Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat
Département d'Hydraulique

Année : 2013/2014

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de ***Doctorat en sciences***

Contribution au dimensionnement d'un réseau d'assainissement en tenant compte de l'aspect stationnaire et non stationnaire de l'écoulement.

Spécialité : **Hydraulique**

Par
ZEGHADNIA LOTFI

Devant le Jury

Président :	Ouerdachi Lahbassi	PROF.	UNIV.	Badji Mokhtar, Annaba
Rapporteur :	Djemili Lakhdar	PROF.	UNIV.	Badji Mokhtar, Annaba.
Co-rapporteur :	Houichi Larbi	M.C.A.	UNIV	Elhadj Lakhdar, Batna.
Examinateurs :	Djebbar Yassine	PROF.	UNIV.	Mohamed Cherif Messaâdia,Souk-Ahras
	Boudoukha Abderrahmane	PROF.	UNIV.	Elhadj Lakhdar, Batna.
	Amarchi Hocine	M.C.A.	UNIV.	Badji Mokhtar, Annaba.
	Heddam Salim	M.C.A.	UNIV.	Skikda

إ ه د ا ء

أ ه د ى ه ذ ا ا ل ع م ل ا ل م ت و ا ض ع ل ل و ا ل د ي ن ا ل ك ر ي م ي ن , ا ل ز و ج ة ا ل ك ر ي م ة , و ل د ي ع ب د ا ل ر ح م ا ن , و ك ل ا ل إ خ و ة ا ل أ ع ز ا ء , و إ ل ى ك ل ا ل أ ص ح ا ب ا ل ك ر ا م و إ ل ى ك ل ص ا ح ب ه د ف ن ب ي ل ا م ن ب ه و ع م ل ل أ ج ل ه و ص ب ر ف ي س ب ي ل ت ح ق ي ق ه , إ ل ى أ م ت ي

ز غ ا د ن ي ة ل ط ف ي

تشكر

الحمد لله أولا أن يسر لي إتمام هذه الرسالة فله الحمد أولا وآخرا.

ثم أتقدم بالشكر و العرفان لكل من الأستاذ الدكتور لخضر جميلي و الدكتور العربي حويشي على مجهوداتهم و نصائحهم. كذلك لا يفوتني أن أتقدم بشكر خاص للدكتور حمّار يحي علي قبوله تأطيري في بداية المشوار. و كذلك أخص بالذكر أخي رزقي نورالدين علي نصائحه و مؤازرته المعنوية. دون أن أنسى مساعدات الأستاذ الدكتور جبار ياسين في تحسين مستوى المقالات, وأخيرا أتقدم بالشكر الجزيل لكل أعضاء لجنة المناقشة, و إلى كل من ساهم في أن يرى هذا العمل النور.

Résumé :

Souvent, les concepteurs considèrent l'écoulement dans les réseaux d'assainissement comme permanent et uniforme, ce qui justifie et favorise l'utilisation de l'équation de Manning. Cette dernière a été pour longtemps un sujet d'intérêt particulier pour les chercheurs qui l'ont exprimé sous forme de graphes et/ou tableaux pour faciliter son application en pratique. Par ailleurs, plusieurs chercheurs ont identifié les erreurs, qui peuvent être important, et qui sont associées à l'utilisation des méthodes simplifiées.

Ce travail vise à proposer une approche capable de donner, d'une manière simple et directe, les caractéristiques d'écoulement mieux que ceux des méthodes existantes. Pour cela on a proposé plusieurs approches. Le premier est semi-graphique où on présente des équations simplifiées associées à un graphe pour des fins pratiques. On a aussi proposé une nouvelle méthodologie de design basé sur le concept de rendement volumétrique et de circulation de l'écoulement pour mieux exploiter la conduite et pour améliorer son rendement. Finalement, on a présenté une nouvelle approche analytique basée sur la référenciassions à une conduite ayant des caractéristiques d'écoulement connus.

Les résultats des approches proposées et ceux des méthodes existantes ont été comparés à ceux de l'équation de Manning. Les approches proposées sont simples, directs et donnent de meilleurs résultats.

Mot clés : Ecoulement stationnaire, équation de Manning, réseau d'assainissement, conduite partiellement remplie, écoulement non stationnaire.

Abstract:

In General, designers consider the flow in wastewater collection system as steady and uniform, which favors and justify the use of manning's formula. The later has been, for long, a subject of particular interest to researchers, who expressed it in terms of graphs and tables for simplicity and practical reasons. However, several researchers expressed their concern regarding potential errors associated with the use of these simple methods.

This research work propose, through a simple and direct approach, a better solution than existing methods. Three approaches were proposed. The first one is semi-graphic where simple equations along with a graph were proposed. In the second one a novel design approach based on the volumetric and circulation efficiency of the flow to better exploit the pipe and ameliorate its efficiency was proposed. Finally, we present a novel analytic approach based on the referencing to a conduit with known flow characteristics.

The results of the proposed approaches, along with those of existing methods were compared to the Manning formula results. The proposed approaches are simpler, more direct, and produce better results.

Key words: steady flow, Manning equation, sewer network, partially filled pipe, unsteady flow.

الملخص:

عموما الجريان في أنابيب الصرف الصحي يقبل على أنه جريان دائم و متجانس, مما يسمح بإستعمال معادلة مانينق و التي يعتبرها الأخصائيون من أفضل المعادلات القادرة على التعبير بشكل جيد علي مثل هذا النوع من الجريان, و هذا يرجع لبساطتها و كمية الحلول التي خصصت لها من جداول و منحنيات التي تيسر عملية حساب الخصائص الهيدروليكية للجريان, وكانت و لا تزال مادة خصبة لكثير من البحوث و الدراسات. كما قام العديد من الباحثين بنقد و تسليط الضوء علي بعض العيوب التي تشوب كمية الحلول المقترحة.

هذا البحث يهدف إلي إقتراح مقاربات تهدف جميعها إلي تحسين و تدعيم طرق حل و التعامل مع هذه المعادلة. من أجل ذلك قمنا بإقتراح ثلاث مقاربة ,تتراوح بين تحسين نتائج بعض البحوث و ذلك من خلال مقاربات شبه تخطيطية أين قمنا بإقتراح بعض الصيغ البسيطة مقرونة برسم تخطيطي ضروري لملائمة متطلبات التطبيقات الواقعية, كذلك من خلال مقاربة ثانية حيث قمنا بإقتراح إعادة النظر في طريقة حساب قنوات الصرف الصحي من خلال التأكيد علي ضرورة التركيز علي مفهوم آخر و هو فعالية الجريان خلال الأنابيب سواء أكان حجمي من خلال كمية التدفق أو حركي من خلال تقدير سرعة الجريان مما يؤدي في الأخير لإستغلال أمثل للقناة. كذلك قمنا بإقتراح مقاربة ثالثة تعتمد على مرجعية معلومة الخصائص أو بتعبير آخر تعتمد على قناة مرجعية ذات خصائص معلومة و من خلالها ننطلق لحساب سائر القنوات, و التي أعطت نتائج رائعة حيث تم مقارنة النتائج مع المعادلة الأصل وهي معادلة مانينق و بعض المقاربة الحديثة فكان الفارق المرجعي صفر و هي نتيجة لم يدعيها احد من قبل.

كل المقاربات السابقة تضمنت إضافات نوعية و طرحنا من خلالها مقاربات حديثة و أفكار جديدة مساهمة منا في إثراء كمية الحلول المطروحة و معالجة النقائص.

كلمات مفتاحية: جريان ثابت, معادلة مانينق , شبكة الصرف الصحي, قناة ممتلئة جزئيا, جريان غير ثابت.

SOMMAIRE

Remerciement..... 2
Résumé..... 3
Sommaire..... 6
La liste des figures..... 8
La liste des tableaux..... 9
La liste principale des notations utilisées..... 11
Introduction générale..... 12
Chapitre I : Assainissement Urbain..... 16
1. Introduction..... 16
2. Assainissement systèmes, réseau et ouvrage..... 16
3. Systèmes d'évacuation des eaux usées..... 16
3.1. ***System d'assainissement non collectif***..... 17
3.2. ***System d'assainissement collectif***..... 17
3.2.1. Système unitaire..... 17
3.2.2. Système séparatif..... 18
3.2.3. System mixte..... 18
4. **Contraintes en assainissement**..... 18
4.1. ***Contraintes qualitatives***..... 19
4.2. ***Contraintes techniques***..... 19
4.2.1. Contraintes des sites..... 19
4.2.1.1. La pluviométrie de la région..... 19
4.2.1.2. La topographie..... 19
5. **Condition de transport des effluents**..... 20
6. Conclusion..... 21
Chapitre II : Etat de connaissance des différents types et principes d'écoulement dans les réseaux d'assainissement..... 22
1. Introduction..... 22
2. Types d'écoulement et principes..... 22
2.1. ***Ecoulement permanant ou non permanant***..... 22
2.2. ***Ecoulement uniforme ou non uniforme***..... 23
2.3. ***Ecoulement laminaire et turbulent***..... 24
2.4. ***Ecoulement à surface libre et à pleine section en charge***..... 26
2.5. ***Principes de base***..... 26
2.5.1. *Principe de la conservation de la masse*..... 26
2.5.2. Principe de la quantité de mouvement..... 27
2.5.3. Principe de la conservation de l'énergie..... 28
2.6. ***Profondeur normal (équation Manning)***..... 28
2.7. ***Capacité hydraulique***..... 29
3. Conclusion..... 29
Chapitre III : Approche semi-graphique..... 31
1. Introduction..... 31
2. Equation de Manning..... 31
2.1. ***Ganguillet et Kutter***..... 32
2.2. ***Manning***..... 32
3. **Approche graphique**..... 34
4. **Approche semi-graphique**..... 34
4.1. ***Reformulation de l'équation de Manning***..... 34
4.1.1. Equation de la vitesse..... 34
4.1.1.1. Simplification de l'équation de la vitesse..... 35

4.2. ***Epreuve analytique*** …… 38
4.2.1. Condition du débit Max …… 38
***5.* Conclusion** …… 38
Chapitre IV : Rendement volumétrique et de circulation dans les conduites partiellement remplie …… 40
1. Introduction …… 40
2. Reformulation des équations …… 40
3. Estimation du rendement volumétrique et de circulation …… 42
Exemple …… 55
Solution …… 55
4. Rendement volumétrique Maximal …… 56
4.1. ***Condition d'écoulement avec débit Max*** …… 56
4.2. ***Equation de la vitesse et les limites recommandées*** …… 58
5. Ecoulement avec rendement maximal de circulation …… 63
5.1. ***Condition d'écoulement avec vitesse moyenne maximale*** …… 63
5.2. ***Les limites recommandées*** …… 65
Exemple 01 …… 67
Solution …… 67
Exemple 02 …… 69
Solution …… 69
6. Conclusion …… 70
Chapitre V : Nouvelle approche pour le calcul des caractéristiques des RA avec CR …… 71
1. Introduction …… 71
2. Cas des conduites en série …… 71
2.1. ***La vitesse d'écoulement*** …… 71
2.2. ***Test d'exactitude*** …… 74
2.3. ***Angle de remplissage*** …… 76
2.3.1. Test d'exactitude …… 77
***3.* Cas des conduites en parallèle** …… 78
3.1. ***La vitesse d'écoulement*** …… 78
3.1.1. Bassins versants arrangés en parallèles …… 78
3.2. ***Test d'exactitude*** …… 83
3.3. ***L'angle de remplissage*** …… 84
***4.* Conclusion** …… 86
Chapitre VI : Les Modèles complexes …… 88
1. Introduction …… 88
2. Equations de Barré de Saint venant …… 88
2.1. ***Modélisation unidimensionnelle*** …… 89
2.2. ***L'équation de continuité*** …… 90
2.3. ***L'équation de la dynamique*** …… 90
2.4. ***Ecoulement permanent*** …… 91
2.5. ***Ecoulement uniforme*** …… 91
***3.* Modèle de Muskingum** …… 93
4. Conclusion …… 95
Conclusion générale …… 96
Références …… 97
Annexe …… 102

LISTE DES FIGURES

Figure	*Titre*	*Page*
Figure 1.1	Réseau unitaire	**17**
Figure 1.2	*Réseau séparatif*	**18**
Figure 2.3-A-	*écoulement uniforme*	**23**
Figure 2.3-B-	*écoulement varié*	**23**
Figure 2.4	*Ressaut hydraulique*	**24**
Figure 2.5	*Définition des termes pour l'énergie totale dans un canal ouvert ou une conduite ne coulant pas pleine.*	**28**
Figure 3.6	*Section d'écoulement partiellement remplie de rayon « r »*	**35**
Figure 3.7	*Détermination du paramètre K en fonction le taux de remplissage* $f = (\theta)$	**37**
Figure 4.8	*Rendement volumétrique et de circulation dans une conduite circulaire.*	**43**
Figure 5.9	*Deux Bassin versant et deux conduites arrangées en séries*	**72**
Figure 5.10	*Bassins versants et conduites arrangés en parallèle*	**79**
Figure 6.11	*Principe de modèle de Muskingum*	**93**
Figure 12 (Annexe)	*rapport des débits et des vitesses dans une conduite partiellement remplie. (Camp, 1946), (SCS, 1986)*	102

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	***Titre***	***page***
Tableau 4.1	*Rendement volumétrique et de circulation en fonction le taux de remplissage*	**44**
Tableau 4.2	*Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n}(min) = 0.4$*, et* $10mm \leq D \leq 250mm$*.*	**59**
Tableau 4.3	*Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n}(max) = 1$ *; et* $10mm \leq D \leq 250mm$*.*	**60**
Tableau 4.4	*Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n} = 1.05(min)$*, et* $315mm \leq D \leq 2100mm$*.*	**61**
Tableau 4.5	*Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits* Pour **:** $\frac{i^{1/2}}{n}(\max) = 4.64$, et $315mm \leq D \leq 2100mm$*.*	**62**
Tableau 4.6	*Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n} = 0.5$*(min), et* $10mm \leq D \leq 2100mm$*.*	**65**
Tableau 4.7	*Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n} = 5$ *(max); et* $10mm \leq D \leq 2100mm$*.*	**66**
Tableau 5.8	*Teste d'exactitude de l'équation (79), l'équation de Saatçi et de Giroud comparées avec l'équation (32)*	**76 et 103**

Tableau 5.9	*Test d'exactitude de l'équation (85) comparée avec l'équation de (32), équation de Saatçi (80) et l'équation (82) de Akgiray*	**78 et 118**
Tableau 5.10	*Test d'exactitude de l'équation (103), (102), (112) et (113) comparées avec l'équation de (32), équation de Saatçi (80) et l'équation (82) de Akgiray*	**84 et 133**
Tableau 5.11	*Test d'exactitude des équations (115) et (116) comparées avec l'équation (114) et les formules de Saatçi et Akgiray*	**86 et 148**

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

Q	(m^3/s)	Débit volume ;
V	(m^2/s)	Vitesse moyenne d'un écoulement ;
A	(m^2)	Aire d'une section mouillée ;
i	(-)	La pente du radier de la conduite ;
n	($s/m^{1/3}$)	Coefficient de Manning ;
Rh	(m)	Rayon hydraulique;
θ	(Rad)	Angle de remplissage ;
Rq	(-)	Rapport des débits ;
ZZ1	(m^2)	Sous bassin versant numéro 01 ;
ZZ2	(m^2)	Sous bassin versant numéro 02 ;
ZZ3	(m^2)	Bassin versant équivalent ;
T1-T2	(m)	Conduite de drainage du débit 01
T2-T3	(m)	Conduite de drainage du bassin versant équivalent ;
$r = \frac{D}{2}$	(m),	Rayon de la conduite ;
D	(m)	Diamètre d'une conduite circulaire ;
P	(m)	Périmètre mouillé ;
Qef	(%)	Rendement volumétrique ;
Q_{max}	(m^3/s)	Debits Max;
q_r	(m3/s)	Débit réel dans la conduite ;
Vef	(%)	Rendement de circulation ;
V_{max}	(m^2/s)	Vitesse Max ;
V_r	(m^2/s)	Vitesse réelle dans la conduite ;
A_{max}	(m^2)	Section mouillé correspond à Q_{max} ;
Q_p	(m^3/s)	Débit de la section pleine ;
θ_{Qmax}	(rad)	Angle de remplissage corresponde à Q_{max} ;
CC1	(m^2)	Sous bassin versant numéro 01 ;
CC2	(m^2)	Sous bassin versant numéro 02 ;
CC3	(m^2)	Bassin versant équivalent ;
M1-N1	(m)	Conduite de drainage du débit 01 ;
M2-N1	(m)	Conduite de drainage du débit 02 ;
N1-N2	(m)	Conduite de drainage du bassin versant équivalent ;
Q1	(m3/s)	débit produit sur le sous bassin 01 ;
Q2	(m3/s)	débit produit sur le sous bassin 02 ;
Q3	(m3/s)	débit produit sur le bassin équivalent .

Introduction générale

Le réseau d'assainissement est une infrastructure importante pour les milieux urbanisés et représente un garant impérative d'une vie saine. Il peut collecter uniquement les eaux usées, ou bien les eaux usées combinées avec les eaux pluviales ou uniquement les eaux pluviales ; de ce fait on distingue deux types de réseaux en milieu urbain : les réseaux séparatifs (eaux usées et eaux de pluie circulent dans des canalisations séparées) et les réseaux unitaires (eaux usées et eaux de pluie circulent dans les mêmes canalisations). Ils coulent en générale à surface libre et dans des conduites circulaires de diamètre D, sauf pour certaines régions de dépression en recourant à l'écoulement forcé pour remplacer le manque d'énergie dû à la présence d'une pente favorable par d'autre mécanique où les stations de pompage sont primordiales dans le system de collecte . La majorité des auteurs admirent par hypothèse un écoulement plein mes sous une pression atmosphérique (Terence J. McGhee, 1991), (Régis Bourrier, 1997), (Marc,S et Bechir, S, 2006). Le dimensionnement hydraulique de l'assainissement fait l'objet depuis plusieurs années de plusieurs prescriptions et méthodes et règles pour répondre aux besoins pratiques et académiques, via des solutions graphiques (VenkateswarluSwarna and all, 1990),(Terence J. McGhee, 1991) qui sont moins exactes et limitées, et méthodes semi-graphiques (Zeghadnia et al, 2009) qui réduisent le recours aux graphes, et la troisième c'est les essais d'analyse à travers les méthodes numériques (Hager ,1989), (Swameeet Jain, 1975, 1976et 1977), (Achour et Bedjaoui, 2012). Les méthodes théoriques de dimensionnement sont assez homogènes et basées sur des modèles admis hydrauliquement : Chézy, Bazin, Manning, Strickler et colebrook-White. La plus couramment utilisée est la formule de Manning (Saâtci, 1990). Généralement en pratique le débit Q, la rugosité n, la pente i sont des caractéristiques connues, en revanche le diamètre D, la vitesse d'écoulement V, le rayon hydraulique Rh sont des paramètres inconnus et nécessites d'être calculés. D'autres paramétrés s'avèrent importants pour certaines applications où pratiques à savoir la hauteur de remplissage et ce en fonction d'une hauteur « h », où encore appelé le taux de remplissage exprimé en fonction d'un angle de remplissage « θ » afin de mieux contrôler le risque de mise en charge des conduites à écoulement aéré appelé encore à surface libre.

Les méthodes numériques dépendent du remplissage de la conduite si elle est pleine ou partiellement remplie. Pour le premier cas le calcul est simple (Hager, 1991) et ce dû à la forme de l'équation de Manning. D'autres auteurs Hager (1989), Swamee and Jain (1975,

1976, and 1977), and Achour et Bedjaoui (2012), ont essayé d'expliciter l'équation de Colebrook-White (1845-1854) pour le cas de l'écoulement forcé turbulent via des solutions approchées. Alors pour le cas d'une conduite partiellement pleine des méthodes itératives sont nécessaires, mais sont laborieuses. La majorité des études sont adressées pour déterminer la hauteur normale, Certains auteurs ont essayé de proposer des solutions explicites : Barr and Das (1986),Saatçi (1990),Akigray (2004), and Prabhata and Swamee (2004), Achour (2006),Tommy S.W. Wong(2007) sans proposer des formules directes pour le calcul du diamètre.

Il est important de signaler que la formule de Colebrook-White n'est pas recommandée pour l'écoulement des eaux usées et ce dû au coefficient de rugosité qu'utilise Colebrook-white pour décrire la hauteur des aspérités, alors en réalité le réseau d'assainissement est exposé d'être affecté par une couche biofilm (Carlier, 1985), (Clair, 2003), (Guzman et al, 2007), (Guillermo et al, 2009); et à ce moment nous sommes devant un état de surface sans aucune possibilité de mesurer la hauteur des aspérités, ce qui renforce notre choix de l'équation de Manning.

La présente étude est adressée pour répondre à quelques questions importantes afin de :

- Simplifier les équations de Manning qualifiées comme les meilleures dans leur genre pour décrire l'écoulement permanent et uniforme et discuter les différentes approches proposées selon notre recherche bibliographique ;
- Contribuer à l'enrichissement des modèles proposés jusqu'à présent et exposer notre point de vue à travers la discussion des divers concepts.

Pour pouvoir bien exposer nos approches, nous avons divisé la thèse en 06 chapitres après une introduction générale qui expose une recherche bibliographique. Les chapitres sont structurés comme suit:

- Le premier chapitre intitulé « ***Assainissement urbain*** », représente une présentation générale des différents concepts et notions nécessaires pour l'assainissement urbain, Que ce soit le rôle d'un réseau d'assainissement, les différents types de contra-intes…etc
- Le deuxième chapitre intitulé : « ***Etat de connaissance des différents types et principes d'écoulement dans les réseaux d'assainissement »*** est adressé pour

présenter une synthèse des connaissances sur les différents principes des écoulements dans les réseaux d'assainissement comme son titre l'indique ;

- Pour le troisième chapitre intitulé *: « **Approche semi-graphique »*** il représente la première solution proposée. il contient des simplifications et reformulation de l'équation de Manning ainsi qu'une solution semi-graphique pour déterminer les différents paramètres d'écoulement, avec un bref aperçu sur la solution graphique et l'évolution de l'équation de Chezy (1769) et les différentes propositions de Ganguillet et Kutter (Robert. L, 2011) jusqu'à l'apparition de la formule de Manning (Chow, 1959) et la discussion du choix de l'équation de Manning pour nos contributions, des différentes convictions et certains résultats proposés (Giroud et al, 2000) ;
- Le quatrième chapitre intitulé « ***Nouvelle conception des conduites circulaire basée sur le rendement volumétrique ou circulaire de l'écoulement »*** a pour objectif de proposer une nouvelle notion pour le dimensionnement basé sur deux principaux concepts :
    1. La notion du rendement volumétrique, qui signifie que la conduite écoule avec sa capacité volumétrique maximale, c'est-à-dire qu'elle s'écoule avec un débit maximum et qui correspond impérativement à un niveau de remplissage égale à θ_{Qmax}, si cette condition est vérifiée à ce moment nous disons que la conduite est volumétriquement bien exploitée, autrement dit, le rendement volumétrique de la conduite atteint son maximum ;
    2. La notion du rendement de circulation à l'intérieur de la conduite, qui signifie que l'écoulement s'effectue avec une vitesse maximale corresponde obligatoirement à un niveau de remplissage égale à θ_{Vmax}, autrement dit que la conduite est bien exploitée de point de vue rendement de circulation.

Ces deux notions, représentent une nouvelle proposition, tel que le rendement d'une conduite est devenu mesurable. Et selon notre recherche bibliographique aucun auteur n'a abordé ce sujet jusqu'à présent. Et nous croyons que c'est la première contribution qui traite le dimensionnement des conduites à partir d'une efficacité maximale.

- Une autre approche est établie pour enrichir les méthodes de conception et pour expliciter le désigne des réseaux d'assainissement et ce via le cinquième chapitre intitulé « ***Nouvelle approche pour le calcul des caractéristiques du réseau d'assainissement en fonction d'une conduite de référence »,***dans ce chapitre nous

avons présenté une nouvelle méthode qui a donnée de bon résultat ou le maximum de déviation comparé aux résultats (les plus célèbres) qu'on a trouvé lors de notre recherche ainsi qu'à l'équation de Manning est **Zéro,** résultat que personne n'a atteint auparavant, et ce pour les deux cas possibles de l'écoulement : arrangement en série ou en parallèle. Avec la discussion des meilleurs résultats proposés jusqu'à présent à savoir (Saâtçi, 1990), (Giroud et al, 2000), (Akgiray, 2004 et 2005). Sans oublier que leurs résultats sont comparés avec le nôtre et l'écart est remarquable.

- Le dernier chapitre son intitulé est : ***« Les modèles complexes »*** représente en bref une présentation de deux modèles célèbres adressés pour décrire les écoulements non permanant et non uniforme à savoir le modèle décrit par les équations de Barré saint-Venant, et le modèle de McCarthy (1938) connu sou le nom modèle de Muskingum, qui sont les plus utilisés pour décrire ce genre d'écoulement (Blanpain&B.Chocat, 1998) ; le premier est un modèle hydraulique, alors que le deuxième est un modèle hydrologique.

Et enfin, la thèse est clôturée par une conclusion générale qui représente une synthèse des résultats obtenus dans les différents chapitres.

Pour toutes les discussions et dans tous les chapitres, notre attention sera apportée uniquement sur les écoulements permanents uniformes.

Chapitre I : Assainissement Urbain

1. Introduction :

L'assainissement des agglomérations a pour but d'assurer la collecte, le transite, de l'ensemble des eaux pluviales et usées et de procéder aux traitements avant leur rejet dans le milieu naturel par des modes compatibles avec la santé publique. L'assainissement urbain concerne la gestion des eaux en milieux urbain, que ce soit des eaux liées à l'utilisation par la population ou bien les effets des eaux de précipitation.

2. Assainissement system, réseau et ouvrage :

L'encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement a définie « l'assainissement comme étant l'action d'assainir et de rendre sain. L'assainissement concerne la gestion des eaux usées comme celle des eaux pluviales. Il peut être collectif et /ou utiliser des techniques plus au moins localisées. L'assainissement constitue l'aspect technique de l'hydrologie urbaine. L'assainissement peut être défini aussi comme étant l'ensemble des stratégies utilisées par les habitants des villes, responsables officiels ou non, pour essayer de répondre aux problèmes posés par la circulation urbaine de l'eau en excluant la production et la distribution de l'eau potable ». Le système d'assainissement donc et l'ensemble des éléments qui peuvent intervenir dans l'action d'assainissement, et ce depuis la collecte jusqu'à la station d'épuration (Egard, 1998).

La partie sur laquelle nous projetterons la lumière c'est le réseau d'assainissement, qui a pour rôle de transférer l'effluent. Il relie entre les ouvrages de collecte et la station d'épuration (considéré comme point exutoire). La canalisation ou tronçon c'est la partie qui relie entre deux regards, et l'ensemble constitue le linéaire transportant l'effluent.

3. Systèmes d'évacuation des eaux usées :

Depuis de vue densité des habitants, les techniques d'assainissement permettent la mise en œuvre de deux types de systèmes : Les systèmes d'assainissement collectifs et non collectifs ou encore individuels, en revanche nous pourrions distinguer plusieurs systèmes.

3.1. ***Systèmes d'assainissement non collectifs :***

Ce système est adressé pour assurer le traitement et l'évacuation des eaux usées domestiques qui ne peuvent être évacués par un system d'assainissement publique en raison de la faible densité des habitations.

3.2. ***Systèmes d'assainissement collectifs :***

Il est conçu pour assurer l'évacuation rapide des eaux usées vers les stations d'épuration, et de manière analogue pour les eaux pluviales devrait transiter vers les rejets naturels (avec le respect des normes de rejet), et empêcher la submersion des zones urbanisées.

On distingue :

3.2.1. Système unitaire :

Représente la façon de l'évacuation de l'ensemble eaux usées et pluviales par un unique réseau, généralement pourvu de déversoirs, permettant en cas d'orage le rejet d'une partie des eaux par sur verse directement dans le milieu naturel.

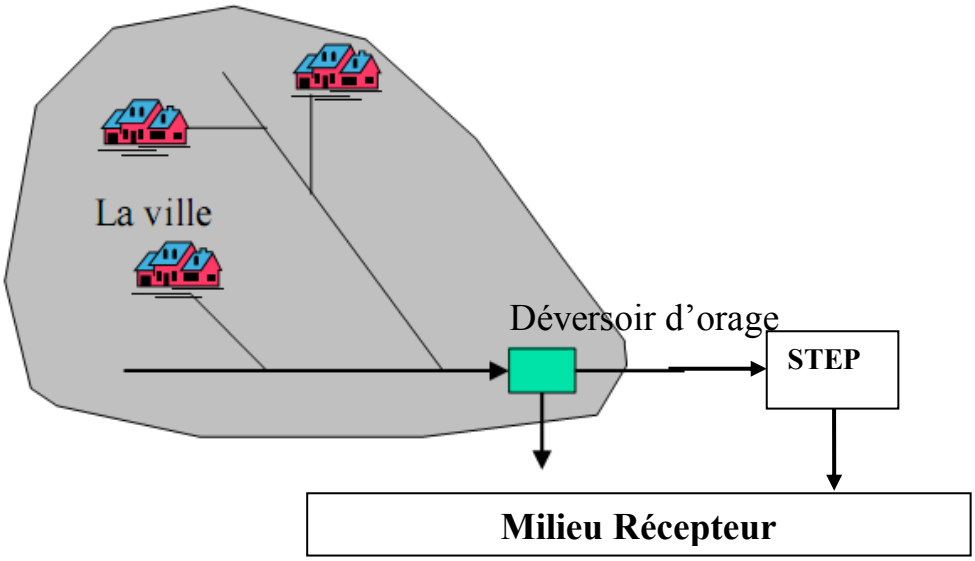


Figure 1.1 : *Réseau unitaire.*

3.2.2. Système séparatif :

Adresser pour évacuer des eaux usées domestiques (eaux de vanne et eaux ménagères) ainsi qu'une partie de certain effluent industriel, alors que l'évacuation des toutes les eaux de pluies est assurée par un autre réseau.

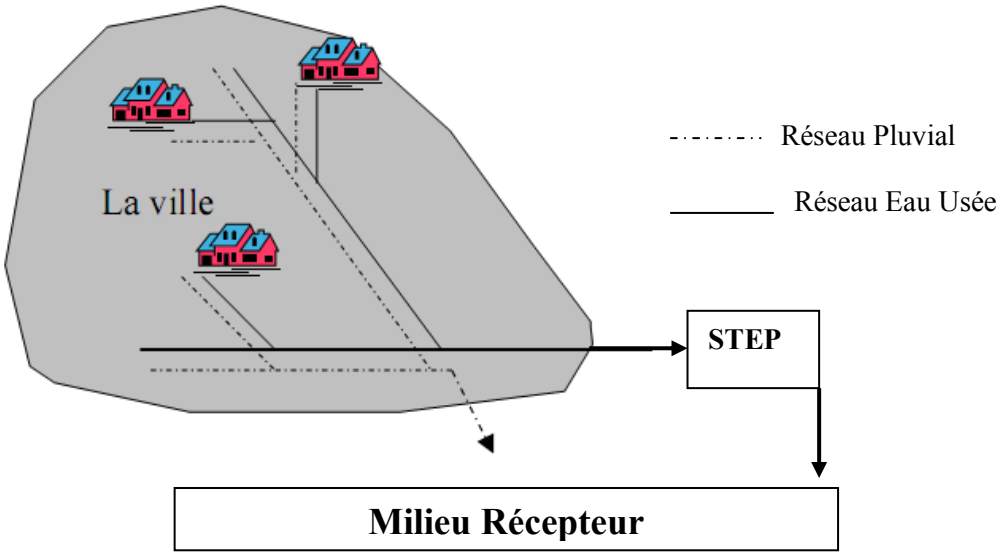


Figure 1.2 : *Réseau séparatif.*

3.2.3. Système mixte :

Désignant communément des réseaux constitués selon les zones d'habitation en partie en système unitaire et en partie en système séparatif.

4. Contraintes en assainissement :

Les techniques d'assainissement des agglomérations et la protection sanitaire des milieux récepteurs doivent servir et répondre aux exigences d'ordre techniques, économiques et esthétiques. Les eaux pluviales doivent être évacuées pour limiter la submersion des zones urbanisées. Les eaux usées doivent être évacuées sans stagnation loin des habitations car les déchets qu'elles contiennent sont susceptibles de donner naissance à des nuisances ou même engendrer des épidémies ; les eaux rejetées doivent satisfaire aux objectifs fixés pour le maintien et l'amélioration de la qualité des milieux naturels récepteurs.

4.1. **Contraintes qualitatives :**

La loi 83-17 du 16 juillet 1983, portant code des eaux algérien (journal N°30 du 19/07/1983), en son article 89 au 91, chapitre II, a prévu que les conditions de rejet doivent répondre aux normes fixées par la voie réglementaire. Pour satisfaire à ces obligations, les propriétaires d'installations de déversement existant antérieurement, notamment les industries et en vertu de la publication du décret ci-dessus, devront prendre toutes dispositions pour que leurs effluents permettent la satisfaction de l'objectif de protection de l'environnement.

4.2. ***Contraintes techniques :***

L'établissement d'un réseau d'assainissement est une opération composée est complexée par fois. Pour se prêter à une solution uniforme et relever de règles rigides. Il est commandé par de nombreux facteurs qui peuvent conduire à des conclusions contradictoires entre lesquelles un compromis est à dégager, l'analyser de ces différents facteurs qui influent sur la conception du projet. Cette analyse conduit à étudier :

4.2.1. Contraintes des sites :

4.2.1.1. La pluviométrie de la région :

Dans un réseau unitaire c'est l'évacuation des eaux d'orage qui détermine les caractéristiques hydrauliques des ouvrages de collecte. Les débits des pointes d'eaux pluviales sont très supérieurs à ceux des pointes d'eaux usées, une protection absolue nécessiterait la construction d'égouts aux dimensions excessives par les dépenses et d'entretien qu'elles impliqueraient. Pour les ouvrages du réseau il est donc inévitable d'accepter des insuffisances occasionnelles et d'en mesurer les conséquences. On calcule généralement les évacuateurs d'eau pluviale - en système séparatif comme en unitaire - de telle sorte que la capacité d'évacuation corresponde au débit d'orage d'une fréquence probable donnée.

4.2.1.2. La topographie :

Elle est imposée et son rôle est essentiel. En effet comme il s'agit d'évacuer des eaux aussi rapidement que possible pour éviter les dépôts, l'évacuation sera d'autant plus aisée que le terrain présentera des pentes plus importantes. L'évacuation rapide et continue de tous les déchets fermentescibles des canalisations d'eaux usées implique une pente raisonnable choisie par le concepteur.

D'autres facteurs sont aussi des facteurs influençant sur la conception d'un projet d'assainissement qui peuvent être classées sous la rubrique contraintes des sites, et qui devraient être étudiés, à savoir : l'hydrographie de la zone ainsi que ses nappes, car et surtout pour conduire les eaux pluviales, la connaissance de ses deux facteurs aide le concepteur à mieux choisir l'endroit sur lequel il implantera les ouvrages du réseau.

La nature géologique de la région peut constituer un défi lorsque et à titre d'exemple l'implantation nécessite la construction d'autres ouvrages la protection des conduites, les études géotechniques doivent être faites sur tout le site concerné. D'autres facteurs peuvent représenter une contrainte, exemple : Le mode d'occupation de sol, l'aménagement global future….etc.

5. *Conditions de transport des effluents :*

Les types d'effluents à transporter par le réseau en milieux urbain peuvent être classés en trois catégories :

- Des eaux usées domestiques ou ménagères ;
- Des eaux usées industrielles ;
- Des eaux pluviales ;

Selon le system d'évacuation choisi ses eaux peuvent se regroupés ou se séparées mais pour tous les cas la condition une vitesse admissible est impérative pour pouvoir éviter une déposition probable des dépôts soit l'intervalle suivant une fourchette admissible (Marc S et Bachir, 2006):

$$0.6 \leq V \leq 5m/S$$

En outre, il est demandé de tous les concepteurs d'éviter de rendre les conduites d'assainissement des milieux favorisants la fermentation, et ce par l'assurance de la ventilation des égouts, autrement dit, l'écoulement dans les conduites d'égout doit être à plan libre, afin d'assurer un rendement élevé des écoulements qui sera détaillé encore dans le chapitre IV.

6. *Conclusion :*

L'assainissement est l'action d'assainir et de rendre sain, à travers un ensemble des techniques et des stratégies utilisées par les habitants des villes, responsables officiels ou non. Les systèmes d'assainissement peuvent être partagés en système collectif et non collectif ou encore individuel et ce en fonction de la densité de la population, en revanche nous pourrions distinguer plusieurs systèmes en fonction de type des eaux usées transportées à savoir : unitaire, séparatif ou bien pseudo séparatif. Le transport de l'effluent doit répondre aux exigences d'ordre techniques, économiques et esthétiques fixées par les lois de la région.

Chapitre II : Etat de connaissance des différents types et principes d'écoulement dans les réseaux d'assainissement

1. Introduction :

La conception adéquate des réseaux de drainage doit nécessairement s'appuyer sur une bonne compréhension des principes hydrauliques de façon à pouvoir bien dimensionner les différentes composantes. Ce chapitre a pour but de présenter ces principes hydrauliques fondamentaux, et de faire une vue rétrospective des différents régimes possibles dans les conduites d'assainissement, en accentuant l'application des principes de base à des problèmes réels rencontrés typiquement lors de la conception. L'écoulement dans les conduites d'assainissement peut être, uniforme (par hypothèse), graduellement varié (représente la majorité des cas) ou bien brusquement varié, si nous considérons que le facteur temps n'influe pas sur l'écoulement ce qui rend l'écoulement permanant (en revanche les paramètres varient instantanément d'une section à l'autre en réalité), et finalement si l'écoulement s'effectue en charge ou à surface libre.

2. Types et principes d'écoulement :

La conception et l'analyse hydraulique d'un réseau d'assainissement doit débuter par un pas essentiel c'est l'identification des types d'écoulement pour un problème particulier, puisque les équations servant à la conception sont souvent applicables pour des cas particuliers d'écoulement. Les différents types d'écoulement peuvent être définis en considérant certains paramètres qui changent avec le temps et la distance le long d'un élément d'écoulement. Chow (1959), Henderson (1966).

2.1. *Écoulement permanent ou non permanent* :

Un écoulement permanent se produit lorsque le débit, la profondeur et la vitesse sont constants dans le temps, c'est-à-dire qu'ils sont uniquement en fonction des coordonnées spatiales :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0, \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \qquad (2.1)$$

Des écoulements de ce type peuvent caractériser par exemple les débits avec une variation plus ou moins lente. D'un autre côté, l'écoulement dans un réseau d'égout pluvial est non permanent lors d'évènements pluvieux, autrement dit, les caractéristiques d'écoulement varient avec le temps:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial h}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial V}{\partial t} \neq 0 \qquad (2.2)$$

On recourt dans ces cas aux équations dites de Saint-Venant (détaillées au chapitre 06).

2.2. ***Écoulement uniforme ou non uniforme*** **:**

L'écoulement dans les conduites d'assainissement est généralement non uniforme, alors l'hypothèse d'un écoulement est posée afin de simplifier l'analyse et la conception des réseaux d'assainissement. Par définition un écoulement est dit uniforme lorsque le débit, la profondeur d'eau et la vitesse sont constants le long de la distance considérée ; la pente de la canalisation, celle de l'énergie spécifique et la surface de l'eau sont alors toutes parallèles. La profondeur d'eau correspondant à un écoulement uniforme s'appelle la profondeur normale. Par opposition, un écoulement est non uniforme lorsque les mêmes paramètres (débit, vitesse et profondeur d'eau) varient avec la distance.

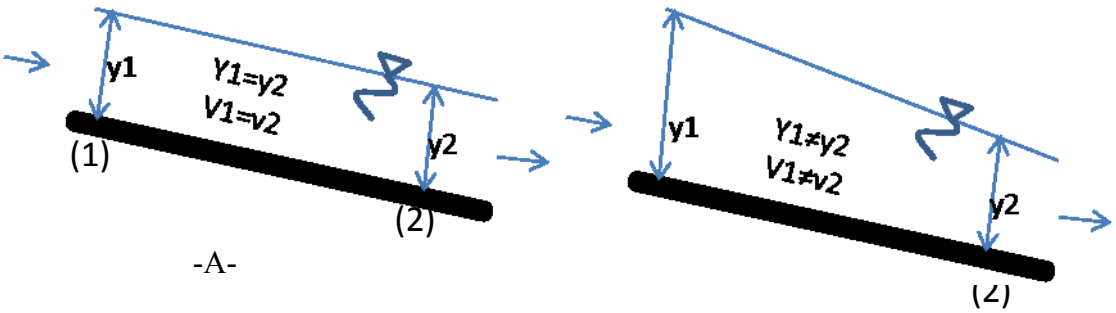


Figure 2.3: *(A) écoulement uniforme, (B) écoulement varié.*

On peut distinguer deux sous-catégories dans ce cas: l'écoulement peut être **graduellement** ou **rapidement varié**, selon la rapidité avec laquelle le changement se fait. Exemples d'écoulement graduellement varie l'écoulement en caniveau et l'écoulement dans les canalisations en temps de pluie.

Un écoulement rapidement varie est caractérisé par des changements abrupts sur de très courtes distances : c'est le cas d'un écoulement par exemple à la sortie d'un déversoir où il se

produit un ressaut hydraulique. Les équations pour l'écoulement uniforme ne peuvent plus être utilisées dans ces cas d'écoulement rapidement varie puisque l'écoulement implique alors des phénomènes d'onde.

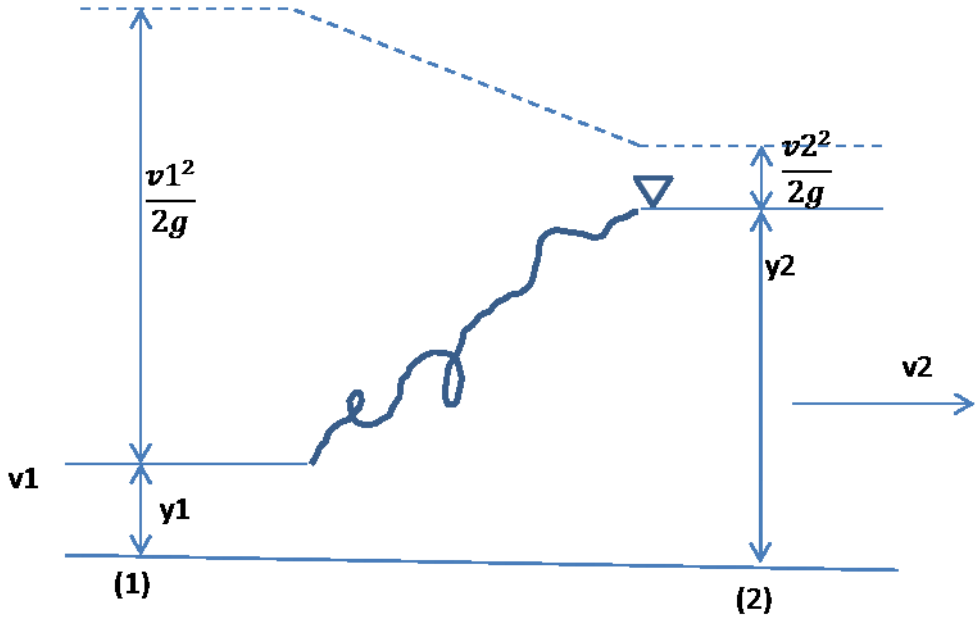


Figure 2.4: *Ressaut hydraulique.*

On peut après cette promenade, dire qu'un écoulement non uniforme peut également être non permanent si on y compare avec les conditions suscitées.

2.3. ***Ecoulement laminaire et turbulent* :**

En fonction du type de forces en jeu pour gouverner le type d'écoulement, une autre classification peut s'établir. Si les forces visqueuses prédominent et que le nombre de Reynolds est inférieur à environ 2300 (Sinniger et Hager 1989), en revanche Terence(1991) toléré d'atteindre 4000, l'écoulement est dit laminaire :

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \tag{2.3}$$

Tel que :

V : La vitesse en m/s ;

υ : La viscosité cinématique $m^2.s^{-1}$;

D : Le diamètre intérieur de la conduite en m.

Les lignes d'eau à l'intérieur d'une section type tendent dans ce cas à rester parallèles. Si le nombre de Reynolds est supérieur ou égale à 2300, l'écoulement à ce moment est turbulent, là où des sous classes peuvent être distinguées à savoir : turbulent lisse, régime de transition et plein turbulence ou hydrauliquement rugueux (Zeghadnia, 2007), En pratique la majorité des écoulements sont en régime turbulent et plus particulièrement en régime plein turbulence (Bdjaoui. A, 2010). L'équation de Manning s'applique au cas de régime turbulence pleinement développée (Carlier, 1980), ce qui est le cas usuel en pratique. L'équation de Manning peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Q = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S\, i^{1/2} \tag{2.4}$$

Où :

Q : Le débit écoulant dans la conduite en m^3/s;

R_h : Le rayon hydraulique en m;

n : Coefficient déterminant l'état interne de la Paroi de la conduite $\frac{s}{m^{1/3}}$;

S: La section mouillée en m^2;

i : La pente de la conduite.

En revanche L'équation de Colebrook-White est par ailleurs jugée plus appropriée pour les gammes lisses et de transition et plein turbulence, ainsi que l'équation qu'il a une large utilisation dans les deux Amériques (Carlier, 1980), (Terence J, 1991).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \log_{10}\left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}\right) \tag{2.5}$$

Tel que :

λ : Le coefficient de frottement ;

ε : La rugosité absolue en m ;

D : Le diamètre interne de la conduite en m.

2.4. ***Ecoulement à surface libre et à pleine section en charge* :**

Un écoulement libre comme dans un canal naturel ou n'est pas totalement confine ; en conduite, l'écoulement est dit à surface libre lorsque les niveaux d'eau n'atteignent pas la pleine hauteur de la canalisation d'un autre cote, on peut également avoir avec une conduite à un écoulement partiellement pleine ou pleine. Dans le premier cas, l'analyse est similaire à un écoulement à surface libre. Dans le cas d'un écoulement à plein section, l'écoulement est confine sans une surface libre et on dit alors qu'il se fait sous pression ou en charge, (d'autres auteurs acceptes par hypothèse un écoulement à pleine section et à surface libre où les forces gravitaires gouvernent) (Akgiray, 2004 et 2005), (Marc S, et Béchir S., 2006).

2.5. ***Principes de base* :**

La très grande majorité des problèmes rencontrés lors de la conception des réseaux de drainage urbain peuvent être analysées à l'aide des trois grands principes de conservation suivants :

- Conservation de la masse (continuité)
- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation de l'énergie.

2.5.1. Principe de la conservation de la masse (de continuité) :

Ce principe fut énoncé dès l'antiquité par Lucrèce (99-55 av. J-C) et démontré par les pionniers de la chimie et de la physique moderne (Beaudry. JP, 2010).

Dans sa forme la plus simple, le principe de continuité exprime la conservation de masse et l'équation de base est la suivante :

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \sum Q_e - \sum Q_s \qquad (2.6)$$

Tel que :

ΔS : est le changement de stockage m^3,

Δt : est l'intervalle de temps en sec,

Q_e : est le débit moyen entrant m^3/s,

Q_S : est le débit moyen sortant m^3/s.

En assumant un écoulement permanent l'équation de continuité indique alors simplement que la somme des débits entrant est égale à la somme des débits sortant du volume de contrôle :

$$\sum Q_e = \sum Q_s \tag{2.7}$$

On obtient alors l'équation de continuité dans sa forme la plus simple :

$$Q = vS \tag{2.8}$$

Tel que :

Q : est le débit en m^3/s,

v : est la vitesse moyenne en m/s,

S : est la section d'écoulement en m^2.

2.5.2. Principe de la quantité de mouvement :

Se dérive à partir de la deuxième loi de Isaac Newton, ce dénier fut le premier à formuler les trois lois fondamentale de la dynamique (Beaudry JP, 2010). Selon Newton la somme des forces externes agissant sur une masse de liquide est égale au taux de changement dans la quantité de mouvement linéaire de cette masse :

$$\sum F_{ext} = \frac{d(mv)}{dt} \tag{2.9}$$

$\sum F_{ext}$: la somme des forces extérieurs,

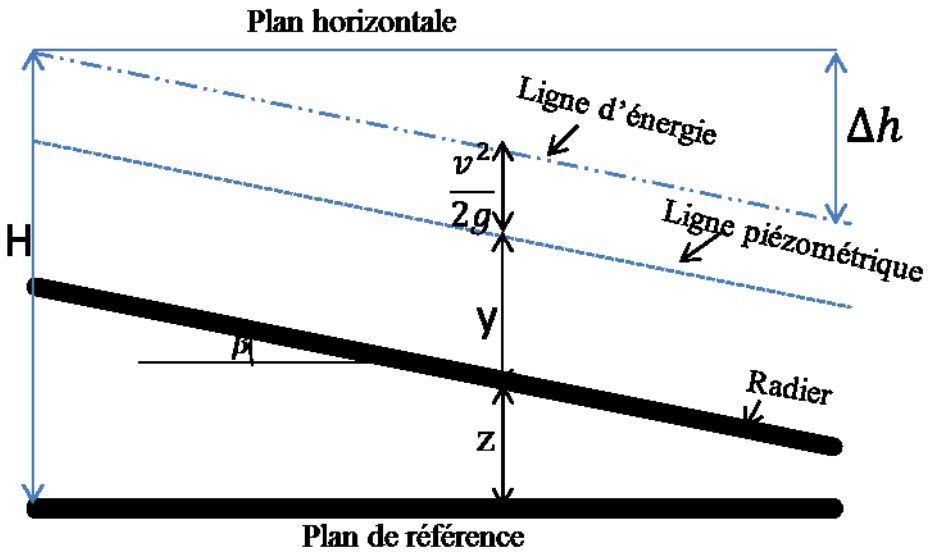
mv : la quantité de mouvement.

L'équation d'onde dynamique qui en résulte, couplée avec l'équation de continuité sous sa forme complète, forment les équations de Saint-Venant qui les développa en 1871 (voir chapitre 06).

Ces équations définissent un écoulement non permanent graduellement varie et sont utilisées dans différents programmes de simulation comme SWMM (*Storm water Management Model*).

2.5.3. Principe de la conservation d'énergie :

Jugé très important pour analyser l'écoulement en réseau, ce sont les lignes du gradient hydraulique et du gradient d'énergie, séparées verticalement par le terme de vitesse $V^2/2g$. Dans le cas d'un écoulement à surface libre, la ligne du gradient hydraulique (piézométrique) correspond à la surface de l'écoulement.



$$H = z + y\cos\beta + \frac{v^2}{2g} \qquad (2.10)$$

Figure 2.5 : Définition des termes pour l'énergie totale dans un canal ouvert ou une conduite ne coulant pas pleine.

2.6. ***Profondeur normale (équation de Manning)*** **:**

Comme la majorité des conduites des réseaux d'assainissement ne coulent pas pleine, il est important de connaitre la hauteur de remplissage dans la conduite, cette hauteur est appelée hauteur ou profondeur normale. La profondeur normale est simplement définie comme la profondeur correspondant à un écoulement uniforme avec un débit constant (écoulement uniforme permanent). La profondeur normale est en fonction du débit, des dimensions, du type de canalisation (Rugosité) et de la pente. Sa valeur peut être calculée à l'aide de l'équation de Manning (Show, 1959 ; French, 1985):

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3}\, i^{1/2} \qquad (2.11)$$

Où :

R_h : Le rayon hydraulique en m;

n : coefficient déterminant l'état interne de la paroi de la conduite en $\frac{s}{m^{1/3}}$;

i : la pente de la conduite ;

V : la vitesse d'écoulement en m/s.

Cette profondeur peut être calculée par le bais des méthodes itératives ou graphiquement (Chow 1959), (MTQ, 1995) qui sont basées sur l'hypothèse que la valeur de coefficient de Manning « n » ne varie pas avec la profondeur, or que certaines mesures ont estimé une variation de ce coefficient en fonction de la profondeur, et qu'elle est plus grande de 29% pour le cas d'une section pleine (ASCE/WEF, 1992), (Camp, 1946), (Steven F, 2010). Certains auteurs ont essayé de proposer une solution explicite pour le calcul de la hauteur normale en se basant sur l'équation de Colebrook-White (Achour.A et Bdjaoui.A, 2006).

2.7. ***Capacité hydraulique :***

La capacité hydraulique d'une conduite s'évalue avec l'équation de Manning, qui s'écrit sous la forme de l'équation (2.4). Il est de bonne pratique de dimensionner les conduites de façon à ce que les débits de conception puissent être véhiculés avec des hauteurs d'eau inferieures à la capacité maximum (pleine section) , car maintenir l'écoulement à ce niveau (écoulement pleine section) peut entrainer des instabilités, puisque la conduite pourra couler pleine temporairement et à des intervalles irréguliers (Henderson, 1966), ce qui nous toléré de proposer un autre concept ou de le rappeler déferrement, c'est ce qu'on aime l'appeler l'écoulement à plein rendement volumétrique ou bien l'écoulement à plein rendement de circulation qui sera détaillé dans les prochains chapitres.

3. Conclusion :

L'écoulement dans les conduites d'assainissement peut être, uniforme (par hypothèse), graduellement varié (représente la majorité des cas) ou bien brusquement varié. Si nous prenons en considération que le facteur temps il peut être permanant ou non permanant. L'identification du type d'écoulement est essentielle ; les équations servant à la conception sont applicables pour des cas particuliers d'écoulement. Pour l'écoulement où les caractéristiques varient avec le temps les équations dites de Saint-Venant s'avèrent convenables. Si les forces visqueuses prédominent l'écoulement et qualifié turbulent, en revanche si les force gravitationnelles sont prédominantes il est qualifié laminaire. En

générale les conduites d'assainissement s'écoulent à surface libre. Le calcul de la hauteur normale aide à déterminer la capacité hydraulique de la conduite, où il est préférable d'éviter l'écoulement à pleine section (voir chapitres suivants).

Chapitre III : Approche semi-graphique

1. Introduction :

La conception des réseaux urbains ou agricoles ainsi que les ouvrages de protection contre les inondations fonctionnant à surface libre ou à ciel ouvert ou dans des sections pleines, est basée sur l'approche de Manning qualifiée d'usage courant, à cause de sa simplicité, et la disponibilité des diagrammes et tableaux (Chow, 1959), (Terence J. McGhee, 1991) destinés à déterminer les caractéristiques hydrauliques de l'écoulement, à savoir la vitesse et la hauteur normale. L'exactitude d'obtention de ces deux paramètres jugés essentiels, et représente sans doute une tâche primordiale pour le concepteur, et un souci résident pour un chercheur prudent. Les méthodes proposées oscillent entre des méthodes graphiques (Venkateswa-rluSwarna and al, 1990), ou semi-graphiques (Giroud et al, 2000) ou encore numériques (Zeghadnia et al, 2014). Afin de contribuer à la simplification des calculs de ces variables, on commence par la proposition d'une méthode semi-graphique claire et aisée, élaborée dans le présent chapitre.

2. Equation de Manning :

Chézy a été, en 1769, le premier qui a présenté une formule pour décrire les écoulements à surface libre et uniforme dans les canaux. Elle est présentée sous la forme (Robert. L , 2011):

$$V = c\sqrt{R_h i} \tag{3.12}$$

Tel que :

V: La vitesse d'écoulement en m/s.

R_h: Le rayon hydraulique en m.

C : Le coefficient de Chézy en $m^{1/2}/s$.

i : La pente de la conduite.

Les modèles qui ont été développés par la suite, utilisent en général, l'équation de Chézy dans laquelle ils cherchent à mieux décrire le coefficient "*C*".

2.1. ***Ganguillet et Kutter* :**

En 1869, deux ingénieurs suisses, suite à de nombreux relevés principalement sur de grandes rivières, présentent une équation pour décrire le coefficient "*C*" de l'équation de Chézy. Elle est connue sous le nom de formule de Kutter (Robert. L , 2011) :

$$C = \frac{23+\frac{0.00155}{i}+\frac{1}{n}}{1+\left(23+\frac{0.00155}{i}\right)\left(\frac{n}{\sqrt{R_h}}\right)} \tag{3.13}$$

Tel que :

n : Le coefficient de la résistance $\frac{s}{m^{1/3}}$,

i : La pente de la conduite,

R_h : Le rayon hydraulique (m).

2.2. ***Manning :***

En 1891, un ingénieur irlandais nommé Manning présenta une formule qui, par la suite, a été réduite à la forme que l'on connaît (équation 2.4), (Robert. L , 2011):

$$\mathrm{Q} = \frac{1}{\mathrm{n}} \mathrm{R_h^{2/3}} \mathrm{S\ i^{1/2}} \tag{2.4}$$

Où :

Q : Le débit écoulant dans la conduite en m^3/s,

R_h: Le rayon hydraulique en m,

n : Le coefficient déterminant l'état interne de la paroi de la conduite $\frac{s}{m^{1/3}}$,

S: La section mouillée en m^2,

i : la pente de la conduite.

Où le coefficient de Chézy a pour valeur :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{1/6} \tag{3.14}$$

La formule de Manning peut être utilisée que ce soit pour des conduites circulaires et non circulaires pleines ou partiellement pleines. Cette formule a été dérivée des formules existantes et vérifiée par 170 relevés qui sont tirés principalement des expériences de Bazin (Chow, 1959). En 1936, le comité exécutif de la Third World Power Conférence recommande l'utilisation de la formule de Manning à l'échelle internationale (Chow, 1959). Par la suite, elle est devenue la plus usitée pour le calcul des écoulements uniformes en canaux ouverts. Les ingénieurs la préfèrent à cause de sa simplicité et de sa facilité d'utilisation.

Plusieurs noms sont associés à la formule de Manning, que ce soit parce qu'ils aient présenté la forme simplifiée ou qu'ils aient obtenu une formule semblable de façon indépendante. Ces noms sont G.H.L. Hagen en 1876, Philippe--Gaspard Gauckler en 1868 et Strickler en 1923 (Chow, 1959). À cause de sa simplicité, la formule de Manning peut se transposer en un abaque simple d'utilisation. Pour les sections de géométrie simple, la formule de Manning présentée sous forme de figure permet de calculer directement la profondeur normale d'écoulement.

Chow (1959) rapporte que Bankhmeteff et Feodoroff ont comparé la formule de Manning, Kutter et Bazin en utilisant les équations de distribution de vitesse. Leurs résultats montrent que la formule de Manning est la meilleure de celles considérées.

Les recherches de Prandtl, Nukiradse, Karman, ainsi que d'autres comme Powell (1950) et Crump (1956) ont montré la possibilité d'utiliser les équations universelles adressées pour l'estimation des pertes de charge pour être appliquées aux écoulements à surface libre, reste à noter que ces équations rencontrent une opposition de la part des hydrauliciens et préfèrent les équation de Bazin, Manning, Strickler...etc, Ils estiment en effet que l'emploi de ces formules universelles ne présentent guère d'avantage puisqu'en somme les coefficients - de Bazin, Manning, Strickler - des formules anciennes sont remplacés ici par la hauteur moyenne de la rugosité équivalente dont le choix et la détermination ne sont guère plus commodes (Carlier 1985), et des recherches récentes ont montré que les parois des conduites d'assainissement subissent une formation d'une couche de biofilm (Claire OMS**,** 2009), (Karloren Guzmán and al 2007),(Guillermo J. Rincón and al 2009) influençant la rugosité et à ce moment nous somme devant un état de surface et ne pas devant une hauteur d'aspérité, chose qui nous incite en plus de choisir l'opposition d'utiliser les formules universelles au détriment des formules

anciennes. Mais les équations universelles sont avantagées quand il est le cas des conduites dépourvues de ses dépôts (Carlier 1985).

3. Approches graphique :

Les graphes, nomogram et les tableaux depuis longtemps ont été considéré des méthodes faciles et plus pratiques pour les ingénieurs pour une commode interprétation des valeurs exprimées par des formules implicites nécessitent généralement des méthodes itératives comme celle de Manning. Plusieurs auteurs ont essayé de contribuer et proposer un graphe ou tableau ou nomogram afin de contourner le recours à ces méthodes de tâtonnement. Show(1956), Camp(1946), Metcalf (1981), Venkasteswarlu (1990), Terence (1991), Wallingford (2006)…etc. Les solutions graphiques ou sous forme des tableaux sont des solutions limitées et dépendent des pas choisis par le concepteur au début. Cette section a pour objectif de mentionner leurs existences et de citer quelques références.

4. Approche semi-graphique :

4.1. ***Reformulation de l'équation de Manning***

4.1.1. Equation de la Vitesse

L'utilisation de Manning pour calculer les caractéristiques hydrauliques mène à supposer que l'écoulement est uniforme, c'est à dire, la pente et la section transversale restent constantes, une section transversale ne diffère en rien des autres, et la vitesse reste constante tout le long d'un filet liquide (Carlier, 1980). L'équation de la vitesse selon Manning peut être écrite sous les formes suivantes (équation 3.11) :

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \, i^{1/2} \qquad (3.11)$$

Les équations (2.4) et (3.11) peuvent être exprimées en fonction d'un angle, soit θ , où, elle décrive le taux de remplissage dans la conduite.

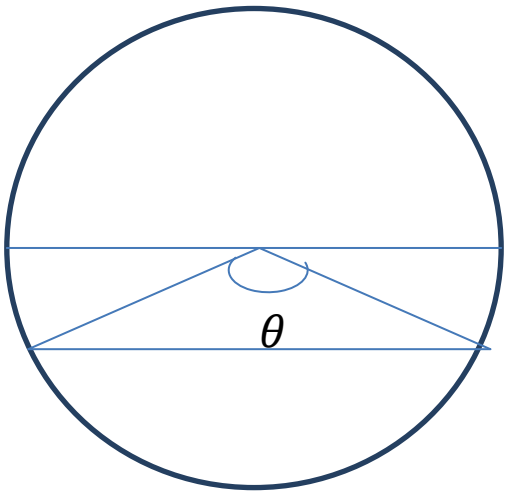


Figure 3.6: *Section d'écoulement partiellement remplie de rayon « r ».*

D'après la figure 3.6:

$$Q = \frac{1}{n}\left(\frac{r^8}{2^5}\right)^{1/3}\left[\frac{(\theta-\sin\theta)^5}{\theta^2}\right]^{1/3} i^{1/2} \quad (3.15)$$

$$V = \frac{1}{n}\left(\frac{r}{2}\right)^{2/3}\left[\frac{(\theta-\sin\theta)}{\theta}\right]^{2/3} i^{1/2} \quad (3.16)$$

Tel que :

r : le rayon de la conduite, soit : r = D/2, tel que D est son diamètre interne.

L'équation (3.15) et (3.16) pour les valeurs connues suivantes Q, n, i et D, ne peuvent être résolues qu'à partir des itérations longues (Saatçi, 1990), (Giroud et al, 2000).

Les graphes et les tableaux existants aident aussi à résoudre les équations suscitées, mais ils restent imprécis et limités.

4.1.1.1. Simplification de l'équation de vitesse :

L'équation (3.15) peut être réécrite sous la forme :

$$\left[\left(\frac{nQ}{i^{1/2}}\right)^3\left(\frac{2^5}{r^8}\right)\right] = \frac{(\theta-\sin\theta)^5}{\theta^2} \quad (3.17)$$

Soit :

$$K\theta^{2/5} = \theta - \sin\theta \quad (3.18)$$

Où :

$$K = \left[\left(\frac{nQ}{i^{1/2}}\right)^3 \left(\frac{2^5}{r^8}\right)\right]^{1/5}$$

L'équation (3.16) peut être réécrite sous la forme :

$$\left(\frac{nV}{i^{1/2}}\right)^{3/2} \left(\frac{2}{r}\right) = \frac{\theta - \sin\theta}{\theta} \tag{3.19}$$

Soit :

$$F\theta = \theta - \sin\theta \tag{3.20}$$

Où :

$$F = \left(\frac{nV}{i^{1/2}}\right)^{3/2} \left(\frac{2}{r}\right) \tag{3.21}$$

D'après l'équation (3.18) et (3.20), nous pourrions déduire ce qui suit :

$$K\theta^{2/5} = F\theta \Leftrightarrow K\theta^{-3/5} = F \tag{3.22}$$

Si en remplaçant "F" par sa valeur, on obtient :

$$V = \frac{1}{n}\left(\frac{r}{2}\right)^{2/3} K^{2/3}\theta^{-2/5} i^{1/2} \tag{3.23}$$

Maintenant, l'équation (3.16) est remplacée avec succès par une autre plus simple, qui est l'équation (3.23), elle peut être réécrite sous la forme :

$$V = a\theta^{-2/5} \tag{3.24}$$

Où :

$$a = \frac{1}{n}\left(\frac{r}{2}\right)^{2/3} K^{2/3} i^{1/2}$$

L'équation (3.24) est une équation à deux inconnues, ce qui rend la solution difficile, puisque pour des valeurs connues de Q, i, n et D, nous avons pratiquement une seule vitesse, en revanche, l'équation (3.24) admettra une infinité de solution. Afin de contourner ce passage, nous irons s'aider à un procédé graphique, pour minimiser le nombre des inconnues dans l'équation (3.24). D'après les travaux de Giroud et al, (2000) à partir de l'équation (3.18), nous pourrions tracer la figure 3.7 représentante de l'équation (3.25) :

$$K = f(\theta) \tag{3.25}$$

Tel que :

$$f(\theta) = \frac{\theta - \sin\theta}{\theta^{2/5}} \tag{3.26}$$

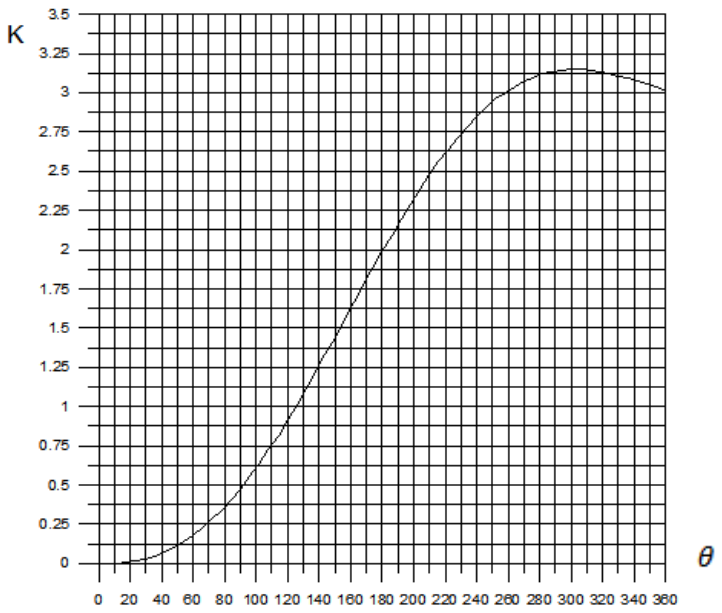


***Figure 3.7** : Détermination du paramètre K en fonction le taux de remplissage $f = (\theta)$.*

La 1ére lecture du graphe, conduit à conclure que la valeur maximale du paramètre K est entre 300 et 310, et d'après Giroud et al, (2000), la valeur maximale de θ est 302.41, en revanche, notre graphe après son digitalisation, on a trouvé que la valeur maximale de θ est 308.10

4.2. ***Epreuve Analytique***

4.2.1. Condition du débit max

La condition de débit pour une section circulaire de rayon "r" est :

$$3PdS - SdP = 0 \tag{3.27}$$

Où :

p : Le périmètre mouillé en m,

S : La section mouillée en m^2.

$$P = \theta r \Rightarrow dP = rd\theta \tag{3.28}$$

$$S = \frac{r^2}{2}(\theta - \sin\theta) \Rightarrow dS = \frac{r^2}{2}(1 - \cos\theta)d\theta \tag{3.29}$$

La combinaison entre les équations (3.28) et (3.29) donne ce qui suit :

$$2\theta - 3\theta\cos\theta + \sin\theta = 0 \tag{3.30}$$

L'équation (3.30) nécessite une méthode itérative pour y résoudre, la méthode dichotomie (André Fortin, 1995), nous a donné ce qui convient : l'équation (3.30) est vérifiée pour $\theta = 308.3236$, cette valeur a été obtenue pour un écart absolu égale à 10^{-15}. Si en comparant le résultat obtenu graphiquement et celui obtenu par la voie analytique, nous pourrions juger l'authenticité de nos résultats. Cette méthode a pour but de minimiser le recours à la lecture graphique et donner plus de chance à la voie numérique ce qui évidement augmente l'exactitude des résultats obtenus.

5. Conclusion :

Le calcul de la vitesse d'écoulement pour un écoulement à surface libre, plus exactement pour une conduite partiellement remplie ne peut pas être obtenu auparavant qu'à partir des méthodes laborieuses basées sur l'équation de Manning. Cette tâche est rendue plus simple avec une analyse et des simplifications de l'équation de la vitesse, terminée par l'obtention de l'équation (3.24). La méthode semi graphique proposée pour déterminer la vitesse et la hauteur normale, minimise l'erreur, et ce, via la possibilité de recourir au numérique, afin

d'obtenir l'exactitude. En s'épaulant par la figure 3.7, la valeur de la vitesse peut être obtenue aisément en vertu de l'équation (3.24) et (3.18) respectivement.

CE TRAVAIL A FAIT L'OBJET DES COMMUNICATIONS INTERNATIONALES :

1. **Zeghadnia Lotfi, Houichi Larbi, Djemili Lakhdar, Rezgui Nordine&Bachir Achour,** « *Calcul de la hauteur Normale dans une Conduite partiellement remplie* », Congre International sur l'eau, Déchets & environnement, 2eme édition, Union des pays de la méditerranée, 2009, El jadida, Maroc.

2. **Zeghadnia Lotfi, Djemili Lakhdar, Houichi Larbi, Rezgui Nordine,** « *Calcul de la vitesse dans une Conduite partiellement remplie* », 5th Conférence International, WATER RESOURCES IN MEDITERRANEAN BASIN » WATMED 5, Lille_ France 26-28, 2010.

3. **Zeghadnia Lotfi, Djemili Lakhdar, Houichi Larbi, Rezgui Nordine,** « *Méthode semi graphique pour l'estimation de la vitesse dans une conduite partiellement remplie* », Colloque International sur l'eau, CIEAU 2010, Annaba, Algérie.

ET D'UNE PUBLICATION INTERNATIONALE :

- **Zeghadnia Lotfi, Djemili Lakhdar, Houichi Larbi, Rezgui Nordine,.** 2009 : " *Détermination de la vitesse et de la hauteur Normale dans une conduite Partiellement remplie*". European Journal of Scientific Research, Vol 37, N°4, PP.561-566.

Chapitre IV : Rendement volumétrique et de circulation dans les conduites partiellement remplies

1. Introduction :

Le dimensionnement hydraulique a pour objectif de montrer l'aptitude de la canalisation à évacuer les quantités d'eaux prévisibles et rester partiellement remplie ; cette tâche très importante les chercheurs n'ont pas cessé d'y résoudre et de simplifier les modèles destinés pour répondre à ces fins. Classiquement les concepteurs des réseaux d'assainissement et lors du dimensionnement des réseaux d'assainissement se contentent d'un diamètre qui correspond à une vitesse d'écoulement acceptable (généralement comprise entre 0.6 m/s et 4m/s) sans pris en considération le taux de remplissage qui est un facteur primordiale pour définir le rendement volumétrique ou circulaire dans la conduite, paramètre indispensable pour bien exploiter une conduite en assainissement. En réalité, un rendement d'écoulement que ce soit volumétrique qui permet le passage du plus grand débit possible, qu'on appelle débit maximum, ou bien de circulation qui permet une vitesse de circulation dans la conduite d'être maximale. C'est deux notions sont impératives pour une conception rentable ; et elles nous conduisent à fonder la conception avec la prise en compte du rendement volumétrique ou de circulation. *Et selon notre recherche bibliographique aucun auteur n'a abordé ce sujet jusqu'à présent.* Dans ce chapitre nous allons développer une nouvelle approche basée sur l'exploitation maximale de la conduite, qui est simple est plus exacte, une approche purement analytique est basée sur le modèle de Manning (et ce pour les raisons citées dans l'introduction générale), et ce afin de combler ce manque dans la théorie.

2. Reformulation des équations :

En se basant sur l'équation de Manning et la figure (3.6), il est facile de déduire les équations des paramètres hydrauliques et géométriques à savoir : la surface mouillé, le rayon hydraulique, le périmètre mouillé. Les équations (3.15) et (3.16) peuvent être réécrites en fonction du diamètre et l'angle décrivant le taux de remplissage dans la conduite, et ce comme suit :

$$Q = \frac{1}{n}\left(\frac{D^8}{2^{13}}\right)^{1/3}\left[\frac{(\theta-\sin\theta)^5}{\theta^2}\right]^{1/3} i^{1/2} \qquad (4.31)$$

$$V = \frac{1}{n}\left(\frac{D}{4}\right)^{2/3}\left[\frac{(\theta-\sin\theta)}{\theta}\right]^{2/3} i^{1/2} \quad (4.32)$$

$$S_m = \frac{D^2}{8}\left(\theta - Sin(\theta)\right) \quad (4.33)$$

$$P_m = \theta\frac{D}{2} \quad (4.34)$$

$$R_h = \frac{S_m}{P_m} = \frac{D}{4}\left(1 - \frac{\sin(\theta)}{\theta}\right) \quad (4.35)$$

Les équations (4.31), (4.32) et pour les valeurs connues du débit Q, de la rugosité n, de la pente i et du diamètre D, ne peuvent être résolues qu'à partir des itérations longues (Giroud et al, 2000). L'équation (4.32) peut être remplacée avec une autre plus simple, soit l'équation (3.24) (Zeghadnia et al, 2009):

$$V = a\theta^{-2/5} \quad (3.24)$$

Avec :

$$a = \frac{1}{n}\left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} K^{2/3} i^{1/2}$$

$$K = \left[\left(\frac{nQ}{i^{1/2}}\right)^3 \left(\frac{2^{13}}{D^8}\right)\right]^{1/5}$$

Ou bien :

$$V = \left(\left(\frac{i^{1/2}}{n}\right)^3 \left(\frac{2Q}{D}\right)^2\right)^{1/5} \theta^{-2/5} \quad (4.36)$$

Les équations (4.33) et (4.35) prennent les nouvelles formes :

$$S_m = \left(\frac{D}{2}\right)^{2/5} \left(\frac{nQ}{i^{1/2}}\right)^{3/5} \theta^{2/5} \tag{4.37}$$

$$R_h = \left(\frac{2\,n\,Q}{D\,i^{1/2}}\right)^{3/5} \theta^{-3/5} \tag{4.38}$$

3. Estimation du rendement volumétrique et de circulation :

Fréquemment, le calcul du diamètre pour le réseau des eaux usées se fait par l'hypothèse que les conduites s'écoulent à pleine section (sous pression atmosphérique) dont le but est de simplifier la conception, et ce qui rend l'équation de Manning plus simple. Le graphe établi par Camp (1946), (SCS, 1986), (voir l'ANNEXE) pour des conduites circulaires montre que le débit a un maximum, ainsi que la vitesse, c'est-à-dire qu'au-delà de ces deux valeurs extrêmes le débit et la vitesse s'abaissent, autrement dit, le rendement volumétrique ou de circulation diminue. Alors, pour des conduites s'écoulant à plein rendement, la conception des conduites doit être effectuée avec le respect de ce critère « **le rendement d'écoulement** ». Pour estimer le rendement volumétrique d'une conduite, nous proposons la formule suivante :

$$\mathrm{Q_{ef}} = 100\% * \left(1 - \frac{\mathrm{Abs(Q_{max} - q_r)}}{\mathrm{Q_{max}}}\right) \tag{4.39}$$

Tel que;

Qef : Le rendement volumétrique (m^3/s);

Q_{max}: Le débit max (m^3/s);

q_r: Le débit écoulant (m^3/s).

Pour estimer le rendement de circulation nous proposons l'expression suivante :

$$\mathrm{V_{ef}} = 100\% * \left(1 - \frac{\mathrm{Abs(V_{max} - V_r)}}{\mathrm{V_{max}}}\right) \tag{4.40}$$

Où

Vef : Le rendement de Circulation (m^2/s);

V_{max}: La vitesse maximale d'écoulement (m^2/s);

V_r: La vitesse d'écoulement (m^2/s).

Nous proposons aussi une solution graphique pour estimer le rendement volumétrique et de circulation établie en fonction du taux de remplissage :

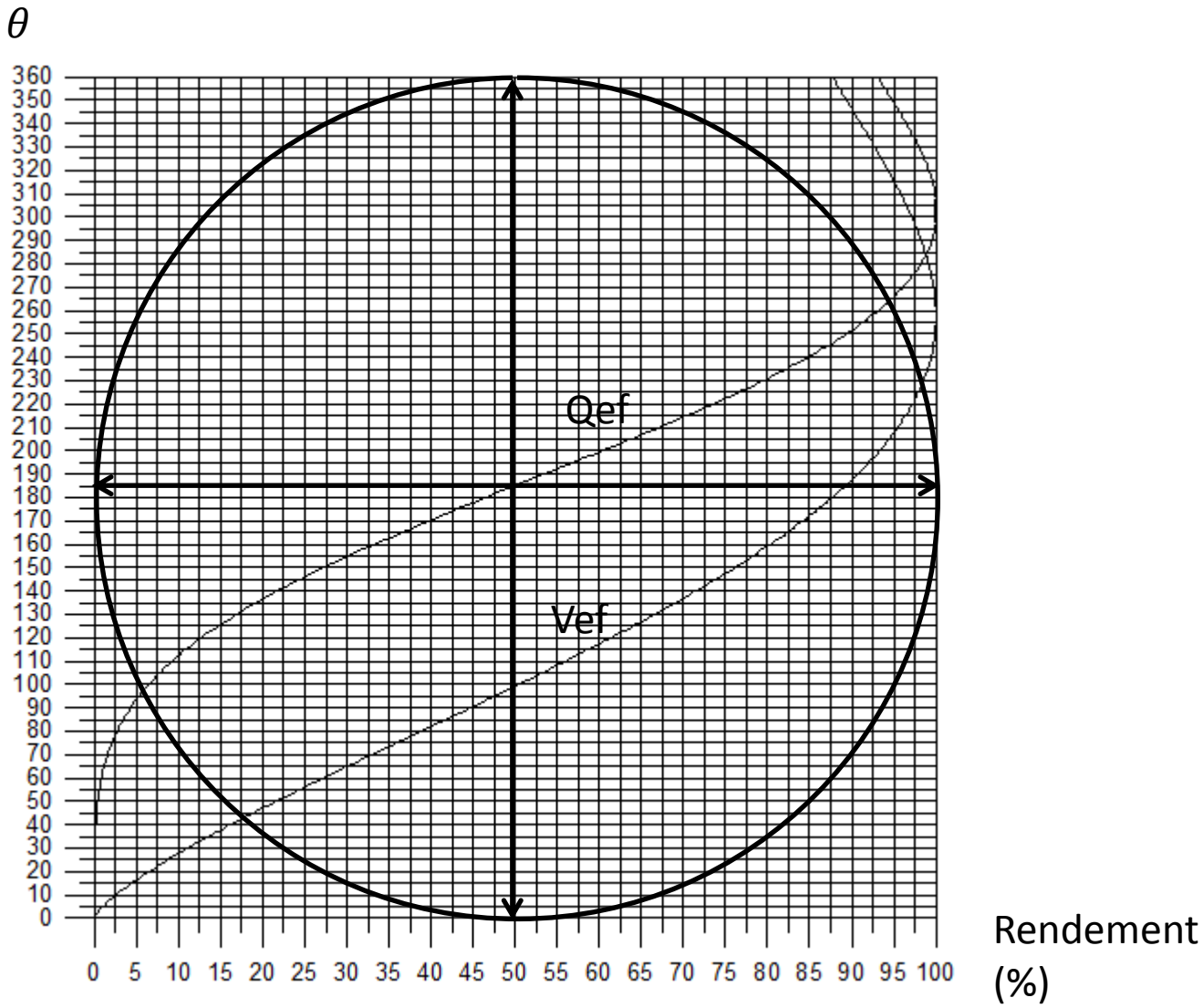


Figure 4.8: *Rendement volumétrique et de circulation dans une conduite circulaire.*

La figure 4.8 montre que le rendement volumétrique ou de circulation dépend du taux de remplissage de la conduite, et ne varie pas de la même façon, tel que, pour le rendement volumétrique et pour un remplissage $0° \leq \theta \leq 40°$ le rendement est pratiquement zéro, et pour $40° \leq \theta \leq 180°$ le rendement et au-dessous de 50%, alors le rendement est de 50% pour $\theta = 185°$. le rendement volumétrique est maximal pour $\theta = 308°$, où $Q_{ef} \cong 100\%$, pour $308° \leq \theta \leq 360°$ le rendement volumétrique diminue jusqu'à 93.09%.

En revanche, la variation du rendement de circulation est plus rapide, tel que pour : $0° \leq \theta \leq 40°$ le rendement est de 20% , et pour $40° \leq \theta \leq 180°$ le rendement peut atteindre 85%. Le rendement est maximum si $\theta = 257°$ tel que $V_{ef} \cong 100\%$. Pour $257° \leq \theta \leq 360°$ Le rendement de circulation diminue pour atteindre 87.74% pour pleine section. Et pour plus de détail, nous proposons le tableau suivant :

Table 4.1: *Rendement volumétrique et de circulation en fonction le taux de remplissage*

Taux de remplissage **θ**	Rendement volumétrique Qef(%)	Rendement de Circulation Vef (%)
0	0	0
1	0	0.1201868
2	0	0.3028452
3	0	0.519973
4	7.629395E-006	0.7630229
5	1.525879E-005	1.027328
6	4.577637E-005	1.30989
7	7.629395E-005	1.608574
8	0.0001525879	1.921755
9	0.0002441406	2.248156
10	0.0003890991	2.586734
11	0.0005874634	2.936631
12	0.0008544922	3.297108
13	0.001197815	3.667521
14	0.001655579	4.04731
15	0.002235413	4.43598
16	0.002944946	4.83309
17	0.003822327	5.238229
18	0.004898071	5.651039
19	0.00617981	6.071186
20	0.007720947	6.498361
21	0.009529114	6.932271

22	0.01164246	7.372653
23	0.01409912	7.819259
24	0.01692963	8.271855
25	0.02018738	8.730227
26	0.02388763	9.194154
27	0.02809906	9.663445
28	0.03285217	10.13792
29	0.03819275	10.61738
30	0.04416656	11.10167
31	0.05083466	11.59062
32	0.05823517	12.08407
33	0.06643677	12.58188
34	0.0754776	13.08388
35	0.08544159	13.58995
36	0.09635925	14.09994
37	0.1083069	14.61374
38	0.1213455	15.13119
39	0.1355286	15.65218
40	0.1509476	16.17659
41	0.1676407	16.7043
42	0.1856995	17.23518
43	0.2052002	17.76915
44	0.2261887	18.30606
45	0.248764	18.84584
46	0.2729874	19.38836
47	0.2989502	19.93353
48	0.3267136	20.48124
49	0.356369	21.03139
50	0.3879929	21.58389
51	0.4216843	22.13863
52	0.4574966	22.69554
53	0.4955368	23.2545

54	0.5358887	23.81544
55	0.5786362	24.37826
56	0.6238556	24.94287
57	0.6716537	25.50918
58	0.7221146	26.07712
59	0.7753372	26.64659
60	0.8313828	27.21751
61	0.8903809	27.7898
62	0.9524002	28.36338
63	1.017532	28.93816
64	1.085892	29.51408
65	1.157547	30.09104
66	1.232605	30.66896
67	1.311157	31.24778
68	1.393303	31.82742
69	1.479126	32.4078
70	1.568726	32.98884
71	1.662201	33.57048
72	1.759651	34.15264
73	1.861145	34.73524
74	1.966805	35.31822
75	2.076706	35.9015
76	2.190948	36.48502
77	2.309624	37.06871
78	2.432823	37.65249
79	2.560638	38.2363
80	2.693169	38.82006
81	2.830482	39.40372
82	2.972687	39.98721
83	3.119858	40.57046
84	3.272095	41.1534
85	3.429474	41.73597

86	3.592087	42.31811
87	3.760002	42.89975
88	3.933319	43.48082
89	4.112106	44.06127
90	4.296463	44.64105
91	4.486435	45.22007
92	4.682121	45.79828
93	4.883591	46.37562
94	5.090919	46.95204
95	5.304169	47.52747
96	5.523415	48.10184
97	5.748726	48.67512
98	5.980164	49.24723
99	6.217789	49.81812
100	6.46167	50.38773
101	6.711845	50.95601
102	6.968399	51.5229
103	7.231377	52.08834
104	7.500816	52.65229
105	7.776787	53.21468
106	8.059319	53.77545
107	8.348465	54.33457
108	8.644264	54.89197
109	8.946754	55.4476
110	9.255981	56.00142
111	9.57196	56.55336
112	9.894753	57.10338
113	10.22436	57.65143
114	10.56081	58.19745
115	10.90413	58.7414
116	11.25433	59.28323
117	11.61145	59.82289

118	11.97549	60.36033
119	12.34645	60.89551
120	12.72436	61.42837
121	13.10921	61.95888
122	13.50099	62.48697
123	13.89972	63.01262
124	14.30538	63.53577
125	14.71798	64.05637
126	15.13748	64.57439
127	15.56388	65.08979
128	15.99718	65.60251
129	16.43732	66.11252
130	16.88432	66.61977
131	17.3381	67.12421
132	17.79868	67.62583
133	18.26598	68.12456
134	18.74001	68.62037
135	19.22069	69.11322
136	19.70798	69.60307
137	20.20185	70.08988
138	20.70224	70.57362
139	21.2091	71.05424
140	21.72236	71.53172
141	22.24197	72.006
142	22.76785	72.47707
143	23.29996	72.94487
144	23.83822	73.40939
145	24.38253	73.87057
146	24.93285	74.32838
147	25.48907	74.78282
148	26.05114	75.23381
149	26.61893	75.68134

150	27.19239	76.12539
151	27.77141	76.56592
152	28.35589	77.00288
153	28.94574	77.43626
154	29.54086	77.86604
155	30.14114	78.29216
156	30.74647	78.71461
157	31.35675	79.13338
158	31.97186	79.5484
159	32.59169	79.95967
160	33.21611	80.36716
161	33.84502	80.77085
162	34.47827	81.1707
163	35.11576	81.5667
164	35.75735	81.95882
165	36.40291	82.34704
166	37.0523	82.73132
167	37.7054	83.11166
168	38.36206	83.48802
169	39.02215	83.8604
170	39.68552	84.22876
171	40.35204	84.59308
172	41.02153	84.95335
173	41.69389	85.30954
174	42.36894	85.66165
175	43.04654	86.00964
176	43.72652	86.35352
177	44.40876	86.69324
178	45.09307	87.02881
179	45.77931	87.3602
180	46.46733	87.68739
181	47.15694	88.01039

182	47.848	88.32915
183	48.54036	88.6437
184	49.23383	88.95399
185	49.92826	89.26003
186	50.62348	89.56179
187	51.31934	89.85928
188	52.01565	90.15246
189	52.71225	90.44135
190	53.409	90.72593
191	54.10568	91.00619
192	54.80216	91.28211
193	55.49826	91.5537
194	56.19381	91.82096
195	56.88864	92.08385
196	57.58258	92.34239
197	58.27547	92.59658
198	58.96713	92.84639
199	59.65739	93.09184
200	60.3461	93.33291
201	61.03307	93.5696
202	61.71813	93.8019
203	62.40114	94.02984
204	63.08191	94.25339
205	63.76027	94.47254
206	64.43607	94.68732
207	65.10915	94.89772
208	65.77933	95.10373
209	66.44646	95.30536
210	67.11037	95.50261
211	67.7709	95.69548
212	68.42789	95.88398
213	69.08121	96.06811

214	69.73067	96.24786
215	70.37611	96.42326
216	71.01742	96.59431
217	71.65442	96.76101
218	72.28696	96.92336
219	72.91489	97.08138
220	73.53808	97.23507
221	74.15636	97.38444
222	74.76962	97.5295
223	75.37771	97.67026
224	75.98048	97.80672
225	76.57779	97.9389
226	77.16953	98.06682
227	77.75556	98.19047
228	78.33575	98.30988
229	78.90996	98.42505
230	79.4781	98.536
231	80.04002	98.64275
232	80.5956	98.7453
233	81.14476	98.84368
234	81.68735	98.9379
235	82.22327	99.02796
236	82.75243	99.1139
237	83.27469	99.19573
238	83.78999	99.27346
239	84.2982	99.34711
240	84.79923	99.41671
241	85.29301	99.48226
242	85.77944	99.5438
243	86.25841	99.60133
244	86.72987	99.6549
245	87.19372	99.70449

246	87.64988	99.75016
247	88.0983	99.79191
248	88.53889	99.82977
249	88.97158	99.86375
250	89.39633	99.89391
251	89.81307	99.92023
252	90.22173	99.94276
253	90.62227	99.96152
254	91.01462	99.97654
255	91.39877	99.98783
256	91.77465	99.99545
257	92.14222	99.99939
258	92.50146	99.99969
259	92.85233	99.99638
260	93.19479	99.9895
261	93.52882	99.97906
262	93.85441	99.96511
263	94.17152	99.94766
264	94.48016	99.92675
265	94.7803	99.90241
266	95.07192	99.87467
267	95.35504	99.84357
268	95.62966	99.80912
269	95.89576	99.77138
270	96.15336	99.73035
271	96.40246	99.6861
272	96.64307	99.63865
273	96.87522	99.58802
274	97.09891	99.53426
275	97.31417	99.47741
276	97.52103	99.41749
277	97.71952	99.35455

278	97.90966	99.2886
279	98.0915	99.21971
280	98.26505	99.1479
281	98.43038	99.07321
282	98.58752	98.99567
283	98.73652	98.91534
284	98.87743	98.83224
285	99.01031	98.74641
286	99.13519	98.6579
287	99.25217	98.56673
288	99.36128	98.47296
289	99.4626	98.37662
290	99.55619	98.27775
291	99.64212	98.1764
292	99.72047	98.0726
293	99.79131	97.96639
294	99.85471	97.85783
295	99.91077	97.74696
296	99.95956	97.63379
297	99.99883	97.51839
298	99.96432	97.40081
299	99.93681	97.28107
300	99.91621	97.15924
301	99.90243	97.03533
302	99.89537	96.90942
303	99.89493	96.78153
304	99.90101	96.65172
305	99.9135	96.52001
306	99.9323	96.38647
307	99.95731	96.25114
308	99.98842	96.11406
309	99.97449	95.97528

310	99.93153	95.83485
311	99.88281	95.69279
312	99.82845	95.54919
313	99.76856	95.40406
314	99.70327	95.25746
315	99.63268	95.10944
316	99.55693	94.96004
317	99.47614	94.8093
318	99.39043	94.65729
319	99.29991	94.50404
320	99.20474	94.3496
321	99.10502	94.19402
322	99.00089	94.03735
323	98.89247	93.87963
324	98.7799	93.72092
325	98.66331	93.56125
326	98.54282	93.40068
327	98.41857	93.23927
328	98.2907	93.07703
329	98.15933	92.91405
330	98.0246	92.75035
331	97.88665	92.58599
332	97.74561	92.42103
333	97.60162	92.25549
334	97.4548	92.08943
335	97.3053	91.92291
336	97.15326	91.75597
337	96.99879	91.58865
338	96.84206	91.42101
339	96.68319	91.2531
340	96.52232	91.08495
341	96.35958	90.91663

342	96.1951	90.74816
343	96.02905	90.57962
344	95.86151	90.41103
345	95.69266	90.24245
346	95.52262	90.07394
347	95.35153	89.90553
348	95.17952	89.73726
349	95.00673	89.5692
350	94.83327	89.40137
351	94.65931	89.23384
352	94.48496	89.06665
353	94.31035	88.89984
354	94.13562	88.73346
355	93.96091	88.56755
356	93.78632	88.40216
357	93.61199	88.23734
358	93.43806	88.07314
359	93.26466	87.90957
360	93.0919	87.74671

Exemple:

Calculer le rendement volumétrique et de circulation pour une conduite dont les caractéristiques sont les suivants :

$V_r = 0.65 m/s$, q_r =0.202m3/s, in a 0.5m diametre, Qmax= 0.256m3/s, Qfull= 0.240m3/s Vfull=1.224m3/s, Vmax=1.30m3/s.

Solution :

En utilisant les équations (4.39) and (4.40), on trouve ce qui suit:

$$Q_{ef} = 100\% * \left(1 - \frac{Abs(Q_{max} - q_r)}{Q_{max}}\right)$$

$$Q_{ef} = 100\% * \left(1 - \frac{Abs(0.256-0.202)}{0.256}\right) = 78.90\%$$

Le rendement volumétrique est de 78.90%, la conduite n'est pas assez rentable volumétriquement.

$$V_{ef} = 100\% * \left(1 - \frac{Abs(V_{max} - V_r)}{V_{max}}\right)$$

$$V_{ef} = 100\% * \left(1 - \frac{Abs(1.30-0.65)}{1.30}\right) = 50\%$$

Le rendement de la circulation est de 50%, la circulation de l'eau est moins rentable. Dans l'exemple précèdent, malgré que la vitesse est acceptable techniquement, mais la conduite n'est assez rentable de point de vu rentabilité volumétrique et de circulation. De ce fait on est besoin de fonder une nouvelle conception basée sur la rentabilité volumétrique ou de circulation dans les conduites. Et pour le faire nous proposons la méthode avec les étapes suivantes:

4. Rendement volumétrique Maximal :

4.1. *Condition d'écoulement avec un débit max :*

Un écoulement à plein rendement volumétrique d'une conduite et celui qui correspond au passage d'un débit max Q_{max}, c'est-à-dire que la section mouillée varie ou croit d'une section S_m pour un débit Q à une section $S_{max.}$ Dans ce cas on dit que la conduite est pleinement exploitée volumétriquement. Lorsqu'il s'agit d'un écoulement avec un débit max, l'angle de remplissage $\theta = 308.3236$ (Zeghadnia et al, 2009). De l'équation (4.31) :

$$Q_{max} = 0.3349288 \frac{D^{8/3} i^{1/2}}{n} \tag{4.41}$$

L'écoulement peut aussi être à pleine section mais ne pas en charge et correspond à un débit $Q_{p,}$ Pour un écoulement effectué à pleine section (non en charge), le débit de la pleine section est :

$$Q_p = 0.3117909 \frac{D^{8/3} i^{1/2}}{n} \tag{4.42}$$

Si en injectant l'équation (4.42) dans l'équation (4.41), on obtient la relation entre Q_{max} et Q_p :

$$Q_{max} = 1.0742096 Q_p \tag{4.43}$$

Autrement dit, Si un écoulement dans une section quelconque effectué avec un débit max, il doit impérativement vérifier la condition suivante (Carlier, 1980):

$$3\mathrm{PdS} - \mathrm{SdP} = 0 \tag{4.44}$$

Pour décrire l'écoulement dans une conduite possédant une géométrie circulaire, et partiellement pleine, soit :

$$\mathrm{P_m} = \theta \mathrm{r} \Rightarrow \mathrm{dP} = \mathrm{rd}\theta \tag{4.45}$$

$$\mathrm{S_m} = \frac{\mathrm{r}^2}{2}(\theta - \sin\theta) \Rightarrow \mathrm{dS} = \frac{\mathrm{r}^2}{2}(1 - \cos\theta)\mathrm{d}\theta \tag{4.46}$$

Remplaçant le périmètre, la section mouillée et leurs dérivés dans l'équation (4.44) on obtient ce qui suit :

$$3\frac{dS_m}{S_m} = \frac{dP_m}{p_m} \Rightarrow {S_m}^3 = P_m \tag{4.47}$$

L'équation (2.4) et après l'injection de l'équation (4.35) et (4.47) devient :

$$Q = \frac{i^{1/2}}{n}\frac{{S_m}^{5/3}}{{P_m}^{2/3}} = \frac{i^{1/2}}{n}{p_m}^{-1/9} \tag{4.48}$$

De l'équation (4.48), le périmètre mouillé peut être évalué comme suit :

$$P_m = \left(\frac{i^{1/2}}{nQ}\right)^9 \tag{4.49}$$

Au regard de l'équation (4.34) et (4.49), nous pouvons déduire que :

$$D = \frac{2}{\theta_{Qmax}} \left(\frac{i^{1/2}}{nQ}\right)^9 \tag{4.50}$$

Qui peut être encore simplifiée sous la forme :

$$D = 0.372 \left(\frac{i^{1/2}}{nQ}\right)^9 \tag{4.51}$$

La formule (4.49) assure un calcul explicite du diamètre ainsi qu'un dégagement maximal du débit, et ce pour un débit Q, une rugosité n, et une pente i connus. Un autre cas et susceptible d'être envisagé, il s'agit du calcul de la pente i, cette tâche est possible lorsque : le débit Q, la rugosité n, et le diamètre D sont des donnés ; et ce, selon l'équation (4.50) :

$$i = \left(n\, Q \left(\frac{D}{0.372}\right)^{1/9}\right)^2 \tag{4.50}$$

4.2. ***Equation de la vitesse et les limites recommandées :***

La combinaison entre l'équation (2.11), (4.35) et (4.47) donne ce qui suit :

$$V = \frac{i^{1/2}}{n} P^{-4/9} \tag{51}$$

En remplaçant le périmètre mouillé de l'équation (4.51) par sa valeur dans l'équation (4.49) on obtient :

$$V = \frac{i^{1/2}}{n} \left(\left(\frac{i^{1/2}}{nQ}\right)^9\right)^{-4/9} = \frac{n}{i^{1/2}} Q^4 \tag{4.52}$$

Si en combinant entre l'équation (4.51) et l'équation (4.52) on obtient :

$$V = \left(\frac{0.372}{D}\right)^{4/9} \tag{4.53}$$

L'équation (4.51) est valable seulement pour la gamme que montre le tableau 4.1, qui est validé pour un intervalle de variation de vitesse suivant (Marc et al, 2006) : $0.5m/s \leq V \leq 5m/s$.

Tableau 4.2. *Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n}(min) = 0.4$, *et* $10mm \leq D \leq 250mm$.

D (mm)	Q (m3/s)	V(Q) m/s	V(D) m/s
10	0,60	2,00	2,00
12	0,59	1,84	1,84
16	0,57	1,62	1,62
20	0,55	1,47	1,47
25	0,54	1,33	1,33
32	0,53	1,19	1,19
40	0,51	1,08	1,08
50	0,50	0,98	0,98
63	0,49	0,88	0,88
75	0,48	0,81	0,82
90	0,47	0,75	0,75
100	0,46	0,72	0,72
110	0,46	0,69	0,69
125	0,45	0,65	0,65
140	0,45	0,62	0,62
160	0,44	0,58	0,58
200	0,43	0,53	0,53
225	0,42	0,50	0,50
250	0,42	0,50	0,50

Tableau 4.3. *Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n}(max) = 1$ *; et* $10mm \leq D \leq 250mm$.

D (mm)	Q (m3/s)	V(Q) m/s	V(D) m/s
10	1,49	4,99	4,99
12	1,46	4,60	4,60
16	1,42	4,05	4,05
20	1,38	3,67	3,67
25	1,35	3,32	3,32
32	1,31	2,97	2,98
40	1,28	2,69	2,69
50	1,25	2,44	2,44
63	1,22	2,20	2,20
75	1,19	2,04	2,04
90	1,17	1,88	1,88
100	1,16	1,79	1,79
110	1,14	1,72	1,72
125	1,13	1,62	1,62
140	1,11	1,54	1,54
160	1,10	1,45	1,45
200	1,07	1,32	1,32
225	1,06	1,25	1,25
250	1,05	1,19	1,19

Les deux tableaux 4.2 et 4.3 sont destinés pour illustrer l'amplitude des équations (4.52) et (4.53), le rapport de la pente sur la rugosité influe considérablement sur la gamme de variation du diamètre et du débit sous l'instruction de ne pas excéder l'intervalle de la vitesse proposée au début. Pour des diamètres qui varient entre : $10mm \leq D \leq 250mm$, la valeur minimale du rapport de la racine carrée de la pente et la rugosité qui ne doit pas être inférieur à 0.4, ce qui donne en conséquence une variation du débit :

$$0.42\,{}^{m^3}/_{s} \leq Q \leq 0.6\,{}^{m^3}/_{s} \qquad (4.54)$$

Le même intervalle de variation du diamètre accepte une valeur maximale du rapport, soit : $\frac{i^{1/2}}{n} = 1$. Cette valeur maximale fait induire une variation du débit :

$$1.05\,{}^{m^3}/_{s} \leq Q \leq 1.49\,{}^{m^3}/_{s}.$$

Si on fait élargir la gamme de variation du diamètre, soit : $315mm \leq D \leq 2100mm$, tout en préservant la condition de vitesse d'écoulement suscitée, on obtient ce qui suit :

Tableau 4.4. *Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n} = 1.05(min)$*, et* $315mm \leq D \leq 2100mm$.

D (mm)	Q (m3/s)	V(Q) m/s	V(D) m/s
315	1,07	1,13	1,13
400	1,04	1,02	1,02
500	1,02	0,92	0,92
600	1,00	0,85	0,85
700	0,98	0,79	0,79
800	0,96	0,75	0,75
900	0,95	0,71	0,71
1000	0,94	0,68	0,68
1100	0,93	0,65	0,65
1200	0,92	0,62	0,62
1300	0,91	0,60	0,60
1400	0,91	0,58	0,58
1500	0,90	0,56	0,57
1600	0,89	0,55	0,55
1700	0,89	0,53	0,53
1800	0,88	0,52	0,52
1900	0,88	0,51	0,51
2000	0,87	0,50	0,50
2100	0,87	0,50	0,50

Tableau 4.5. *Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits*

Pour : $\frac{i^{1/2}}{n}(\max) = 4.64$, et $315mm \leq D \leq 2100mm$.

D (mm)	Q (m3/s)	V(Q) m/s	V(D) m/s
315	4,73	5,00	5,00
400	4,60	4,49	4,49
500	4,49	4,07	4,07
600	4,40	3,75	3,75
700	4,33	3,50	3,50
800	4,26	3,30	3,30
900	4,21	3,13	3,13
1000	4,16	2,99	2,99
1100	4,11	2,87	2,87
1200	4,07	2,76	2,76
1300	4,04	2,66	2,66
1400	4,00	2,57	2,57
1500	3,97	2,50	2,50
1600	3,95	2,43	2,43
1700	3,92	2,36	2,36
1800	3,89	2,30	2,30
1900	3,87	2,25	2,25
2000	3,85	2,20	2,20
2100	3,83	2,15	2,15

Il est clair que les tableaux 4.4 et 4.5 montrent une variation des valeurs du débit suivant la variation du diamètre, et cela sous l'influence de la variation du rapport de la racine carrée de la pente et la rugosité. Nous pouvons résumer la variation comme suit :

Pour une valeur minimale du rapport $\frac{i^{1/2}}{n} = 1.05$, et selon le tableau 4.4, le débit varie comme suit :

$$0.87\, {}^{m^3}/_{s} \leq Q \leq 1.07\, {}^{m^3}/_{s} \qquad (4.55)$$

Si maintenant le rapport atteint son maximum $\frac{i^{1/2}}{n} = 4.64$, le tableau 4.5 montre que le débit varie aussi comme suit :

$$3.83\,{}^{m^3}/_{s} \leq Q \leq 4.73\,{}^{m^3}/_{s} \tag{4.56}$$

Pour les autres valeurs du débit et qui ne figurent pas sur les tableaux, peuvent être apparus si la valeur du rapport se change, et pour qu'on puisse obtenir des valeurs acceptables des vitesses on doit seulement respecter les bornes de variation du quotient.

5. Ecoulement avec rendement maximal de circulation :

5.1. *Condition d'écoulement avec une vitesse moyenne maximale :*

L'écoulement des eaux par une vitesse max, est un critère très important quand il s'agit d'une évacuation des eaux usées. Pour un écoulement à une vitesse moyenne maximale, il est impératif de vérifier la condition suivante :

$$\mathrm{PdS} - \mathrm{SdP} = 0 \tag{4.57}$$

Où :

P : Le périmètre mouillé en m,

S : La section mouillée en m^2.

La combinaison entre les équations (4.45), (4.46) et (4.57) donne ce qui suit :

$$-\theta\cos\theta + \sin\theta = 0 \tag{4.58}$$

L'équation (4.58) nécessite une méthode itérative pour sa résolution, la méthode dichotomie (André, 1995), nous a donné ce qui convient : l'équation (58) est vérifiée pour $\theta = 257{,}584°$, cette valeur a été obtenue pour un écart absolu égal à 10^{-6}. L'équation (4.57) peut être réécrite comme suit :

$$PdS = SdP \tag{59}$$

$$\frac{dS}{S} = \frac{dP}{P} \tag{4.60}$$

D'après l'équation (4.34), (4.37) et (4.60) et tout calcul fait, on peut obtenir après plusieurs simplifications la formule suivante :

$$D = \frac{0.445\, n\, Q}{i^{1/2}} \tag{4.61}$$

L'équation (4.37) devient :

$$S_m = \frac{n\, Q}{i^{1/2}} \tag{4.62}$$

Le calcul du diamètre est directe selon l'équation (61) pour un débit Q, une rugosité n, et une pente i connus. La pente peut être aussi déterminé en cas où : le débit Q, la rugosité n et le diamètre D sont connus, et ce par le biais de l'équation (4.63) :

$$i = \left(\frac{2\, n\, Q}{4.49\, D}\right)^2 \tag{4.63}$$

Tenant compte de l'équation (4.62) nous pouvons déduire que la vitesse est égale au rapport de la racine carré de la pente et de la rugosité de la conduite de la manière suivante :

$$V = \frac{i^{1/2}}{n} = \frac{0.445Q}{D} \tag{4.64}$$

La première lecture montre que l'équation de la vitesse (4.64) dépend uniquement de la pente et de la rugosité, et c'est vrai comme déduction initiale, mais en réalité, l'expression est conditionnée par un taux de remplissage qui favorise impérativement l'équation (4.61) ; donc l'équation (4.64) représente une forme dérivée d'une succession des conditions vérifiées au préalable, autrement dit l'équation (4.64) est vérifiée si et uniquement si l'équation (4.61) est vérifiée.

5.2. ***Les limites recommandées :***

Le modèle proposé pour un écoulement avec une vitesse d'écoulement maximale ou par un taux de remplissage correspondant à la dite vitesse, est gouverné par une limite de la vitesse d'écoulement elle-même, ce qui résulte par la suite d'une succession de limite des valeurs : du débit, de la pente et de la rugosité pour une gamme de variation du diamètre montrée dans les tableaux 4.6 et 4.7.

Tableau 4.6. *Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n} = 0.5$*(min), et* $10mm \leq D \leq 2100mm$.

D (mm)	Q (m3/s)	V (m/s)	D (mm)	Q (m3/s)	V (m/s)
10	**0,01**	0,50	315	**0,35**	0,50
12	**0,01**	0,50	400	**0,45**	0,50
16	**0,02**	0,50	500	**0,56**	0,50
20	**0,02**	0,50	600	**0,67**	0,50
25	**0,03**	0,50	700	**0,79**	0,50
32	**0,04**	0,50	800	**0,90**	0,50
40	**0,04**	0,50	900	**1,01**	0,50
50	**0,06**	0,50	1000	**1,12**	0,50
63	**0,07**	0,50	1100	**1,24**	0,50
75	**0,08**	0,50	1200	**1,35**	0,50
90	**0,10**	0,50	1300	**1,46**	0,50
100	**0,11**	0,50	1400	**1,57**	0,50
110	**0,12**	0,50	1500	**1,69**	0,50
125	**0,14**	0,50	1600	**1,80**	0,50
140	**0,16**	0,50	1700	**1,91**	0,50
160	**0,18**	0,50	1800	**2,02**	0,50
200	**0,22**	0,50	1900	**2,13**	0,50
225	**0,25**	0,50	2000	**2,25**	0,50
250	**0,28**	0,50	2100	**2,36**	0,50

Tableau 4.7. *Les limites des vitesses recommandées en fonction des diamètres et des débits Pour :* $\frac{i^{1/2}}{n} = 5$ *(max); et* $10mm \leq D \leq 2100mm$.

D (mm)	Q (m3/s)	V (m/s)	D (mm)	Q (m3/s)	V (m/s)
10	**0,11**	5,00	315	**3,54**	5,00
12	**0,13**	5,00	400	**4,49**	5,00
16	**0,18**	5,00	500	**5,62**	5,00
20	**0,22**	5,00	600	**6,74**	5,00
25	**0,28**	5,00	700	**7,87**	5,00
32	**0,36**	5,00	800	**8,99**	5,00
40	**0,45**	5,00	900	**10,11**	5,00
50	**0,56**	5,00	1000	**11,24**	5,00
63	**0,71**	5,00	1100	**12,36**	5,00
75	**0,84**	5,00	1200	**13,48**	5,00
90	**1,01**	5,00	1300	**14,61**	5,00
100	**1,12**	5,00	1400	**15,73**	5,00
110	**1,24**	5,00	1500	**16,85**	5,00
125	**1,40**	5,00	1600	**17,98**	5,00
140	**1,57**	5,00	1700	**19,10**	5,00
160	**1,80**	5,00	1800	**20,22**	5,00
200	**2,25**	5,00	1900	**21,35**	5,00
225	**2,53**	5,00	2000	**22,47**	5,00
250	**2,81**	5,00	2100	**23,60**	5,00

Considérant des valeurs obtenues et mentionnées sur les tableaux 4.6 et 4.7, nous pourrions conclure que le rapport, de la racine carrée de la pente et de la rugosité, joue un rôle très important aussi bien sur l'élargissement du domaine de validité que sur sa restriction, et en premier lieu les valeurs du débit, autrement dit, les équations du modèle d'évacuation avec

un taux de remplissage correspond à une vitesse max et pour une valeur minimale du rapport $\frac{i^{1/2}}{n} = 0.5$, et $10mm \leq D \leq 2100mm$ le débit varie comme suit :

$$0.01\,{}^{m^3}/_{s} \leq Q \leq 2.36\,{}^{m^3}/_{s} \qquad (4.65)$$

Et pour $\frac{i^{1/2}}{n} = 5$ et $10mm \leq D \geq 2100mm$ le débit varie comme suit :

$$0.11\,{}^{m^3}/_{S} \leq Q \leq 23.60\,{}^{m^3}/_{S} \tag{4.66}$$

Pour les deux variantes d'écoulement, soit avec un taux de remplissage correspond à un débit max, ou bien avec taux de remplissage correspond à une vitesse max, le respect de la gamme de variation du rapport de la racine carré de la pente et de la rugosité, conduit à obtenir une vitesse acceptable d'écoulement, et pas forcément au débit d'écoulement voulu (le cas d'un débit connu), car chaque valeur du rapport en question génère une gamme de variation du débit, et pour mettre plus d'information, il faut que le débit appartient à l'intervalle suivant :

a) Cas d'écoulement avec débit max :

$$Q_{D=250mm} \leq Qconnus \leq Q_{D=10mm} \tag{4.67}$$

Ou bien :

$$Q_{D=2100mm} \leq Qconnus \leq Q_{D=315mm} \tag{4.68}$$

b) Cas d'écoulement avec vitesse max :

$$Q_{D=10mm} \leq Qconnus \leq Q_{D=2100mm} \tag{4.69}$$

Exemple 01 :

1) Cas d'écoulement avec un débit max :

Soit une conduite circulaire, dont le coefficient de Manning $n = 0.013$, la pente $= 0.02\%$, transportant un débit égale à $1.05\ m^3/s$. Calculer le diamètre D pour un taux de remplissage correspondant à θ_{Qmax}.

Solution :

1) D'abord on doit vérifier si le rapport de la racine carré de la pente sur la rugosité est respecté ou non, pour appliquer le modèle :

$$1.05 \leq \frac{i^{1/2}}{n} = 1.08 \leq 4.64$$

Le rapport appartient à la fourchette admissible, d'après les tableaux 4.3 et 4.4 on peut conclure que le diamètre appartient à l'intervalle :

$$315mm \leq D \leq 2100mm$$

2) vérification du débit :

De l'équation (4.51) on peut calculer $Q_{D=315mm}$ et $Q_{D=2100mm}$

$$Q_{D=315mm} = \left(\frac{0.372}{D}\right)^{1/9} \frac{i^{1/2}}{n} = 1.10\, m^3/s$$

$$Q_{D=2100mm} = \left(\frac{0.372}{D}\right)^{1/9} \frac{i^{1/2}}{n} = 0.89\, m^3/s$$

$$0.89\, {}^{m^3}/_{S} \leq Q = 1.05 \leq 1.10\, {}^{m^3}/_{S}.$$

L'appartenance du débit au domaine de validité est vérifiée.

2) De l'équation (4.51) le diamètre peut être calculé comme suit :

$$D = 0.372\left(\frac{i^{1/2}}{nQ}\right)^{9} \cong 500mm$$

4) Vérification de la vitesse :

En se Basant sur l'équation (4.53), on obtient : $V = 0.95\ m/s$.

Cette vitesse est une vitesse acceptable. Le diamètre est un diamètre convenable et assure en collaboration avec les autres paramètres un dégagement avec un débit max correspondant à un taux de remplissage égale à θ_{Qmax}.

Exemple 02 :

3) Cas d'une évacuation à une vitesse max :

Utilisons les mêmes données, mais cette fois ci pour trouver le diamètre convenable qui assurera un dégagement avec vitesse max.

Solution :

1) Vérification du rapport (racine carré pente sur la rugosité) ;

$$0.5 \leq \frac{i^{1/2}}{n} = 1.08 \leq 5$$

On peut conclure que le diamètre appartient à l'intervalle :

$$10mm \leq D \leq 2100mm$$

2) Vérification du débit :

De l'équation (4.61) on peut calculer $Q_{D=10mm}$ et $Q_{D=2100mm}$:

$$Q_{D=10mm} = \left(\frac{D}{0.445}\right)^{8/3} \frac{i^{1/2}}{n} = 0.02\, m^3/s$$

$$Q_{D=2100mm} = \left(\frac{D}{0.445}\right)^{8/3} \frac{i^{1/2}}{n} = 5.10\, m^3/s$$

$$0.02\, {}^{m^3}/_{s} \leq Q = 1.05 \leq 5.10\, {}^{m^3}/_{s}.$$

L'appartenance du débit au domaine de validité est vérifiée.

3) Calcul du diamètre :

Selon l'équation (4.61) le diamètre D égale à :

$$D = \frac{0.445\, n\, Q}{i^{1/2}} \cong 400mm$$

Dès que le diamètre convenable est connu, la vitesse ne dépend donc que de la pente i et de la rugosité n, l'équation (4.64) donne ce qui suit :

$$V = \frac{i^{1/2}}{n} = 1.08\, m/s$$

La vitesse est alors acceptable.

6. Conclusion :

Une nouvelle conception pour l'écoulement dans des conduites partiellement remplies a été proposée dans ce chapitre. Cette proposition est basée sur l'efficacité volumétrique et circulaire de l'effluent. Une efficacité d'écoulement se traduit par un écoulement avec volume maximum ou bien par une vitesse maximale ; ces deux conditions permettent l'évaluation du rendement de l'écoulement dans les conduites circulaires comme il est montré dans la figure 4.8. La méthode proposée au-dessus sert à trouver les caractéristiques adéquates pour bien exploiter les conduites via l'exploitation maximale de l'aire d'écoulement. Dès maintenant le rendement d'une conduite est devenu mesurable.

CE TRAVAIL A FAIT L'OBJET D'UNE COMMUNICATION INTERNATIONALE :

Zeghadnia Lotfi, Djemili Lakhdar, Houichi Larbi, Rezgui Nordine, "*Dimensionnement conditionné par dégagement rapide du débit dans des conduite partiellement remplies*", Colloque International sur l'eau, CIEAU 2010, Annaba, Algérie.

ET D'UNE PUBLICATION INTERNATIONALE :

- *Déjà soumissionné dans une revue reconnue.*

Chapitre V : Nouvelle approche pour le calcul des caractéristiques du réseau d'assainissement (RA) en fonction d'une conduite de référence(CR)

1. Introduction :

L'évacuation des eaux usées s'effectue généralement dans des conduites écoulant à surface libre, dans ce cas l'écoulement est considéré uniforme est permanent et ce pour faciliter sa conception. Les deux hypothèses d'uniformité et de la permanence tolèrent l'utilisation de l'équation de Manning qui est déjà discutée par plusieurs auteurs à savoir : (Chow,1959), (Henderson 1966), (Metcalf & Eddy, 1981), (Carlier, 1985) ,(Hager ,2010)...etc. La forme circulaire est la plus utilisée dans la conception des réseaux d'assainissement. Lors de la conception, les conduites peuvent s'arrangées en séries ou en parallèles, en plus elles peuvent s'écoulées à section pleine (mais à surface libre) ou être partiellement remplies. Pour le premier, l'équation de Manning est plus facile (Hager, 2010), en revanche le deuxième cas est le plus fréquent, et l'équation de Manning devient plus difficile, et nécessite des méthodes itératives laborieuses et un calcul lourd. Plusieurs auteurs ont essayé de trouver une solution explicite pour contourner ce problème et ce par l'explicitation du calcul de la hauteur normale en utilisant l'équation de Manning ou bien l'équation de Colebroock-White à savoir : Barr and Das, 1986), (wheeler, 1992), (Esen, 1993), (Swamee et al, 2004), (Achour et Bdjaoui, 2006). D'autres auteurs (Saâtçi, 1990), (Giroud et al, 2000), (Akgiray, 2004 et 2005) ont essayé de proposer une solution explicite pour le calcul de la vitesse et le taux de remplissage.

Dans ce chapitre nous allons développer une nouvelle approche plus simples est plus exacte, une approche purement analytique et basée sur le modèle de Manning (et ce pour les raisons citées dans l'introduction générale).

2. Cas des conduites en séries :

2.1. *La Vitesse d'écoulement :*

Les bassins versant peuvent être arrangés en séries comme ci- montré dans la figure 5.9 ou en parallèles, et par conséquence les conduites d'évacuation des eaux usées sont arrangées aussi en série. On appelle deux bassins versants des bassins arrangés en série si le Outlet du premier bassin est le inlet du deuxième.

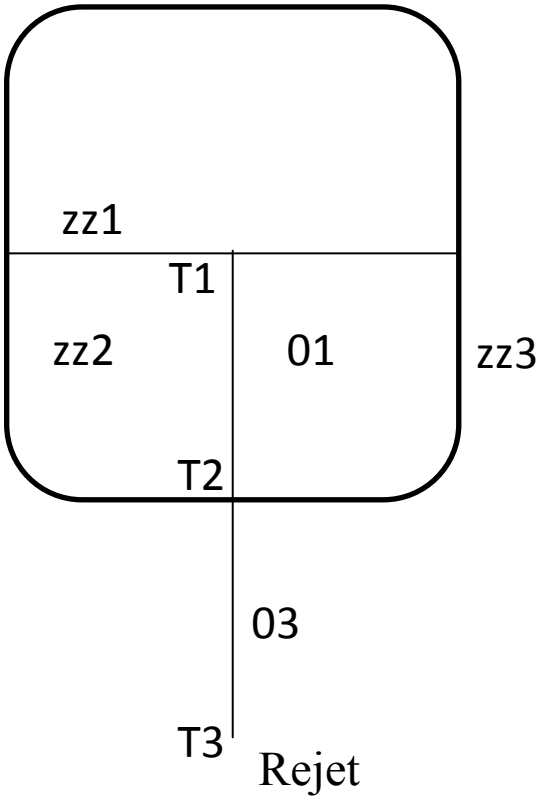


Figure 5.9 *: Deux Bassin versant et deux conduites arrangées en séries.*

Tel que Les conduites:

T1-T2: collecte les eaux usées du sous bassin ZZ1 (elle prend le numéro 1)

T2-T3: collecte les eaux usées du bassin équivalent ZZ3 (elle prend le numéro 3), tel que :

$$ZZ_{3=}\ ZZ_2 + ZZ_1 \tag{5.70}$$

Les débits peuvent être évalués avec une méthode agrée comme les méthodes : SCS, la méthode rationnelle (Viessman et Lewis 2003). L'écoulement dans les conduites est toujours considéré uniforme et permanant, ce qui signifie que les caractéristiques d'écoulement sont constants durant l'écoulement et dans l'espace. (Pour la longueur du tronçon considéré).

Considérant que la conduite T1-T2 est la conduite de référence, où le diamètre D1, le rayon hydraulique Rh1, l'angle de remplissage θ1, la section d'écoulement A1, la pente i1 sont des données.

La pente i3, et le coefficient de Manning n3, sont aussi considérés comme des données pour la conduite T2-T3.

Le débit Q1 transporté dans la conduite T1-T2 est produit dans le sous bassin ZZ1, pour le débit Q2 produit dans le sous bassin ZZ2. Le débit Q3 transporté par la conduite T2-T3est produite par la surface équivalente du bassin versant total ZZ3.

A partir de la figure 5.9, il est aisé de conclure ce qui suit :

$$Q_3 > \mathrm{Q}_1 \tag{5.71}$$

Tel que:

$$Q_3 = A_3 V_3 \tag{5.72}$$

$$Q_1 = A_1 V_1 \tag{5.73}$$

Le rapport Rq31 du Q3 et Q1 est donné par l'équation suivante:

$$Rq_{31} = \frac{Q_3}{Q_1} \tag{5.74}$$

De l'équation (5.71) et pour un écoulement à pleine section (sous pression atmosphérique) on obtient ce qui suit :

$$A_3 = aA_1 \tag{5.75}$$

Ce qui donne:

$$D_3^2 = aD_1^2 \tag{5.76}$$

L'équation de Manning pour un écoulement à pleine section s'écrit comme suit :

$$V_3 = \frac{s_3^{0.5}}{n_3}\left(\frac{D_3}{4}\right)^{2/3} \tag{5.77}$$

Si on remplace l'équation (5.76) par sa valeur dans l'équation (5.73), et au regard des équations (5.72), (5.73), (5.74) et (5.75) on obtient ce qui suit :

$$V_3 = (\mathrm{rQ}_{31}\mathrm{V}_1)^{1/4}\left(\frac{\mathrm{S}_3^{0.5}}{\mathrm{n}_3}\right)^{3/4}\left(\frac{\mathrm{D}_1}{4}\right)^{1/2} \tag{5.78}$$

L'équation (5.78) exprime la valeur de la vitesse d'écoulement dans la conduite T2-T3 pour le cas d'une conduite pleine à surface libre en fonction des caractéristiques de la conduite de

référence (conduite N°01). Pour le cas des conduites écoulent avec un remplissage partiel, et au regard de l'équation (5.36), l'équation (5.78) devienne :

$$V_3 = \left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)^{1/4} \left(\frac{S_3^{0.5}}{n_3}\right)^{3/4} \left(\frac{n_1}{S_1^{0.5}}\right)^{3/20} \left(\frac{2Q_1}{D_1\theta_1}\right)^{2/5} \quad (5.79)$$

L'équation (5.79) est la meilleure formule jusqu'à présent pour exprimer la vitesse dans une conduite partiellement pleine avec un écart relatif égale à zéro en y comparant avec l'équation (4.32) comme s'est montré dans le tableau 5.8.

2.2. ***Teste d'exactitude :***

D'après le tableau 5.8, la déviation maximale que produit l'équation (5.79) par rapport à l'équation (4.32) est de $1.12810^{-5}\ \% \cong 0$. Une approximation a été proposée par Saatçi (1990) pour résoudre ce problème en utilisant la formule suivante :

$$\theta_{Saatçi} = \frac{3\pi}{2}\sqrt{1-\sqrt{1-\sqrt{\frac{\pi Qn}{D^{8/3}S^{0.5}}}}} \quad (5.80)$$

Selon Saatçi (1990), la vitesse d'écoulement peut être obtenue après la substitution $\theta_{Saatçi}$ donnée par l'équation (5.80) dans l'équation (4.32). L'équation (5.80) est uniquement valable pour $0° \leq \theta \leq 265°$. Giroud (Giroud et al, 2000) proposa une autre approximation plus précise que celle de Saatçi, tel qu'il propose d'utiliser la formule suivante :

$$V = 0.7591\left(1-\frac{Qn}{2D^{8/3}S^{0.5}}\right)\left(\frac{Q^4S^{9/2}}{D^2n^9}\right)^{1/13} \quad (5.81)$$

Selon l'auteur, la formule (5.81) produit un écart relatif inférieur à 3% pour $0° \leq \theta \leq 302.41°$ (Akgiray,2000), proposa aussi un autre modèle pour améliorer les résultats précédents, le modèle consiste à proposer une relation explicite pour le calcul du taux de remplissage pour θ entre 0 et 301.41°. La relation proposée est donnée pour quatre (04) types possibles de problèmes :

1. Donner Q, D, et S, Trouver h/D and (ou bien) V ;
2. Donner Q, D et V, trouver h/D et (ou bien) S ;
3. donner V, D et S, trouver h/D et (ou bien) Q ;
4. Donner Q, V et S, trouver h/D et (ou bien) D ;

Les quatre types de problèmes probables classifiés par Akgiray sont étudiés pour deux cas, quand le coefficient de Manning « n » est constant, et quand « n » est variable en fonction de la hauteur de remplissage (Camp, 1946), et pour les deux cas le coefficient de Manning est considéré comme étant une donnée. Dans ce chapitre on traitera uniquement le cas d'un coefficient « n » constant. Pour le calcul de l'angle exprimant le taux de remplissage Akgiray (2005) propose l'utilisation de la formule suivante :

$$\theta = 2 \times 6^{5/13} K^{3/13} \left(1 + \left(sin^{-1}(2.98K)\right)^{0.8} - 2K^{0.946}\right) \tag{5.82}$$

Tel que:

$$K = \frac{Qn}{D^{8/3} S^{0.5}} \tag{5.83}$$

Selon Akgiray la vitesse d'écoulement peut être estimée après la substitution de la valeur de θ dans l'équation (4.32). L'erreur maximale produite est de 0.29 %. Après une analyse des équations proposées et comme le montre le tableau 5.8, on a trouvé qu'elles ne sont pas assez exactes et ne couvrent pas tout le domaine de variation de θ, telque pour Giroud pour $0° \leq \theta \leq 360°$ l'erreur maximale peut atteindre 12.768%, alors pour Saatçi pour $0° \leq \theta \leq 265°$ l'erreur maximale est de 561.41%, et pour Akgiray l'erreur peut atteindre 23.80%.

Table 5.8: *Teste d'exactitude de l'équation (5.79), l'équation de Saatçi et de Giroud comparées avec l'équation (4.32).*

θ *and* θ_1	Manning Equation (m/s)	Proposed Equation (5.79) (m/s)	Error %	Saatçi equation Error %	Giroud equation Error %
1°	0,002361629	0,00236163	9,8589E-06	89.3474	0,004
2°	0,005950753	0,005950752	0	85,94367	0,004
3°	0,01021735	0,01021735	0	83,46836	0,005
4°	0,01499313	0,01499313	0	81,45177	0,007
5°	0,02018673	0,02018673	0	79,71937	0,009
6°	0,02573905	0,02573905	7,23665E-06	78,18411	0,012
7°	0,03160805	0,03160805	0	76,79537	0,015
8°	0,03776193	0,03776193	0	75,52073	0,018
9°	0,04417562	0,04417562	8,43291E-06	74,33798	0,022
10°	0,0508287	0,05082869	0	73,23115	0,027
20°	0,127691	0,127691	0	64,62856	0,096
25°	0,1715467	0,1715467	0	61,28267	0,146
35°	0,267039	0,267039	0	55,565	0,276
45°	0,3703158	0,3703158	0	50,64856	0,437
90°	0,8771848	0,8771848	0	32,4059	1,190
110°	1,100413	1,100413	0	24,75224	1,293
120°	1,207051	1,207051	0	20,8076	1,244
135°	1,358057	1,358057	0	14,60113	1,027
145°	1,451537	1,451537	0	10,19018	0,791
190°	1,782741	1,782741	0	14,59881	0,836
200°	1,833967	1,833967	0	21,95952	1,192
235°	1,945874	1,945873	0	60,9691	1,749
245°	1,959167	1,959167	0	80,98525	1,597
246°	1,960065	1,960064	0	83,49858	1,572
290°	1,931132	1,931132	0	not applicable	1,468
300°	1,909153	1,909153	6,24409E-06	not applicable	2,694
308°	1,888616	1,888616	0	not applicable	3,803
320°	1,853945	1,853945	0	not applicable	5,652
335°	1,806261	1,806261	0	not applicable	8,209
345°	1,773241	1,773241	0	not applicable	10,013
350°	1,756714	1,756714	0	not applicable	10,930
360°	1,7242	1,7242	0	not applicable	12,768

2.3. ***Angle de remplissage:***

Comme suscité auparavant, la détermination du paramètre angle de remplissage est importante, surtout pour les mesures des débits ou la détermination des hauteurs normales. Le calcul de ce paramètre nécessite des méthodes itératives en vertu de la forme de l'équation (4.32). Les approches proposées par Saatçi via l'équation (5.80) et l'équation (5.82) de Akgiray peuvent servir ce besoin et nous aident à trouver la valeur de θ, tel que pour

L'équation de Saatçi prétend qu'elle occasionne une erreur maximale égale à 3% pour θ entre 0° et 265. Selon Akgiray l'équation (5.82) produit une erreur maximale inférieure à 0.72%. Après la vérification, on a trouvé que les équations (5.80) et (5.82) sont moins exactes, tel que pour l'équation (5.80) la déviation maximale dépasse 100% dans certains cas, alors pour l'équation (5.82), la déviation relative maximale est de 41.36 comme le montre le tableau 5.9. Nous contribuions dans ce point par la proposition des démarches pour éliminer le besoin aux méthodes itératives et ce via le développement suivant ; De l'équation (4.36) on peut déduire ce qui suit :

$$\theta_3 = \left(\left(\frac{S_3^{0.5}}{n_3}\right)^3 \left(\frac{2Q_3}{D_3}\right)^2\right)^{1/2} \frac{1}{V_3^{5/2}} \tag{5.84}$$

Combinant les équations (5.79) et (5.84) il est facile de conclure l'expression de l'angle de remplissage en fonction des paramètres de l'équation de référence :

$$\theta_3 = \left(\frac{n_3}{S_3^{0.5}}\right)^{3/8} \left(\frac{Q_1}{Q_3}\right)^{5/8} \left(\frac{2Q_3}{D_3}\right) \left(\frac{D_1\theta_1}{2Q_1}\right) \left(\frac{S_1^{0.5}}{n_1}\right)^{3/8} \tag{5.85}$$

2.3.1. Teste d'exactitude:

L'équation (5.85) est la plus exacte si on la compare avec les autres formules proposées jusqu'à maintenant, tel que elle produit un écart relatif égale à $10^{-15}\% = 0$, en y comparant avec l'équation (4.32) comme le montre le tableau 5.9.

Table 5.9: *Test d'exactitude de l'équation (5.85) comparée avec l'équation (4.32), équation de Saatçi (5.80)*

θ and θ_1	Manning Equation In radian	Proposed Equation (5.85) In radian	Error %	Saatçi equation (5.80) Error %
1°	0,02	0,02	0,00	2,69E+04
2°	0,03	0,03	0,00	1,34E+04
3°	0,05	0,05	0,00	8,90E+03
4°	0,07	0,07	0,00	6,65E+03
5°	0,09	0,09	0,00	5,30E+03
6°	0,10	0,10	0,00	4,40E+03
7°	0,12	0,12	0,00	3,76E+03
8°	0,14	0,14	0,00	3,27E+03
9°	0,16	0,16	0,00	2,90E+03
10°	0,17	0,17	0,00	2,60E+03
20°	0,35	0,35	0,00	1,24E+03
25°	0,44	0,44	0,00	9,72E+02
35°	0,61	0,61	0,00	6,60E+02
45°	0,79	0,79	0,00	4,84E+02
90°	1,57	1,57	0,00	1,66E+02
110°	1,92	1,92	0,00	1,04E+02
120°	2,09	2,09	0,00	7,92E+01
135°	2,36	2,36	0,00	4,84E+01
145°	2,53	2,53	0,00	3,08E+01
190°	3,31	3,31	0,00	2,89E+01
200°	3,49	3,49	0,00	3,91E+01
235°	4,10	4,10	0,00	6,96E+01
245°	4,27	4,27	0,00	7,73E+01
246°	4,29	4,29	0,00	7,81E+01
290°	5,06	5,06	0,00	not applicable
300°	5,23	5,23	0,00	not applicable
308°	5,37	5,37	0,00	not applicable
320°	5,58	5,58	0,00	not applicable
335°	5,84	5,84	0,00	not applicable
345°	6,02	6,02	0,00	not applicable
350°	6,11	6,11	0,00	not applicable
360°	6,28	6,28	0,00	not applicable

3. Cas des conduites en parallèle :

3.1. *La Vitesse d'écoulement* :

3.1.1. Bassins versants arrangés en parallèles :

On appelle deux bassins versants des bassins arrangés en parallèle s'ils ont le même Outlet comme s'est montré la figure 5.10.

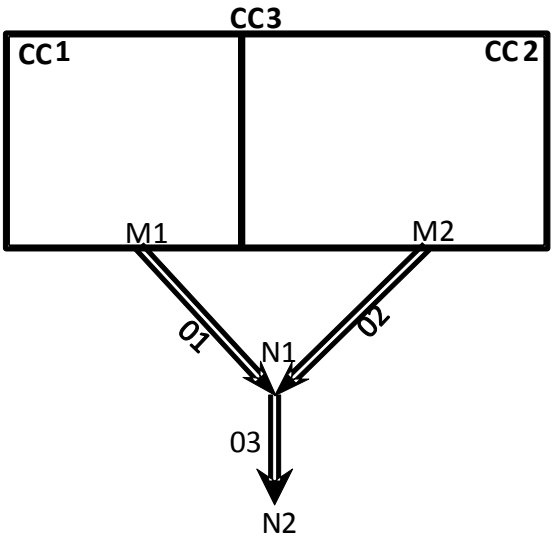


Figure 5.10 : *Bassins versants et conduites arrangés en parallèle.*

- La conduite M1-N1 collecte les eaux du sous bassin versant CC1 (Conduite 01) ;
- La conduite M2-N1 collecte les eaux du sous bassin versant CC2 (Conduite 02) ;
- La conduite N1-N2 collecte les eaux du sous bassin versant équivalent CC3 (Conduite 03).

Tel que :

$$CC_{3=}\ CC_2 + CC_1 \tag{5.86}$$

Les débits Q_i peuvent être estimés par une des méthodes agrées, exemple : la méthode rationnelle, SCS (Viessman et Lewis 2003). Le débit Q_1 produit sur le sous bassin versant CC1 est transporté par la conduite M1-N1, et le débit Q_2 produit sur le sous bassin versant CC1 est transporté par la conduite M2-N1, et enfin Q_3 produit sur le bassin versant équivalent CC3 est transporté par la conduite N1-N2.

Quatre types de problèmes peuvent être rencontrés pour calculer la vitesse et l'angle de remplissage selon la position de la conduite de référence, et ce comme suit :

1. Le calcul de V_3 et θ_3 en fonction des caractéristiques de la conduite 01 (Conduite 01 est la conduite de référence).
2. Le calcul de V_3 et θ_3 en fonction des caractéristiques de la conduite 02 (Conduite 02 est la conduite de référence).
3. Le calcul de V_2 et θ_2 en fonction des caractéristiques de la conduite 01 (Conduite 01 est la conduite de référence).

4. Le calcul de V_1 and θ_1 en fonction des caractéristiques de la conduite 02 (Conduite 02 est la conduite de référence).

a) Cas un (01) et deux (02) :

L'écoulement dans les conduites est permanant et uniforme, ce qui signifie que les caractéristiques sont constantes durant le temps et dans l'espace (pour une longueur considéré). Considérant que la conduite M2-N1 (ou bien la conduite 02) est la conduite de référence, avec des caractéristiques connues : Le diamètre D2, rayon hydraulique Rh2, l'angle de remplissage θ2, Section d'écoulement A2, la pente i2, coefficient de Manning n2. Pour la conduite 03 N1-N2, les paramètres suivants sont considérés comme des données aussi : La pente i3, le coefficient de Manning n3.

De la figure 5.10 il est aisé de déduire ce qui suit :

$$\mathrm{Q_3} > \mathrm{Q_1} \tag{5.87}$$

$$\mathrm{Q_3} > \mathrm{Q_2} \tag{5.88}$$

Le rapport Rq32 entre Q_3 et Q_2, et le rapport Rq_{31} entre Q_3 et Q_1 sont donnés par les équations suivantes :

$$\frac{\mathrm{Q_3}}{\mathrm{Q_2}} = \mathrm{Rq_{32}} \tag{5.89}$$

$$\frac{Q_3}{\mathrm{Q_1}} = \mathrm{Rq_{31}} \tag{5.90}$$

Tel que:

$$Q_3 = A_3 V_3 \tag{5.91}$$

$$Q_1 = A_1 V_1 \tag{5.92}$$

Les inéquations (5.87) et (5.88) pour des conduites écoulant à pleine section, nous conduisent à déduire ce qui suit:

$$A_3 = bA_1 \tag{5.93}$$

Ce qui implique:

$$D_3^2 = bD_1^2 \tag{5.94}$$

Même chose pour:

$$A_3 = aA_2 \tag{5.95}$$

On obtient:

$$D_3^2 = aD_2^2 \tag{5.96}$$

En se basant sur les équations (5.89), (5.91) et (5.95) le rapport Rq32 devient :

$$Rq_{32} = \frac{aV_3}{V_2} \tag{5.97}$$

Ce qui implique que:

$$V_3 = \frac{Rq_{32}}{a} V_2 \tag{5.98}$$

L'utilisant de l'équation (5.96), rend l'équation de Manning pour la vitesse comme suit:

$$V_3 = \frac{s_3^{0.5}}{n_3} \left(\frac{D_2}{4}\right)^{2/3} a^{1/3} \tag{5.99}$$

$$\Rightarrow a = V_3^3 \left(\frac{n_3}{s_3^{0.5}}\right)^3 \left(\frac{4}{D_2}\right)^2 \tag{5.100}$$

La combinaison entre les équations (5.98) et (5.100) donne ce qui suit :

$$V_3 = (\mathrm{rQ_{32}V_2})^{1/4} \left(\frac{\mathrm{S_3^{0.5}}}{n_3}\right)^{3/4} \left(\frac{\mathrm{D_2}}{4}\right)^{1/2} \tag{5.101}$$

L'équation (5.101) permet le calcul de la vitesse dans la conduite (N1-N2) en fonction des caractéristiques de la conduite de référence (conduite 02) pour le cas d'une conduite pleine.
Pour le cas d'une conduite partiellement remplie, la formule précédente et selon l'équation (4.36) elle se réécrite comme suit :

$$V_3 = \left(\frac{\mathrm{Q}_3}{Q_2}\right)^{1/4} \left(\frac{\mathrm{S}_3^{0.5}}{\mathrm{n}_3}\right)^{3/4} \left(\frac{n_2}{\mathrm{S}_2^{0.5}}\right)^{3/20} \left(\frac{2Q_2}{D_2\theta_2}\right)^{2/5} \quad (5.102)$$

Similairement, si la conduite M1-N1 est la conduite de référence, la vitesse d'écoulement pour une conduite partiellement remplie peut être calculée comme suit :

$$V_3 = \left(\frac{\mathrm{Q}_3}{Q_1}\right)^{1/4} \left(\frac{\mathrm{S}_3^{0.5}}{\mathrm{n}_3}\right)^{3/4} \left(\frac{n_1}{\mathrm{S}_1^{0.5}}\right)^{3/20} \left(\frac{2Q_1}{D_1\theta_1}\right)^{2/5} \quad (5.103)$$

Les équations (5.102) et (5.103) donne la valeur exacte de la vitesse d'écoulement dans la conduite N1-N2 en fonction des paramètres connus de la conduite de référence. Idem pour le premier que pour le deuxième cas la déviation maximale produite par les deux équations est **ZERO** comme le montre le tableau 5.10.

b) ***Cas trois et quatre*** *:*

Dans ce cas, nous avons exprimé les caractéristiques de la conduite 01 en fonction des caractéristiques de la deuxième conduite (conduite de référence). D'après les deux équations (5.94) et (5.96) il est aisé de déduire ce qui suit :

$$aD_2^2 = bD_1^2 \quad (5.104)$$

Alors :

$$D_1 = \left(\frac{a}{b}\right)^{0.5} D_2 \quad (5.105)$$

Si on substitut l'équation (5.105) dans l'équation de la vitesse on obtient la formule suivante:

$$V_1 = \frac{s_1^{0.5}}{n_1}\left(\frac{D_2}{4}\right)^{2/3}\left(\frac{a}{b}\right)^{1/3} \quad (5.106)$$

On se basant sur les équations (5.72), (5.74) et (5.93) le rapport Rq_{31} se réécrit comme suit :

$$Rq_{31} = \frac{bV_3}{V_1} \quad (5.107)$$

La reformulation de l'équation (5.107) donne:

$$V_3 = \frac{Rq_{31}}{b} V_1 \quad (5.108)$$

Au regard des deux équations (5.98) et (5.108) on peut conclure ce qui suit :

$$\frac{a}{b} = \frac{V_2 Q_1}{V_1 Q_2} \tag{5.109}$$

Tel que:

$$R_{q12} = \frac{Q_1}{Q_2} \tag{5.110}$$

La combinaison entre les équations (5.106), (5.109) et (5.110) nous permet d'obtenir la formule de la vitesse exprimée en fonction la conduite de référence (conduite 02) pour une section pleine:

$$V_1 = (\mathrm{Rq_{12}V_2})^{1/4} \left(\frac{\mathrm{S_1^{0.5}}}{\mathrm{n_1}}\right)^{3/4} \left(\frac{\mathrm{D_2}}{4}\right)^{1/2} \tag{5.111}$$

Pour une conduite partiellement remplie et en se basant sur l'équation (4.36), l'équation (5.111) se réécrite comme suit :

$$V_1 = \left(\frac{\mathrm{Q_1}}{Q_2}\right)^{1/4} \left(\frac{\mathrm{S_1^{0.5}}}{\mathrm{n_1}}\right)^{3/4} \left(\frac{n_2}{\mathrm{S_2^{0.5}}}\right)^{3/20} \left(\frac{2Q_2}{D_2\theta_2}\right)^{2/5} \tag{5.112}$$

Pour le cas où la conduite 01 est la conduite de référence, l'équation précédente se réécrite comme suit :

$$V_2 = \left(\frac{\mathrm{Q_2}}{Q_1}\right)^{1/4} \left(\frac{\mathrm{S_2^{0.5}}}{\mathrm{n_2}}\right)^{3/4} \left(\frac{n_1}{\mathrm{S_1^{0.5}}}\right)^{3/20} \left(\frac{2Q_1}{D_1\theta_1}\right)^{2/5} \tag{5.113}$$

3.2. ***Teste d'exactitude:***

Les équations (5.103), (5.102), (5.112) et (5.113) sont les meilleures formules jusqu'à présent, elles sont capables de calculer la valeur de la vitesse et donner le même résultat que produite l'équation de Manning originale; comparées avec l'équation de Manning et les approches récentes, l'erreur maximale produite est **ZERO** comme le montre le tableau 5.10.

Table 5.10: *Test d'exactitude de l'équation (5.103), (5.102), (5.112) et (5.113) comparées avec l'équation de (4.32), équation de Saatçi (5.80) et l'équation (5.82) de Akgiray*

θ_1 *and* θ_2	Manning Equation	Proposed Equation (5.103)	Error %	Saatçi equation Error %	Giroud equation Error %	Akgiray equation Error %
1°	0.002175079	0.002175079	0	89.3474	0,004	3.82208E-03
2°	0.00548069	0.00548069	0	85,94367	0,004	1.83529E-03
3°	0.009410257	0.009410258	9.8968E-06	83,46836	0,005	1.30634E-03
4°	0.01380879	0.01380879	0	81,45177	0,007	3.97250E-03
5°	0.01859214	0.01859214	0	79,71937	0,009	5.74054E-03
6°	0.02370587	0.02370587	0	78,18411	0,012	8.23439E-03
7°	0.02911126	0.02911126	6.3983E-06	76,79537	0,015	1.16579E-02
8°	0.03477904	0.03477904	0	75,52073	0,018	1.50708E-02
9°	0.0406861	0.0406861	0	74,33798	0,022	1.90265E-02
10°	0.04681363	0.04681363	0	73,23115	0,027	2.34751E-02
20°	0.1176045	0.1176045	0	64,62856	0,096	9.48772E-02
35°	0.245945	0.245945	0	55,565	0,276	0.2955875
45°	0.3410638	0.3410638	0	50,64856	0,437	0.4938920
90°	0.8078941	0.8078941	0	32,4059	1,190	2.001798
100°	0.9118952	0.9118952	0	28,60162	1,272	2.455752
120°	1.111704	1.111704	0	20,8076	1,244	3.462290
135°	1.250781	1.250781	0	14,60113	1,027	4.285882
145°	1.336877	1.336877	0	10,19018	0,791	4.857391
190°	1.641918	1.641918	0	14,59881	0,836	7.359813
200°	1.689098	1.689098	0	21,95952	1,192	7.810522
235°	1.792165	1.792165	6.6516E-06	60,9691	1,749	8.712387
245°	1.804408	1.804408	0	80,98525	1,597	8.748280
256°	1.809674	1.809674	6.5873E-06	119,6846	1,220	8.683651
290°	1.778588	1.778588	0	not applicable	1,468	8.126489
300°	1.758345	1.758345	0	not applicable	2,694	8.254137
308°	1.73943	1.73943	0	not applicable	3,803	9.677319
335°	1.663581	1.663581	0	not applicable	8,209	17.29931
345°	1.633169	1.633169	0	not applicable	10,013	20.00472
360°	1.588002	1.588002	0	not applicable	12,768	23.80213

3.3. ***L'angle de remplissage :***

Le calcul de ce paramètre est important tant pour le cas des conduites en séries que pour le cas des conduites arrangées en parallèles. Nous proposons dans cette partie une formule explicite qui peut calculer l'angle de remplissage avec une exactitude énorme et ne diffère en rien par rapport à la formule de Manning où la déviation maximale est **ZERRO** (voir tableau

5.11), et couvre tout le domaine de variation de θ. Cette proposition a pour but d'améliorer les résultats proposés auparavant comme celle de Saatçi et Akgiray. Pour le faire, suivant le développement de l'équation (4.36), on peut déduire l'expression de θ :

$$\theta_1 = \left(\left(\frac{S_1^{0.5}}{n_1}\right)^3 \left(\frac{2Q_1}{D_1}\right)^2\right)^{1/2} \frac{1}{V_1^{5/2}} \tag{5.114}$$

A partir des équations (5.112) et (5.114), il est facile de déduire l'expression de θ_1 de la conduite 01 en fonction des caractéristiques de la conduite de référence (conduite 02 dans ce cas) :

$$\theta_1 = \left(\frac{n_1}{S_1^{0.5}}\right)^{3/8} \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{5/8} \left(\frac{2Q_1}{D_1}\right) \left(\frac{D_2\theta_2}{2Q_2}\right) \left(\frac{S_2^{0.5}}{n_2}\right)^{3/8} \tag{5.115}$$

Si la conduite (01) est la conduite de référence, alors θ_2 de la conduite 02 s'exprime comme suit :

$$\theta_2 = \left(\frac{n_2}{S_2^{0.5}}\right)^{3/8} \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{5/8} \left(\frac{2Q_2}{D_2}\right) \left(\frac{D_1\theta_1}{2Q_1}\right) \left(\frac{S_1^{0.5}}{n_1}\right)^{3/8} \tag{5.116}$$

La même chose peut être répétée pour les autres des conduites, mais pour éviter la répétition on ne va pas les citer, car nous croyons que l'idée est simple et claire.

Tableau 5.11: *Test d'exactitude des équations (5.115) et (5.116) comparées avec l'équation (5.114) et les formules de Saatçi et Akgiray*

θ_1 *and* θ_2	Manning Equation(2.3) In radian	Proposed Equation (5.115) In radian	Error %	Saatçi equation (5.80) Error %	Akgiray equation (5.82) Error %
1°	0,02	0,02	0,00	2,69E+04	9.56E-03
2°	0,03	0,03	0,00	1,34E+04	4.58E-03
3°	0,05	0,05	0,00	8,90E+03	3.26E-03
4°	0,07	0,07	0,00	6,65E+03	9.93E-03
5°	0,09	0,09	0,00	5,30E+03	1.43E-02
6°	0,10	0,10	0,00	4,40E+03	2.05E-02
7°	0,12	0,12	0,00	3,76E+03	2.91E-02
8°	0,14	0,14	0,00	3,27E+03	3.76E-02
9°	0,16	0,16	0,00	2,90E+03	4.75E-02
10°	0,17	0,17	0,00	2,60E+03	5.86E-02
20°	0,35	0,35	0,00	1,24E+03	0.236
35°	0,61	0,61	0,00	6,60E+02	0.735
45°	0,79	0,79	0,00	4,84E+02	1.224
90°	1,57	1,57	0,00	1,66E+02	4.834
100°	1,74	1,74	0,00	1,32E+02	5.884
120°	2,09	2,09	0,00	7,92E+01	8.157
135°	2,36	2,36	0,00	4,84E+01	9.959
145°	2,53	2,53	0,00	3,08E+01	11.181
190°	3,31	3,31	0,00	2,89E+01	16.267
200°	3,49	3,49	0,00	3,91E+01	17.139
235°	4,10	4,10	0,00	6,96E+01	18.847
245°	4,27	4,27	0,00	7,73E+01	18.914
290°	5,06	5,06	0,00	not applicable	17.743
300°	5,23	5,23	0,00	not applicable	17.985
308°	5,37	5,37	0,00	not applicable	20.620
335°	5,84	5,84	0,00	not applicable	32.894
345°	6,02	6,02	0,00	not applicable	36.612
360°	6,28	6,28	0,00	not applicable	41.361

4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter une nouvelle approche afin d'expliciter le calcul de la vitesse et du taux de remplissage dans des conduites partiellement pleines ou même pleines. Les formules traitent l'écoulement pour un système tant en série que en parallèle. Les résultats obtenus sont comparés avec les approches les plus récentes qu'on les a trouvées durant notre recherche bibliographique. La majorité des approches sont élaborées afin d'obtenir des formules correspondent à une constante prés à l'équation de Manning, en revanche la nôtre présente un écart maximum ZERO, résultat qui n'a pas été encore atteint

auparavant. La méthode proposée capable de produire des formules pour le reste des caractéristiques hydraulique à savoir: Diamètre (D), Rayon hydraulique (Rh), la pente (i) avec la même exactitude c'est-à-dire ZERO, malgré que les résultats ne sont pas encore publiés ni cités dans cette thèse, mais sont prêts pour voir la lumière.

CE TRAVAIL A FAIT L'OBJET DES COMMUNICATIONS INTERNATIONALES :

1. **Zeghadnia Lotfi, Djemili Lakhdar, Houichi larbi, Rezgui Nordine. 2013** « *New approach for the computation of Flow velocity in partially filled pipes Arranged In parallel* », **Seventeenth International Water Technology Conference 2013**, Istanbul, 2013, Turquie.

ET DES PUBLICATIONS INTERNATIONALES :

1. **Zeghadnia Lotfi, Djemili Lakhdar, Houichi Larbi,.** 2014 : " analytic solution for the computation of flow velocity and water surface angle for drainage and sewer networks: case of pipes arranged in series ". Accepted,.Indercience, *Int. J. of Hydrology Sci. & Tech., Vol. 4, No. 1*.
2. **Zeghadnia Lotfi, Djemili Lakhdar,Rezgui nordine, Houichi Larbi,.** 2014 : " New equation for the computation of flow velocity in partially filled pipes arranged in parallel ".IWA, Accepted,. *J. of Water Sci. & Tech.*

Ainsi que d'autres qui ne sont pas encore apparu.

Chapitre VI : Les modèles complexes

1. Introduction :

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) (Kovacs, 1988);
- les modèles issus de la dynamique des systèmes, appelés souvent modèles globaux ou conceptuels, du type Muskingum. Généralement les modèles d'écoulement en conduites utilisées sont des modèles basés sur les équations de Barré de saint venant (Modèle hydraulique) et le modèle conceptuel de Muskingum (Modèle hydrologique), ces modèles présentent des avantages et des inconvénients (Yen, 1993). Dans la pratique un modèle est sophistiqué mieux il est capable de représenter la réalité, et en contrepartie il est difficile plus le temps de calcul est long et nécessite plus de données (Blanpain O., et B.Chocat, 1998). La nature des phénomènes sont variables suivant la géométrie des collecteurs, leur taux de remplissage,.. etc. Des singularités très nombreuses (regards de visite, chambres de jonctions, siphons) au fonctionnement hydraulique généralement inconnues, créent des perturbations importantes dans les propagations, de même que certains ouvrages de plus grandes dimensions comme des chambres de dessablage, des bassins de retenue,..etc. L'écoulement en réseau est donc constitué par un ensemble très complexe de phénomènes hétérogènes dans le temps et l'espace ce qui rend la modélisation un peu compliquée est nécéssite certaines hypothéses simplificatrices.

2. Equations de Barré de sant venant :

Dans les réseaux d'assainissement, les phénomènes transitoires sont systématiquement présents du fait de la variabilité des débits par temps de pluie. Ils se traduisent par une variation, qui peut être brutale dans certains cas, de la hauteur d´eau due à la propagation d'une onde de gravité ou d'un ressaut hydraulique. La méthode de calcul hydraulique prend en considération cette réalité en résolvant les équations de Barré de Saint Venant qui décrivent mathématiquement la réalité physique de l'écoulement transitoire. Elles s'appellent aussi The shallow water waves equations ou les équations des ondes d'eau de faible profondeur (Christopher Z., 2001).

2.1. ***Modélisation unidimensionnelle :***

Du point de vue théorique, on peut dériver les équations des écoulements unidimensionnels de deux manières : à partir des équations complètes tridimensionnelles de Navier-Stokes et, en passant par une cascade d'hypothèses simplificatrices, arriver aux équations différentielles partielles, ou bien on le peut à partir des hypothèses énoncées par Saint-Venant et construire des équations exprimant les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie dans un volume de contrôle fini. Cette deuxième façon de procéder est très utile car on met clairement en évidence toutes les hypothèses physiques utilisées, à savoir :

- Que l'écoulement se fasse le long d'une direction privilégiée x ;
- Que les caractéristiques de ces écoulements puissent être considérées comme correctement approché par leur valeur moyenne dans une section droite orthogonale à x ;
- Dans une section transversale, la vitesse longitudinale est uniforme et la surface libre est horizontale ;
- La répartition des pressions sur une verticale est hydrostatique ;
- Les pertes de charge, quelle que soit leur nature, peuvent être exprimées par les formules de l'écoulement permanent (formule Manning-Strickler, Chézy, etc).
- La pente longitudinale est faible ;
- La densité de l'eau est constante.

Les variables sont le débit Q(x,t) et la section mouillée S(x,t). Où la vitesse V(x,t) et le tirant d'eau h(x,t) ou encore la côte Z(x ,t) de la surface libre sont toutes en fonctions des seuls paramètres abscisse x ,et le temps t. pour simplifier l'écriture ces variable seront simplement notées : Q, S, V, h, Z .

Les équations de Barré de Saint-Venant sont composées d'un couple de deux équations aux dérivées partielles en 'x' et 't', traduisant :

1. La loi de continuité ou la conservation de la masse ;
2. La loi fondamentale de la dynamique ou la conservation de la quantité de mouvement.

2.2. ***Equation de continuité :***

Cette équation exprime le principe de conservation de la masse. Cela revient à dire que la variation de masse de fluide d´un élément de volume « dv » pendant un temps « dt » est égale à la masse de fluide entrant dans ce volume déduit de la masse de fluide sortante. Elles s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{6.114}$$

Avec :

q : représente un événement éventuel débit latéral, par unité de longueur, positif ou négatif selon qu'il s'agit respectivement d'un débit d'apport ou de fuite en m.

S : La section mouillée en m^2.

Q : Le débit dans la conduite en m3/s.

2.3. ***Equation de la dynamique :***

Cette équation se déduit de la deuxième loi de Newton : le taux de variation de la quantité de mouvement d´une particule de masse « m » est égal à la somme des forces extérieures agissant sur cette particule. Les forces extérieures agissant sur le volume de contrôle sont les forces de pression hydrostatique, celles de pression due au changement de la largeur, et celles de gravité et de frottements. Les formulations les plus classiques sont les suivantes :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{S}\right) + gS\frac{\partial h}{\partial x} = gS(I - J) + Kq\frac{Q}{S} \tag{6.115}$$

Ou encore :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) + (K - 1)q\frac{V}{S} \tag{6.116}$$

Avec :

V :La vitesse d'écoulement dans la section en m^2/s,

h : La hauteur d'eau dans la section en m,

I : La pente de la conduite,

J : La perte de charge unitaire,

K : Compris entre 0 et 1 selon que le débit latéral est entrant (0) ou sortant (1).

2.4.*Ecoulement permanent :*

Pour le cas du temps sec l'écoulement peut être considéré comme permanent sur des intervalles de temps courts (de l'ordre de 30 minutes) (Claire O., 2003). Dans cette situation (écoulement permanent non-uniforme) les équations de Saint-Venant précédentes se simplifient comme suit :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{6.117}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{S}\right) + gS\frac{\partial h}{\partial x} = gS(I - J) + Kq\frac{Q}{S} \tag{6.118}$$

Ou encore :

$$V\frac{\partial V}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) + (K - 1)q\frac{V}{S} \tag{6.119}$$

2.5.*Ecoulement uniforme :*

Dans les collecteurs des réseaux d'assainissement on peut observer des changements de pente liés à un changement de pente du radier et à la présence des dépôts grossiers. Cependant on peut considérer que l'écoulement possède un comportement uniforme pour les tronçons de même diamètre. Dans le cas du régime permanent et uniforme, et pour un débit latéral nul q=0 les équations de Saint-Venant se simplifiées encore sous la forme suivante :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{6.120}$$

$$I = J \tag{6.121}$$

L'équation dynamique (6.116) pour q = 0 elle s'écrit comme suit :

$$\underset{01}{\frac{\partial V}{\partial t}} + \underset{02}{V\frac{\partial V}{\partial x}} + \underset{03}{g\frac{\partial h}{\partial x}} = \underset{04}{g}\underset{05}{(I-J)} \tag{6.122}$$

Elle comprend plusieurs termes, numérotés ici de (1) à (5), ils correspondent respectivement à:

(01) Premier terme d'inertie (énergie due à l'accélération dans une monodirection) ;
(02) Deuxième terme d'inertie (accélération convective) ;
(03) Terme de pression, lié à la pente de la surface libre ;
(04) Terme de gravité ;
(05) Terme de frottement, lié aux pertes de charge.

Si le terme (04) sont négligés on obtient l'équation de l'onde dynamique :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \tag{6.123}$$

Différentes études théoriques et expérimentales portant sur la propagation d'une crue ont permis de montrer (Preissmann 1971, Kovacs, 1988) que le terme d'inertie (01) est lié au temps, donc à la vitesse de montée de la crue et que le terme d'accélération convective (02) est lié à la géométrie des conduites. Si les termes (01) et (02) sont négligés on obtient de l'onde diffusante :

$$g\frac{\partial h}{\partial x} = g(I-J) \tag{6.124}$$

Et si en plus le terme (03) est négligé, obtient l'équation de l'onde cinématique :

$$g(I-J) = 0 \Leftrightarrow I = J \tag{6.125}$$

3. Modèle de Muskingum :

Utilisé pour représenter la transformation pluie-débit et le ruissellement. Il s'agit d'un modèle issu du modèle de type réservoir créé initialement par Mc Carthy en 1934 pour simuler les débits de la rivière Muskingum dans l'Ohio, USA (Mc Carthy., 1938 and 1940), (M. Baláž, 2010). Depuis les travaux de Hicks (1943) qui ont confirmé ce qui n'était au départ qu'une hypothèse de travail, et que le volume stocké dans un tronçon est sensiblement proportionnel au débit dans ce tronçon. Il s'agit précisément de l'hypothèse faite dans le modèle Muskingum dont la loi de stockage s'écrit, sous sa forme la plus générale :

$$V_s = k\big(\alpha Q_e(t) + (1-\alpha)Q_s(t)\big) \tag{6.126}$$

Avec :

Vs : Le volume stocké (m3) ;

Qe : Le débit entrant (m3/s) ;

Qs : Le débit sortant (m3/s) ;

K : Paramètre du modèle Muskingum (s) ;

α : Paramètre de pondération.

Cette première équation est complétée par l'équation de conservation de la masse :

$$\frac{dV_s(t)}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t) \tag{6.127}$$

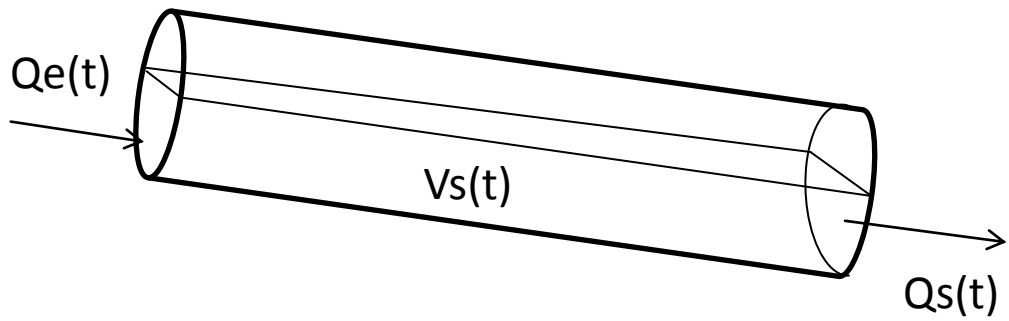


Figure 6.11 : *Principe de modèle de Muskingum*

Le paramètre *K* (appelé lag-time) représente le décalage temporel entre les barycentres des hydrogrammes d'entrée et de sortie, c'est aussi, théoriquement, le temps de transite d'une onde se propageant à la célérité *C* sur une distance Δx :

$$k = \frac{C}{\Delta x} \tag{6.128}$$

Le paramètre de pondération α quantifie les influences respectives des débits d'entrée et de sortie sur le volume stocké. D'un point de vue physique, $\alpha \in [0,1]$. Néanmoins, certains auteurs proposent de prendre, pour des raisons numériques, $\alpha \in [-0.5, 0.5]$, ou même $\alpha \in [-\infty, 0.5]$ (Strupczewski et Kundzewicz,1980). Le cas $\alpha < 0$ n'a plus de signification physique mais il permet parfois de mieux représenter certains hydrogrammes particuliers. En pratique, la plupart des valeurs utilisées restent comprises entre 0 et 0,5. Reynier (1978) préconise $\alpha = 0{,}2$.

- Le modèle du réservoir linéaire, avec $\alpha = 0$:

$$V_s(t) = KQ_s(t) \tag{6.129}$$

- Le modèle du réservoir linéaire, avec $\alpha = 1$:

$$V_s(t) = KQ_e(t) \tag{6.130}$$

Les deux derniers modèles sont simplement des cas particuliers du premier. Le système composé des deux équations de stockage et de conservation se résout soit par intégration directe, soit par discrétisation. Cette deuxième technique est la plus rapide à mettre en œuvre. On dérive la loi de stockage par rapport au temps *t*, et on égalise avec les termes de droite de l'équation de conservation :

$$\frac{dV_s(t)}{dt} = K\alpha \frac{dQ_e(t)}{dt} + K(1-\alpha)\frac{dQ_s(t)}{dt} = Q_e(t) - Q_s(t) \tag{6.131}$$

4. Conclusion :

L'écoulement dans les réseaux d'assainissement est constitué par un ensemble très complexe de phénomènes hétérogènes dans le temps et l'espace, ce qui rend la modélisation un peu complquée. Généralement les modèles d'écoulement en conduites utilisées sont des modèles basés sur les équations de Barré Saint Venant (Modèle hydraulique) et le modèle conceptuel de Muskingum (Modèle hydrologique). Les équations de Barré Saint-Venant sont construites des équations exprimant les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le modèle Muskingum représente la transformation pluie-débit et le ruissellement. Adressé pour étudier le l'acheminement des débits dans un tronçon compris entre deux sections verticales et ce à travers l'établissement des hydro-grammes explicatifs de la variation des débits entrant et sortant et leurs influence sur le volume compris entre les sections d'écoulement.

Conclusion générale :

L'objectif principal de cette thèse est de proposer des solutions plus simples et directes pour les écoulements probables dans un réseau d'assainissement. Notre attention s'est concentrée sur l'étude des écoulements permanents et uniformes. Les autres types d'écoulement représentent un vaste domaine de recherche après la soutenance.

La recherche bibliographique effectuée durant ces années de recherche nous a conduit à déduire que les modèles les plus utilisées pour le calcul des caractéristiques d'un réseau d'assainissement sont les modèles de : Manning-Strickler (Saatçi, 1990), Chézy (Robert. L, 2011) et plus particulièrement celle de Manning (Akgiray, 2004 et 2005). Les réseaux d'assainissement s'écoulent souvent dans des conduites partiellement remplies ; la détermination des caractéristiques d'écoulement dans ce cas nécessite le recours aux graphes, tableaux (Chow,1959), (VenkateswarluSwarna and al, 1990), (Terence J. McGhee, 1991) mais restent moins exactes et limités, ou bien l'utilisation des méthodes numériques laborieuses (Saatçi, 1990), (Hager, 2010). Certaines auteurs ont essayé d'expliciter ces méthodes via des approches pour certains écarts par rapport à l'équation originale de Manning ; les travaux les plus importants sont ceux de : (Saatçi, 1990), (Giroud et al, 2000) et (Akgiray, 2004 et 2005) ; en revanche d'autres auteurs ont préféré la formule de Colebrook-White, malgré l'inconvénient que présente cette équation pour le cas des réseaux d'assainissement dû aux dépôts sur les parois des réseaux ce qui favorise et avantage la formation des couches biofilms (Carlier, 1985), (Clair, 2003), (Guzman et al, 2007), (Guillermo et al, 2009).

Pour contribuer à l'amélioration des méthodes de conceptions et de calcul des réseaux d'assainissement, nous avons proposé 06 chapitres consécutifs chacun est adressé pour servir un objectif, et ce comme suit :

- Les chapitres 01 et 02 ont eu pour objectif de passer en revue des différents concepts et connaissances de base sur l'hydraulique urbaine, les différentes classifications des réseaux d'assainissement, les différents types d'écoulement dans réseaux d'assainissement ainsi que d'autres concepts, nécessaires pour le sujet.

Pour bien déployer notre contribution trois approches sont proposées à travers 03 chapitres qui sont : 03,04 et 05, chacune des approches possède des avantages qui la caractérise, tel que :

- Pour le chapitre 03, une approche semi-graphique est développée, où l'équation de Manning est devenue très simple en fonction de , tel que, le ***SINUS*** est entièrement enlevé pour la 1ére fois selon notre recherche bibliographique. L'équation obtenue admet une infinité de solution. Comparée avec le phénomène physique une solution graphique était impérative, pour cette raison un graphe très facile a été établi. Le graphe représente la variation des paramètres connus généralement représentés par un paramètre appelé « K » en fonction de la variation du taux de remplissageθ. Ce graphe aide à estimer tous les paramètres qui sont exprimés en fonction de θ, par un seul graphe. La comparaison des résultats obtenus graphiquement par celle obtenus analytiquement sont assez exactes par rapport à ceux estimés par d'autres chercheurs (Giroud et al, 2000).
- Dans le quatrième chapitre une approche basée sur le concept du rendement de la conduite est établie, et qui peut être étalée à travers deux concepts ou deux notions du rendement :
    1. Le rendement volumétrique qui assure que volumétriquement la conduite est pleinement exploitée, à ce moment le taux de remplissage doit impérativement égale à θ_{Qmax} ;
    2. Le rendement de circulation qui signifie que l'écoulement s'effectue sous une vitesse qui corresponde à un niveau de remplissage égale à θ_{Vmax} , ce qui assure l'évacuation la plus rapide possible comparée au condition d'écoulement.

Cette nouvelle conception est proposée afin d'obtenir des conduites écoulant à plein rendement, tant volumétrique que de circulation (tout dépend des fins de concepteur). *La conception avec un rendement élevé n'a pas été abordée auparavant par les chercheurs*. Pour les deux type d'écoulement des équations explicites ont été élaborées pour répondre à ce besoin, ce qui rend l'exploitation maximale des conduites possible. Des tableaux détaillés sont fournis pour permettre évaluer le rendement pour chaque degré de remplissage, ainsi qu'un graphe adressé pour connaitre en mieux le comportement des deux aspects pour le même d'angle de remplissage. ***Dès maintenant le rendement d'une conduite est devenu mesurable***.

- Le cinquième chapitre est consacré pour la troisième approche, où nous avons proposé une solution analytique et explicite pour le calcul des différents paramètres de l'écoulement permanent et uniforme pour les deux cas possibles d'arrangement des conduites, à savoir : arrangement en série ou bien arrangement en parallèle, à partir d'une conduite de référence à caractéristiques connues. L'approche est valable pour le cas des conduites écoulant à pleine section ou pour des conduites partiellement remplies. Les résultats obtenus ont été comparés avec des approches récentes (les plus célèbres selon notre recherche (Saatçi, 1990), (Giroud et al, 2000) et (Akgiray, 2004 et 2005)) et l'équation de Manning. Toutes les équations obtenues rendent le calcul explicite et direct. La déviation maximale trouvée est **ZERO, résultat que personne n'a prétend auparavant.**

L'écoulement non uniforme ou encore non stationnaire est un écoulement très compliqué en vertu de la complexité de ces modèles mathématiques. Les équations Barré de Saint Venant sont les plus utilisées ainsi que le modèle Muskingum (Blanpain O., et B.Chocat, 1998). Pour les résoudre nous utilisons généralement la méthode des éléments finis ou autres méthodes numériques : différences finis, volumes finis. ***Le chapitre six (06)*** a été établie pour mieux comprendre ces modèles complexes et avoir une idée sur ces deux modèles célèbres. Une partie expérimentale est prévue au début ; malheureusement le manque des moyens nous a empêché de y faire. Notre attention dans cette thèse a été adressée complètement aux écoulements permanents et uniformes, alors les autres seront un sujet de recherche dans les prochaines années.

References biblioghraphiques:

1. ACHOUR B., BEDJAOUI, A. (2006). Discussion. Exact Solutions for Normal Depth Problem " by Prabatha, K. Swamee and Pushpa N. Rathie, J. Hydraulic. Res., Vol.44, n°5, 715-717.

2. AKGIRAY. Ö. (2004). Simple formula for velocity, depth of flow and slope calculations in partially filled circular pipes. J. Environmental engineering science, Vol. 2, n° 13, p.371-385.

3. AKGIRAY. Ö. (2005). Explicit solutions of the Manning equation in partially filled circular pipes. J.Environmental engineering science, Vol. 32, p. 490-499.

4. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE) ET WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). (1992). Design and construction of storm water management. Manuel de pratique, New York.

5. ANDRE F. (1995). Analyse numérique pour ingénieurs. Edition de l'école polytechnique de Montréal, Canada.

6. BARR, D.I.H, AND DAS, M.M. (1986). Direct solution for normal depth using the manning equation. Proceedings of the institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 81, p. 315-333.

7. Bdjaoui. A (2010). Contribution à l'étude de l'écoulement en charge et à surface libre, Thèse, Biskra.

8. BEAUDRY J.P., J.C ROLLAND.(2010). Mécanique des Fluides appliqué, 2eme edition, Berger, Canada.

9. BLANPAIN O., CHOCAT B.(1998). Système d'aide au choix de modèles hydrologiques et hydrauliques pour simuler les réseaux d'assainissement : Applications aux modèles de propagation en conduite. Revue des sciences de l'eau. Vol. 12., n°2., p., 317-332.

10. BOURRIER REGIS. (1997). Les réseaux d'assainissement: Calculs, Applications, Perspectives. Tec & Doc, 4éme édition. France.

11. CAMP, T.R. (1946). Design of sewers to facilitate flow, J. Sewage Works., Vol.18., n°01, p. 3-16.

12. CARLIER, M., (1980) Hydraulique Générale, Eyrolles. , 1980, France.

13. CLAIR OMS. (2003). localisation, nature et dynamique de l'interface eau-sédiment en réseau d'assainissement unitaire. Thèse en Sciences et Techniques de l'Environnement. Ecole national des ponts et chaussées. France.

14. Chow, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y.USA.

15. CHRISTOPHER Z.(2001). Review of urban storm water models. J. Environmental Modelling & Software. Elsevier., Vol.16., p. 195-231.

16. CODE DES EAUX ALGERIEN. Loi n° 83-17 du 16 juillet 1983 portant code des eaux, P 1270 (JORA N° 30 du 19-07-1983) .

17. EGARD BOU NADER., (1998). Conduite du diagnostic, et évaluation des collecteurs des infrastructures urbaines de l'assainissement. Thèse, INSA, Lyon, France.

18. ESEN, I.I.(1993). Desing of sewers based on minimum velocity. ASCE., J Environmental engineering. Vol. 119., n°3, p. 591-594.

19. FRENCH, R. H. (1985). Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, New York. USA.

20. GIROUD, J.P., PALMER, B., AND DOVE, J.E.,(2000) .Calculation of flow Velocity in pipes as function of flow rate., J. Geosynthétics International., Vol.7, n°(4-6)., p. 583- 600.

21. GUZMAN, K., LA MOTTA, E. J., MCCORQUODALE, J. A., ROJAS, S., AND ERMOGENOUS, M. (2007). Effect of biofilm formation on roughness coefficient and solids deposition in small-diameter PVC sewer pipes. J. Environ. Eng., Vol. 133., n°4., p.364–371.

22. GUILLERMO J. RINCÓN.(2009). Discussion of "Tractive Force Design for Sanitary Sewer Self-Cleansing" by LaVere B. Merritt. J. Environ. Eng., Asce., Vol. 135., n°12., p. 1338–1347.

23. HICKS W.I. (1943). A method of computing urban runoff. Transactions of the ASCE., n° 2230., p. 1217-1268.

24. HENDERSON,F.M.(1966). OpenChannelFlow,Macmillan,NewYork.USA

25. KOVACS Y. (1988). Modèles de simulation d'écoulement transitoire en réseau d'assainissement. Thèse de doctorat: ENPC, Paris, France.

26. MAC CARTHY, G.T., (1938). The unit hydrograph and flood routing, Conference of North Atlantic Division, US Army Corps of Engineers, New London, CT. US Engineering.

27. MAC CARTHY G.T. (1940). Engineering construction: flood routing. Fort Belvoir, Virginia (USA) : The Engineering School.
28. MANNING, R. (1891). On the flow of water in open channels and pipes, Transactions, Institution of Civil Engineers of Ireland, Vol. 20., p. 161-207, Dublin.

29. MARC, S., BECHIR, S., (2006). Guide technique de l'assainissement. 3eme édition, le Montier, Paris.

30. METCALF et EDDY INC.(1981). wastewater engineering: collection and pumping of wastewater. McGraw-Hill, New York. USA.

31. MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC (MTQ) .(1995). Manuel de conception des ponceaux, Service de l'hydraulique, Quebec.

32. MIROSLAV BALÁŽ. (2010). On the use of the Muskingum method for the imulation of flood wave movements. Vol.18., n°.3., p. 14-20.

33. PREISSMANN A. (1971). Modèles pour le calcul de la propagation des crues. La Houille Blanche. Vol. 3., p. 219-223.

34. PRABHATA K.SWAMEE .(1994). Normal depth equations for irrigation canals. ASCE J. hydraulic division. Vol.102., n°5., p. 657-664.

35. PRABHATA K.SWAMEE. PUSHPA N. RATHIE .(2004).Exact solution for normal depth problem. IAHR. J. hydraulic research. Vol. 42., n°5., p. 657-664.

36. REYNIER B. (1978). Etude d'un modèle hydrologique urbain. Villeurbanne (France) : INSA de Lyon.

37. ROBERT LAGACE (2011). Notions d'hydraulique en milieux rural. Université de Laval. Canada.

38. SAATÇI, A.,(1990). Velocity and depth of flow calculations in partially pipes, J. environment Engineering, ASCE., Vol. 116., n°6., p. 1202-1208.

39. SOIL CONSERVATION SERVICE, (1986). *Technical Note - Hydrology No N4*, June 17, 1. USA.

40. SINNIGER, R., HAGER, W.H. (1989). Constructions Hydrauliques, Ecoulement stationnaire, Presses Polytechniques Romandes, Vol. 15, Lausanne.

41. STEVEN MANGIN., (2010). Development of an Equation Independent of Manning's Coefficient *n* for Depth Prediction in Partially-Filled Circular Culverts. Thése, Youngstown state university, USA.

42. STRUPCZEWSKI W., KUNDZEWICZ Z. (1980). Muskingum method revisited. Journal of Hydrology., Vol. 48., p. 327-342.

43. SWARNA, V., MODAK, P. (1990). Graphs for Hydraulic Design of Sanitary Sewers. J. Environ. Eng.,ASCE., Vol. 116, No. 3, pp. 561–574.

44. TERENCE J. McGHEE , (1991) .Water Supply and Sewerage, 6th edition, McGraw Hill. USA.

45. VIESSMAN, W. AND G. L. LEWIS. (2003). Introduction to hydrology. 5em edition. Prentice- Hall. USA.

46. VENKATESWARLU SWARNA., PRASADA M. MODAK.(1990). Graphs for hydraulic design of sanitary sewers. ASCE., Vol 116., p. 561-574.

47. WALLINGFORD HR; D I H BARR**. (2006).** Tables for the Hydraulic Design of Pipes, Sewers and Channels., 8th edition (Volume 1).,Thomas Telford. London.

48. WHEELER. W.(1992). Discussion of: velocity and depth of flow calculations in partially field pipes by A.M. Saatçi. ASCE journal of environmental engineering, Vol. 118., n°3, p. 451-454

49. WILLI H. HAGER.(2010). Wastewater hydraulics theory and practice. Second edition, Springer. London

50. YEN B.C. (1993).is hydraulics is over-used or under-used in urban drainage. Proceedings of 6Th ICUSD, 91-97.

51. ZEGHADNIA LOTFI., (2007). Calcul de l'écoulement turbulent dans les conduites en charge par la méthode du modèle rugueux de référence. Thèse de magister, Université de Badji-Mokhtar, Annaba., Algérie

52. ZEGHADNIA, L., DJEMILI, L., HOUICHI, L., REZGUI, N., (2009) Détermination de la vitesse et la hauteur normale dans une conduite Partiellement remplie, J. EJSR., Vol. 37., n°4., p.561-566.

53. ZEGHADNIA LOTFI, DJEMILI LAKHDAR, HOUICHI LARBI,. 2014 : " analytic solution for the computation of flow velocity and water surface angle for drainage and sewer networks: case of pipes arranged in series "., Inderscience, *Int. J. of Hydrology Sci. & Tech., Vol. 4, No. 1*.

54. ZEGHADNIA LOTFI, DJEMILI LAKHDAR,REZGUI NORDINE, HOUICHI LARBI,. 2014 : " New equation for the computation of flow velocity in partially filled pipes arranged in parallel ".IWA, Accepted,. *J. of Water Sci. & Tech.*

ANNEXE 01

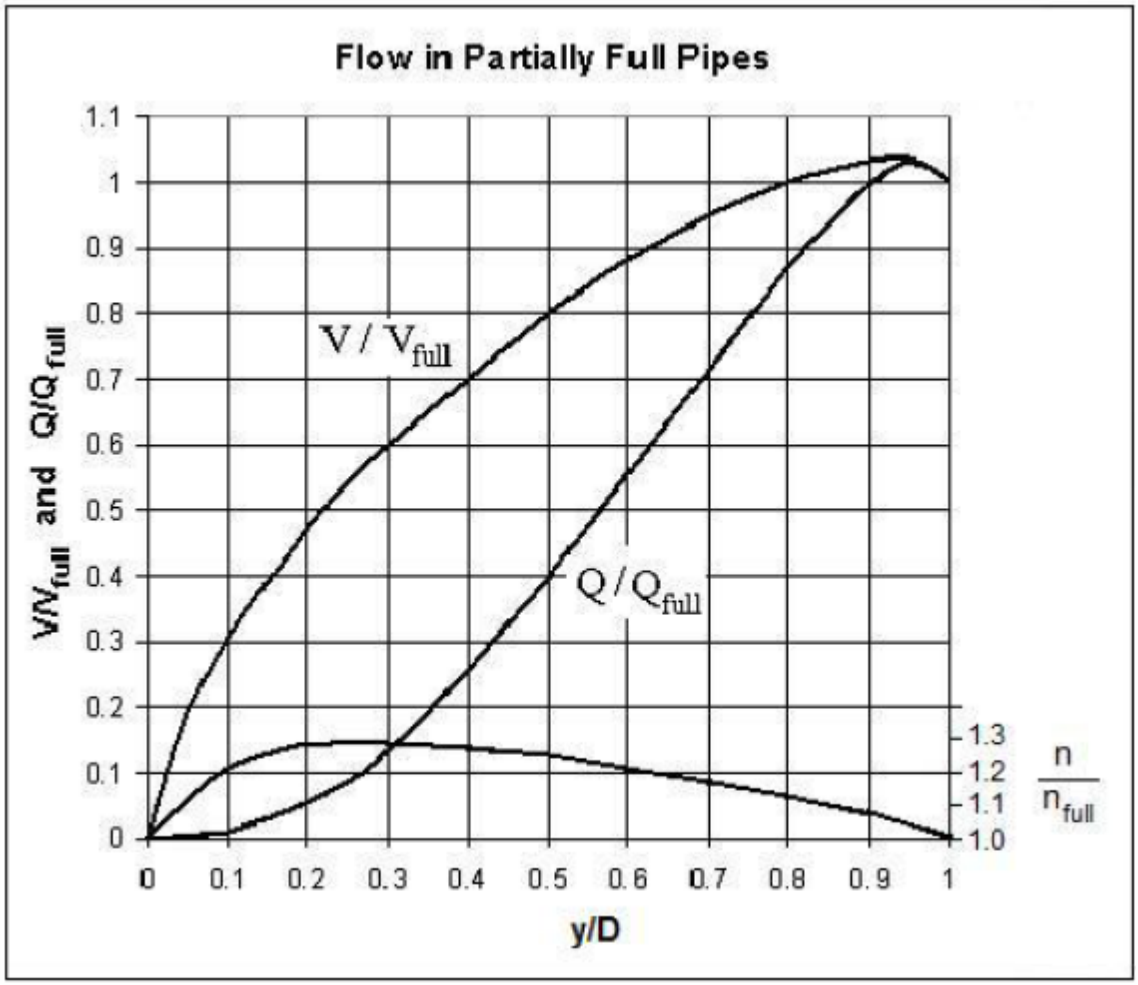


Figure 12 : *rapport des débits et des vitesses dans une conduite partiellement remplie (Camp, 1946), (SCS, 1986)*

ANNEXE 02

Table 5.8 : Teste d'exactitude de l'équation (79), l'équation de Saâtçi et de Giroud comparées avec l'équation (32)(Conduites en série).

θ	Manning Equation (32)	Proposed Equation (79)	Erreur %	Saatçi equation Erreurr %	Giroud equation Erreurr %	Akgiray equation Erreurr %
1°	0.002175079	0.002175079	0	89.3474	0,004	3.82208E-03
2°	0.00548069	0.00548069	0	85,94367	0,004	1.83529E-03
3°	0.009410257	0.009410258	9.8968E-06	83,46836	0,005	1.30634E-03
4°	0.01380879	0.01380879	0	81,45177	0,007	3.97250E-03
5°	0.01859214	0.01859214	0	79,71937	0,009	5.74054E-03
6°	0.02370587	0.02370587	0	78,18411	0,012	8.23439E-03
7°	0.02911126	0.02911126	6.3983E-06	76,79537	0,015	1.16579E-02
8°	0.03477904	0.03477904	0	75,52073	0,018	1.50708E-02
9°	0.0406861	0.0406861	0	74,33798	0,022	1.90265E-02
10°	0.04681363	0.04681363	0	73,23115	0,027	2.34751E-02
11°	0.05314593	0.05314593	0	72,18835	0,032	2.84166E-02
12°	0.05966964	0.05966964	0	71,20036	0,037	3.38442E-02
13°	0.0663732	0.0663732	0	70,25999	0,043	3.97710E-02
14°	0.07324647	0.07324647	0	69,36141	0,049	4.62620E-02
15°	0.08028047	0.08028047	0	68,49986	0,056	5.30575E-02
16°	0.08746714	0.08746714	0	67,67137	0,063	6.04959E-02
17°	0.09479923	0.09479923	0	66,87263	0,070	6.83052E-02
18°	0.1022701	0.1022701	0	66,10081	0,078	7.66985E-02
19°	0.1098737	0.1098737	6.7810E-06	65,35349	0,087	8.55768E-02
20°	0.1176045	0.1176045	0	64,62856	0,096	9.48772E-02
21°	0.1254572	0.1254572	0	63,9242	0,105	0.1047358
22°	0.133427	0.133427	0	63,23878	0,115	0.1150529
23°	0.1415095	0.1415095	0	62,57087	0,125	0.1259090

24°	0.1497005	0.1497005	0	61,91921	0,135	0.1372255
25°	0.1579958	0.1579958	0	61,28267	0,146	0.1490910
26°	0.1663918	0.1663918	8.9554E-06	60,66024	0,158	0.1614311
27°	0.1748849	0.1748849	0	60,05098	0,169	0.1742965
28°	0.1834716	0.1834716	0	59,45406	0,182	0.1876701
29°	0.1921487	0.1921487	0	58,86872	0,194	0.2015530
30°	0.2009132	0.2009132	0	58,29429	0,207	0.2159227
31°	0.209762	0.209762	0	57,73011	0,220	0.2308251
32°	0.2186923	0.2186923	0	57,17561	0,234	0.2462424
33°	0.2277013	0.2277013	0	56,63025	0,248	0.2621858
34°	0.2367864	0.2367864	0	56,09353	0,262	0.2786134
35°	0.245945	0.245945	0	55,565	0,276	0.2955875
36°	0.2551747	0.2551747	0	55,04423	0,291	0.3130722
37°	0.264473	0.264473	0	54,53081	0,306	0.3310932
38°	0.2738376	0.2738376	0	54,02439	0,322	0.3496341
39°	0.2832662	0.2832662	0	53,5246	0,337	0.3686543
40°	0.2927568	0.2927568	0	53,03115	0,353	0.3882305
41°	0.302307	0.302307	0	52,54369	0,370	0.4083307
42°	0.3119148	0.3119148	0	52,06197	0,386	0.4289459
43°	0.3215782	0.3215782	0	51,58572	0,403	0.4500584
44°	0.3312952	0.3312952	0	51,11465	0,420	0.4717164
45°	0.3410638	0.3410638	0	50,64856	0,437	0.4938920
46°	0.3508821	0.3508821	0	50,1872	0,454	0.5166028
47°	0.3607483	0.3607483	0	49,73037	0,472	0.5398150
48°	0.3706605	0.3706605	0	49,27785	0,490	0.5635466
49°	0.3806169	0.3806169	0	48,82945	0,507	0.5877984
50°	0.3906158	0.3906158	0	48,38499	0,525	0.6125786
51°	0.4006553	0.4006553	0	47,94429	0,544	0.6378722
52°	0.4107339	0.4107339	0	47,50719	0,562	0.6636655
53°	0.4208498	0.4208498	0	47,07351	0,580	0.6899894
54°	0.4310014	0.4310014	0	46,64312	0,599	0.7168230
55°	0.441187	0.441187	0	46,21586	0,617	0.7441614

56°	0.4514051	0.4514051	0	45,7916	0,636	0.7720128
57°	0.461654	0.461654	0	45,37019	0,654	0.8003723
58°	0.4719323	0.4719323	0	44,95152	0,673	0.8292488
59°	0.4822383	0.4822384	6.1799E-06	44,53543	0,692	0.8586057
60°	0.4925706	0.4925706	0	44,12185	0,710	0.8884778
61°	0.5029277	0.5029277	0	43,71062	0,729	0.9188495
62°	0.513308	0.513308	0	43,30164	0,748	0.9496996
63°	0.5237103	0.5237103	0	42,89482	0,766	0.9810618
64°	0.5341328	0.5341328	0	42,49005	0,785	1.012904
65°	0.5445744	0.5445744	0	42,08722	0,803	1.045243
66°	0.5550334	0.5550334	0	41,68624	0,821	1.078060
67°	0.5655087	0.5655087	0	41,287	0,839	1.111359
68°	0.5759987	0.5759987	0	40,88942	0,858	1.145136
69°	0.5865021	0.5865021	0	40,49342	0,875	1.179395
70°	0.5970176	0.5970176	0	40,09892	0,893	1.214122
71°	0.6075438	0.6075439	9.8107E-06	39,70581	0,911	1.249312
72°	0.6180795	0.6180795	0	39,31403	0,928	1.284971
73°	0.6286232	0.6286232	0	38,92348	0,945	1.321086
74°	0.6391737	0.6391737	0	38,53411	0,962	1.357665
75°	0.6497298	0.6497298	0	38,14582	0,979	1.394696
76°	0.6602901	0.6602901	0	37,75854	0,995	1.432176
77°	0.6708533	0.6708533	0	37,37222	1,012	1.470104
78°	0.6814184	0.6814183	8.7471E-06	36,98676	1,028	1.508462
79°	0.6919838	0.6919838	0	36,60212	1,043	1.547276
80°	0.7025486	0.7025486	0	36,21822	1,058	1.586511
81°	0.7131114	0.7131114	0	35,83498	1,073	1.626175
82°	0.7236711	0.7236711	0	35,45236	1,088	1.666262
83°	0.7342264	0.7342264	0	35,07028	1,102	1.706781
84°	0.7447762	0.7447762	0	34,68869	1,116	1.747717
85°	0.7553194	0.7553194	0	34,30751	1,129	1.789048
86°	0.7658546	0.7658546	0	33,9267	1,142	1.830801
87°	0.7763808	0.7763808	0	33,54619	1,155	1.872956

88°	0.7868969	0.7868969	0	33,16593	1,167	1.915514
89°	0.7974017	0.7974017	0	32,78585	1,178	1.958465
90°	0.8078941	0.8078941	0	32,4059	1,190	2.001798
91°	0.818373	0.818373	0	32,02603	1,200	2.045525
92°	0.8288372	0.8288372	0	31,64618	1,210	2.089636
93°	0.8392858	0.8392857	7.1018E-06	31,26629	1,220	2.134128
94°	0.8497174	0.8497174	0	30,88631	1,229	2.178987
95°	0.8601313	0.8601313	0	30,50619	1,238	2.224210
96°	0.8705262	0.8705261	6.8469E-06	30,12587	1,246	2.269811
97°	0.880901	0.880901	0	29,74532	1,253	2.315762
98°	0.8912548	0.8912548	0	29,36445	1,260	2.362076
99°	0.9015866	0.9015866	0	28,98323	1,266	2.408742
100°	0.9118952	0.9118952	0	28,60162	1,272	2.455752
101°	0.9221796	0.9221796	0	28,21955	1,277	2.503101
102°	0.932439	0.932439	0	27,83698	1,282	2.550792
103°	0.9426721	0.9426721	0	27,45384	1,285	2.598819
104°	0.9528781	0.9528781	0	27,07011	1,289	2.647179
105°	0.9630559	0.9630559	0	26,68573	1,291	2.695861
106°	0.9732047	0.9732047	0	26,30064	1,293	2.744863
107°	0.9833233	0.9833233	0	25,91478	1,294	2.794181
108°	0.9934109	0.9934109	0	25,52814	1,294	2.843819
109°	1.003466	1.003466	0	25,14063	1,294	2.893764
110°	1.013489	1.013489	0	24,75224	1,293	2.944013
111°	1.023478	1.023478	0	24,36287	1,292	2.994553
112°	1.033432	1.033432	0	23,97251	1,289	3.045419
113°	1.04335	1.04335	0	23,5811	1,286	3.096538
114°	1.053232	1.053232	0	23,18859	1,282	3.147971
115°	1.063076	1.063076	0	22,79493	1,278	3.199671
116°	1.072882	1.072882	0	22,40007	1,272	3.251661
117°	1.082649	1.082649	0	22,00395	1,266	3.303918
118°	1.092375	1.092375	0	21,60654	1,259	3.356445

119°	1.10206	1.10206	0	21,20778	1,252	3.409242
120°	1.111704	1.111704	0	20,8076	1,244	3.462290
121°	1.121305	1.121305	0	20,40599	1,235	3.515591
122°	1.130862	1.130862	0	20,00287	1,225	3.569157
123°	1.140375	1.140375	0	19,59818	1,214	3.622959
124°	1.149843	1.149843	0	19,19189	1,203	3.677011
125°	1.159264	1.159264	0	18,78394	1,191	3.731295
126°	1.168639	1.168639	0	18,37426	1,178	3.785803
127°	1.177967	1.177967	0	17,96284	1,164	3.840550
128°	1.187246	1.187246	0	17,54957	1,150	3.895500
129°	1.196476	1.196476	0	17,13445	1,134	3.950676
130°	1.205655	1.205655	0	16,71739	1,118	4.006063
131°	1.214785	1.214785	0	16,29834	1,102	4.061635
132°	1.223863	1.223863	0	15,87725	1,084	4.117409
133°	1.232889	1.232889	0	15,45405	1,066	4.173388
134°	1.241862	1.241862	0	15,0287	1,047	4.229541
135°	1.250781	1.250781	0	14,60113	1,027	4.285882
136°	1.259646	1.259646	0	14,17129	1,007	4.342378
137°	1.268456	1.268456	0	13,73912	0,986	4.399045
138°	1.277211	1.277211	0	13,30454	0,964	4.455872
139°	1.285909	1.285909	0	12,86752	0,941	4.512846
140°	1.29455	1.29455	0	12,42797	0,918	4.569955
141°	1.303133	1.303133	0	11,98584	0,894	4.627217
142°	1.311658	1.311658	0	11,54106	0,869	4.684591
143°	1.320125	1.320125	0	11,09357	0,843	4.742096
144°	1.328531	1.328531	0	10,6433	0,817	4.799693
145°	1.336877	1.336877	0	10,19018	0,791	4.857391
146°	1.345163	1.345163	0	9,734134	0,763	4.915189
147°	1.353387	1.353387	0	9,275119	0,735	4.973069
148°	1.361549	1.361549	0	8,813026	0,706	5.031021
149°	1.369648	1.369648	0	8,347807	0,677	5.089038
150°	1.377684	1.377684	0	7,879384	0,647	5.147102

151°	1.385656	1.385656	0	7,40768	0,616	5.205205
152°	1.393565	1.393565	0	6,93261	0,585	5.263340
153°	1.401408	1.401408	0	6,454114	0,554	5.321499
154°	1.409186	1.409186	0	5,972098	0,521	5.379675
155°	1.416897	1.416897	0	5,486477	0,489	5.437827
156°	1.424543	1.424543	0	4,997165	0,455	5.495982
157°	1.432121	1.432121	0	4,504086	0,422	5.554100
158°	1.439632	1.439632	0	4,007144	0,387	5.612176
159°	1.447075	1.447075	0	3,506257	0,353	5.670204
160°	1.45445	1.45445	0	3,001319	0,317	5.728161
161°	1.461756	1.461756	0	2,492265	0,282	5.786051
162°	1.468992	1.468992	0	1,978982	0,246	5.843827
163°	1.476159	1.476159	0	1,461352	0,209	5.901510
164°	1.483255	1.483255	0	0,9392976	0,173	5.959071
165°	1.490281	1.490281	0	0,4127013	0,135	6.016496
166°	1.497235	1.497235	0	0,118531	0,098	6.073750
167°	1.504118	1.504118	0	0,6545175	0,060	6.130861
168°	1.51093	1.51093	0	1,195368	0,022	6.187778
169°	1.517669	1.517669	0	1,741193	0,016	6.244498
170°	1.524335	1.524335	0	2,292126	0,055	6.301000
171°	1.530929	1.530929	0	2,848268	0,093	6.357282
172°	1.537449	1.537449	0	3,409762	0,132	6.413302
173°	1.543895	1.543895	0	3,976725	0,171	6.469074
174°	1.550267	1.550267	0	4,549292	0,211	6.524554
175°	1.556565	1.556565	0	5,127618	0,250	6.579749
176°	1.562788	1.562788	0	5,711805	0,289	6.634618
177°	1.568936	1.568936	0	6,302035	0,329	6.689166
178°	1.575009	1.575009	0	6,898433	0,368	6.743353
179°	1.581007	1.581007	0	7,50117	0,408	6.797178
180°	1.586928	1.586928	0	8,110403	0,448	6.850616
181°	1.592774	1.592774	0	8,726289	0,487	6.903657
182°	1.598542	1.598542	0	9,348998	0,526	6.956260

183°	1.604235	1.604235	0	9,978709	0,566	7.008436
184°	1.60985	1.60985	0	10,6156	0,605	7.060156
185°	1.615389	1.615389	0	11,25987	0,644	7.111392
186°	1.62085	1.62085	0	11,9117	0,683	7.162140
187°	1.626234	1.626234	0	12,57129	0,722	7.212371
188°	1.63154	1.63154	0	13,23887	0,760	7.262069
189°	1.636768	1.636768	0	13,91463	0,798	7.311231
190°	1.641918	1.641918	0	14,59881	0,836	7.359813
191°	1.64699	1.64699	0	15,29164	0,874	7.407805
192°	1.651984	1.651984	0	15,99335	0,911	7.455207
193°	1.656899	1.656899	0	16,7042	0,948	7.501981
194°	1.661736	1.661736	0	17,42448	0,984	7.548118
195°	1.666493	1.666493	0	18,15441	1,020	7.593587
196°	1.671172	1.671172	0	18,8943	1,056	7.638395
197°	1.675772	1.675772	0	19,64445	1,090	7.682503
198°	1.680293	1.680293	0	20,40515	1,125	7.725904
199°	1.684735	1.684735	0	21,17673	1,159	7.768579
200°	1.689098	1.689098	0	21,95952	1,192	7.810522
201°	1.693382	1.693382	0	22,7539	1,225	7.851694
202°	1.697586	1.697586	0	23,56019	1,257	7.892085
203°	1.701711	1.701711	0	24,37879	1,288	7.931693
204°	1.705757	1.705757	0	25,21011	1,319	7.970502
205°	1.709723	1.709723	0	26,05456	1,348	8.008473
206°	1.71361	1.71361	0	26,91258	1,377	8.045629
207°	1.717417	1.717417	0	27,78463	1,406	8.081925
208°	1.721146	1.721146	0	28,6712	1,433	8.117355
209°	1.724795	1.724795	0	29,57279	1,460	8.151915
210°	1.728364	1.728364	0	30,48997	1,485	8.185578
211°	1.731855	1.731855	0	31,42326	1,510	8.218338
212°	1.735266	1.735266	0	32,37328	1,534	8.250196
213°	1.738599	1.738599	0	33,34066	1,556	8.281124
214°	1.741852	1.741852	0	34,32606	1,578	8.311107

215°	1.745026	1.745026	0	35,33018	1,599	8.340146
216°	1.748122	1.748122	0	36,35376	1,619	8.368237
217°	1.751139	1.751138	6.8075E-06	37,39765	1,637	8.395360
218°	1.754077	1.754077	0	38,46262	1,654	8.421517
219°	1.756936	1.756936	0	39,54957	1,671	8.446688
220°	1.759718	1.759718	0	40,65947	1,686	8.470866
221°	1.762421	1.762421	0	41,79335	1,699	8.494061
222°	1.765046	1.765046	0	42,95228	1,712	8.516244
223°	1.767594	1.767594	0	44,13742	1,723	8.537436
224°	1.770063	1.770063	0	45,35	1,733	8.557609
225°	1.772455	1.772455	0	46,59136	1,742	8.576760
226°	1.77477	1.77477	0	47,86293	1,749	8.594913
227°	1.777008	1.777008	0	49,16627	1,755	8.612044
228°	1.779169	1.779169	0	50,50304	1,760	8.628143
229°	1.781254	1.781254	0	51,875	1,763	8.643230
230°	1.783262	1.783262	0	53,28418	1,764	8.657303
231°	1.785193	1.785193	0	54,73266	1,764	8.670344
232°	1.787049	1.787049	0	56,22273	1,763	8.682380
233°	1.78883	1.78883	0	57,75695	1,760	8.693391
234°	1.790535	1.790535	0	59,33807	1,755	8.703387
235°	1.792165	1.792165	6.6516E-06	60,9691	1,749	8.712387
236°	1.79372	1.79372	0	62,65339	1,742	8.720371
237°	1.795201	1.795201	0	64,39466	1,732	8.727367
238°	1.796608	1.796608	0	66,19699	1,721	8.733367
239°	1.797941	1.797941	0	68,06494	1,709	8.738383
240°	1.7992	1.7992	0	70,00356	1,694	8.742415
241°	1.800387	1.800387	6.6213E-06	72,01856	1,678	8.745488
242°	1.8015	1.8015	6.6172E-06	74,11644	1,661	8.747599
243°	1.802541	1.802541	0	76,30446	1,641	8.748749
244°	1.803511	1.803511	0	78,59086	1,620	8.748978
245°	1.804408	1.804408	0	80,98525	1,597	8.748280
246°	1.805235	1.805235	0	83,49858	1,572	8.746665

247°	1.80599	1.80599	0	86,14357	1,545	8.744161
248°	1.806675	1.806675	0	88,93518	1,517	8.740746
249°	1.807291	1.807291	6.5960E-06	91,89096	1,486	8.736477
250°	1.807836	1.807836	0	95,03185	1,454	8.731362
251°	1.808313	1.808313	0	98,38319	1,420	8.725396
252°	1.80872	1.80872	0	101,9756	1,384	8.718618
253°	1.80906	1.80906	0	105,8472	1,346	8.711039
254°	1.809332	1.809332	0	110,0456	1,306	8.702661
255°	1.809536	1.809536	0	114,6316	1,264	8.693528
256°	1.809674	1.809674	6.5873E-06	119,6846	1,220	8.683651
257°	1.809745	1.809745	0	125,3104	1,175	8.673045
258°	1.809751	1.809751	0	131,6551	1,127	8.661756
259°	1.809691	1.809691	0	138,9272	1,077	8.649770
260°	1.809566	1.809566	6.5877E-06	147,4383	1,026	8.637129
261°	1.809378	1.809378	0	157,6835	0,972	8.623879
262°	1.809125	1.809125	6.5893E-06	170,5159	0,916	8.610007
263°	1.808809	1.808809	0	187,5903	0,859	8.595561
264°	1.808431	1.808431	0	212,7823	0,799	8.580564
265°	1.80799	1.80799	0	259,1763	0,737	8.565029
266°	1.807488	1.807488	0	561,416	0,673	8.549014
267°	1.806925	1.806925	0	not applicable	0,607	8.532533
268°	1.806302	1.806302	0	not applicable	0,540	8.515613
269°	1.805619	1.805619	0	not applicable	0,470	8.498287
270°	1.804876	1.804876	0	not applicable	0,398	8.480609
271°	1.804076	1.804076	0	not applicable	0,324	8.462594

272°	1.803217	1.803217	0	not applicable	0,248	8.444266
273°	1.802301	1.802301	0	not applicable	0,170	8.425694
274°	1.801328	1.801328	0	not applicable	0,090	8.406889
275°	1.800299	1.800299	0	not applicable	0,007	8.387922
276°	1.799214	1.799214	0	not applicable	0,077	8.368828
277°	1.798075	1.798075	0	not applicable	0,163	8.349646
278°	1.796882	1.796882	0	not applicable	0,251	8.330433
279°	1.795635	1.795635	0	not applicable	0,342	8.311234
280°	1.794335	1.794335	0	not applicable	0,434	8.292134
281°	1.792984	1.792984	0	not applicable	0,529	8.273188
282°	1.791581	1.791581	0	not applicable	0,625	8.254468
283°	1.790127	1.790127	0	not applicable	0,723	8.236060
284°	1.788623	1.788623	6.6648E-06	not applicable	0,824	8.218086
285°	1.787069	1.787069	6.6706E-06	not applicable	0,926	8.200601
286°	1.785467	1.785468	6.6766E-06	not applicable	1,031	8.183775

287°	1.783818	1.783818	0	not applicable	1,137	8.167762
288°	1.782121	1.782121	0	not applicable	1,245	8.152702
289°	1.780377	1.780377	0	not applicable	1,356	8.138865
290°	1.778588	1.778588	0	not applicable	1,468	8.126489
291°	1.776754	1.776754	0	not applicable	1,582	8.115925
292°	1.774875	1.774875	0	not applicable	1,698	8.107609
293°	1.772953	1.772953	0	not applicable	1,816	8.102143
294°	1.770988	1.770988	0	not applicable	1,936	8.100221
295°	1.768982	1.768982	0	not applicable	2,058	8.102886
296°	1.766934	1.766934	0	not applicable	2,181	8.111502
297°	1.764845	1.764845	0	not applicable	2,307	8.127923
298°	1.762717	1.762717	0	not applicable	2,434	8.154710
299°	1.76055	1.76055	0	not applicable	2,563	8.195291
300°	1.758345	1.758345	0	not applicable	2,694	8.254137
301°	1.756103	1.756103	0	not applicable	2,827	8.336226
302°	1.753824	1.753824	0	not applicable	2,961	8.446418

303°	1.75151	1.75151	0	not applicable	3,097	8.587745
304°	1.74916	1.74916	0	not applicable	3,235	8.760194
305°	1.746777	1.746777	0	not applicable	3,374	8.960292
306°	1.74436	1.74436	0	not applicable	3,516	9.183186
307°	1.741911	1.741911	0	not applicable	3,658	9.423730
308°	1.73943	1.73943	0	not applicable	3,803	9.677319
309°	1.736919	1.736919	0	not applicable	3,949	9.940503
310°	1.734377	1.734377	0	not applicable	4,096	10.21083
311°	1.731806	1.731806	0	not applicable	4,245	10.48622
312°	1.729208	1.729207	6.8938E-06	not applicable	4,396	10.76540
313°	1.726581	1.726581	0	not applicable	4,548	11.04738
314°	1.723928	1.723928	0	not applicable	4,702	11.33137
315°	1.721249	1.721249	0	not applicable	4,857	11.61676
316°	1.718545	1.718545	0	not applicable	5,013	11.90319
317°	1.715817	1.715817	0	not applicable	5,171	12.19025
318°	1.713066	1.713066	0	not applicable	5,330	12.47768

319°	1.710293	1.710293	0	not applicable	5,490	12.76533
320°	1.707498	1.707498	6.9815E-06	not applicable	5,652	13.05293
321°	1.704682	1.704682	0	not applicable	5,815	13.34037
322°	1.701847	1.701847	0	not applicable	5,979	13.62755
323°	1.698993	1.698993	0	not applicable	6,144	13.91430
324°	1.69612	1.69612	0	not applicable	6,311	14.20057
325°	1.693231	1.693231	0	not applicable	6,479	14.48628
326°	1.690325	1.690325	0	not applicable	6,647	14.77135
327°	1.687403	1.687403	0	not applicable	6,817	15.05571
328°	1.684467	1.684467	0	not applicable	6,988	15.33934
329°	1.681518	1.681518	0	not applicable	7,160	15.62212
330°	1.678555	1.678555	0	not applicable	7,332	15.90406
331°	1.675581	1.675581	0	not applicable	7,506	16.18507
332°	1.672595	1.672595	0	not applicable	7,681	16.46516
333°	1.6696	1.6696	0	not applicable	7,856	16.74424
334°	1.666594	1.666594	0	not applicable	8,032	17.02231

335°	1.663581	1.663581	0	not applicable	8,209	17.29931
336°	1.660559	1.66056	7.1788E-06	not applicable	8,387	17.57524
337°	1.657531	1.657531	0	not applicable	8,565	17.85004
338°	1.654498	1.654498	0	not applicable	8,744	18.12369
339°	1.651459	1.651459	7.2184E-06	not applicable	8,924	18.39618
340°	1.648416	1.648416	0	not applicable	9,104	18.66743
341°	1.645369	1.645369	0	not applicable	9,285	18.93744
342°	1.642321	1.642321	0	not applicable	9,466	19.20623
343°	1.63927	1.63927	0	not applicable	9,648	19.47371
344°	1.636219	1.636219	0	not applicable	9,830	19.73988
345°	1.633169	1.633169	0	not applicable	10,013	20.00472
346°	1.630119	1.630119	0	not applicable	10,196	20.26821
347°	1.627071	1.627071	0	not applicable	10,379	20.53031
348°	1.624026	1.624026	0	not applicable	10,562	20.79101
349°	1.620984	1.620984	0	not applicable	10,746	21.05029
350°	1.617947	1.617947	0	not applicable	10,930	21.30812

351°	1.614915	1.614915	0	not applicable	11,114	21.56447
352°	1.611889	1.611889	0	not applicable	11,298	21.81933
353°	1.608871	1.60887	7.4095E-06	not applicable	11,482	22.07269
354°	1.605859	1.605859	0	not applicable	11,666	22.32451
355°	1.602857	1.602857	0	not applicable	11,850	22.57478
356°	1.599864	1.599864	7.4512E-06	not applicable	12,034	22.82348
357°	1.596881	1.596881	0	not applicable	12,218	23.07058
358°	1.593909	1.593909	0	not applicable	12,402	23.31607
359°	1.590949	1.590949	0	not applicable	12,585	23.55994
360°	1.588002	1.588002	0	not applicable	12,768	23.80213

ANNEXE 03

Table 5.9: *Test d'exactitude de l'équation (85) comparée avec l'équation de (32), équation de Saâtçi (80) et l'équation (82) de Akgiray(Conduites en série).*

θ	Manning Equation (32)	Proposed Equation (85) Ou (84)	Error %	Saatçi equation Error %	Akgiray equation Error %
1°	0,02	0,02	0,00	2,69E+04	9.56E-03
2°	0,03	0,03	0,00	1,34E+04	4.58E-03
3°	0,05	0,05	0,00	8,90E+03	3.26E-03
4°	0,07	0,07	0,00	6,65E+03	9.93E-03
5°	0,09	0,09	0,00	5,30E+03	1.43E-02
6°	0,10	0,10	0,00	4,40E+03	2.05E-02
7°	0,12	0,12	0,00	3,76E+03	2.91E-02
8°	0,14	0,14	0,00	3,27E+03	3.76E-02
9°	0,16	0,16	0,00	2,90E+03	4.75E-02
10°	0,17	0,17	0,00	2,60E+03	5.86E-02
11°	0,19	0,19	0,00	2,35E+03	7.10E-02
12°	0,21	0,21	0,00	2,15E+03	8.45E-02
13°	0,23	0,23	0,00	1,97E+03	9.93E-02
14°	0,24	0,24	0,00	1,82E+03	0.115
15°	0,26	0,26	0,00	1,70E+03	0.132
16°	0,28	0,28	0,00	1,58E+03	0.151
17°	0,30	0,30	0,00	1,48E+03	0.170
18°	0,31	0,31	0,00	1,39E+03	0.191
19°	0,33	0,33	0,00	1,32E+03	0.213
20°	0,35	0,35	0,00	1,24E+03	0.236
21°	0,37	0,37	0,00	1,18E+03	0.261
22°	0,38	0,38	0,00	1,12E+03	0.287
23°	0,40	0,40	0,00	1,07E+03	0.314
24°	0,42	0,42	0,00	1,02E+03	0.342
25°	0,44	0,44	0,00	9,72E+02	0.371

26°	0,45	0,45	0,00	9,30E+02	0.402
27°	0,47	0,47	0,00	8,91E+02	0.434
28°	0,49	0,49	0,00	8,55E+02	0.467
29°	0,51	0,51	0,00	8,22E+02	0.502
30°	0,52	0,52	0,00	7,90E+02	0.537
31°	0,54	0,54	0,00	7,61E+02	0.574
32°	0,56	0,56	0,00	7,33E+02	0.612
33°	0,58	0,58	0,00	7,07E+02	0.652
34°	0,59	0,59	0,00	6,83E+02	0.693
35°	0,61	0,61	0,00	6,60E+02	0.735
36°	0,63	0,63	0,00	6,38E+02	0.778
37°	0,65	0,65	0,00	6,17E+02	0.822
38°	0,66	0,66	0,00	5,98E+02	0.868
39°	0,68	0,68	0,00	5,79E+02	0.915
40°	0,70	0,70	0,00	5,61E+02	0.964
41°	0,72	0,72	0,00	5,45E+02	1.013
42°	0,73	0,73	0,00	5,28E+02	1.064
43°	0,75	0,75	0,00	5,13E+02	1.116
44°	0,77	0,77	0,00	4,98E+02	1.169
45°	0,79	0,79	0,00	4,84E+02	1.224
46°	0,80	0,80	0,00	4,71E+02	1.279
47°	0,82	0,82	0,00	4,58E+02	1.336
48°	0,84	0,84	0,00	4,46E+02	1.395
49°	0,85	0,85	0,00	4,34E+02	1.454
50°	0,87	0,87	0,00	4,22E+02	1.515
51°	0,89	0,89	0,00	4,11E+02	1.577
52°	0,91	0,91	0,00	4,01E+02	1.640
53°	0,92	0,92	0,00	3,91E+02	1.704
54°	0,94	0,94	0,00	3,81E+02	1.769
55°	0,96	0,96	0,00	3,71E+02	1.836
56°	0,98	0,98	0,00	3,62E+02	1.904
57°	0,99	0,99	0,00	3,53E+02	1.973

58°	1,01	1,01	0,00	3,45E+02	2.043
59°	1,03	1,03	0,00	3,36E+02	2.114
60°	1,05	1,05	0,00	3,28E+02	2.187
61°	1,06	1,06	0,00	3,21E+02	2.260
62°	1,08	1,08	0,00	3,13E+02	2.335
63°	1,10	1,10	0,00	3,06E+02	2.411
64°	1,12	1,12	0,00	2,99E+02	2.488
65°	1,13	1,13	0,00	2,92E+02	2.566
66°	1,15	1,15	0,00	2,85E+02	2.645
67°	1,17	1,17	0,00	2,79E+02	2.725
68°	1,19	1,19	0,00	2,72E+02	2.806
69°	1,20	1,20	0,00	2,66E+02	2.888
70°	1,22	1,22	0,00	2,60E+02	2.971
71°	1,24	1,24	0,00	2,54E+02	3.056
72°	1,26	1,26	0,00	2,49E+02	3.141
73°	1,27	1,27	0,00	2,43E+02	3.227
74°	1,29	1,29	0,00	2,38E+02	3.315
75°	1,31	1,31	0,00	2,32E+02	3.403
76°	1,33	1,33	0,00	2,27E+02	3.492
77°	1,34	1,34	0,00	2,22E+02	3.582
78°	1,36	1,36	0,00	2,17E+02	3.673
79°	1,38	1,38	0,00	2,12E+02	3.765
80°	1,40	1,40	0,00	2,08E+02	3.858
81°	1,41	1,41	0,00	2,03E+02	3.952
82°	1,43	1,43	0,00	1,99E+02	4.047
83°	1,45	1,45	0,00	1,94E+02	4.142
84°	1,47	1,47	0,00	1,90E+02	4.239
85°	1,48	1,48	0,00	1,86E+02	4.336
86°	1,50	1,50	0,00	1,82E+02	4.434
87°	1,52	1,52	0,00	1,78E+02	4.533
88°	1,54	1,54	0,00	1,74E+02	4.632
89°	1,55	1,55	0,00	1,70E+02	4.733

90°	1,57	1,57	0,00	1,66E+02	4.834
91°	1,59	1,59	0,00	1,63E+02	4.936
92°	1,60	1,60	0,00	1,59E+02	5.038
93°	1,62	1,62	0,00	1,55E+02	5.142
94°	1,64	1,64	0,00	1,52E+02	5.246
95°	1,66	1,66	0,00	1,48E+02	5.351
96°	1,67	1,67	0,00	1,45E+02	5.456
97°	1,69	1,69	0,00	1,42E+02	5.562
98°	1,71	1,71	0,00	1,38E+02	5.669
99°	1,73	1,73	0,00	1,35E+02	5.776
100°	1,74	1,74	0,00	1,32E+02	5.884
101°	1,76	1,76	0,00	1,29E+02	5.993
102°	1,78	1,78	0,00	1,26E+02	6.102
103°	1,80	1,80	0,00	1,23E+02	6.212
104°	1,81	1,81	0,00	1,20E+02	6.323
105°	1,83	1,83	0,00	1,17E+02	6.434
106°	1,85	1,85	0,00	1,14E+02	6.545
107°	1,87	1,87	0,00	1,12E+02	6.657
108°	1,88	1,88	0,00	1,09E+02	6.770
109°	1,90	1,90	0,00	1,06E+02	6.883
110°	1,92	1,92	0,00	1,04E+02	6.996
111°	1,94	1,94	0,00	1,01E+02	7.111
112°	1,95	1,95	0,00	9,84E+01	7.225
113°	1,97	1,97	0,00	9,59E+01	7.340
114°	1,99	1,99	0,00	9,34E+01	7.455
115°	2,01	2,01	0,00	9,09E+01	7.571
116°	2,02	2,02	0,00	8,85E+01	7.688
117°	2,04	2,04	0,00	8,61E+01	7.804
118°	2,06	2,06	0,00	8,38E+01	7.921
119°	2,08	2,08	0,00	8,15E+01	8.039
120°	2,09	2,09	0,00	7,92E+01	8.157
121°	2,11	2,11	0,00	7,69E+01	8.275

122°	2,13	2,13	0,00	7,47E+01	8.394
123°	2,15	2,15	0,00	7,25E+01	8.512
124°	2,16	2,16	0,00	7,04E+01	8.632
125°	2,18	2,18	0,00	6,82E+01	8.751
126°	2,20	2,20	0,00	6,61E+01	8.871
127°	2,22	2,22	0,00	6,40E+01	8.991
128°	2,23	2,23	0,00	6,20E+01	9.111
129°	2,25	2,25	0,00	6,00E+01	9.232
130°	2,27	2,27	0,00	5,80E+01	9.352
131°	2,29	2,29	0,00	5,60E+01	9.473
132°	2,30	2,30	0,00	5,41E+01	9.595
133°	2,32	2,32	0,00	5,21E+01	9.716
134°	2,34	2,34	0,00	5,03E+01	9.838
135°	2,36	2,36	0,00	4,84E+01	9.959
136°	2,37	2,37	0,00	4,65E+01	10.086
137°	2,39	2,39	0,00	4,47E+01	10.203
138°	2,41	2,41	0,00	4,29E+01	10.325
139°	2,42	2,42	0,00	4,11E+01	10.447
140°	2,44	2,44	0,00	3,93E+01	10.570
141°	2,46	2,46	0,00	3,76E+01	10.692
142°	2,48	2,48	0,00	3,59E+01	10.814
143°	2,49	2,49	0,00	3,42E+01	10.937
144°	2,51	2,51	0,00	3,25E+01	11.059
145°	2,53	2,53	0,00	3,08E+01	11.181
146°	2,55	2,55	0,00	2,92E+01	11.303
147°	2,56	2,56	0,00	2,76E+01	11.426
148°	2,58	2,58	0,00	2,59E+01	11.548
149°	2,60	2,60	0,00	2,43E+01	11.670
150°	2,62	2,62	0,00	2,28E+01	11.792
151°	2,63	2,63	0,00	2,12E+01	11.913
152°	2,65	2,65	0,00	1,97E+01	12.035
153°	2,67	2,67	0,00	1,82E+01	12.156

154°	2,69	2,69	0,00	1,66E+01	12.278
155°	2,70	2,70	0,00	1,52E+01	12.399
156°	2,72	2,72	0,00	1,37E+01	12.519
157°	2,74	2,74	0,00	1,22E+01	12.640
158°	2,76	2,76	0,00	1,08E+01	12.760
159°	2,77	2,77	0,00	9,33E+00	12.879
160°	2,79	2,79	0,00	7,92E+00	12.999
161°	2,81	2,81	0,00	6,51E+00	13.118
162°	2,83	2,83	0,00	5,12E+00	13.236
163°	2,84	2,84	0,00	3,75E+00	13.354
164°	2,86	2,86	0,00	2,39E+00	13.472
165°	2,88	2,88	0,00	1,04E+00	13.589
166°	2,90	2,90	0,00	2,96E-01	13.706
167°	2,91	2,91	0,00	1,62E+00	13.8222
168°	2,93	2,93	0,00	2,93E+00	13.937
169°	2,95	2,95	0,00	4,22E+00	14.052
170°	2,97	2,97	0,00	5,51E+00	14.166
171°	2,98	2,98	0,00	6,78E+00	14.280
172°	3,00	3,00	0,00	8,04E+00	14.392
173°	3,02	3,02	0,00	9,29E+00	14.504
174°	3,04	3,04	0,00	1,05E+01	14.616
175°	3,05	3,05	0,00	1,18E+01	14.726
176°	3,07	3,07	0,00	1,30E+01	14.836
177°	3,09	3,09	0,00	1,42E+01	14.945
178°	3,11	3,11	0,00	1,54E+01	15.053
179°	3,12	3,12	0,00	1,65E+01	15.160
180°	3,14	3,14	0,00	1,77E+01	15.266
181°	3,16	3,16	0,00	1,89E+01	15.371
182°	3,17	3,17	0,00	2,00E+01	15.475
183°	3,19	3,19	0,00	2,12E+01	15.578
184°	3,21	3,21	0,00	2,23E+01	15.680
185°	3,23	3,23	0,00	2,34E+01	15.780

186°	3,24	3,24	0,00	2,45E+01	15.880
187°	3,26	3,26	0,00	2,56E+01	15.979
188°	3,28	3,28	0,00	2,67E+01	16.076
189°	3,30	3,30	0,00	2,78E+01	16.172
190°	3,31	3,31	0,00	2,89E+01	16.267
191°	3,33	3,33	0,00	2,99E+01	16.360
192°	3,35	3,35	0,00	3,10E+01	16.452
193°	3,37	3,37	0,00	3,20E+01	16.543
194°	3,38	3,38	0,00	3,31E+01	16.633
195°	3,40	3,40	0,00	3,41E+01	16.721
196°	3,42	3,42	0,00	3,51E+01	16.807
197°	3,44	3,44	0,00	3,61E+01	16.893
198°	3,45	3,45	0,00	3,71E+01	16.976
199°	3,47	3,47	0,00	3,81E+01	17.058
200°	3,49	3,49	0,00	3,91E+01	17.139
201°	3,51	3,51	0,00	4,01E+01	17.218
202°	3,52	3,52	0,00	4,11E+01	17.296
203°	3,54	3,54	0,00	4,20E+01	17.371
204°	3,56	3,56	0,00	4,30E+01	17.446
205°	3,58	3,58	0,00	4,39E+01	17.518
206°	3,59	3,59	0,00	4,49E+01	17.589
207°	3,61	3,61	0,00	4,58E+01	17.658
208°	3,63	3,63	0,00	4,68E+01	17.726
209°	3,65	3,65	0,00	4,77E+01	17.791
210°	3,66	3,66	0,00	4,86E+01	17.855
211°	3,68	3,68	0,00	4,95E+01	17.918
212°	3,70	3,70	0,00	5,04E+01	17.978
213°	3,72	3,72	0,00	5,13E+01	18.036
214°	3,73	3,73	0,00	5,22E+01	18.093
215°	3,75	3,75	0,00	5,31E+01	18.148
216°	3,77	3,77	0,00	5,39E+01	18.201
217°	3,79	3,79	0,00	5,48E+01	18.252

218°	3,80	3,80	0,00	5,57E+01	18.302
219°	3,82	3,82	0,00	5,65E+01	18.349
220°	3,84	3,84	0,00	5,74E+01	18.394
221°	3,86	3,86	0,00	5,82E+01	18.438
222°	3,87	3,87	0,00	5,91E+01	18.480
223°	3,89	3,89	0,00	5,99E+01	18.519
224°	3,91	3,91	0,00	6,07E+01	18.557
225°	3,93	3,93	0,00	6,16E+01	18.593
226°	3,94	3,94	0,00	6,24E+01	18.627
227°	3,96	3,96	0,00	6,32E+01	18.659
228°	3,98	3,98	0,00	6,40E+01	18.689
229°	3,99	3,99	0,00	6,48E+01	18.718
230°	4,01	4,01	0,00	6,56E+01	18.744
231°	4,03	4,03	0,00	6,64E+01	18.768
232°	4,05	4,05	0,00	6,72E+01	18.791
233°	4,06	4,06	0,00	6,80E+01	18.811
234°	4,08	4,08	0,00	6,88E+01	18.830
235°	4,10	4,10	0,00	6,96E+01	18.847
236°	4,12	4,12	0,00	7,04E+01	18.862
237°	4,13	4,13	0,00	7,11E+01	18.875
238°	4,15	4,15	0,00	7,19E+01	18.886
239°	4,17	4,17	0,00	7,27E+01	18.895
240°	4,19	4,19	0,00	7,35E+01	18.903
241°	4,20	4,20	0,00	7,42E+01	18.909
242°	4,22	4,22	0,00	7,50E+01	18.913
243°	4,24	4,24	0,00	7,58E+01	18.915
244°	4,26	4,26	0,00	7,65E+01	18.915
245°	4,27	4,27	0,00	7,73E+01	18.914
246°	4,29	4,29	0,00	7,81E+01	18.911
247°	4,31	4,31	0,00	7,88E+01	18.906
248°	4,33	4,33	0,00	7,96E+01	18.900
249°	4,34	4,34	0,00	8,04E+01	18.892

250°	4,36	4,36	0,00	8,12E+01	18.882
251°	4,38	4,38	0,00	8,20E+01	18.871
252°	4,40	4,40	0,00	8,28E+01	18.859
253°	4,41	4,41	0,00	8,36E+01	18.844
254°	4,43	4,43	0,00	8,44E+01	18.829
255°	4,45	4,45	0,00	8,52E+01	18.812
256°	4,47	4,47	0,00	8,60E+01	18.793
257°	4,48	4,48	0,00	8,69E+01	18.773
258°	4,50	4,50	0,00	8,78E+01	18.752
259°	4,52	4,52	0,00	8,87E+01	18.730
260°	4,54	4,54	0,00	8,96E+01	18.706
261°	4,55	4,55	0,00	9,06E+01	18.681
262°	4,57	4,57	0,00	9,17E+01	18.656
263°	4,59	4,59	0,00	9,29E+01	18.628
264°	4,61	4,61	0,00	9,42E+01	18.600
265°	4,62	4,62	0,00	9,59E+01	18.571
266°	4,64	4,64	0,00	9,91E+01	18.541
267°	4,66	4,66	0,00	not applicable	18.510
268°	4,68	4,68	0,00	not applicable	18.479
269°	4,69	4,69	0,00	not applicable	18.446
270°	4,71	4,71	0,00	not applicable	18.413
271°	4,73	4,73	0,00	not applicable	18.379
272°	4,74	4,74	0,00	not applicable	18.344
273°	4,76	4,76	0,00	not applicable	18.309

274°	4,78	4,78	0,00	not applicable	18.274
275°	4,80	4,80	0,00	not applicable	18.238
276°	4,81	4,81	0,00	not applicable	18.202
277°	4,83	4,83	0,00	not applicable	18.166
278°	4,85	4,85	0,00	not applicable	18.130
279°	4,87	4,87	0,00	not applicable	18.093
280°	4,88	4,88	0,00	not applicable	18.057
281°	4,90	4,90	0,00	not applicable	18.021
282°	4,92	4,92	0,00	not applicable	17.986
283°	4,94	4,94	0,00	not applicable	17.951
284°	4,95	4,95	0,00	not applicable	17.917
285°	4,97	4,97	0,00	not applicable	17.884
286°	4,99	4,99	0,00	not applicable	17.852
287°	5,01	5,01	0,00	not applicable	17.822
288°	5,02	5,02	0,00	not applicable	17.793
289°	5,04	5,04	0,00	not applicable	17.767

290°	5,06	5,06	0,00	not applicable	17.743
291°	5,08	5,08	0,00	not applicable	17.723
292°	5,09	5,09	0,00	not applicable	17.707
293°	5,11	5,11	0,00	not applicable	17.697
294°	5,13	5,13	0,00	not applicable	17.693
295°	5,15	5,15	0,00	not applicable	17.698
296°	5,16	5,16	0,00	not applicable	17.715
297°	5,18	5,18	0,00	not applicable	17.746
298°	5,20	5,20	0,00	not applicable	17.797
299°	5,22	5,22	0,00	not applicable	17.874
300°	5,23	5,23	0,00	not applicable	17.985
301°	5,25	5,25	0,00	not applicable	18.141
302°	5,27	5,27	0,00	not applicable	18.348
303°	5,29	5,29	0,00	not applicable	18.614
304°	5,30	5,30	0,00	not applicable	18.936
305°	5,32	5,32	0,00	not applicable	19.308

306°	5,34	5,34	0,00	not applicable	19.719
307°	5,36	5,36	0,00	not applicable	20.159
308°	5,37	5,37	0,00	not applicable	20.620
309°	5,39	5,39	0,00	not applicable	21.094
310°	5,41	5,41	0,00	not applicable	21.577
311°	5,43	5,43	0,00	not applicable	22.065
312°	5,44	5,44	0,00	not applicable	22.555
313°	5,46	5,46	0,00	not applicable	23.046
314°	5,48	5,48	0,00	not applicable	23.536
315°	5,50	5,50	0,00	not applicable	24.024
316°	5,51	5,51	0,00	not applicable	24.509
317°	5,53	5,53	0,00	not applicable	24.991
318°	5,55	5,55	0,00	not applicable	25.469
319°	5,56	5,56	0,00	not applicable	25.943
320°	5,58	5,58	0,00	not applicable	26.413
321°	5,60	5,60	0,00	not applicable	26.879

322°	5,62	5,62	0,00	not applicable	27.340
323°	5,63	5,63	0,00	not applicable	27.797
324°	5,65	5,65	0,00	not applicable	28.248
325°	5,67	5,67	0,00	not applicable	28.695
326°	5,69	5,69	0,00	not applicable	29.137
327°	5,70	5,70	0,00	not applicable	29.574
328°	5,72	5,72	0,00	not applicable	30.006
329°	5,74	5,74	0,00	not applicable	30.433
330°	5,76	5,76	0,00	not applicable	30.856
331°	5,77	5,77	0,00	not applicable	31.273
332°	5,79	5,79	0,00	not applicable	31.685
333°	5,81	5,81	0,00	not applicable	32.093
334°	5,83	5,83	0,00	not applicable	32.496
335°	5,84	5,84	0,00	not applicable	32.894
336°	5,86	5,86	0,00	not applicable	33.287
337°	5,88	5,88	0,00	not applicable	33.675

338°	5,90	5,90	0,00	not applicable	34.058
339°	5,91	5,91	0,00	not applicable	34.437
340°	5,93	5,93	0,00	not applicable	34.811
341°	5,95	5,95	0,00	not applicable	35.180
342°	5,97	5,97	0,00	not applicable	35.545
343°	5,98	5,98	0,00	not applicable	35.905
344°	6,00	6,00	0,00	not applicable	36.261
345°	6,02	6,02	0,00	not applicable	36.612
346°	6,04	6,04	0,00	not applicable	36.959
347°	6,05	6,05	0,00	not applicable	37.301
348°	6,07	6,07	0,00	not applicable	37.638
349°	6,09	6,09	0,00	not applicable	37.972
350°	6,11	6,11	0,00	not applicable	38.301
351°	6,12	6,12	0,00	not applicable	38.626
352°	6,14	6,14	0,00	not applicable	38.946
353°	6,16	6,16	0,00	not applicable	39.262

354°	6,18	6,18	0,00	not applicable	39.575
355°	6,19	6,19	0,00	not applicable	39.883
356°	6,21	6,21	0,00	not applicable	40.186
357°	6,23	6,23	0,00	not applicable	40.486
358°	6,25	6,25	0,00	not applicable	40.782
359°	6,26	6,26	0,00	not applicable	41.074
360°	6,28	6,28	0,00	not applicable	41.361

ANNEXE 04

Table 5.10: *Test d'exactitude de l'équation (103), (102), (112) et (113) comparées avec l'équation de (32), équation de Saâtçi (80) et l'équation (82) de Akgiray(Conduites en parallèle).*

θ	Manning Equation (32)	Proposed Equation (103,(102),(112) Et (113)	Erreurr %	Saatçi equation Ereur %	Giroud equation Erreur %	Akgiray equation Erreur %
1°	0.002175079	0.002175079	0	89.3474	0,004	3.82208E-03
2°	0.00548069	0.00548069	0	85,94367	0,004	1.83529E-03
3°	0.009410257	0.009410258	9.8968E-06	83,46836	0,005	1.30634E-03
4°	0.01380879	0.01380879	0	81,45177	0,007	3.97250E-03
5°	0.01859214	0.01859214	0	79,71937	0,009	5.74054E-03
6°	0.02370587	0.02370587	0	78,18411	0,012	8.23439E-03
7°	0.02911126	0.02911126	6.3983E-06	76,79537	0,015	1.16579E-02
8°	0.03477904	0.03477904	0	75,52073	0,018	1.50708E-02
9°	0.0406861	0.0406861	0	74,33798	0,022	1.90265E-02
10°	0.04681363	0.04681363	0	73,23115	0,027	2.34751E-02
11°	0.05314593	0.05314593	0	72,18835	0,032	2.84166E-02
12°	0.05966964	0.05966964	0	71,20036	0,037	3.38442E-02
13°	0.0663732	0.0663732	0	70,25999	0,043	3.97710E-02
14°	0.07324647	0.07324647	0	69,36141	0,049	4.62620E-02
15°	0.08028047	0.08028047	0	68,49986	0,056	5.30575E-02
16°	0.08746714	0.08746714	0	67,67137	0,063	6.04959E-02
17°	0.09479923	0.09479923	0	66,87263	0,070	6.83052E-02
18°	0.1022701	0.1022701	0	66,10081	0,078	7.66985E-02
19°	0.1098737	0.1098737	6.7810E-06	65,35349	0,087	8.55768E-02
20°	0.1176045	0.1176045	0	64,62856	0,096	9.48772E-02
21°	0.1254572	0.1254572	0	63,9242	0,105	0.1047358

22°	0.133427	0.133427	0	63,23878	0,115	0.1150529
23°	0.1415095	0.1415095	0	62,57087	0,125	0.1259090
24°	0.1497005	0.1497005	0	61,91921	0,135	0.1372255
25°	0.1579958	0.1579958	0	61,28267	0,146	0.1490910
26°	0.1663918	0.1663918	8.9554E-06	60,66024	0,158	0.1614311
27°	0.1748849	0.1748849	0	60,05098	0,169	0.1742965
28°	0.1834716	0.1834716	0	59,45406	0,182	0.1876701
29°	0.1921487	0.1921487	0	58,86872	0,194	0.2015530
30°	0.2009132	0.2009132	0	58,29429	0,207	0.2159227
31°	0.209762	0.209762	0	57,73011	0,220	0.2308251
32°	0.2186923	0.2186923	0	57,17561	0,234	0.2462424
33°	0.2277013	0.2277013	0	56,63025	0,248	0.2621858
34°	0.2367864	0.2367864	0	56,09353	0,262	0.2786134
35°	0.245945	0.245945	0	55,565	0,276	0.2955875
36°	0.2551747	0.2551747	0	55,04423	0,291	0.3130722
37°	0.264473	0.264473	0	54,53081	0,306	0.3310932
38°	0.2738376	0.2738376	0	54,02439	0,322	0.3496341
39°	0.2832662	0.2832662	0	53,5246	0,337	0.3686543
40°	0.2927568	0.2927568	0	53,03115	0,353	0.3882305
41°	0.302307	0.302307	0	52,54369	0,370	0.4083307
42°	0.3119148	0.3119148	0	52,06197	0,386	0.4289459
43°	0.3215782	0.3215782	0	51,58572	0,403	0.4500584
44°	0.3312952	0.3312952	0	51,11465	0,420	0.4717164
45°	0.3410638	0.3410638	0	50,64856	0,437	0.4938920
46°	0.3508821	0.3508821	0	50,1872	0,454	0.5166028
47°	0.3607483	0.3607483	0	49,73037	0,472	0.5398150
48°	0.3706605	0.3706605	0	49,27785	0,490	0.5635466
49°	0.3806169	0.3806169	0	48,82945	0,507	0.5877984
50°	0.3906158	0.3906158	0	48,38499	0,525	0.6125786
51°	0.4006553	0.4006553	0	47,94429	0,544	0.6378722
52°	0.4107339	0.4107339	0	47,50719	0,562	0.6636655
53°	0.4208498	0.4208498	0	47,07351	0,580	0.6899894

54°	0.4310014	0.4310014	0	46,64312	0,599	0.7168230
55°	0.441187	0.441187	0	46,21586	0,617	0.7441614
56°	0.4514051	0.4514051	0	45,7916	0,636	0.7720128
57°	0.461654	0.461654	0	45,37019	0,654	0.8003723
58°	0.4719323	0.4719323	0	44,95152	0,673	0.8292488
59°	0.4822383	0.4822384	6.1799E-06	44,53543	0,692	0.8586057
60°	0.4925706	0.4925706	0	44,12185	0,710	0.8884778
61°	0.5029277	0.5029277	0	43,71062	0,729	0.9188495
62°	0.513308	0.513308	0	43,30164	0,748	0.9496996
63°	0.5237103	0.5237103	0	42,89482	0,766	0.9810618
64°	0.5341328	0.5341328	0	42,49005	0,785	1.012904
65°	0.5445744	0.5445744	0	42,08722	0,803	1.045243
66°	0.5550334	0.5550334	0	41,68624	0,821	1.078060
67°	0.5655087	0.5655087	0	41,287	0,839	1.111359
68°	0.5759987	0.5759987	0	40,88942	0,858	1.145136
69°	0.5865021	0.5865021	0	40,49342	0,875	1.179395
70°	0.5970176	0.5970176	0	40,09892	0,893	1.214122
71°	0.6075438	0.6075439	9.8107E-06	39,70581	0,911	1.249312
72°	0.6180795	0.6180795	0	39,31403	0,928	1.284971
73°	0.6286232	0.6286232	0	38,92348	0,945	1.321086
74°	0.6391737	0.6391737	0	38,53411	0,962	1.357665
75°	0.6497298	0.6497298	0	38,14582	0,979	1.394696
76°	0.6602901	0.6602901	0	37,75854	0,995	1.432176
77°	0.6708533	0.6708533	0	37,37222	1,012	1.470104
78°	0.6814184	0.6814183	8.7471E-06	36,98676	1,028	1.508462
79°	0.6919838	0.6919838	0	36,60212	1,043	1.547276
80°	0.7025486	0.7025486	0	36,21822	1,058	1.586511
81°	0.7131114	0.7131114	0	35,83498	1,073	1.626175
82°	0.7236711	0.7236711	0	35,45236	1,088	1.666262
83°	0.7342264	0.7342264	0	35,07028	1,102	1.706781
84°	0.7447762	0.7447762	0	34,68869	1,116	1.747717
85°	0.7553194	0.7553194	0	34,30751	1,129	1.789048

86°	0.7658546	0.7658546	0	33,9267	1,142	1.830801
87°	0.7763808	0.7763808	0	33,54619	1,155	1.872956
88°	0.7868969	0.7868969	0	33,16593	1,167	1.915514
89°	0.7974017	0.7974017	0	32,78585	1,178	1.958465
90°	0.8078941	0.8078941	0	32,4059	1,190	2.001798
91°	0.818373	0.818373	0	32,02603	1,200	2.045525
92°	0.8288372	0.8288372	0	31,64618	1,210	2.089636
93°	0.8392858	0.8392857	7.1018E-06	31,26629	1,220	2.134128
94°	0.8497174	0.8497174	0	30,88631	1,229	2.178987
95°	0.8601313	0.8601313	0	30,50619	1,238	2.224210
96°	0.8705262	0.8705261	6.8469E-06	30,12587	1,246	2.269811
97°	0.880901	0.880901	0	29,74532	1,253	2.315762
98°	0.8912548	0.8912548	0	29,36445	1,260	2.362076
99°	0.9015866	0.9015866	0	28,98323	1,266	2.408742
100°	0.9118952	0.9118952	0	28,60162	1,272	2.455752
101°	0.9221796	0.9221796	0	28,21955	1,277	2.503101
102°	0.932439	0.932439	0	27,83698	1,282	2.550792
103°	0.9426721	0.9426721	0	27,45384	1,285	2.598819
104°	0.9528781	0.9528781	0	27,07011	1,289	2.647179
105°	0.9630559	0.9630559	0	26,68573	1,291	2.695861
106°	0.9732047	0.9732047	0	26,30064	1,293	2.744863
107°	0.9833233	0.9833233	0	25,91478	1,294	2.794181
108°	0.9934109	0.9934109	0	25,52814	1,294	2.843819
109°	1.003466	1.003466	0	25,14063	1,294	2.893764
110°	1.013489	1.013489	0	24,75224	1,293	2.944013
111°	1.023478	1.023478	0	24,36287	1,292	2.994553
112°	1.033432	1.033432	0	23,97251	1,289	3.045419
113°	1.04335	1.04335	0	23,5811	1,286	3.096538
114°	1.053232	1.053232	0	23,18859	1,282	3.147971
115°	1.063076	1.063076	0	22,79493	1,278	3.199671
116°	1.072882	1.072882	0	22,40007	1,272	3.251661
117°	1.082649	1.082649	0	22,00395	1,266	3.303918

118°	1.092375	1.092375	0	21,60654	1,259	3.356445
119°	1.10206	1.10206	0	21,20778	1,252	3.409242
120°	1.111704	1.111704	0	20,8076	1,244	3.462290
121°	1.121305	1.121305	0	20,40599	1,235	3.515591
122°	1.130862	1.130862	0	20,00287	1,225	3.569157
123°	1.140375	1.140375	0	19,59818	1,214	3.622959
124°	1.149843	1.149843	0	19,19189	1,203	3.677011
125°	1.159264	1.159264	0	18,78394	1,191	3.731295
126°	1.168639	1.168639	0	18,37426	1,178	3.785803
127°	1.177967	1.177967	0	17,96284	1,164	3.840550
128°	1.187246	1.187246	0	17,54957	1,150	3.895500
129°	1.196476	1.196476	0	17,13445	1,134	3.950676
130°	1.205655	1.205655	0	16,71739	1,118	4.006063
131°	1.214785	1.214785	0	16,29834	1,102	4.061635
132°	1.223863	1.223863	0	15,87725	1,084	4.117409
133°	1.232889	1.232889	0	15,45405	1,066	4.173388
134°	1.241862	1.241862	0	15,0287	1,047	4.229541
135°	1.250781	1.250781	0	14,60113	1,027	4.285882
136°	1.259646	1.259646	0	14,17129	1,007	4.342378
137°	1.268456	1.268456	0	13,73912	0,986	4.399045
138°	1.277211	1.277211	0	13,30454	0,964	4.455872
139°	1.285909	1.285909	0	12,86752	0,941	4.512846
140°	1.29455	1.29455	0	12,42797	0,918	4.569955
141°	1.303133	1.303133	0	11,98584	0,894	4.627217
142°	1.311658	1.311658	0	11,54106	0,869	4.684591
143°	1.320125	1.320125	0	11,09357	0,843	4.742096
144°	1.328531	1.328531	0	10,6433	0,817	4.799693
145°	1.336877	1.336877	0	10,19018	0,791	4.857391
146°	1.345163	1.345163	0	9,734134	0,763	4.915189
147°	1.353387	1.353387	0	9,275119	0,735	4.973069
148°	1.361549	1.361549	0	8,813026	0,706	5.031021
149°	1.369648	1.369648	0	8,347807	0,677	5.089038

150°	1.377684	1.377684	0	7,879384	0,647	5.147102
151°	1.385656	1.385656	0	7,40768	0,616	5.205205
152°	1.393565	1.393565	0	6,93261	0,585	5.263340
153°	1.401408	1.401408	0	6,454114	0,554	5.321499
154°	1.409186	1.409186	0	5,972098	0,521	5.379675
155°	1.416897	1.416897	0	5,486477	0,489	5.437827
156°	1.424543	1.424543	0	4,997165	0,455	5.495982
157°	1.432121	1.432121	0	4,504086	0,422	5.554100
158°	1.439632	1.439632	0	4,007144	0,387	5.612176
159°	1.447075	1.447075	0	3,506257	0,353	5.670204
160°	1.45445	1.45445	0	3,001319	0,317	5.728161
161°	1.461756	1.461756	0	2,492265	0,282	5.786051
162°	1.468992	1.468992	0	1,978982	0,246	5.843827
163°	1.476159	1.476159	0	1,461352	0,209	5.901510
164°	1.483255	1.483255	0	0,9392976	0,173	5.959071
165°	1.490281	1.490281	0	0,4127013	0,135	6.016496
166°	1.497235	1.497235	0	0,118531	0,098	6.073750
167°	1.504118	1.504118	0	0,6545175	0,060	6.130861
168°	1.51093	1.51093	0	1,195368	0,022	6.187778
169°	1.517669	1.517669	0	1,741193	0,016	6.244498
170°	1.524335	1.524335	0	2,292126	0,055	6.301000
171°	1.530929	1.530929	0	2,848268	0,093	6.357282
172°	1.537449	1.537449	0	3,409762	0,132	6.413302
173°	1.543895	1.543895	0	3,976725	0,171	6.469074
174°	1.550267	1.550267	0	4,549292	0,211	6.524554
175°	1.556565	1.556565	0	5,127618	0,250	6.579749
176°	1.562788	1.562788	0	5,711805	0,289	6.634618
177°	1.568936	1.568936	0	6,302035	0,329	6.689166
178°	1.575009	1.575009	0	6,898433	0,368	6.743353
179°	1.581007	1.581007	0	7,50117	0,408	6.797178
180°	1.586928	1.586928	0	8,110403	0,448	6.850616
181°	1.592774	1.592774	0	8,726289	0,487	6.903657

182°	1.598542	1.598542	0	9,348998	0,526	6.956260
183°	1.604235	1.604235	0	9,978709	0,566	7.008436
184°	1.60985	1.60985	0	10,6156	0,605	7.060156
185°	1.615389	1.615389	0	11,25987	0,644	7.111392
186°	1.62085	1.62085	0	11,9117	0,683	7.162140
187°	1.626234	1.626234	0	12,57129	0,722	7.212371
188°	1.63154	1.63154	0	13,23887	0,760	7.262069
189°	1.636768	1.636768	0	13,91463	0,798	7.311231
190°	1.641918	1.641918	0	14,59881	0,836	7.359813
191°	1.64699	1.64699	0	15,29164	0,874	7.407805
192°	1.651984	1.651984	0	15,99335	0,911	7.455207
193°	1.656899	1.656899	0	16,7042	0,948	7.501981
194°	1.661736	1.661736	0	17,42448	0,984	7.548118
195°	1.666493	1.666493	0	18,15441	1,020	7.593587
196°	1.671172	1.671172	0	18,8943	1,056	7.638395
197°	1.675772	1.675772	0	19,64445	1,090	7.682503
198°	1.680293	1.680293	0	20,40515	1,125	7.725904
199°	1.684735	1.684735	0	21,17673	1,159	7.768579
200°	1.689098	1.689098	0	21,95952	1,192	7.810522
201°	1.693382	1.693382	0	22,7539	1,225	7.851694
202°	1.697586	1.697586	0	23,56019	1,257	7.892085
203°	1.701711	1.701711	0	24,37879	1,288	7.931693
204°	1.705757	1.705757	0	25,21011	1,319	7.970502
205°	1.709723	1.709723	0	26,05456	1,348	8.008473
206°	1.71361	1.71361	0	26,91258	1,377	8.045629
207°	1.717417	1.717417	0	27,78463	1,406	8.081925
208°	1.721146	1.721146	0	28,6712	1,433	8.117355
209°	1.724795	1.724795	0	29,57279	1,460	8.151915
210°	1.728364	1.728364	0	30,48997	1,485	8.185578
211°	1.731855	1.731855	0	31,42326	1,510	8.218338
212°	1.735266	1.735266	0	32,37328	1,534	8.250196
213°	1.738599	1.738599	0	33,34066	1,556	8.281124

214°	1.741852	1.741852	0	34,32606	1,578	8.311107
215°	1.745026	1.745026	0	35,33018	1,599	8.340146
216°	1.748122	1.748122	0	36,35376	1,619	8.368237
217°	1.751139	1.751138	6.8075E-06	37,39765	1,637	8.395360
218°	1.754077	1.754077	0	38,46262	1,654	8.421517
219°	1.756936	1.756936	0	39,54957	1,671	8.446688
220°	1.759718	1.759718	0	40,65947	1,686	8.470866
221°	1.762421	1.762421	0	41,79335	1,699	8.494061
222°	1.765046	1.765046	0	42,95228	1,712	8.516244
223°	1.767594	1.767594	0	44,13742	1,723	8.537436
224°	1.770063	1.770063	0	45,35	1,733	8.557609
225°	1.772455	1.772455	0	46,59136	1,742	8.576760
226°	1.77477	1.77477	0	47,86293	1,749	8.594913
227°	1.777008	1.777008	0	49,16627	1,755	8.612044
228°	1.779169	1.779169	0	50,50304	1,760	8.628143
229°	1.781254	1.781254	0	51,875	1,763	8.643230
230°	1.783262	1.783262	0	53,28418	1,764	8.657303
231°	1.785193	1.785193	0	54,73266	1,764	8.670344
232°	1.787049	1.787049	0	56,22273	1,763	8.682380
233°	1.78883	1.78883	0	57,75695	1,760	8.693391
234°	1.790535	1.790535	0	59,33807	1,755	8.703387
235°	1.792165	1.792165	6.6516E-06	60,9691	1,749	8.712387
236°	1.79372	1.79372	0	62,65339	1,742	8.720371
237°	1.795201	1.795201	0	64,39466	1,732	8.727367
238°	1.796608	1.796608	0	66,19699	1,721	8.733367
239°	1.797941	1.797941	0	68,06494	1,709	8.738383
240°	1.7992	1.7992	0	70,00356	1,694	8.742415
241°	1.800387	1.800387	6.6213E-06	72,01856	1,678	8.745488
242°	1.8015	1.8015	6.6172E-06	74,11644	1,661	8.747599
243°	1.802541	1.802541	0	76,30446	1,641	8.748749
244°	1.803511	1.803511	0	78,59086	1,620	8.748978
245°	1.804408	1.804408	0	80,98525	1,597	8.748280

246°	1.805235	1.805235	0	83,49858	1,572	8.746665
247°	1.80599	1.80599	0	86,14357	1,545	8.744161
248°	1.806675	1.806675	0	88,93518	1,517	8.740746
249°	1.807291	1.807291	6.5960E-06	91,89096	1,486	8.736477
250°	1.807836	1.807836	0	95,03185	1,454	8.731362
251°	1.808313	1.808313	0	98,38319	1,420	8.725396
252°	1.80872	1.80872	0	101,9756	1,384	8.718618
253°	1.80906	1.80906	0	105,8472	1,346	8.711039
254°	1.809332	1.809332	0	110,0456	1,306	8.702661
255°	1.809536	1.809536	0	114,6316	1,264	8.693528
256°	1.809674	1.809674	6.5873E-06	119,6846	1,220	8.683651
257°	1.809745	1.809745	0	125,3104	1,175	8.673045
258°	1.809751	1.809751	0	131,6551	1,127	8.661756
259°	1.809691	1.809691	0	138,9272	1,077	8.649770
260°	1.809566	1.809566	6.5877E-06	147,4383	1,026	8.637129
261°	1.809378	1.809378	0	157,6835	0,972	8.623879
262°	1.809125	1.809125	6.5893E-06	170,5159	0,916	8.610007
263°	1.808809	1.808809	0	187,5903	0,859	8.595561
264°	1.808431	1.808431	0	212,7823	0,799	8.580564
265°	1.80799	1.80799	0	259,1763	0,737	8.565029
266°	1.807488	1.807488	0	561,416	0,673	8.549014
267°	1.806925	1.806925	0	not applicable	0,607	8.532533
268°	1.806302	1.806302	0	not applicable	0,540	8.515613
269°	1.805619	1.805619	0	not applicable	0,470	8.498287
270°	1.804876	1.804876	0	not applicable	0,398	8.480609
271°	1.804076	1.804076	0	not applicable	0,324	8.462594

272°	1.803217	1.803217	0	not applicable	0,248	8.444266
273°	1.802301	1.802301	0	not applicable	0,170	8.425694
274°	1.801328	1.801328	0	not applicable	0,090	8.406889
275°	1.800299	1.800299	0	not applicable	0,007	8.387922
276°	1.799214	1.799214	0	not applicable	0,077	8.368828
277°	1.798075	1.798075	0	not applicable	0,163	8.349646
278°	1.796882	1.796882	0	not applicable	0,251	8.330433
279°	1.795635	1.795635	0	not applicable	0,342	8.311234
280°	1.794335	1.794335	0	not applicable	0,434	8.292134
281°	1.792984	1.792984	0	not applicable	0,529	8.273188
282°	1.791581	1.791581	0	not applicable	0,625	8.254468
283°	1.790127	1.790127	0	not applicable	0,723	8.236060
284°	1.788623	1.788623	6.6648E-06	not applicable	0,824	8.218086
285°	1.787069	1.787069	6.6706E-06	not applicable	0,926	8.200601
286°	1.785467	1.785468	6.6766E-06	not applicable	1,031	8.183775

287°	1.783818	1.783818	0	not applicable	1,137	8.167762
288°	1.782121	1.782121	0	not applicable	1,245	8.152702
289°	1.780377	1.780377	0	not applicable	1,356	8.138865
290°	1.778588	1.778588	0	not applicable	1,468	8.126489
291°	1.776754	1.776754	0	not applicable	1,582	8.115925
292°	1.774875	1.774875	0	not applicable	1,698	8.107609
293°	1.772953	1.772953	0	not applicable	1,816	8.102143
294°	1.770988	1.770988	0	not applicable	1,936	8.100221
295°	1.768982	1.768982	0	not applicable	2,058	8.102886
296°	1.766934	1.766934	0	not applicable	2,181	8.111502
297°	1.764845	1.764845	0	not applicable	2,307	8.127923
298°	1.762717	1.762717	0	not applicable	2,434	8.154710
299°	1.76055	1.76055	0	not applicable	2,563	8.195291
300°	1.758345	1.758345	0	not applicable	2,694	8.254137
301°	1.756103	1.756103	0	not applicable	2,827	8.336226
302°	1.753824	1.753824	0	not applicable	2,961	8.446418

303°	1.75151	1.75151	0	not applicable	3,097	8.587745
304°	1.74916	1.74916	0	not applicable	3,235	8.760194
305°	1.746777	1.746777	0	not applicable	3,374	8.960292
306°	1.74436	1.74436	0	not applicable	3,516	9.183186
307°	1.741911	1.741911	0	not applicable	3,658	9.423730
308°	1.73943	1.73943	0	not applicable	3,803	9.677319
309°	1.736919	1.736919	0	not applicable	3,949	9.940503
310°	1.734377	1.734377	0	not applicable	4,096	10.21083
311°	1.731806	1.731806	0	not applicable	4,245	10.48622
312°	1.729208	1.729207	6.8938E-06	not applicable	4,396	10.76540
313°	1.726581	1.726581	0	not applicable	4,548	11.04738
314°	1.723928	1.723928	0	not applicable	4,702	11.33137
315°	1.721249	1.721249	0	not applicable	4,857	11.61676
316°	1.718545	1.718545	0	not applicable	5,013	11.90319
317°	1.715817	1.715817	0	not applicable	5,171	12.19025
318°	1.713066	1.713066	0	not applicable	5,330	12.47768

319°	1.710293	1.710293	0	not applicable	5,490	12.76533
320°	1.707498	1.707498	6.9815E-06	not applicable	5,652	13.05293
321°	1.704682	1.704682	0	not applicable	5,815	13.34037
322°	1.701847	1.701847	0	not applicable	5,979	13.62755
323°	1.698993	1.698993	0	not applicable	6,144	13.91430
324°	1.69612	1.69612	0	not applicable	6,311	14.20057
325°	1.693231	1.693231	0	not applicable	6,479	14.48628
326°	1.690325	1.690325	0	not applicable	6,647	14.77135
327°	1.687403	1.687403	0	not applicable	6,817	15.05571
328°	1.684467	1.684467	0	not applicable	6,988	15.33934
329°	1.681518	1.681518	0	not applicable	7,160	15.62212
330°	1.678555	1.678555	0	not applicable	7,332	15.90406
331°	1.675581	1.675581	0	not applicable	7,506	16.18507
332°	1.672595	1.672595	0	not applicable	7,681	16.46516
333°	1.6696	1.6696	0	not applicable	7,856	16.74424
334°	1.666594	1.666594	0	not applicable	8,032	17.02231

335°	1.663581	1.663581	0	not applicable	8,209	17.29931
336°	1.660559	1.66056	7.1788E-06	not applicable	8,387	17.57524
337°	1.657531	1.657531	0	not applicable	8,565	17.85004
338°	1.654498	1.654498	0	not applicable	8,744	18.12369
339°	1.651459	1.651459	7.2184E-06	not applicable	8,924	18.39618
340°	1.648416	1.648416	0	not applicable	9,104	18.66743
341°	1.645369	1.645369	0	not applicable	9,285	18.93744
342°	1.642321	1.642321	0	not applicable	9,466	19.20623
343°	1.63927	1.63927	0	not applicable	9,648	19.47371
344°	1.636219	1.636219	0	not applicable	9,830	19.73988
345°	1.633169	1.633169	0	not applicable	10,013	20.00472
346°	1.630119	1.630119	0	not applicable	10,196	20.26821
347°	1.627071	1.627071	0	not applicable	10,379	20.53031
348°	1.624026	1.624026	0	not applicable	10,562	20.79101
349°	1.620984	1.620984	0	not applicable	10,746	21.05029
350°	1.617947	1.617947	0	not applicable	10,930	21.30812

351°	1.614915	1.614915	0	not applicable	11,114	21.56447
352°	1.611889	1.611889	0	not applicable	11,298	21.81933
353°	1.608871	1.60887	7.4095E-06	not applicable	11,482	22.07269
354°	1.605859	1.605859	0	not applicable	11,666	22.32451
355°	1.602857	1.602857	0	not applicable	11,850	22.57478
356°	1.599864	1.599864	7.4512E-06	not applicable	12,034	22.82348
357°	1.596881	1.596881	0	not applicable	12,218	23.07058
358°	1.593909	1.593909	0	not applicable	12,402	23.31607
359°	1.590949	1.590949	0	not applicable	12,585	23.55994
360°	1.588002	1.588002	0	not applicable	12,768	23.80213

ANNEXE 05

Tableau 5.11: *Test d'exactitude des équations (115) et (116) comparées avec l'équation (114) et les formules de Saâtçi et Akgiray(Conduites en série)*

θ	Manning Equation(03) En radian	Proposed Equation (41) In radian	Erreur %	Saatçi equation (80) Error %	Akgiray equation (82) Error %
1°	0,02	0,02	0,00	2,69E+04	9.56E-03
2°	0,03	0,03	0,00	1,34E+04	4.58E-03
3°	0,05	0,05	0,00	8,90E+03	3.26E-03
4°	0,07	0,07	0,00	6,65E+03	9.93E-03
5°	0,09	0,09	0,00	5,30E+03	1.43E-02
6°	0,10	0,10	0,00	4,40E+03	2.05E-02
7°	0,12	0,12	0,00	3,76E+03	2.91E-02
8°	0,14	0,14	0,00	3,27E+03	3.76E-02
9°	0,16	0,16	0,00	2,90E+03	4.75E-02
10°	0,17	0,17	0,00	2,60E+03	5.86E-02
11°	0,19	0,19	0,00	2,35E+03	7.10E-02
12°	0,21	0,21	0,00	2,15E+03	8.45E-02
13°	0,23	0,23	0,00	1,97E+03	9.93E-02
14°	0,24	0,24	0,00	1,82E+03	0.115
15°	0,26	0,26	0,00	1,70E+03	0.132
16°	0,28	0,28	0,00	1,58E+03	0.151
17°	0,30	0,30	0,00	1,48E+03	0.170
18°	0,31	0,31	0,00	1,39E+03	0.191
19°	0,33	0,33	0,00	1,32E+03	0.213
20°	0,35	0,35	0,00	1,24E+03	0.236
21°	0,37	0,37	0,00	1,18E+03	0.261
22°	0,38	0,38	0,00	1,12E+03	0.287
23°	0,40	0,40	0,00	1,07E+03	0.314
24°	0,42	0,42	0,00	1,02E+03	0.342
25°	0,44	0,44	0,00	9,72E+02	0.371
26°	0,45	0,45	0,00	9,30E+02	0.402

27°	0,47	0,47	0,00	8,91E+02	0.434
28°	0,49	0,49	0,00	8,55E+02	0.467
29°	0,51	0,51	0,00	8,22E+02	0.502
30°	0,52	0,52	0,00	7,90E+02	0.537
31°	0,54	0,54	0,00	7,61E+02	0.574
32°	0,56	0,56	0,00	7,33E+02	0.612
33°	0,58	0,58	0,00	7,07E+02	0.652
34°	0,59	0,59	0,00	6,83E+02	0.693
35°	0,61	0,61	0,00	6,60E+02	0.735
36°	0,63	0,63	0,00	6,38E+02	0.778
37°	0,65	0,65	0,00	6,17E+02	0.822
38°	0,66	0,66	0,00	5,98E+02	0.868
39°	0,68	0,68	0,00	5,79E+02	0.915
40°	0,70	0,70	0,00	5,61E+02	0.964
41°	0,72	0,72	0,00	5,45E+02	1.013
42°	0,73	0,73	0,00	5,28E+02	1.064
43°	0,75	0,75	0,00	5,13E+02	1.116
44°	0,77	0,77	0,00	4,98E+02	1.169
45°	0,79	0,79	0,00	4,84E+02	1.224
46°	0,80	0,80	0,00	4,71E+02	1.279
47°	0,82	0,82	0,00	4,58E+02	1.336
48°	0,84	0,84	0,00	4,46E+02	1.395
49°	0,85	0,85	0,00	4,34E+02	1.454
50°	0,87	0,87	0,00	4,22E+02	1.515
51°	0,89	0,89	0,00	4,11E+02	1.577
52°	0,91	0,91	0,00	4,01E+02	1.640
53°	0,92	0,92	0,00	3,91E+02	1.704
54°	0,94	0,94	0,00	3,81E+02	1.769
55°	0,96	0,96	0,00	3,71E+02	1.836
56°	0,98	0,98	0,00	3,62E+02	1.904
57°	0,99	0,99	0,00	3,53E+02	1.973
58°	1,01	1,01	0,00	3,45E+02	2.043

59°	1,03	1,03	0,00	3,36E+02	2.114
60°	1,05	1,05	0,00	3,28E+02	2.187
61°	1,06	1,06	0,00	3,21E+02	2.260
62°	1,08	1,08	0,00	3,13E+02	2.335
63°	1,10	1,10	0,00	3,06E+02	2.411
64°	1,12	1,12	0,00	2,99E+02	2.488
65°	1,13	1,13	0,00	2,92E+02	2.566
66°	1,15	1,15	0,00	2,85E+02	2.645
67°	1,17	1,17	0,00	2,79E+02	2.725
68°	1,19	1,19	0,00	2,72E+02	2.806
69°	1,20	1,20	0,00	2,66E+02	2.888
70°	1,22	1,22	0,00	2,60E+02	2.971
71°	1,24	1,24	0,00	2,54E+02	3.056
72°	1,26	1,26	0,00	2,49E+02	3.141
73°	1,27	1,27	0,00	2,43E+02	3.227
74°	1,29	1,29	0,00	2,38E+02	3.315
75°	1,31	1,31	0,00	2,32E+02	3.403
76°	1,33	1,33	0,00	2,27E+02	3.492
77°	1,34	1,34	0,00	2,22E+02	3.582
78°	1,36	1,36	0,00	2,17E+02	3.673
79°	1,38	1,38	0,00	2,12E+02	3.765
80°	1,40	1,40	0,00	2,08E+02	3.858
81°	1,41	1,41	0,00	2,03E+02	3.952
82°	1,43	1,43	0,00	1,99E+02	4.047
83°	1,45	1,45	0,00	1,94E+02	4.142
84°	1,47	1,47	0,00	1,90E+02	4.239
85°	1,48	1,48	0,00	1,86E+02	4.336
86°	1,50	1,50	0,00	1,82E+02	4.434
87°	1,52	1,52	0,00	1,78E+02	4.533
88°	1,54	1,54	0,00	1,74E+02	4.632
89°	1,55	1,55	0,00	1,70E+02	4.733
90°	1,57	1,57	0,00	1,66E+02	4.834

91°	1,59	1,59	0,00	1,63E+02	4.936
92°	1,60	1,60	0,00	1,59E+02	5.038
93°	1,62	1,62	0,00	1,55E+02	5.142
94°	1,64	1,64	0,00	1,52E+02	5.246
95°	1,66	1,66	0,00	1,48E+02	5.351
96°	1,67	1,67	0,00	1,45E+02	5.456
97°	1,69	1,69	0,00	1,42E+02	5.562
98°	1,71	1,71	0,00	1,38E+02	5.669
99°	1,73	1,73	0,00	1,35E+02	5.776
100°	1,74	1,74	0,00	1,32E+02	5.884
101°	1,76	1,76	0,00	1,29E+02	5.993
102°	1,78	1,78	0,00	1,26E+02	6.102
103°	1,80	1,80	0,00	1,23E+02	6.212
104°	1,81	1,81	0,00	1,20E+02	6.323
105°	1,83	1,83	0,00	1,17E+02	6.434
106°	1,85	1,85	0,00	1,14E+02	6.545
107°	1,87	1,87	0,00	1,12E+02	6.657
108°	1,88	1,88	0,00	1,09E+02	6.770
109°	1,90	1,90	0,00	1,06E+02	6.883
110°	1,92	1,92	0,00	1,04E+02	6.996
111°	1,94	1,94	0,00	1,01E+02	7.111
112°	1,95	1,95	0,00	9,84E+01	7.225
113°	1,97	1,97	0,00	9,59E+01	7.340
114°	1,99	1,99	0,00	9,34E+01	7.455
115°	2,01	2,01	0,00	9,09E+01	7.571
116°	2,02	2,02	0,00	8,85E+01	7.688
117°	2,04	2,04	0,00	8,61E+01	7.804
118°	2,06	2,06	0,00	8,38E+01	7.921
119°	2,08	2,08	0,00	8,15E+01	8.039
120°	2,09	2,09	0,00	7,92E+01	8.157
121°	2,11	2,11	0,00	7,69E+01	8.275
122°	2,13	2,13	0,00	7,47E+01	8.394

123°	2,15	2,15	0,00	7,25E+01	8.512
124°	2,16	2,16	0,00	7,04E+01	8.632
125°	2,18	2,18	0,00	6,82E+01	8.751
126°	2,20	2,20	0,00	6,61E+01	8.871
127°	2,22	2,22	0,00	6,40E+01	8.991
128°	2,23	2,23	0,00	6,20E+01	9.111
129°	2,25	2,25	0,00	6,00E+01	9.232
130°	2,27	2,27	0,00	5,80E+01	9.352
131°	2,29	2,29	0,00	5,60E+01	9.473
132°	2,30	2,30	0,00	5,41E+01	9.595
133°	2,32	2,32	0,00	5,21E+01	9.716
134°	2,34	2,34	0,00	5,03E+01	9.838
135°	2,36	2,36	0,00	4,84E+01	9.959
136°	2,37	2,37	0,00	4,65E+01	10.086
137°	2,39	2,39	0,00	4,47E+01	10.203
138°	2,41	2,41	0,00	4,29E+01	10.325
139°	2,42	2,42	0,00	4,11E+01	10.447
140°	2,44	2,44	0,00	3,93E+01	10.570
141°	2,46	2,46	0,00	3,76E+01	10.692
142°	2,48	2,48	0,00	3,59E+01	10.814
143°	2,49	2,49	0,00	3,42E+01	10.937
144°	2,51	2,51	0,00	3,25E+01	11.059
145°	2,53	2,53	0,00	3,08E+01	11.181
146°	2,55	2,55	0,00	2,92E+01	11.303
147°	2,56	2,56	0,00	2,76E+01	11.426
148°	2,58	2,58	0,00	2,59E+01	11.548
149°	2,60	2,60	0,00	2,43E+01	11.670
150°	2,62	2,62	0,00	2,28E+01	11.792
151°	2,63	2,63	0,00	2,12E+01	11.913
152°	2,65	2,65	0,00	1,97E+01	12.035
153°	2,67	2,67	0,00	1,82E+01	12.156
154°	2,69	2,69	0,00	1,66E+01	12.278

155°	2,70	2,70	0,00	1,52E+01	12.399
156°	2,72	2,72	0,00	1,37E+01	12.519
157°	2,74	2,74	0,00	1,22E+01	12.640
158°	2,76	2,76	0,00	1,08E+01	12.760
159°	2,77	2,77	0,00	9,33E+00	12.879
160°	2,79	2,79	0,00	7,92E+00	12.999
161°	2,81	2,81	0,00	6,51E+00	13.118
162°	2,83	2,83	0,00	5,12E+00	13.236
163°	2,84	2,84	0,00	3,75E+00	13.354
164°	2,86	2,86	0,00	2,39E+00	13.472
165°	2,88	2,88	0,00	1,04E+00	13.589
166°	2,90	2,90	0,00	2,96E-01	13.706
167°	2,91	2,91	0,00	1,62E+00	13.8222
168°	2,93	2,93	0,00	2,93E+00	13.937
169°	2,95	2,95	0,00	4,22E+00	14.052
170°	2,97	2,97	0,00	5,51E+00	14.166
171°	2,98	2,98	0,00	6,78E+00	14.280
172°	3,00	3,00	0,00	8,04E+00	14.392
173°	3,02	3,02	0,00	9,29E+00	14.504
174°	3,04	3,04	0,00	1,05E+01	14.616
175°	3,05	3,05	0,00	1,18E+01	14.726
176°	3,07	3,07	0,00	1,30E+01	14.836
177°	3,09	3,09	0,00	1,42E+01	14.945
178°	3,11	3,11	0,00	1,54E+01	15.053
179°	3,12	3,12	0,00	1,65E+01	15.160
180°	3,14	3,14	0,00	1,77E+01	15.266
181°	3,16	3,16	0,00	1,89E+01	15.371
182°	3,17	3,17	0,00	2,00E+01	15.475
183°	3,19	3,19	0,00	2,12E+01	15.578
184°	3,21	3,21	0,00	2,23E+01	15.680
185°	3,23	3,23	0,00	2,34E+01	15.780
186°	3,24	3,24	0,00	2,45E+01	15.880

187°	3,26	3,26	0,00	2,56E+01	15.979
188°	3,28	3,28	0,00	2,67E+01	16.076
189°	3,30	3,30	0,00	2,78E+01	16.172
190°	3,31	3,31	0,00	2,89E+01	16.267
191°	3,33	3,33	0,00	2,99E+01	16.360
192°	3,35	3,35	0,00	3,10E+01	16.452
193°	3,37	3,37	0,00	3,20E+01	16.543
194°	3,38	3,38	0,00	3,31E+01	16.633
195°	3,40	3,40	0,00	3,41E+01	16.721
196°	3,42	3,42	0,00	3,51E+01	16.807
197°	3,44	3,44	0,00	3,61E+01	16.893
198°	3,45	3,45	0,00	3,71E+01	16.976
199°	3,47	3,47	0,00	3,81E+01	17.058
200°	3,49	3,49	0,00	3,91E+01	17.139
201°	3,51	3,51	0,00	4,01E+01	17.218
202°	3,52	3,52	0,00	4,11E+01	17.296
203°	3,54	3,54	0,00	4,20E+01	17.371
204°	3,56	3,56	0,00	4,30E+01	17.446
205°	3,58	3,58	0,00	4,39E+01	17.518
206°	3,59	3,59	0,00	4,49E+01	17.589
207°	3,61	3,61	0,00	4,58E+01	17.658
208°	3,63	3,63	0,00	4,68E+01	17.726
209°	3,65	3,65	0,00	4,77E+01	17.791
210°	3,66	3,66	0,00	4,86E+01	17.855
211°	3,68	3,68	0,00	4,95E+01	17.918
212°	3,70	3,70	0,00	5,04E+01	17.978
213°	3,72	3,72	0,00	5,13E+01	18.036
214°	3,73	3,73	0,00	5,22E+01	18.093
215°	3,75	3,75	0,00	5,31E+01	18.148
216°	3,77	3,77	0,00	5,39E+01	18.201
217°	3,79	3,79	0,00	5,48E+01	18.252
218°	3,80	3,80	0,00	5,57E+01	18.302

219°	3,82	3,82	0,00	5,65E+01	18.349
220°	3,84	3,84	0,00	5,74E+01	18.394
221°	3,86	3,86	0,00	5,82E+01	18.438
222°	3,87	3,87	0,00	5,91E+01	18.480
223°	3,89	3,89	0,00	5,99E+01	18.519
224°	3,91	3,91	0,00	6,07E+01	18.557
225°	3,93	3,93	0,00	6,16E+01	18.593
226°	3,94	3,94	0,00	6,24E+01	18.627
227°	3,96	3,96	0,00	6,32E+01	18.659
228°	3,98	3,98	0,00	6,40E+01	18.689
229°	3,99	3,99	0,00	6,48E+01	18.718
230°	4,01	4,01	0,00	6,56E+01	18.744
231°	4,03	4,03	0,00	6,64E+01	18.768
232°	4,05	4,05	0,00	6,72E+01	18.791
233°	4,06	4,06	0,00	6,80E+01	18.811
234°	4,08	4,08	0,00	6,88E+01	18.830
235°	4,10	4,10	0,00	6,96E+01	18.847
236°	4,12	4,12	0,00	7,04E+01	18.862
237°	4,13	4,13	0,00	7,11E+01	18.875
238°	4,15	4,15	0,00	7,19E+01	18.886
239°	4,17	4,17	0,00	7,27E+01	18.895
240°	4,19	4,19	0,00	7,35E+01	18.903
241°	4,20	4,20	0,00	7,42E+01	18.909
242°	4,22	4,22	0,00	7,50E+01	18.913
243°	4,24	4,24	0,00	7,58E+01	18.915
244°	4,26	4,26	0,00	7,65E+01	18.915
245°	4,27	4,27	0,00	7,73E+01	18.914
246°	4,29	4,29	0,00	7,81E+01	18.911
247°	4,31	4,31	0,00	7,88E+01	18.906
248°	4,33	4,33	0,00	7,96E+01	18.900
249°	4,34	4,34	0,00	8,04E+01	18.892
250°	4,36	4,36	0,00	8,12E+01	18.882

251°	4,38	4,38	0,00	8,20E+01	18.871
252°	4,40	4,40	0,00	8,28E+01	18.859
253°	4,41	4,41	0,00	8,36E+01	18.844
254°	4,43	4,43	0,00	8,44E+01	18.829
255°	4,45	4,45	0,00	8,52E+01	18.812
256°	4,47	4,47	0,00	8,60E+01	18.793
257°	4,48	4,48	0,00	8,69E+01	18.773
258°	4,50	4,50	0,00	8,78E+01	18.752
259°	4,52	4,52	0,00	8,87E+01	18.730
260°	4,54	4,54	0,00	8,96E+01	18.706
261°	4,55	4,55	0,00	9,06E+01	18.681
262°	4,57	4,57	0,00	9,17E+01	18.656
263°	4,59	4,59	0,00	9,29E+01	18.628
264°	4,61	4,61	0,00	9,42E+01	18.600
265°	4,62	4,62	0,00	9,59E+01	18.571
266°	4,64	4,64	0,00	9,91E+01	18.541
267°	4,66	4,66	0,00	not applicable	18.510
268°	4,68	4,68	0,00	not applicable	18.479
269°	4,69	4,69	0,00	not applicable	18.446
270°	4,71	4,71	0,00	not applicable	18.413
271°	4,73	4,73	0,00	not applicable	18.379
272°	4,74	4,74	0,00	not applicable	18.344
273°	4,76	4,76	0,00	not applicable	18.309
274°	4,78	4,78	0,00	not applicable	18.274

275°	4,80	4,80	0,00	not applicable	18.238
276°	4,81	4,81	0,00	not applicable	18.202
277°	4,83	4,83	0,00	not applicable	18.166
278°	4,85	4,85	0,00	not applicable	18.130
279°	4,87	4,87	0,00	not applicable	18.093
280°	4,88	4,88	0,00	not applicable	18.057
281°	4,90	4,90	0,00	not applicable	18.021
282°	4,92	4,92	0,00	not applicable	17.986
283°	4,94	4,94	0,00	not applicable	17.951
284°	4,95	4,95	0,00	not applicable	17.917
285°	4,97	4,97	0,00	not applicable	17.884
286°	4,99	4,99	0,00	not applicable	17.852
287°	5,01	5,01	0,00	not applicable	17.822
288°	5,02	5,02	0,00	not applicable	17.793
289°	5,04	5,04	0,00	not applicable	17.767
290°	5,06	5,06	0,00	not applicable	17.743

291°	5,08	5,08	0,00	not applicable	17.723
292°	5,09	5,09	0,00	not applicable	17.707
293°	5,11	5,11	0,00	not applicable	17.697
294°	5,13	5,13	0,00	not applicable	17.693
295°	5,15	5,15	0,00	not applicable	17.698
296°	5,16	5,16	0,00	not applicable	17.715
297°	5,18	5,18	0,00	not applicable	17.746
298°	5,20	5,20	0,00	not applicable	17.797
299°	5,22	5,22	0,00	not applicable	17.874
300°	5,23	5,23	0,00	not applicable	17.985
301°	5,25	5,25	0,00	not applicable	18.141
302°	5,27	5,27	0,00	not applicable	18.348
303°	5,29	5,29	0,00	not applicable	18.614
304°	5,30	5,30	0,00	not applicable	18.936
305°	5,32	5,32	0,00	not applicable	19.308
306°	5,34	5,34	0,00	not applicable	19.719

307°	5,36	5,36	0,00	not applicable	20.159
308°	5,37	5,37	0,00	not applicable	20.620
309°	5,39	5,39	0,00	not applicable	21.094
310°	5,41	5,41	0,00	not applicable	21.577
311°	5,43	5,43	0,00	not applicable	22.065
312°	5,44	5,44	0,00	not applicable	22.555
313°	5,46	5,46	0,00	not applicable	23.046
314°	5,48	5,48	0,00	not applicable	23.536
315°	5,50	5,50	0,00	not applicable	24.024
316°	5,51	5,51	0,00	not applicable	24.509
317°	5,53	5,53	0,00	not applicable	24.991
318°	5,55	5,55	0,00	not applicable	25.469
319°	5,56	5,56	0,00	not applicable	25.943
320°	5,58	5,58	0,00	not applicable	26.413
321°	5,60	5,60	0,00	not applicable	26.879
322°	5,62	5,62	0,00	not applicable	27.340

323°	5,63	5,63	0,00	not applicable	27.797
324°	5,65	5,65	0,00	not applicable	28.248
325°	5,67	5,67	0,00	not applicable	28.695
326°	5,69	5,69	0,00	not applicable	29.137
327°	5,70	5,70	0,00	not applicable	29.574
328°	5,72	5,72	0,00	not applicable	30.006
329°	5,74	5,74	0,00	not applicable	30.433
330°	5,76	5,76	0,00	not applicable	30.856
331°	5,77	5,77	0,00	not applicable	31.273
332°	5,79	5,79	0,00	not applicable	31.685
333°	5,81	5,81	0,00	not applicable	32.093
334°	5,83	5,83	0,00	not applicable	32.496
335°	5,84	5,84	0,00	not applicable	32.894
336°	5,86	5,86	0,00	not applicable	33.287
337°	5,88	5,88	0,00	not applicable	33.675
338°	5,90	5,90	0,00	not applicable	34.058

339°	5,91	5,91	0,00	not applicable	34.437
340°	5,93	5,93	0,00	not applicable	34.811
341°	5,95	5,95	0,00	not applicable	35.180
342°	5,97	5,97	0,00	not applicable	35.545
343°	5,98	5,98	0,00	not applicable	35.905
344°	6,00	6,00	0,00	not applicable	36.261
345°	6,02	6,02	0,00	not applicable	36.612
346°	6,04	6,04	0,00	not applicable	36.959
347°	6,05	6,05	0,00	not applicable	37.301
348°	6,07	6,07	0,00	not applicable	37.638
349°	6,09	6,09	0,00	not applicable	37.972
350°	6,11	6,11	0,00	not applicable	38.301
351°	6,12	6,12	0,00	not applicable	38.626
352°	6,14	6,14	0,00	not applicable	38.946
353°	6,16	6,16	0,00	not applicable	39.262
354°	6,18	6,18	0,00	not applicable	39.575

355°	6,19	6,19	0,00	not applicable	39.883
356°	6,21	6,21	0,00	not applicable	40.186
357°	6,23	6,23	0,00	not applicable	40.486
358°	6,25	6,25	0,00	not applicable	40.782
359°	6,26	6,26	0,00	not applicable	41.074
360°	6,28	6,28	0,00	not applicable	41.361