréquemment dans la littérature, mais cette présentation n'explique pas leur développement avec les paramètres qui les composent.

Différents calculs numériques permettent d'observer que plus la remontée dans le temps est importante, c'est à dire plus  $m$  augmente, moins l'amortissement numérique est important. [35]

Afin de mieux analyser l'interpolation numérique, l'expression (29) sera développée et explicitée dans un plan complexe des paramètres  $\beta_k$  et  $\sigma_k$  pour la  $k^{\text{ième}}$  harmonique, à chaque point de singularité. La représentation graphique en fonction des paramètres variables  $m$ ,  $\xi$ , et  $j_k$ , nécessite un choix de pas de temps. L'étude a été envisagée d'abord pour le cas sans discrétisation, où la longueur entière de la conduite a été considérée. A travers ces figures, on remarque clairement que lorsque le coefficient  $m$  de remontée dans le temps augmente, la fonction d'interpolation tend vers la fonction créneau. L'erreur, représentée par la différence entre la fonction approchée et la fonction exacte, diminue avec l'augmentation du temps et du coefficient  $m$  de remontée dans le temps.

### 6-4-Interpolation temporelle :

On considère que les caractéristiques  $C^+$  ou  $C^-$  aboutissent entre deux noeuds de calcul. Ici on envisage l'interpolation entre deux points du maillage par rapport au facteur temps ( $t$ ).

Par ailleurs, on désigne par  $U_{ex}(t)$ , la fonction exacte passant par les noeuds du maillage, et  $U_{app}(t)$ , la fonction approchée. Il en résulte donc une certaine erreur entre ces deux fonctions. On propose le développement de Taylor et on essaye d'explicitier ces deux fonctions par rapport à la variable temps, entre deux points. [36]

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

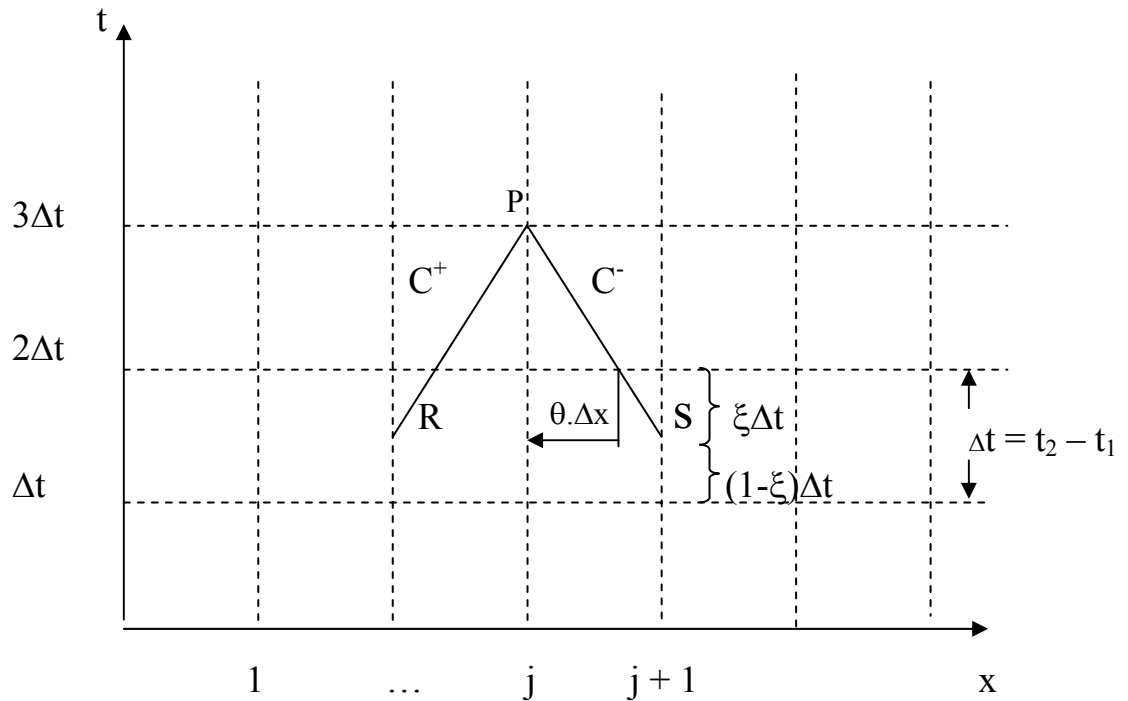


Figure 6-2 : Interpolation entre deux points.

On peut donc écrire :

$$U_{app}(t) = \sum N_i \cdot U_{ex}(t) + \dots + \frac{1}{(n-1)!} \cdot \left[ \sum N_i (t_i - t)^{n-1} \right] \cdot \frac{\partial^{n-1} \cdot U_{ex}}{\partial t^{n-1}} + \frac{1}{n!} \cdot \sum N_i \cdot (t_i - t)^n \cdot M_i \quad (30)$$

Avec : 
$$M_i = \frac{\partial^n U_{ex}}{\partial t^n}$$

Dans ce raisonnement, on suppose par hypothèse que :  $M_1 = M_2$ .

$N_i$  : représente le polynôme d'interpolation linéaire.

Par application entre deux points ( $n=2$ ), on obtient :

$$N_1 = \frac{t_2 - t}{t_2 - t_1} \text{ et } N_2 = \frac{t_1 - t}{t_2 - t_1} \quad (31)$$

On pose que :  $t_2 - t_1 = \Delta t$  ;  $t_2 - t = \xi \cdot \Delta t$  et  $t_1 - t = (1 - \xi) \Delta t$ .

Après remplacement, et arrangement, on obtient :

$$U(t) = U_{ex} + 2 \cdot \xi \cdot \Delta t \cdot (1 - \xi) U'_{ex} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \cdot \xi \cdot (1 - \xi) U''_{ex} \quad (32)$$

On pose : 
$$U_{ex} = e^{kt}, U'_{ex} = k e^{kt}, U''_{ex} = k^2 e^{kt} \quad (33)$$

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

On obtient une équation du second degré en  $k'$  :

$$U(t) = e^{kt} \left[ \frac{1}{2} \Delta t^2 \cdot \xi \cdot (1 - \xi) \cdot k'^2 + 2 \cdot \xi \cdot \Delta t \cdot (1 - \xi) \cdot k' + 1 \right]. \quad (34)$$

Le discriminant de cette équation est négatif pour  $0 < \xi < 1$ :

La relation (8) admet des racines complexes de la forme :

$$k'_{1,2} = \alpha \pm i\beta' \quad (35)$$

Avec :

$$\alpha = -\frac{2}{\Delta t}$$

Et la solution sera de la forme :

$$U(t) = e^{\alpha t} \sin(\beta t) \quad (36)$$

avec :

$$\beta = \frac{2\pi}{T}, \quad \text{et} \quad \Delta x = a \Delta t (m + \xi)$$

Par conséquent la fonction approchée sera :

$$U_{app}(t) = e^{-\frac{2t}{\Delta t(m+\xi)}} \cdot h \cdot \sin \beta t \quad (37)$$

La fonction exacte s'obtient pour  $\xi = 0$ , les pieds des caractéristiques aboutissent aux nœuds du maillage :

$$U_{ex}(t) = e^{-\frac{2t}{m\Delta t}} \cdot h \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (38)$$

On remarque que lorsque le nombre de pas ( $m$ ) tend vers l'infini, la fonction exacte  $U_{ex}(t)$  et la fonction approchée  $U_{app}(t)$  tend vers la relation :

$$U_{app}(t) = U_{ex}(t) = h \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (39)$$

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

**6-5- Interpolation spatiale :**

Le même raisonnement s'opère pour une interpolation spatiale en remplaçant  $t$  par  $x$ ,  $m$  par  $j$  et  $\xi$  par  $\theta$ . On obtient ainsi la fonction exacte :

$$U_{ex}(x) = e^{-\frac{2x}{j\Delta x}} \cdot h \cdot \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (40)$$

La fonction approchée devient :

$$U_{app}(x) = e^{-\frac{2x}{(j+\theta)\Delta x}} \cdot h \cdot \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (41)$$

Pour une longueur d'onde donnée, si l'intervalle d'espace augmente, la fonction exacte  $U_{ex}(x)$  tend vers la fonction approchée  $U_{app}(x)$ , et l'erreur tend vers zéro. On peut écrire donc :

$$U_{ex}(x) = U_{app}(x) = h \sin \frac{2\pi}{L} x \quad (42)$$

**6-6-Détermination de l'erreur due à l'interpolation temporelle :**

La théorie de calcul des erreurs dues à l'interpolation permet de donner la fonction erreur qui sera déduite à partir des relations (9) et (10) comme étant la différence entre la fonction exacte et la fonction approchée. [37]

Ou bien :

$$E(t) = h \cdot e^{-\frac{2t}{(m+\xi)\Delta t}} \cdot \sin \beta t - h \cdot e^{-\frac{2t}{m\Delta t}} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (43)$$

Dans l'expression (43), on remarque que lorsque le paramètre  $\xi$  d'interpolation est égal à la valeur 0, l'erreur est nulle ; et par conséquent la fonction approchée sera égale à la fonction exacte, avec aboutissement des pieds des caractéristiques aux nœuds de calcul. De même, on constate que pour des valeurs données des paramètres  $m$  et  $\xi$ , il y a amortissement de l'erreur dans le temps ; et pour un accroissement du coefficient ( $m$ ) de remontée dans le temps, l'erreur tendra très faiblement vers zéro. Dans tous les cas, l'erreur diminue lorsque la valeur d'epsilon diminue.



**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

**6-7-Amortissement numérique :**

On va à présent développer le facteur d'amortissement  $R_1$ , en étudiant sa variation en fonction des paramètres  $m, \xi$  et  $\beta_k$ , à travers des courbes.

L'amortissement dépend des paramètres physiques et numériques du système, c'est à dire de la période de l'onde  $T$ , de l'intervalle de temps  $\Delta t$ , du facteur de remontée dans le temps  $m$ , et du degré de l'interpolation  $\xi$ .

En calculant le module de l'expression (27), on trouve :

$$|\Psi^{m+1}| = |\Psi(1 - \xi) + \xi|e^{\pm i\sigma_k \Delta t}| \quad (44)$$

$$|\Psi^{m+1}| = |(1 - \xi) \cos(\beta_k \Delta t) + \xi + i(1 - \xi) \sin(\beta_k \Delta t)|$$

$$|\Psi^{m+1}| = [\xi^2 + (1 - \xi)^2 + 2\xi(1 - \xi) \cos(\beta_k \Delta t)]^{\frac{1}{2}}$$

$$|\Psi^{m+1}| = [1 - 2\xi(1 - \xi)(1 - \cos(\beta_k \Delta t))]^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

On pose  $R_1 = [1 - 2\xi(1 - \xi)(1 - \cos(\beta_k \Delta t))]^{\frac{1}{2(m+1)}} \quad (46)$

La dépendance de l'amortissement par rapport à  $m$ ,  $\xi$  et  $\beta_k \Delta t$  est mise en évidence grâce aux courbes données par les figures ci-dessous qui représentent l'amortissement en fonction de  $\xi$  à différentes valeurs de  $m$  fixées. Ces courbes montrent bien les propriétés de convergence et de stabilité du schéma. En effet, la stabilité est obtenue car  $R_1$  est partout inférieur ou égal à 1 en particulier aux points  $\xi = 0$  et  $\xi = 1$ , c'est à dire sur les nœuds du maillage.

On remarque, à travers ces figures, quand le paramètre  $m$  augmente, les courbes caractérisant l'amortissement, s'approchent de l'horizontale passant par la valeur 1. C'est ce qui montre que le coefficient  $R_1$  d'amortissement diminue. Cette diminution est également constatée lorsque la période  $T$  de l'onde augmente. Cependant pour une même période  $T$ , et avec un nombre  $m$  constant de pas de remontée, le coefficient d'amortissement  $R_1$  diminue jusqu'à une valeur correspondant à  $\xi=0,5$ , puis augmente jusqu'à 1. Ce qui permet de dire que l'utilisation de ce coefficient montre bien sa validité dans la modélisation numérique. A la base de la figure 6-6 et la figure 6-7, on peut écrire, pour  $\xi = 0$ , que :

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

$$\frac{\Delta x}{m.a} = \Delta t \quad (47)$$

Et tenant compte que  $j_k = \frac{L_k}{\Delta x}$ , l'expression (46) devient :

$$R_1 = [1 - 2\xi(1 - \xi)(1 - \cos(\frac{2\pi}{j_k}))]^{\frac{1}{2(m+1)}} \quad (48)$$

L'expression (48) montre, cette fois-ci, la dépendance entre le coefficient d'amortissement  $R_1$ , le nombre  $j_k$  de pas de l'espace, le degré d'interpolation temporelle  $\xi$ , et le paramètre  $m$ . Comme le paramètre  $R_1$  tend vers l'unité, lorsque le facteur  $j_k$  augmente, la convergence est démontrée. Ces courbes sont fonctions de  $\xi$ , et on observe que plus on utilise des valeurs proches des nœuds, plus l'amortissement est rapide : En effet, la solution au point  $\xi = 0,5$  est moins précise que celles proches des nœuds, et donc moins amortie.

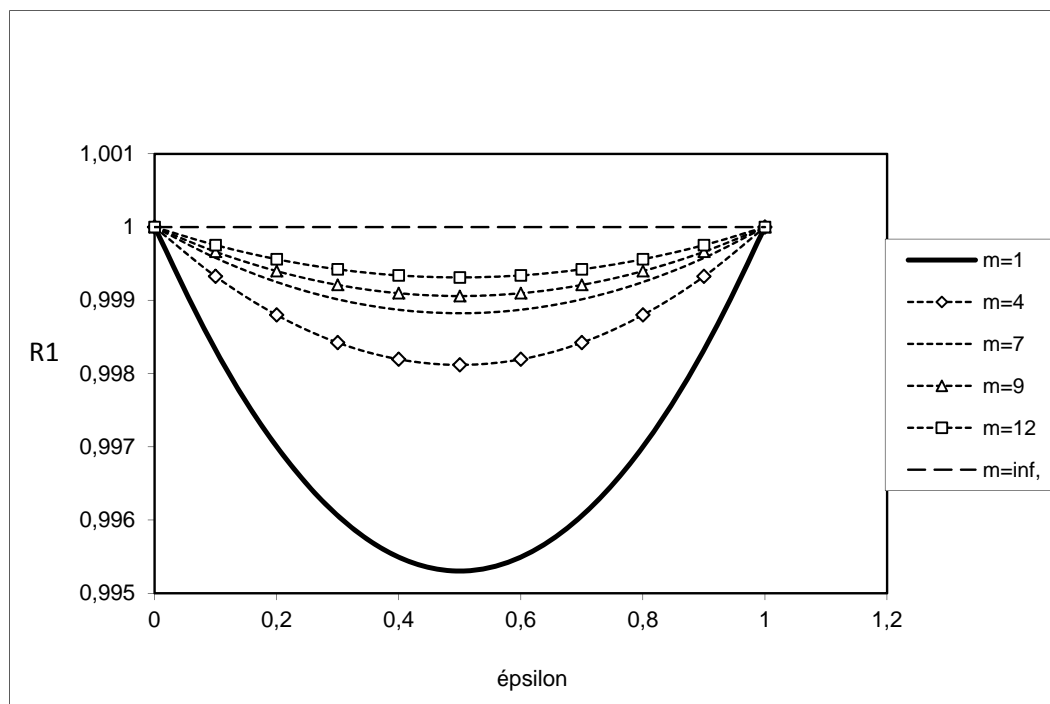


Figure 6-3 : amortissement numérique  $R_1$ , en fonction de  $\xi$ ,  $T=0,1$ sec

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

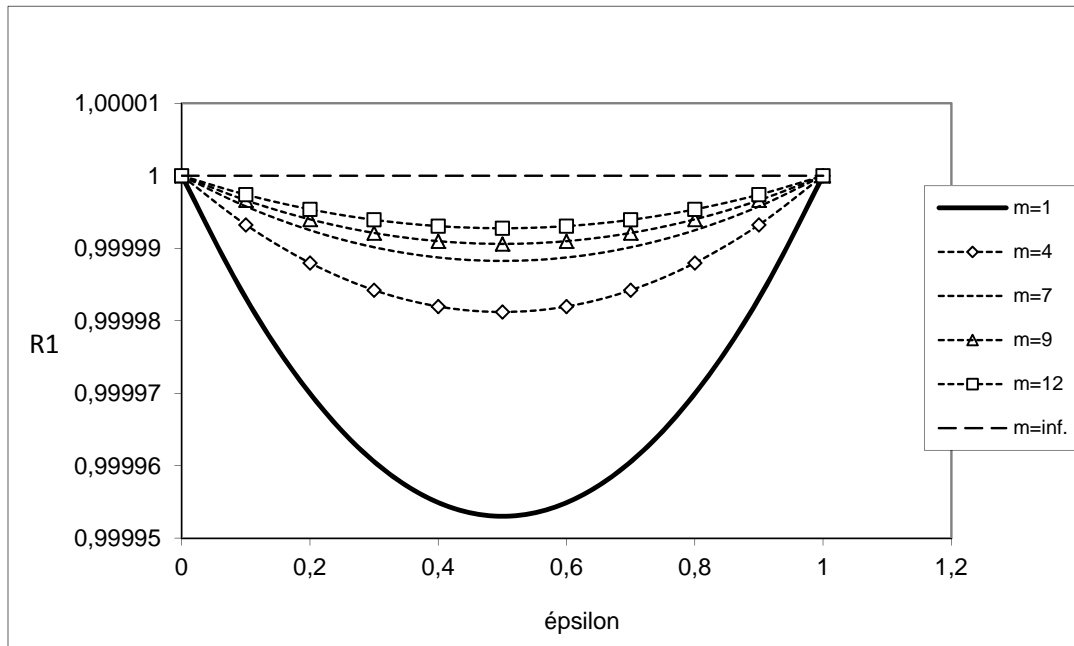


Figure 6-4 : amortissement numérique R1, en fonction de eps, T=0,125sec

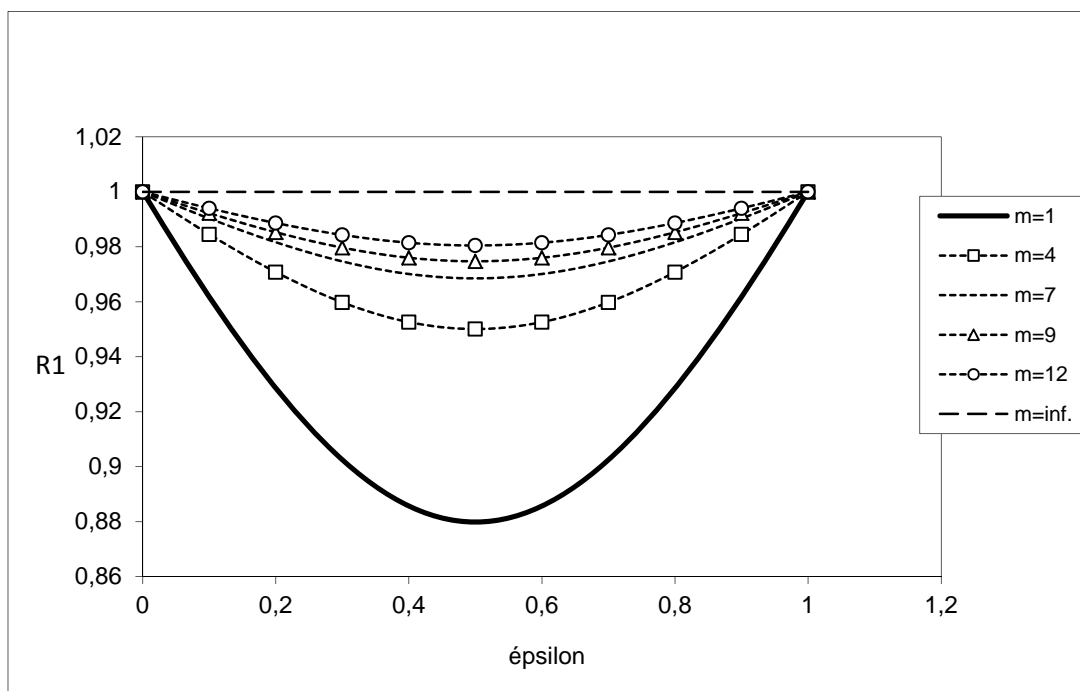


Figure 6-5 : amortissement numérique R1, en fonction de eps, T=0,01sec

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

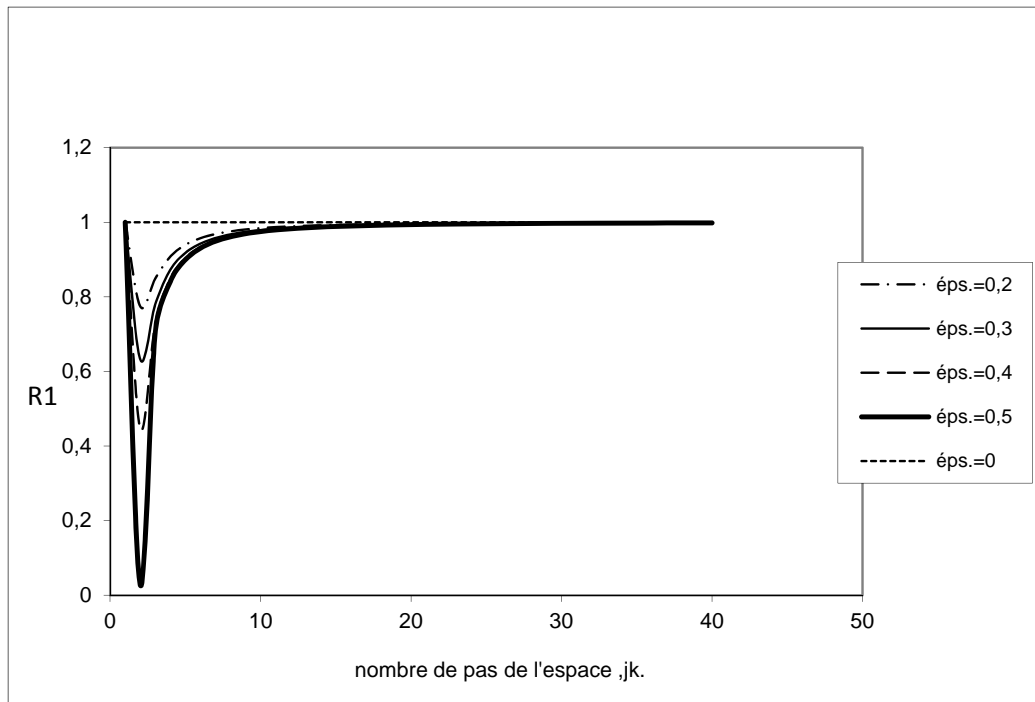


Figure 6-6 : amortissement numérique  $R_1$ , en fonction du nombre de pas de l'espace  $jk$ ,  $m=2$ .

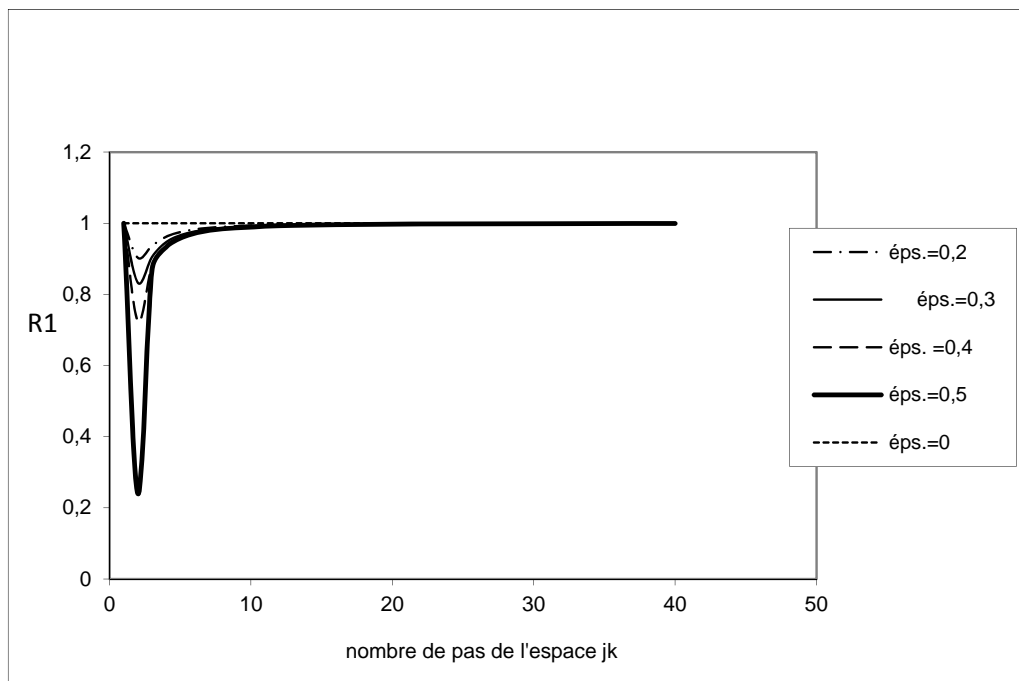


Figure 6-7 : amortissement numérique  $R_1$ , en fonction du nombre de pas de l'espace  $jk$ ,  $m=4$

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

**6-8-La dispersion numérique :**

Le facteur de dispersion est défini comme étant le rapport de la vitesse de l'onde numérique sur la vitesse de la solution analytique. [38]

On considère la partie réelle de l'expression (44), soit

$$\psi^{m+1} - [(1 - \xi)\psi + \xi] \cos \sigma_k \Delta x = 0 \quad (49)$$

Qui peut aboutir à :

$$\psi^{m+1} = [(1 - \xi)\psi + \xi] \cos \sigma_k \Delta x \quad (50)$$

Ou bien :

$$\psi^m = [(1 - \xi) + \xi \psi^{-1}] \cos \sigma_k \Delta x \quad (51)$$

Avec :  $\psi = e^{i\beta\Delta t} = \cos \beta\Delta t + i \sin \beta\Delta t \quad (52)$

En remplaçant  $\psi$  par sa valeur dans le second membre, on trouve :

$$\psi^m = [(1 - \xi) \cos \sigma_k \Delta x + \xi \cdot \cos \sigma_k \Delta x (\cos \beta\Delta t - i \sin \beta\Delta t)] \quad (53)$$

Si l'on pose que :

$$\sigma_k = \frac{2\pi}{L_k} \quad \text{Et} \quad \Delta x = \frac{x}{j_k} \quad (54)$$

On peut écrire :

$$\psi^m = \left[ (1 - \xi) \cos \frac{2\pi}{L_k} \cdot \frac{x}{j_k} + \xi \cdot \cos \frac{2\pi}{L_k} \frac{x}{j_k} (\cos \beta\Delta t - i \sin \beta\Delta t) \right] \quad (55)$$

Pour  $x=0$ :

$$\psi^m = [(1 - \xi) + \xi (\cos \beta\Delta t - i \sin \beta\Delta t)] \quad (56)$$

$$\psi^m = [(1 - \xi) + \xi \cos \beta\Delta t - i \xi \sin \beta\Delta t] \quad (57)$$

L'argument de l'expression (56) sera défini par :

$$\theta = \text{artg} \left[ \frac{\xi \cdot \sin \beta\Delta t}{1 - \xi + \xi \cos \beta\Delta t} \right] \quad (58)$$

On a d'autre part :

$$\frac{a\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{m + \xi} \quad (59)$$

Ou bien :  $\Delta t = \frac{\Delta x}{a(m + \xi)} \quad (60)$

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

Tenant compte que :

$$\beta = \frac{2\pi}{T}; \quad \text{et} \quad j_k = \frac{L_k}{\Delta x} \quad (61)$$

On obtient : 
$$\beta \Delta t = \frac{2\pi}{j_k (m + \xi)} \quad (62)$$

Et par conséquent :

$$\theta = \text{artg} \left[ \frac{\xi \sin \left[ \frac{2\pi}{j_k (m + \xi)} \right]}{1 - \xi + \xi \cos \left[ \frac{2\pi}{j_k (m + \xi)} \right]} \right] \quad (63)$$

Tenant compte de la définition, on peut écrire la relation donnant la dispersion D :

$$D = \frac{j_k (m + \xi)}{2\pi \cdot \xi} \cdot \text{arctg} \left[ \frac{\xi \cdot \sin \left[ \frac{2\pi}{j_k (m + \xi)} \right]}{1 - \xi + \xi \cdot \cos \left[ \frac{2\pi}{j_k (m + \xi)} \right]} \right] \quad (64)$$

On rappelle que :  $L_k$  représente la longueur d'onde de la  $k$ -ième harmonique et  $j_k$  le nombre d'intervalles d'espace dans cette longueur d'onde.

On remarque que pour des longueurs d'onde faibles, ou pour un nombre d'intervalles faible, la dispersion de la solution numérique évolue avec ce dernier. En effet, on peut constater que l'atténuation et la dispersion numérique sont minimales lorsque les paramètres  $\xi$  et  $j_k$  sont maximaux. Il est donc nécessaire de choisir  $\xi = 1$  (ou  $\xi=0$ ), et un pas spatial suffisamment petit pour éliminer ces erreurs numériques. Les représentations graphiques (figures 08, 09, 10, et 11) montrent la variation de la dispersion numérique en fonction du nombre  $j_k$  d'intervalles d'espace, à différents nombres  $m$  de pas de remontée dans le temps pour un  $\xi$  (éps) constant.

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

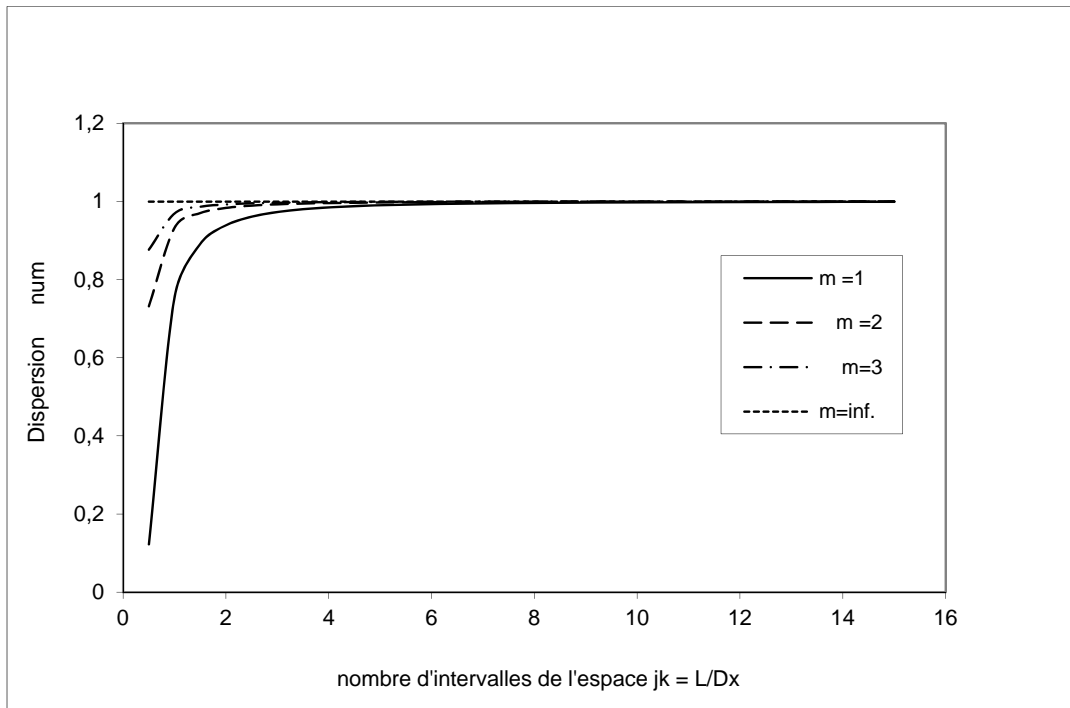


Figure 6-8 : Dispersion numérique,  $\epsilon=0,1$  ;  $m$  variable.

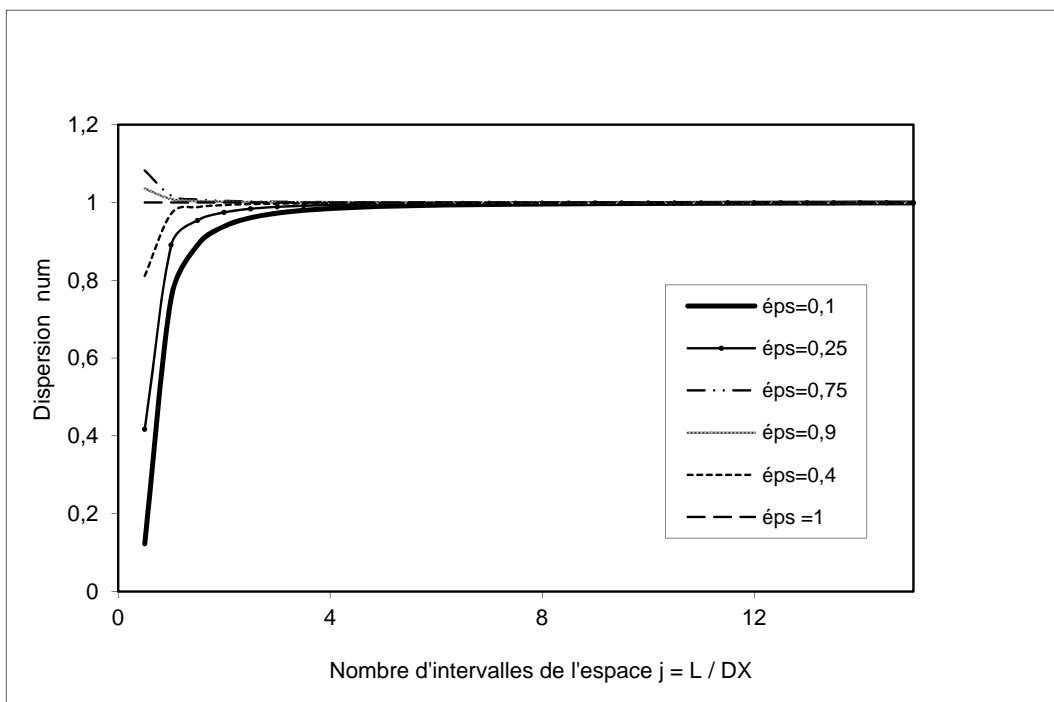


Figure 6-9 : Dispersion numérique, pour  $m=0,1$  ;  $\epsilon$  variable

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

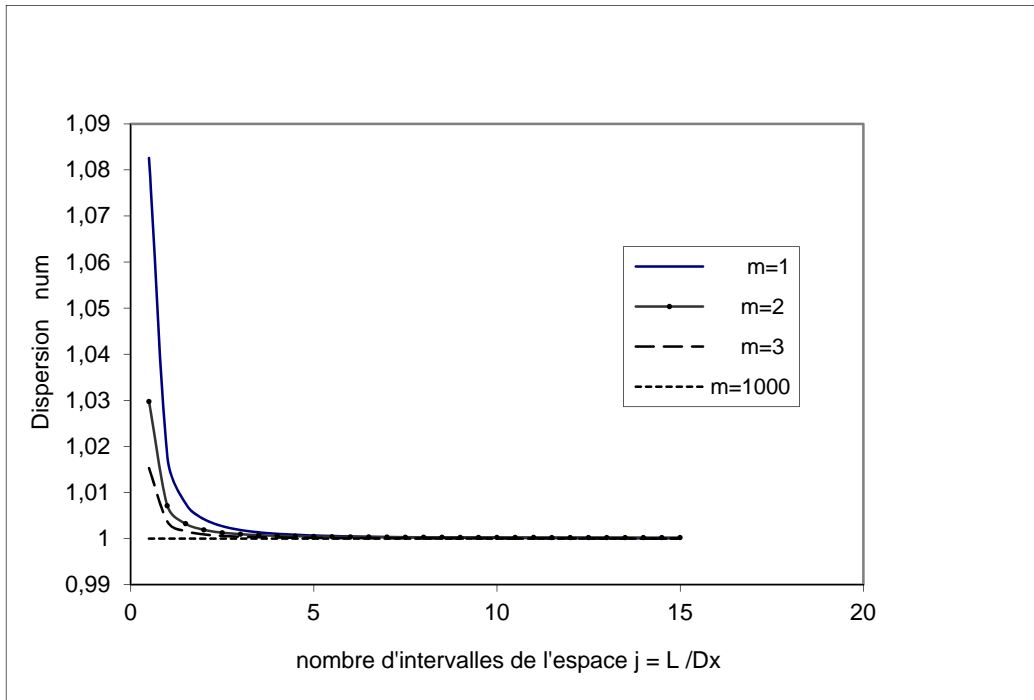


Figure 6-10 : Dispersion numérique, pour  $\epsilon=0,75$  ;  $m$  variable.

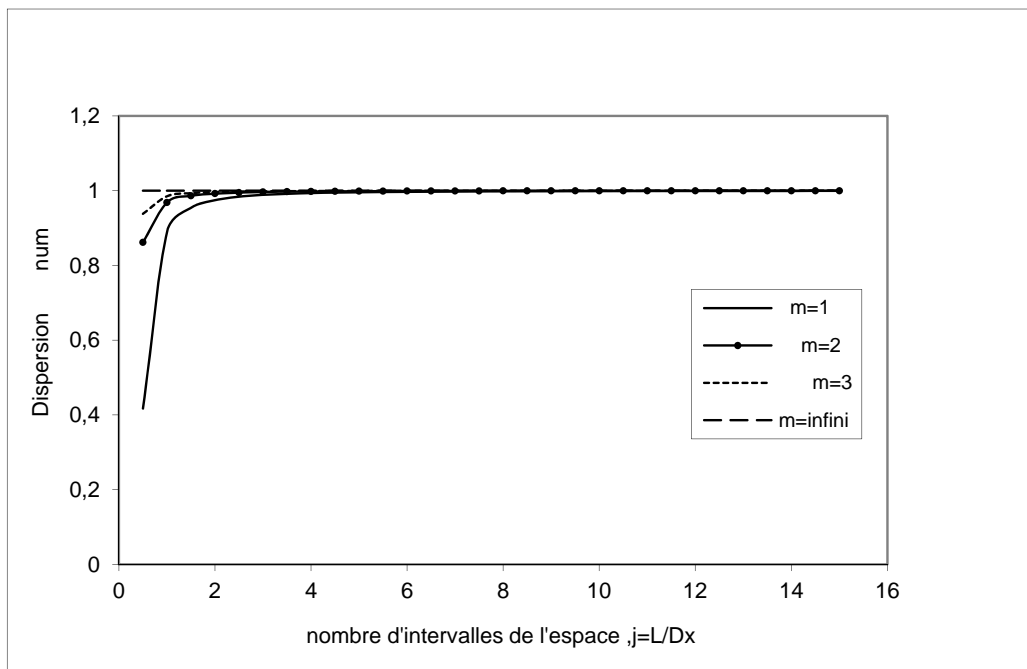


Figure 6-11 : Dispersion numérique, pour  $\epsilon=0,25$  ;  $m$  variable.



**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

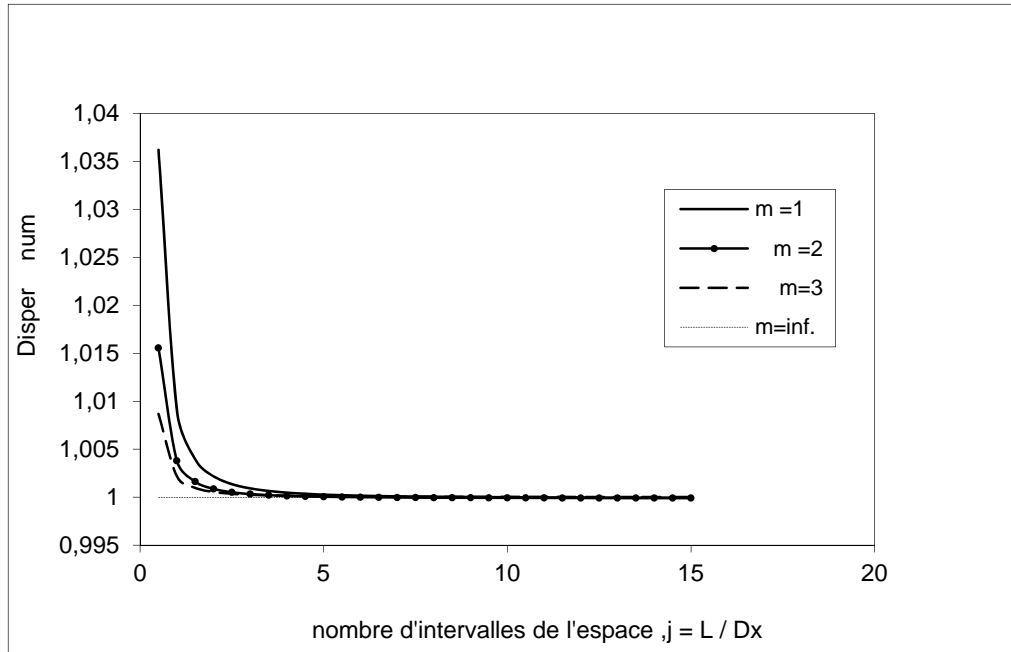


Figure 6-12 : Dispersion numérique,  $\epsilon_s=0,9$  ; m variable.

**PROPOSITION D'UNE METHODE D'INTERPOLATION LINEAIRE AVEC  
ANALYSE D'ERREURS EN REGIME TRANSITOIRE**

**6-9- Conclusion :**

Dans le domaine du régime transitoire, habituellement la méthode des caractéristiques considère le maillage de discrétisation à pas constants. Son utilisation considère toujours les pieds des caractéristiques aboutissant aux nœuds de calcul.

Le calcul aux nœuds n'est pas pris en considération dans cette variante. Les différents schémas examinés dans ce chapitre, montrent que l'utilisation de la méthode des caractéristiques admet des erreurs, lorsque les pieds des caractéristiques aboutissent entre deux nœuds. Il a été constaté que ces erreurs sont temporelles et spatiales. Afin de quantifier ces dernières, l'utilisation des séries de Fourier, le développement de Taylor, et la méthode de l'interpolation linéaire entre deux nœuds, ont été utilisés.

A travers ce raisonnement, deux fonctions numériques exactes et approchées ont été développées. A la base des schémas présentés, l'analyse numérique de ces fonctions a permis la déduction de deux coefficients numériques qui dépendent du nombre de pas de remontée dans le temps et dans l'espace. Représentés graphiquement, ces deux paramètres numériques convergent vers l'unité, dans le temps et dans l'espace. C'est ce qui montre bien la stabilité des schémas étudiés, quelque soit la période considérée.

# Conclusion Générale

## CONCLUSION GENERALE

La détermination des modèles mécanistes régissant les écoulements à surface libre dans les collecteurs d'assainissement a préoccupé plusieurs chercheurs toute en se basant sur les modèles de l'hydrodynamique dérivés du système de Barré de Saint-Venant (1871).

Dans ce travail nous nous sommes intéressés au cas d'un collecteur d'assainissement où l'écoulement est à surface libre et est perturbé par un débit d'intrusion d'eaux claires parasites (ECP). Il a été donc nécessaire de modéliser ce débit, par la théorie des orifices et ajutages, en prenant en compte quelques facteurs favorisant son accès au collecteur. Afin de respecter cette théorie il a été proposé certains coefficients élémentaires de débit qui sont les suivants :

- Un coefficient qui caractérise la contraction du débit d'intrusion ( $C_c$ );
- Un coefficient de viscosité ( $C_{vis}$ ) ;
- Un Coefficient de vitesse ( $C_v$ ) ;
- Un Coefficient de colmatage ( $C_{cl}$ ).

Il a été constaté que les points de vue des chercheurs divergent quant à la détermination délicate de ces coefficients vu que plusieurs paramètres entrent en ligne de compte. Néanmoins ces coefficients dont leur globalité forme le coefficient de débit restent toujours un point noir pour les chercheurs.

Dans le même sens nous avons proposé un modèle approché de l'écoulement dans le collecteur d'assainissement sous influence du débit d'intrusion modélisé auparavant ou il a été déduit un système d'équations qui permet la détermination du couple vitesse -hauteur d'eau lors d'un régime d'écoulement transitoire provoqué ,et le rapport entre ces deux paramètres avec la célérité d'onde .

L'étude des méthodes de solutions du régime transitoire nous a été nécessaire afin de résoudre le système élaboré auparavant et nous avons constaté que la méthode des caractéristiques est vraiment efficace pour le calcul des écoulements non permanents. A l'aide de cette méthode, deux fonctions numériques exactes et approchées ont été développées. Ainsi on a pu déterminer les paramètres amortissement et dispersion et les représentés graphiquement.

Ce modèle sert de base pour l'étude mécaniste d'un écoulement non permanent à surface libre véhiculé dans un collecteur circulaire sous l'influence d'un débit d'intrusion d'eaux parasites claires à travers un orifice régi par plusieurs coefficients de débits.

On peut donc apprécier l'intérêt de notre étude qui permet l'aide à la prise de décision en matière de conception, réhabilitation des réseaux d'assainissement et protection des stations d'épuration. De même ce travail servira de base pour la continuité de nos travaux de recherches.

# Références Bibliographiques

## Références bibliographiques

- [1]- **Joannis C (1994)** Précision des estimations des 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, 71-87p.
- [2]- **Bruno DUPASQUIER (1999)** Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatifs d'eaux usées. Thèse de doctorat ENGREF ,287p.
- [3]- **Jérôme De Bénédittis (2004)** Mesurage de l'infiltration et de l'exfiltration dans les réseaux d'assainissement. Thèse de doctorat INSAL ;316p.
- [4]- **Wisner P. ; Sabourin J F ; comeau A. ;Alperin L (1993)** Modelling of extraneous flows in sanitary sewers urban storm drainage ,vol II Niagara falls,canada ;242-247p.
- [5]- **Belhadj N., Joannis C., Raimbault G (1994)** Modélisation des apports par infiltration dans un réseau d'assainissement en période pluvieuse. Rapport de la conférence internationale sur les nouvelles technologies en assainissement pluvial, NOVATECH ;277-284p.
- [6]- **Berthier E. (1999)** Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain ; élaboration du model et première évaluation .thèse de doctorat ; institut nationale polytechnique de Grenoble .
- [7]- **Renault D (1983)** les eaux claires parasites dans les réseaux d'assainissement (réseaux unitaires).diagnostique et réhabilitation des réseaux ; impact économique dans le traitement ; Novembre ;577-582p.
- [8]- **Hager W.H. Raymann B (1985)** Bretscher U: Die berechnung des fremswasseranfalls in abwassersystemen.GWF Wasser /abwasser .
- [9]- **Direction de l'eau du grand Lyon (1992)** Rapport d'étude diagnostique du bassin versant de la station d'épuration de Pierre Bénite ; Horizon .
- [10]- **JULIUS DE HEER (1992)** Etude de l'échantillonnage systématique et proportionnel au débit par temps sec des eaux usées dans des égouts non visitables ; école polytechnique fédérale de Thèse de doctorat, Lausanne ;366p.
- [11]- **Héloïse MONNIER (2006)** Diagnostic permanent en réseau d'assainissement : mesures et calculs sur sites pilotes de la Région Ouest, MFE ENGEES, Juin 2006.
- [12]- **Catherine TRIANTAFILLOU (1987)** la dégradation et la réhabilitation des réseaux d'assainissement France - Angleterre - Etats-Unis, thèse de doctorat l'ENPC, 612p.
- [13]- **Decker J (1995)** Effect of sewer infiltration for drainage system and sewage treatment. Rapport de la conférence internationale sur les nouvelles technologies en assainissement pluvial, NOVATECH ; 287-293p.
- [14]- **Agenda de l'eau Loire-Bretagne (1982)** les eaux parasites dans les réseaux d'assainissement des collectivités locales. Rapport interne .

- [15]-**LROP-AGENCE DE BASSIN SEINE NORMANDIE (1981)** Analyse et détection des eaux parasites. Méthodologies d'étude. Méthodes de détection.
- [16]-**O .Raynaud C. Joannis et F .Billard (2006)** Maitriser les surverses de réseaux séparatifs d'eaux usées par la réduction des eaux claires parasites, LCPC, Octobre 2006.
- [17]-**Biseau M ; Bourges F ; Ruperd Y (1991)** Réhabilitation des réseaux d'assainissement méthodes disponibles, critères de choix, exemples. Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Pont et Chaussées, Série Environnement et Génie Urbain ;111p.
- [18]- **DAVIES JP. CLARKE BA ; WHITER JT ; CUNNINGHAM RL (2001)** Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes ; Urban Water .
- [19]- **JOANNIS C (1993)** Les études diagnostics en réseau d'assainissement : Analyse rétrospective et propositions. Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées. Série environnement et génie urbain.
- [20]- **Dedoyard et S. Capelle – IBW : Limitation des eaux claires parasites et surveillance des hydrocarbures.**
- [21]- **CARLIER M. (1972)** Hydraulique générale et appliquée, Editions Eyrolles ;570p.
- [22]- **VAZQUEZ José :** Hydraulique générale (Laboratoire Systèmes Hydrauliques Urbains);école nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg.
- [23]- **RIECKERMANN J., GUJER W. (2002)** Quantifying exfiltration from leaky sewers with artificial tracers Proceedings of the 16th European Junior Scientist Workshop "Real Time Control of Urban Drainage Systems" Milo, Etna Mountain, 7 ;November 2002 ;74p.
- [24]-**J.-L.Bertrand-Krajewski (2006)** OSHU3 05 MODELISATION DES ECOULEMENTS, URGC, INSA de Lyon .
- [25]-**VARDY, A.E., (1977)** « On the Use of the Method of Characteristics for the Solution of Unsteady Flows in Networks », Proceedings, Second International Conférence on Pressure Surges, Sept 22-24, 1976, British hydromechanics Research association , fluid engineering, Cranfield, England.
- [26]-**NGUEN TRIEU DONG (1990)** « Sur une méthode numérique de calcul des écoulements non permanents soit à surface libre, soit en charge, soit partiellement à surface libre et partiellement en charge », revue la Houille Blanche n°2.
- [27]- **E. DAVID GOLDBERG and E. B. WYLIE (1983)** « Characteristics Method Using Time-Line Interpolations », Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109, n° 5, Mai 1983.
- [28] -**HARTREE D.R (1952)** « Somme Pratical Methods of using characteristics in the Calculation of Non- Steacy Compressible Flow », Los Alamos Rep, LA- HU-I.
- [29]- **GABUTTI B (1983)** « On two upwind finite – difference schemes for hyperbolic equations, in non conservation form », Computer and fluids, vol 11, n°3 ;207-230 p.



- [30]- MAC CORMACK R (1971)** « Numerical Solution of the interaction of a shock wave with a laminar Boundary layer », Lecture Notes in physics, M. Holt (ed.), Vol.8, Springer – Verlag, New York; 151-163.
- [31]-GOURI DHATT, GILBERT TOUZOT (1981)** « Une présentation de la méthode des éléments finis », Collection Université de Compiègne ; 12-40 p.
- [32] -E.B. WYLIE, V.L. STEETER, et LISHENG SUO (1993)** « Fluid transients in Systems », Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey; 3-80 p.
- [33]-G.COMBES, J.ZAOUI, (1967)** « Analyse des erreurs introduites par l'utilisation pratique de la méthode des caractéristiques dans le calcul du coup de bélier », revue la Houille Blanche n°2 ;195-202 p.
- [34]-CHINTU LAI (1988)** « Comprehensive Method of characteristics models for flows Simulation », Journal of hydraulic Engineering, vol.114, n°9, Septembre 1988.
- [35]- E. DAVID GOLDBERG and E. B. WYLIE (1983)** « Characteristics Method Using, Time-Line Interpolations », Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109, n° 5, Mai 1983.
- [36] -M. VYGODSKI (1975)** « Aide-mémoire de Mathématiques supérieures », édition Mir, Moscou;721- 748p.
- [37]-GOURI DHATT, GILBERT TOUZOT (1981)** « Une présentation de la méthode des éléments finis », Collection Université de Compiègne ;12-40p.
- [38] - JINN – CHUANG YANG, and EUAN- LUNG HSU (1991)** « on the use of the reach – back characteristics, method for calculation of dispersion », International Journal for Numerical methods in fluids ; 225-235p.