

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur

et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد – تلمسان

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID



كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الري

Département d'hydraulique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de

Master En Hydraulique

Option : Eau Sol et Aménagement (ESA)

Conception d'outils numériques d'aide aux hydrauliciens

Soutenu le 5 Juin 2016

Présenté par : TADLAOUI Sarra & BOUABDALLAH Mohammed El Hadi

Devant les membres du Jury :

Mr. MAGNOUNIF A.

Mr. ROUSSAT B.

Mr. DEBBAL Z.

Mr. ADJIM M.

Mr. TADLAOUI M.

Président

Examineur

Examineur

Encadreur

Co-Encadreur

Promotion:2015-2016

DÉDICACE

C'est avec beaucoup de sentiments que nous écrivons ces quelques lignes

On dédie ce modeste travail en témoignage de notre profond respect, À notre département, À nos chers enseignants et enseignantes, À tous les étudiants du département d'hydraulique.

On espère vous laissez une traçabilité et un travail qui vous sera utile dans l'avenir.

DÉDICACE

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être.

J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi. A Mes Très Chers Parents

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mes profonds sentiments envers ma moitié, Dieu ma fait un très beau cadeau en faisant de toi ma sœur jumelle. A Assia

A Ma grande sœur et son mari et leurs adorables petits cœurs Chihab & Bayane

A Mon frère et sa femme

Votre aide, votre générosité, votre soutien ont été pour moi une source de courage et de confiance.

A toute la promotion ESA 2016, A mon binôme 'Mohammed Elhadi'

« Sarra »

A mes très chers parents qui avec leur soutien et leurs prières, mes études ont pu voir le jour.

A, ma sœur, et son mari, mon frère et sa femme

A mon très cher neveu.

A mes ami(e)s et cousins, et a mon binôme 'Sarra'

« Elhadi »

REMERCIEMENTS

On tient avant tout à remercier Dieu pour nous avoir inspiré la volonté et le courage d'acheminer ce travail jusqu'à la fin.

Nos remerciements vont d'abord à notre encadreur: Mr Adjim Mohammed qui, avec son expérience, nous a guidé le long de la réalisation de ce travail. Ses conseils et recommandations ont été précieux pour l'aboutissement de ce travail.

On est conscient de la reconnaissance qu'on doit à notre co-encadreur Mr Tadlaoui Mohammed, pour son aide, son encouragement, sa patience et ses critiques constructives qui nous ont beaucoup aidé à apprécier ce travail et mieux éclairer notre objectif.

On tient à remercier Mr Debbal Zakaria et Mr Rouissat Bouchrit pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire en acceptant de l'examiner. Nos vifs remerciements vont à Mr Megnounif Abdessalem pour avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

On tient à remercier tous les enseignants du département d'hydraulique en particulier ceux qui nous ont enseigné depuis la licence.

Enfin, on remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'épanouissement de ce travail et il nous serait impossible de les citer tous mais, on est certain qu'ils s'y reconnaîtront dans ces remerciements.

RÉSUMÉ

La technologie évolue si vite. De nos jours, l'étudiant passe son temps devant un ordinateur à chercher l'information sur Internet plutôt que dans des livres et des revues scientifiques. En effet, le web est devenu la destination de celui qui veut comprendre ses cours, faire des recherches ainsi que réviser. C'est aussi un moyen pour télécharger des logiciels simples à l'utilisation et indispensables pour parfaire sa formation.

Ce travail présente une modeste contribution à la formation des étudiants du département d'hydraulique de notre université. En effet, nous avons essayé d'étudier toutes les méthodes et les formules d'évaluation des pertes de charges linéaires afin de réaliser des outils numériques qui peuvent aider les étudiants dans leurs cursus.

Notre deuxième contribution était de développer un site Web pour hydrauliciens. Ce dernier a été conçu en fonction des besoins des étudiants et aux exigences des enseignants confirmés par des questionnaires. Ce site Web sert comme une plateforme de communication entre étudiants, enseignants et ingénieurs hydrauliciens. Il permet aussi aux étudiants d'accéder aux cours et logiciels nécessaires pour leur formation.

Afin de réaliser ce projet, nous avons développé plusieurs programmes sous l'environnement Delphi et Matlab. Nous avons utilisé les logiciels EasyPhp et Wordpress pour la conception du site web. La communication et l'organisation du travail ont été faites à travers GanttProject, Dropbox et Trello.

Mots clés : Perte de charge linéaire, Hydraulique, HydroLearn, simulateur, Site web.

ABSTRACT

Technology is in fast evolution. Nowadays the students spend their time in front of the computer looking for information on the internet rather than looking in books and scientific journals. In fact, the web has become the destination of students who want to research, understand and review their courses. It is also a way to download simple softwares to use which will be necessary for their studies.

This work presents a modest contribution to the training of students of the hydraulic department of our university. We tried to study all methods and formulas of the loss of linear pressure in order to make software that can help students in their studies.

Our second contribution was to develop a website for hydraulic engineers. It was designed according to the needs of students and the requirements of teachers confirmed by questionnaires. This website serves as a platform of communication between students, teachers and water engineers. It also allows students to access to their courses and software required for their formation.

To realize this project, we have developed several programs with Delphi and Matlab. We used EasyPhp software and Wordpress to design the website. The communication and organization of our work were made through GanttProject, Dropbox and Trello.

Keywords: Head loss, hydraulic, HydroLearn, simulator, website.

ملخص

التكنولوجيا في تطور مستمر، أصبح الطالب الجامعي يقضي وقته أمام شاشة الكمبيوتر للبحث عن المعلومات في شبكة الانترنت بدلا من الكتب و المجالات العلمية.

يساهم هذا العمل في تقديم مساعدة للطلاب خلال دراستهم في قسم الري، فلقد حاولنا جمع معادلات و الصيغ التي تسمح بحسب هبوط الضغط الخطي في الأنابيب من أجل القيام ببرامج رقمية لهذا الأخير و لإجراء حسابات أخرى في المجال الهيدروليكي.

إضافة إلى هذا قمنا بتطوير موقع إلكتروني لطلبة قسم الري حسب احتياجاتهم و متطلبات الأساتذة و ذلك عبر أجوبة الاستطلاع الذي قمنا به.

لتحقيق هذا المشروع قمنا بتطوير العديد من البرامج على Delphi 7 , كما إستخدمنا Easy PHP و WordPress من أجل تصميم الموقع Hydrolearn و لننظم العمل استعملنا Gantt Project, Dropbox, Trello. **الكلمات المفتاحية:** هبوط الضغط الخطي، موقع إلكتروني، برامج رقمية، هندسة هيدروليكية، Hydrolearn، رقمنة.

NOMENCLATURE

Symboles	Significations	Unité
μ	<i>Viscosité dynamique</i>	Pa.s
ν	<i>Viscosité cinématique</i>	$m^2.s^{-1}$
ρ	<i>Masse volumique</i>	$kg.m^{-3}$
ζ	<i>Coefficient des pertes de charges singulières</i>	-
ε	<i>Rugosité absolue</i>	m
$\bar{\varepsilon}$	<i>Rugosité relative</i>	-
Hs	<i>Charge spécifique</i>	m
Hn	<i>Hauteur normale</i>	
\bar{v}	<i>Vitesse moyenne d'écoulement</i>	$m.s^{-1}$
g	<i>Accélération de la pesanteur</i>	$m.s^{-2}$
R	<i>Rayon hydraulique</i>	m
S	<i>Section mouillée</i>	m^2
P	<i>Périmètre mouillé</i>	m
F	<i>Nombre de Froude</i>	-
Re	<i>Nombre de Reynolds</i>	-
α	<i>Coefficient de correction de l'énergie cinétique</i>	-
B	<i>Largeur au miroir</i>	m
K	<i>Perméabilité</i>	m/s
D	<i>Diamètre</i>	m
hl	<i>Pertes de charges linéaires</i>	m
b₁	<i>Coefficient des pertes de charge défini dans les formulations anciennes</i>	m-
C	<i>Coefficient de rugosité de William-Hazen</i>	m
λ	<i>Coefficient de pertes de charges défini par l'équation de Darcy</i>	m-
J	<i>Perte de charge par unité de longueur</i>	m/m
Q	Débit	m^3/s

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	I
DÉDICACE.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT.....	V
ملخص.....	VI
NOMENCLATURE.....	IV
TABLE DES MATIÈRES.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. MÉTHODOLOGIE ET GESTION DE NOTRE PROJET.....	3
1.1. GANTT PROJECT.....	3
1.2. DROPBOX.....	3
1.3. TRELLO.....	4
1.4. GOOGLE FORMS.....	5
2. CONCEPTS ET THÉORIE DES ÉCOULEMENTS.....	7
2.1. DIFFÉRENTS TYPES DE FLUIDES.....	7
2.1.1. <i>Fluide réel</i>	7
2.1.2. <i>Fluide parfait</i>	7
2.2. VISCOSITÉ.....	7
2.2.1. <i>Viscosité dynamique</i>	8
2.2.2. <i>Viscosité cinématique</i>	8
2.3. LES TYPES D'ÉCOULEMENT.....	8
2.3.1. <i>Les écoulements souterrains</i>	8
2.3.2. <i>Les écoulements à surface libre</i>	9
2.3.3. <i>Les écoulement sous pression</i>	13
2.4. RÉGIME LAMINAIRE ET RÉGIME TURBULENT.....	14
2.5. RUGOSITÉ.....	15

2.6. EQUATION DE BERNOULLI	16
2.7. LES PERTES DE CHARGE	18
3. MÉTHODES D'ESTIMATION DES PERTES DE CHARGE LINÉAIRES	20
3.1. MÉTHODES ANCIENNES POUR L'ESTIMATION DES PERTES DE CHARGES	20
3.2. FORMULES ANCIENNES	21
3.2.1. Formule de Prony 1803.....	21
3.2.2. Formule de Darcy 1852.....	21
3.2.3. Formule de Dupuit 1854	22
3.2.4. Formule de Maurice 1867.....	22
3.2.5. Formule de Ganguillet et Kutter 1869	22
3.2.6. Formule de Flamant 1892.....	23
3.2.7. Formule de René Kœchlin	23
3.2.8. Formule de Saph-Schoder et la formule de Mognié	23
3.2.9. Formule de Biegeleisen-Bukowsky.....	24
3.2.10. Formule de Betz	24
3.2.11. Formule de Scobey.....	24
3.2.12. Formule de Manning-Strickler	25
3.3. MÉTHODES MODERNES POUR L'ESTIMATION DES PERTES DE CHARGE	25
3.4. ESTIMATIONS DU COEFFICIENT λ POUR LE RÉGIME LAMINAIRE.....	26
3.5. LE COEFFICIENT λ POUR LE RÉGIME CRITIQUE.....	26
3.6. LE COEFFICIENT λ POUR LE RÉGIME TURBULENT.....	27
3.6.1. Formules pour les conduites lisses.....	27
3.6.2. FORMULES pour les conduites rugueuses.....	29
3.7. MÉTHODE GRAPHIQUE : DIAGRAMME DE MOODY.....	35
3.8. MÉTHODE UTILISANT UN ABAQUE	35
3.9. LOGICIELS DE CALCULS DE PERTES DE CHARGES.....	36
4. CONCEPTION DU LOGICIEL « HYDROLEARN CALCUL »	39
4.1. PRÉSENTATION DE « HYDROLEARN COMPARE FORMULES ».....	39
4.1.1. Mode d'utilisation.....	40
4.1.2. Validation des résultats obtenus	44
4.2. PRÉSENTATION DE « HYDROLEARN PERTES DANS DES CONDUITES »	45
4.2.1. Mode d'utilisation.....	46
4.3. PRÉSENTATION DE « HYDROCALCUL SURFACE LIBRE »	49
4.3.1. Mode d'utilisation.....	50
4.3.2. Validation des résultats	52
5. CONCEPTION DU SITE WEB « HYDROLEARN »	54

5.1. DÉFINITION DES OBJECTIFS ET BESOINS.....	54
5.1.1. Questionnaire pour Enseignants.....	55
5.1.2 Questionnaire pour étudiants.....	61
5.1.3 Questionnaire pour professionnels.....	65
5.1.4. Synthèse des réponses.....	67
5.2. ÉTUDE DES DIFFÉRENTS SITES WEB.....	68
5.3. LA CONCEPTION DU SITE WEB.....	68
5.3.1. Installation de Easyphp.....	69
5.3.2. Installation de WORDPRESS en local.....	69
5.3.3. Installation de FILEZILLA.....	70
5.3.4. Hébergement du site Internet.....	70
5.3.5. Réalisation du site Internet.....	70
5.3.6 Maintenance et Gestion du site web.....	76
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	77
BIBLIOGRAPHIE.....	79
ANNEXES.....	83
ANNEXE 1 : RUGOSITÉ DE DIFFÉRENTS MATÉRIAUX.....	83
ANNEXE 2 : DIAGRAMME UNIVERSEL DE MOODY.....	84
ANNEXE 3 : TABLE DE COOLBROK.....	85
ANNEXE 4 : SCRIPTS SOUS MATLA.....	97

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1: Plan élaboré sur le logiciel Gantt Project	3
Figure I- 2: Dossier Dropbox.....	4
Figure I- 3: Liste suivie pour l'organisation du travail.....	5
Figure I- 4: Questionnaire réalisé pour les étudiants (§4.2.1)	6
Figure II- 1: Variabilité de l'écoulement dans le temps (Carlier, 1988).....	10
Figure II- 2: Variabilité de l'écoulement dans l'espace (Carlier, 1988).....	10
Figure II- 3: Ligne de charge ; charge spécifique (Carlier, 1988)	11
Figure II- 4: Relation charge spécifique-tirant d'eau. (Degoutte)	13
Figure II- 5: Expérience de Reynolds (Roque, 2005).....	15
Figure II- 6: Représentation graphique de l'équation de Bernoulli pour un fluide parfait.	17
Figure III- 1: Diagramme universel de Moody (Massy, 1975).....	35
Figure IV- 1: Interface utilisateur de Compare formules.	40
Figure IV- 2: Boite de dialogue pour le choix des formules à comparer.....	41
Figure IV- 3: Boite de dialogue pour saisir les données.....	41
Figure IV- 4: Boite de dialogue pour le choix du diamètre normalisé.	42
Figure IV- 5: Boite de dialogue pour le choix du coefficient de rugosités.....	42
Figure IV- 6: Fenêtres pour affichage des résultats communs, de λ estimé par l'équation de Coolbrok et de la perte linéaire estimée par l'équation de Darcy.....	43
Figure IV- 7: Exemple de calcul avec une comparaison de 7 formules par rapport à celle de Coolbrok.....	44
Figure IV- 8: Un exemple de script réalisé sous Delphi 7.....	45
Figure IV- 9: Interface utilisateur du logiciel « Hydrolearn pertes dans des conduites ».	46
Figure IV- 10: Fenêtre de saisi des données du réseau.....	47
Figure IV- 11: Exemple de calcul d'un réseau à cinq conduites.	48
Figure IV- 12: Script sous Delphi 7 de « pertes dans des conduits ».	49
Figure IV- 13: Interface utilisateur de l'application « HYDROLEARN surface libre ».	50

Figure IV- 14 : Fenêtre de saisi des données relatives au calcul des écoulements à surface libre.....	51
Figure IV- 15: Boite de dialogue pour le choix du coefficient de Manning.....	51
Figure IV- 16: Exemple de calcul pour un canal trapézoïdal.	52
Figure IV- 17: Script de Surface libre sous Delphi	53
Figure V- 1: Réponses reçues pour les questions 1, 2,3 & 4 du questionnaire No.1.....	58
Figure V- 2: Réponses reçues pour les questions 6, 7, 8 & 9 du questionnaire No.1.....	60
Figure V- 3: Réponses aux questions 1, 2, 3 & 4 du questionnaire no.2.....	63
Figure V- 4: Réponses aux questions 1, 2 et 3 du questionnaire no.3.	66
Figure V- 5: Site vitrine réalisé en réseau local.....	70
Figure V- 6: Thème actuel utilisé sur le site.....	71
Figure V- 7: Logo et slogan du site (Cruz, 2013).....	72
Figure V- 8: Page d'accueil du site	76
Figure A- 1: Diagramme universel de Moody (Giles, 1982).....	85
Figure A- 2: Script formule de Lees.....	97
Figure A- 3: Script formule de Lobaev.....	97
Figure A- 4: Script formule de Moody	98
Figure A- 5: Script formule de Vankarmanprandtl.....	98
Figure A- 6: Script formule de Swamme Jain	99
Figure A- 7: Script formule de Schilleretherman	99
Figure A- 8: Script formule de Prandtlvankarman	99
Figure A- 9: Script formule de Nikuradse	100
Figure A- 10: Script formule de Nackab	100
Figure A- 11: Script formule de Lehman	101
Figure A- 12: Script formule de Lazard	101
Figure A- 13: Script formule de Haland.....	102
Figure A- 14: Script formule de Hagen	102
Figure A- 15: Script formule de Blasius.....	102
Figure A- 16: Script formule de Barr	103
Figure A- 17: Script formule d'Altschoul	103
Figure A- 18: Script formule de Achour.....	103
Figure A- 19: Script formule de Coolbrok	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau V- 1: Questionnaire no.1.....	55
Tableau V- 2: Questionnaire no.2.....	61
Tableau V- 3: Questionnaire no.3.....	65
Tableau A- 1: Rugosité de différents matériaux (Ligen & Le Guay, 2007	83
Tableau A- 2 : Rugosité indiqués sur EPANET (Lewis A., 2003).....	83
Tableau A- 3: équivalence entre les rugosités de William-Hazen et Darcy	84
Tableau A- 4: Table 1 de Coolbrok.....	86
Tableau A- 5: Table 2 de Coolbrok.....	87
Tableau A- 6: Table 3 de Coolbrok.....	88
Tableau A- 7: Table 4 de Coolbrok.....	89
Tableau A- 8: Table 5 de Coolbrok.....	90
Tableau A- 9: Table 6 de Coolbrok.....	91
Tableau A- 10: Table 7 de Coolbrok.....	92
Tableau A- 11: Table 8 de Coolbrok.....	94
Tableau A- 12: Table 9 de Coolbrok.....	95
Tableau A- 13: Table 10 de Coolbrok.....	96

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De nos jours, on ne fait presque plus de calculs hydraulique manuellement. On se sert de logiciels spécialisés pour différents problèmes.

Un logiciel de calculs d'hydraulique devrait avant tout offrir les fonctionnalités de tout bon logiciel : menu, boutons d'accès rapide, barre d'outils, aide, indication...il devrait comprendre le plus grand nombre de fonctionnalités nécessaires pour répondre aux besoins des utilisateurs. La majorité de ces logiciels sont payants et n'expliquent pas leurs méthodes de calculs et les formules qu'ils utilisent.

Notre travail a pour finalité l'étude des moyens et méthodes d'évaluation de la perte de charge linéaire à l'aide des simulateurs. En effet nous avons créé plusieurs simulateurs de calculs hydrauliques sous l'environnement Delphi 7. Aussi nous avons développé un site web pour aider les étudiants à mieux suivre leurs programmes d'études. Ce site offre aux futurs hydrauliciens un moyen de s'instruire (documents, simulateurs, différents données de base..) qui leur seront utiles pour améliorer leur formation.

Notre étude s'articulera en cinq parties principales :

- **Le premier chapitre : Méthodologie et gestion de notre projet**

Afin de réduire le cycle de développement de notre projet, nous avons utilisé les logiciels Gantt Project, Dropbox , Trello et Google forms qui sont des logiciels de gestion de projets. Dans ce chapitre, nous décrivons succinctement l'utilisation de ces logiciels pour assurer une gestion optimale de notre travail.

- **Le second chapitre : Concepts et théorie des écoulements**

Comporte des généralités sur les types d'écoulements en hydraulique ainsi que les théories appliquées dans les écoulements en charge.

- **Le troisième chapitre : Méthodes d'estimation des pertes de charge linéaires**

Consiste à citer toutes les méthodes et formules anciennes et modernes pour la détermination du coefficient de la perte de charge linéaire pour compléter notre travail de licence (Bouabdallah & Tadlaoui, 2014) ainsi de citer les différentes applications et logiciels qui existent pour évaluer cette dernière.

- **Le quatrième chapitre : Conception du logiciel « HYDROLEARN CALCUL »**

Réalisation de plusieurs simulateurs sous Delphi 7, le 1^{er} simulateur sert à comparer le coefficient de perte de charge linéaire avec plus de 20 formules, par rapport à la formule de Coolbrok. Un 2^{ème} simulateur pour le calcul de la perte de pression dans un réseau bien définie (conduite en séries). Un 3^{ème} simulateur pour le calcul des paramètres d'écoulements à surface libre.

- **Le cinquième chapitre : Conception du site web « HydroLearn »**

Création d'un site web pour les étudiants en hydraulique qui comporte plusieurs services y compris les applications que nous avons développé et autres données utiles pour la formation d'hydraulicien tel que les programmes de la formation, les cours, les mémoires, échange d'idée à travers un forum, ...

CHAPITRE 01

1. MÉTHODOLOGIE ET GESTION DE NOTRE PROJET

Afin de réduire le cycle de développement de notre projet, pour mieux gérer notre temps et être à jour pendant sa réalisation, nous avons élaboré un plan de travail qui nous a permis d'avancer d'une manière convenable et sans aucune difficultés. Nous avons utilisé certains logiciels de gestion de projet et de travail collaboratif.

1.1. GANTT PROJECT

Gantt Project est un logiciel gratuit de gestion de projet. Il permet la planification de projets à l'aide du diagramme de Gantt. Il propose les fonctionnalités de base de ce diagramme, comme la création des tâches, leur affectation, la gestion des dépendances et de l'avancement. Il dispose également de propriétés plus avancées comme l'exportation des documents en HTML/PDF et le travail collaboratif à distance sur internet (Gantt Project Team).

On a utilisé GanttProject pour définir le calendrier globale de notre projet de fin d'étude. Notre travail s'est structuré comme suit :

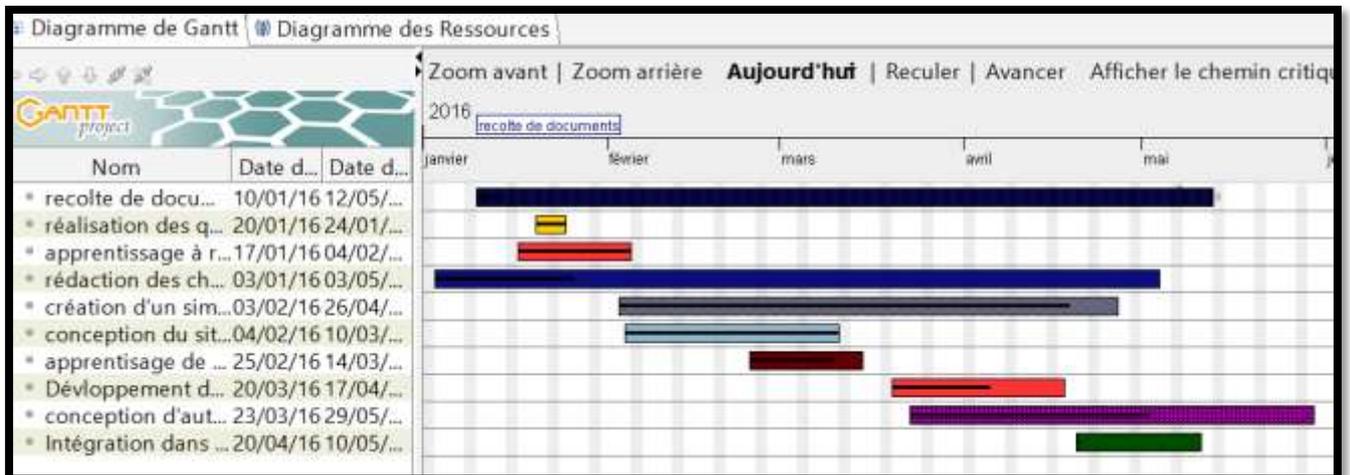


Figure I- 1: Plan élaboré sur le logiciel Gantt Project

1.2. DROPBOX

Est un service fait pour des personnes qui souhaitent échanger des fichiers entre elles de manière simple et rapide. Une application s'installe sur notre machine et envoie chaque

modification de fichier sur un serveur de DropBox. Une fois notre fichier arrivé sur le serveur de Dropbox, il est envoyé à toutes les machines abonnées à notre dossier. (Gini, 2012)

On a utilisé Dropbox durant la réalisation de notre travail pour effectuer l'échange des différents documents et fichiers entre les membres de notre projet (Figure I.2).

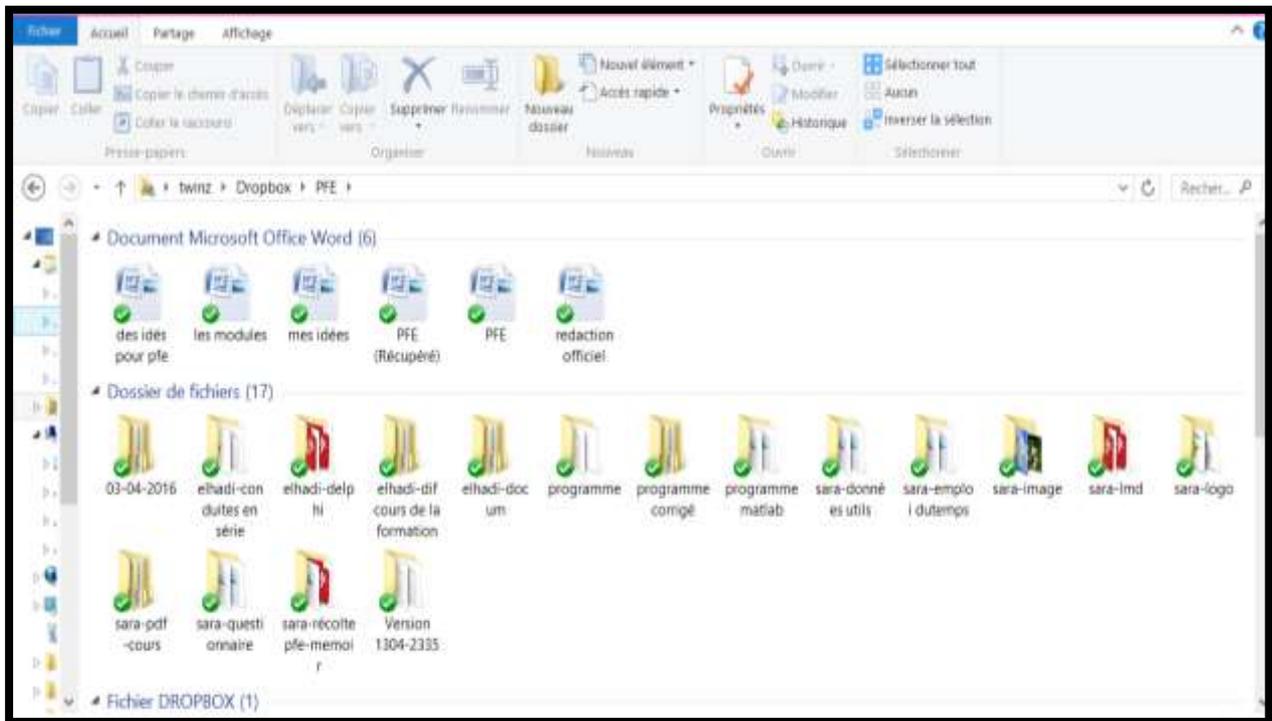


Figure I- 2: Dossier Dropbox

1.3. TRELLO

C'est une application disponible sur web permettant de gérer des projets et tâches en équipe. Nous l'utilisons pour planifier et organiser absolument tout dans notre projet de fin d'étude (4 personnes). Nous avons utilisés Trello tout au long de notre projet, et autant dire qu'on ne saurait plus s'en passer désormais. Nous avons créé 3 listes sur Trello : La première permet de gérer les tâches à faire, la deuxième, les tâches en cours et la dernière, les tâches réalisées. Cet outil nous a permis aussi d'affecter les tâches aux personnes et de définir les durés de réalisation.

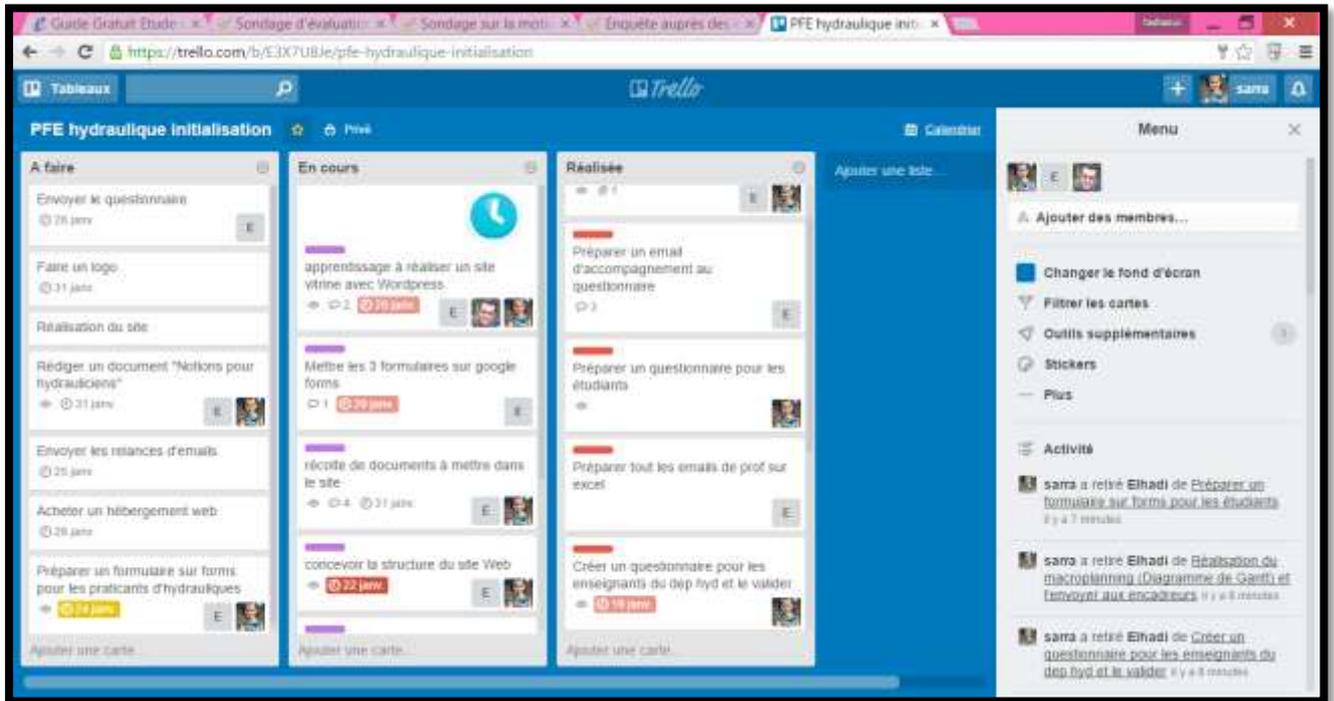


Figure I- 3: Liste suivie pour l'organisation du travail

1.4. GOOGLE FORMS

C'est un outil qui permet de créer des formulaires personnalisés pour réaliser des enquêtes et des questionnaires (§4.1.1). Les réponses sont recueillies dans une feuille Excel. Il est aussi possible de les analyser directement sur cet outil Web. Dans notre cas on a utilisé Google Forms pour la réalisation des questionnaires pour les étudiants, enseignants et professionnels.

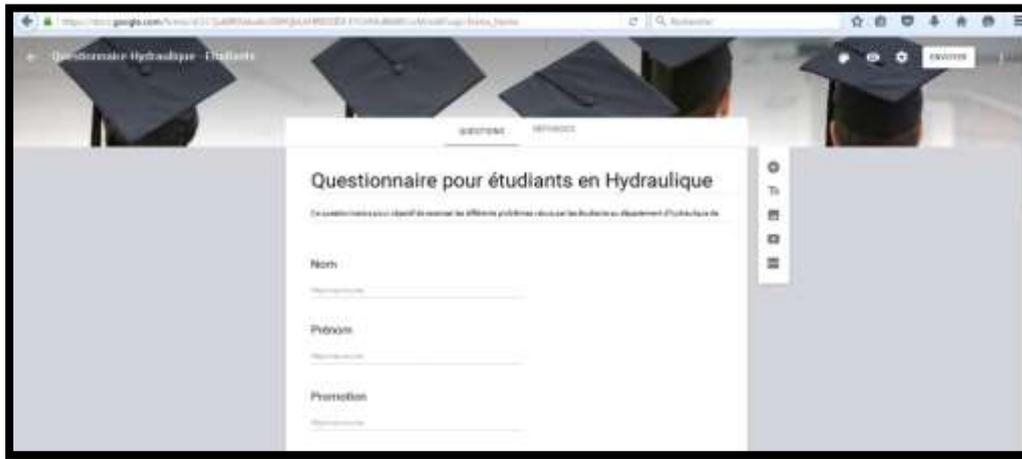
The image shows a screenshot of a Google Forms questionnaire. The title is "Questionnaire pour étudiants en Hydraulique". Below the title, there is a subtitle: "Ce questionnaire a pour objectif de recenser les différents problèmes rencontrés par les étudiants au département d'Hydraulique de". The form contains three text input fields labeled "Nom:", "Prénoms:", and "Pratiquant:". To the right of the form, there is a vertical sidebar with icons for settings, a share icon, and a "ENVOYER" button. The background of the form is a light gray with a header image showing several graduation caps.

Figure I- 4: Questionnaire réalisé pour les étudiants (§4.2.1)

Ces trois outils sont simple à l'utilisation et exploitable par toute personne afin de réduire le cycle de développement du projet, mieux avancer, être à jour, assurer le suivi et la meilleur gestion. Nous affirmons que cette méthodologie de travail nous a facilité les tâches.

CHAPITRE 02

2. CONCEPTS ET THÉORIE DES ÉCOULEMENTS

Les fluides sont des substances susceptibles de s'écouler. Lorsqu'ils sont en équilibre les forces tangentielles sont nulles. Ces forces ne sont prises en considération que lorsqu'il ya un mouvement relatif entre des différentes couches (c.-à-d. le fluide est en mouvement). On peut classer les fluides en liquides et en gaz. Les principales différences existant entre les liquides et les gaz sont:

1. Les liquides sont pratiquement incompressibles tandis que les gaz sont compressibles.
2. Les liquides occupent des volumes bien définis et présentent des surfaces libres tandis qu'une masse donnée de gaz se dilate jusqu'à occuper toutes les parties du récipient qui la contient (Giles, 1982).

2.1. DIFFÉRENTS TYPES DE FLUIDES

2.1.1. Fluide réel

Un fluide réel est un fluide qui existe dans la nature donc il est visqueux et son degré de viscosité dépend de la pression et de la température. La viscosité est la propriété responsable de la résistance au mouvement. Cette résistance est responsable de la perte d'énergie lors du mouvement, donc pour mettre en évidence cette perte d'énergie il faut faire intervenir les forces de viscosité dans l'expression générale du mouvement (Carbonnet & Roques; Policopié Université de Nancy).

2.1.2. Fluide parfait

Pour faciliter l'analyse des divers phénomènes de l'hydraulique, on suppose souvent que la viscosité du fluide est nulle pour étudier certains problèmes où les pertes de charge sont négligeables. Dans cette hypothèse simplificatrice les contraintes tangentielles sont supposées nulles (Pimenov & Tagui-Zade).

2.2. VISCOSITÉ

La viscosité se manifeste chaque fois que les couches voisines d'un même fluide sont en mouvement relatif, c'est à dire lorsqu'il s'établit un gradient de vitesse. La viscosité peut donc être considérée comme le frottement interne qui résulte du glissement d'une couche de fluide sur une autre. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente

un frottement interne élevé. Autrement dit, la viscosité d'un fluide traduit son aptitude à s'écouler ; s'il s'écoule facilement, sa viscosité est faible. On distingue deux types de viscosité : la viscosité dynamique et la viscosité cinématique (Giles, 1982).

2.2.1. Viscosité dynamique

La viscosité dynamique est généralement représentée par le symbole μ et elle s'exprime en Pa.s dans le système S.I. (Système International). Elle varie avec la pression et la température. Elle est égale à 10^{-6} Pa.s pour l'eau à 20°C et 1 atm.

2.2.2. Viscosité cinématique

La viscosité cinématique est définie par le rapport de la viscosité dynamique sur la masse volumique:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad \dots (2.1)$$

où

μ : viscosité dynamique en Pa.s

ρ : masse volumique en kg/m^3

v : viscosité cinématique en m^2/s

2.3. LES TYPES D'ÉCOULEMENT

2.3.1. Les écoulements souterrains

L'eau souterraine s'écoule des niveaux d'énergie élevée aux niveaux d'énergie plus faible ; cette énergie étant essentiellement le résultat de l'altitude et de la pression. En effet, l'énergie cinétique, proportionnelle au carré de la vitesse est négligeable parce que les vitesses sont très petites, surtout en écoulement laminaire. Une perte d'énergie survient lors de l'écoulement, résultant du frottement contre les solides du milieu granulaire. Cette perte d'énergie par unité de longueur du chemin parcouru, dénommée gradient hydraulique, est directement proportionnelle à la vitesse de l'eau en écoulement laminaire.

L'équation qui exprime cette proportionnalité du gradient hydraulique et de la vitesse d'écoulement est la loi de Darcy (Banton & Bangoy, 1999).

L'expérience de Darcy :

En 1856, dans le cadre d'une étude sur l'alimentation en eau de la ville de Dijon, Henry Darcy réalise une expérience sur le débit de l'eau s'écoulant à travers une colonne de sable. Cette première expérience scientifique constitue la naissance de l'hydrogéologie quantitative. Utilisant une colonne de 3,5m de hauteur et de 0,35m de diamètre, ouverte à son extrémité inférieure et remplie de sable grossier, Darcy remarqua que le débit d'écoulement de l'eau dans la colonne était proportionnel à la différence de pression entre l'entrée et la sortie de la colonne d'eau H et inversement proportionnel à la longueur de la colonne de sable L selon une relation de la forme (Banton & Bangoy, 1999):

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{H}{L} \quad \dots (2.2)$$

2.3.2. Les écoulements à surface libre

Les écoulements dans les canaux naturels (rivière) et artificiels (irrigation assainissement) sont, dans la plupart des cas, des écoulements à surface libre. La surface libre est l'interface entre l'air et l'eau. La pression à la surface libre est égale le plus souvent à la pression atmosphérique. On peut définir les écoulements suivants la variabilité des caractéristiques hydrauliques tels que le tirant d'eau et la vitesse en fonction du temps et de l'espace. (Degoutte)

Variabilité dans le temps :

Le mouvement est permanent si les vitesses U et la profondeur h restent invariables dans le temps en grandeur et en direction. Le mouvement est non permanent dans le cas contraire voir (figure II.1).

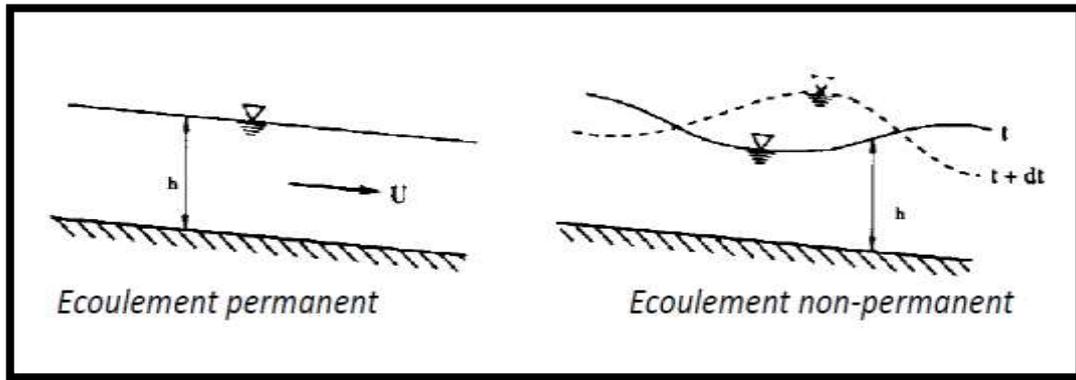


Figure II- 1: Variabilité de l'écoulement dans le temps (Carlier, 1988).

Variabilité dans l'espace :

Le mouvement est uniforme si les paramètres caractérisant l'écoulement restent invariables dans les diverses sections du canal. La ligne de la pente du fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre.

Le mouvement est non uniforme ou varié si les paramètres caractérisant l'écoulement changent d'une section à l'autre. La pente de la surface libre diffère de celle du fond voir (figure II.2).

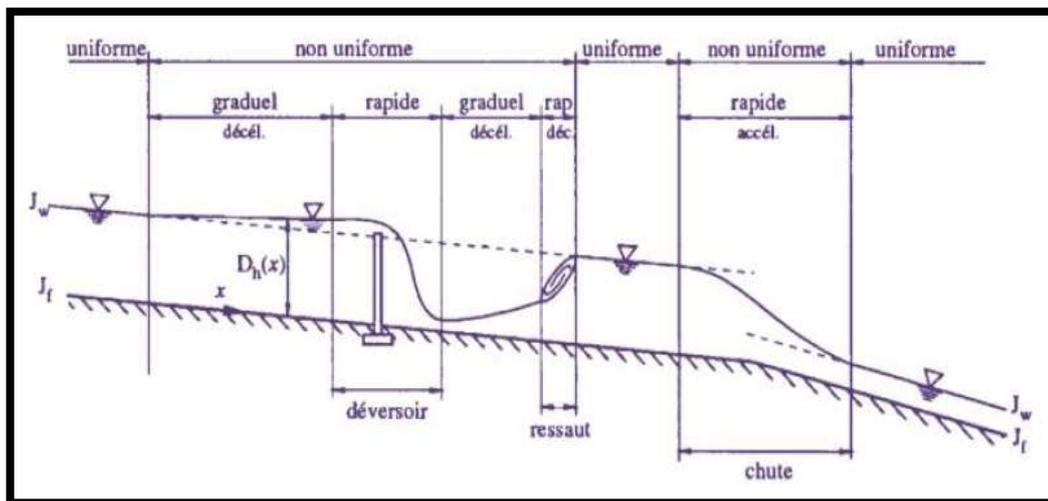


Figure II- 2: Variabilité de l'écoulement dans l'espace (Carlier, 1988).

Si l'on considère un tronçon de canal à écoulement libre compris entre deux sections (1) et (2), on appelle charge spécifique voir (figure II.3), en un point quelconque de ce tronçon la valeur H telle que : (Dupont, 1979)

$$H_s = y + \alpha \frac{U^2}{2g} \dots (2.3)$$

où :

h : la mesure verticale de la hauteur du plan d'eau au dessus du radier [m]

α : coefficient très légèrement supérieur 1 résultant de l'inégale répartition des vitesses

V : vitesse d'écoulement [m/s]

g : accélération de la pesanteur [m/s²]

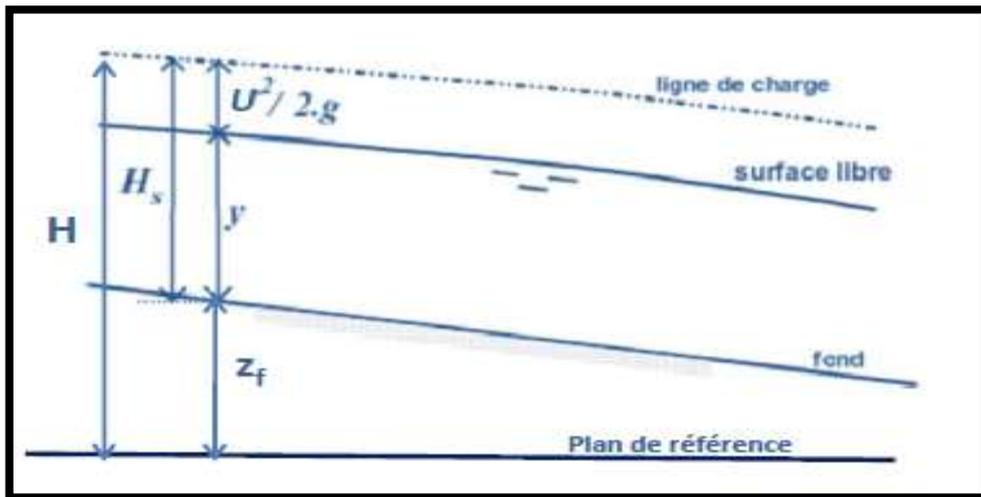


Figure II- 3: Ligne de charge ; charge spécifique (Carlier, 1988)

Pour un écoulement uniforme, la hauteur du plan d'eau est dite hauteur normale.

❖ **Rayon hydraulique :**

Il est défini comme étant le rapport de la surface mouillée S et du périmètre mouillé P de la section d'écoulement (Boillat & Pfister, 2013).

$$Rh = \frac{S}{P} \dots (2.4)$$

où

Rh : Rayon hydraulique [m].

S : Section mouillée [m²].

P : Périmètre mouillé [m].

❖ **Nombre de Froude :**

Le nombre de Froude est un nombre sans dimension dont le carré représente le rapport de l'énergie cinétique du liquide en mouvement à l'énergie potentielle de la pesanteur. Il a un rôle tout à fait fondamental pour caractériser les écoulements (Degoutte).

Il s'écrit avec la formule suivante :

$$F = \sqrt{\frac{Q^2 B}{g S^3}} \dots (2.5)$$

avec :

Q : le débit évacué [m³/s] ;

B : largeur au miroir [m] ;

g : pesanteur [m/s²]

S : section mouillée [m²]

❖ **Régime d'écoulement :**

- Lorsque $F=1$, le régime est dit critique donc $y=y_c$
- Lorsque $F<1$ (ou lorsque $y>y_c$) le régime est dit fluvial.
- Lorsque $F>1$ (ou lorsque $y<y_c$) le régime est dit torrentiel.

Pour un nombre de Froude =1, la hauteur d'eau à cet instant est dite hauteur critique à partir de laquelle le régime d'écoulement transite du fluvial au torrentiel et vice versa (figure II.4).

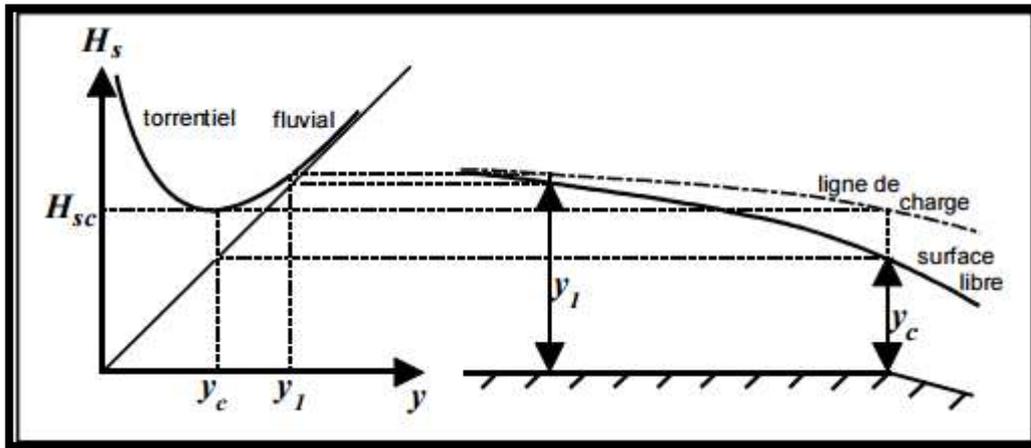


Figure II- 4: Relation charge spécifique-tirant d'eau. (Degoutte)

2.3.3. Les écoulement sous pression

Les écoulements en charge sont des écoulements confinés à l'intérieur d'un contenant, en général une conduite. La pression à l'intérieur de ces conduites peut être de beaucoup plus élevée que la pression atmosphérique ou encore s'abaisser à des valeurs aussi faibles que la pression de vapeur. Même si la pression à l'intérieur de ce type d'écoulement peut atteindre la pression atmosphérique, en aucun cas nous considérons la présence de surface libre dans cette catégorie d'écoulements (Huilier, www.daniel-huilier.fr).

- Nombre de Reynolds:

Le nombre de Reynolds est un critère sans dimensions qui représente le rapport des forces d'inertie aux forces des frottements visqueux. (Giles, 1982; Bouhafsi, 2009)

On peut l'écrire sous la forme suivante:

$$Re = \frac{\bar{V}\rho d}{\mu} \dots (1.6)$$

où :

\bar{V} : vitesse moyenne de l'écoulement [m/s]

d : diamètre de la conduite [m]

ρ = masse volumique du fluide en [kg/m³]

μ : viscosité dynamique en [Pa.s⁻¹]

2.4. RÉGIME LAMINAIRE ET RÉGIME TURBULENT

La distinction entre les deux types de régime qui se produisent dans les liquides réels donne une idée des difficultés que soulèvent les analyses théoriques dans le domaine des liquides en mouvement. En effet, il existe deux types de mouvements des fluides : le mouvement laminaire où chaque particule décrit une trajectoire bien définie et est animée d'une vitesse uniquement dans le sens de l'écoulement ; le mouvement turbulent où chaque particule, outre la vitesse dans le sens de l'écoulement, est animé d'un mouvement d'agitation avec des vitesses transversales à l'écoulement. La turbulence est essentiellement provoquée par la viscosité. Le nombre de Reynolds, défini plus haut, est le paramètre qui caractérise le type d'écoulement. Ainsi, il est généralement admis que :

$Re \leq 2000$: le régime est laminaire

$2000 < Re < 4000$: le régime critique

$Re \geq 4000$: le régime est turbulent

C'est la fameuse expérience du professeur Osborne Reynolds en 1883, qui a mis en évidence l'existence de deux types d'écoulements obéissant chacun à des lois différentes. L'expérience a consisté à faire passer de l'eau propre dans un tube de verre transparent, où l'on introduit un petit filament, fortement coloré, dans la direction coïncidant avec l'axe du tube (Lancastre, 2002).

Si la vitesse de l'eau dans le tube est relativement petit, le filament coloré se maintient rectiligne et coïncide avec l'axe du tube (cf. figure II.5a) quand on augmente la vitesse de l'eau dans le tube, le filament coloré se mélange avec toute la masse d'eau, à laquelle il confère une légère coloration uniforme (cf. figure II.5c).

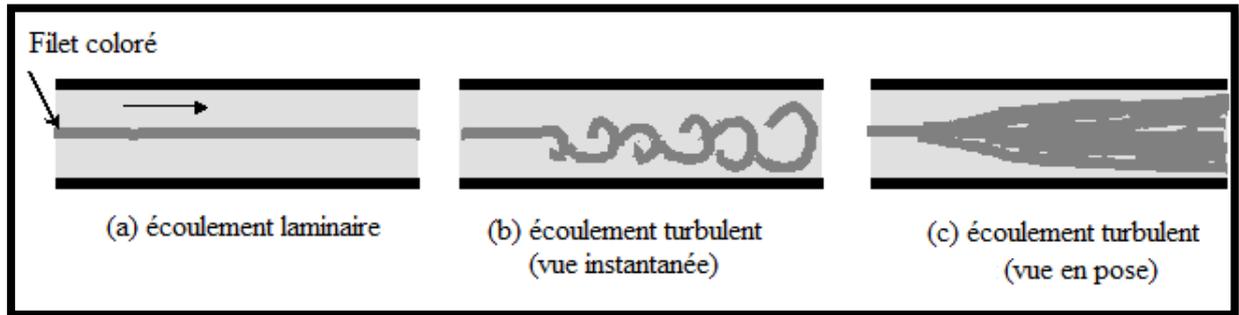


Figure II- 5: Expérience de Reynolds (Roque, 2005)

Le mouvement turbulent s'assimile à un ensemble de mouvements tourbillonnaires, constitués par des tourbillons de diverses dimensions et de diverses fréquences qui se superposent d'une manière aléatoire, au milieu de l'écoulement.

2.5. RUGOSITÉ

La rugosité absolue ε est la mesure moyenne des aspérités du matériau. La rugosité relative $\bar{\varepsilon}$ est le rapport de la rugosité ε au diamètre de la conduite d :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{d} \quad \dots (2.7)$$

où:

ε : Rugosité absolue du matériau [m]

d : diamètre de la conduite [m]

Dans la pratique, la rugosité absolue n'est pas uniforme, mais on peut la caractériser par une valeur moyenne qui au point de vue des pertes de charge correspond à une rugosité uniforme.

La connaissance de ε est très importante, surtout pour les grandes conduites en béton et en acier. Dans les conduites en béton, la valeur de la rugosité absolue dépend essentiellement de la finition, ainsi que de la fréquence et de l'alignement des joints. Dans les conduites métalliques soudées la valeur de ε dépend principalement, du type et du mode d'application du revêtement. Dans les conduites métalliques rivées, le revêtement n'a

qu'une importance secondaire ; le facteur principal est le procédé de rivetage : nombre et écartement des files longitudinales et transversales de rivets. (Lancastre, 2002).

La rugosité est donc un paramètre essentiel dans le calcul des pertes de charges linéaires dans les canalisations. Elle donne un renseignement sur l'état des parois en contact avec le fluide. La rugosité des conduits est un facteur déterminant dans le choix des matières de tuyaux lors de l'étude d'un réseau hydraulique ou aéraulique (Mecaflux).

2.6. EQUATION DE BERNOULLI

Pour un fluide parfait, l'équation de Bernoulli peut s'écrire sous la forme hydraulique suivante (Bouabdallah & Tadlaoui, 2014; Carlier, 1988):

$$\frac{P}{\rho g} + Z + \frac{\bar{V}^2}{2g} = Cste \quad \dots (2.8)$$

où

$\frac{P}{\rho g}$: Pression [m.C.F]

Z : côte au sol [m]

V : vitesse d'écoulement [m/s]

g : accélération de la pesanteur [m/s²]

L'équation (2.8) de Bernoulli exprime la conservation de l'énergie mécanique du fluide par unité de poids le long d'une ligne de courant. Elle est aussi connue comme étant la constante de Bernoulli ou comme étant la charge hydraulique totale ou le potentiel hydraulique total. Les trois termes de gauche expriment respectivement hauteur de la pression statique, la position du point considéré et la hauteur de la vitesse. La somme du premier et second terme est appelée la hauteur piézométrique.

L'interprétation graphique de l'expression (2.8) est illustrée par la (figure II-6), où la pression d'arrêt est enregistrée par un tube de Pitot et la pression statique par un piézomètre.

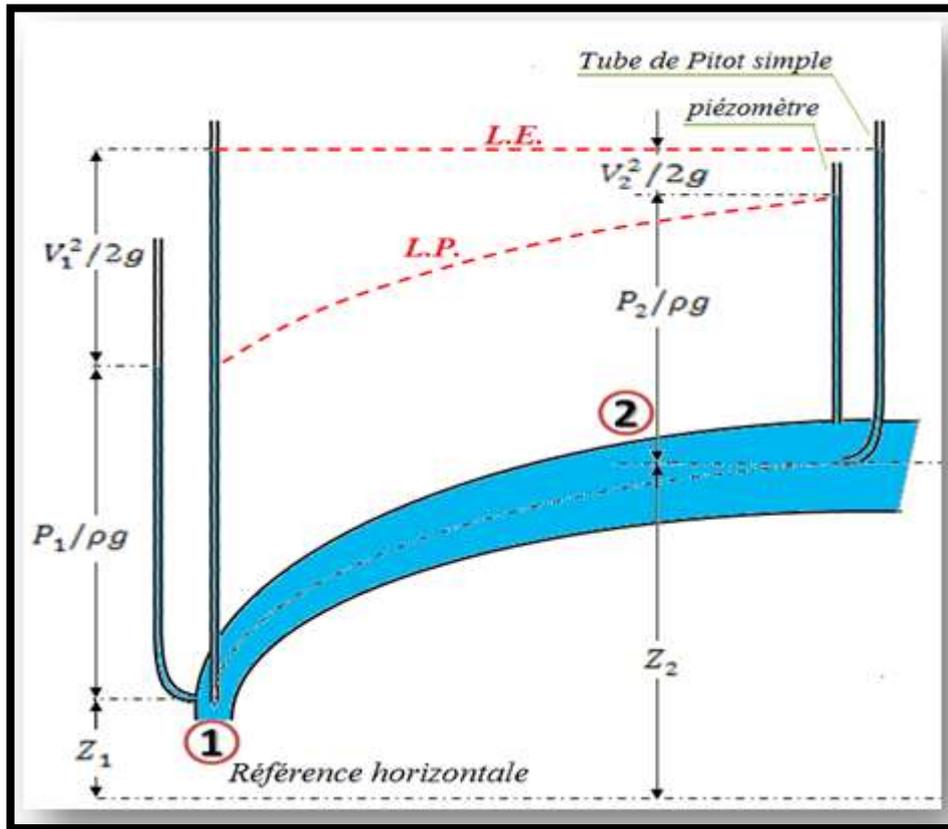


Figure II- 6: Représentation graphique de l'équation de Bernoulli pour un fluide parfait.

L'application de l'équation (2.8) de Bernoulli entre les sections 1 et 2 s'écrit:

$$H = \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{\bar{V}_2^2}{2g} \quad \dots (2.9)$$

L'équation de Bernoulli, équation (2.8), dérivée pour un écoulement parfait le long d'une ligne de courant peut être corrigée pour être appliquée à un fluide réel. En corrigeant l'énergie cinétique moyenne dans une section droite d'un écoulement réel par le coefficient α dit coefficient de correction de l'énergie cinétique et en ajoutant à droite de l'équation (2.9) un terme h_f qui prend en considération l'énergie dissipée entre les sections 1 et 2 due aux frottements, on obtient l'expression suivante connue comme étant l'équation de Bernoulli modifiée ou bien l'équation d'énergie (Giles, 1982; Policopié Université de Nancy)

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \alpha \frac{\bar{V}_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \alpha \frac{\bar{V}_2^2}{2g} + h_f \quad \dots (2.10)$$

où

\bar{V}_1 et \bar{V}_2 : vitesses moyennes d'écoulement respectivement à la section 1 et 2 [m/s],

h_f : Perte de charge totale [m],

α : coefficient de correction de l'énergie cinétique.

2.7. LES PERTES DE CHARGE

Les pertes de charge d'un fluide en mouvement entre deux points d'une tuyauterie horizontale à diamètre constant correspondent à la diminution d'énergie du fluide entre ces deux points. Il existe deux sortes de pertes de charge :

-Les pertes de charge linéaires (ou linéiques) dues aux frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie.

-Les pertes de charge singulières (ou locales) provoquées par les accidents sur la tuyauterie (coudes, vannes de réglage, robinets,...). Ces pertes de charge peuvent être involontaires donc subies ou alors volontairement provoquées (dans l'équilibrage d'un réseau d'alimentation, il est parfois nécessaire de créer des pertes de charge pour diminuer la pression du fluide dans certaines parties de l'installation). Si la détermination des pertes de charges linéaires est relativement bien définie, celle des pertes de charge singulières est bien plus délicate (Ligen & Le Guay, 2007) (Becquet).

Les pertes de charge singulières s'expriment avec la formule suivante :

$$h_s = \zeta \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad \dots (1.10)$$

Où :

h_s : pertes de charges singulière [m]

ζ : Coefficient des pertes de charge singulière [-]

\bar{V} : vitesse d'écoulement dans la conduite [m/s]

g : pesanteur [m/s²]

CHAPITRE 03

3. MÉTHODES D'ESTIMATION DES PERTES DE CHARGE

LINÉAIRES

L'écoulement de l'eau dans les conduites forcées a fait l'objet de nombreuses formules qui ont été traduites en abaques ou mises sous forme de tableaux. Cette diversité montre les difficultés qu'ont rencontrées les auteurs en vue d'établir une expression générale satisfaisante tenant compte, à la fois, de tous les paramètres intervenant dans la résistance à l'écoulement (nature de la conduite, viscosité, et la nature du revêtement).

Le présent chapitre consiste à citer les différentes formules (anciennes et récentes) et méthodes d'évaluation des pertes de charge linéaire ; les formules anciennes ont la forme $J=b_1 \times f(V,d)$ où b_1 est une fonction de l'état de surface, et les formules modernes qui ont la forme $J=\lambda \times f(v,L,d)$ où λ est une fonction de l'état de surface, du diamètre et régime de l'écoulement.

3.1. MÉTHODES ANCIENNES POUR L'ESTIMATION DES PERTES DE CHARGES

Il a été démontré que la perte de charge linéaire par unité de longueur, J , est directement proportionnelle à la vitesse et inversement proportionnelle au diamètre ; elle s'écrit sous la forme générale suivante (Carlier, 1988; Massy, 1975) :

$$J = \frac{4}{d} f(\bar{V}, d, k) \quad \dots (2.1)$$

où

k : état de surface du matériau [m]

d : diamètre de la conduite [m]

\bar{V} : vitesse moyenne [m/s]

3.2. FORMULES ANCIENNES

Pendant très longtemps et jusqu'à ces dernières années, la fonction $f(\bar{V})$ a été déterminée expérimentalement et les auteurs ont posé d'une manière quasi-générale (Carlier, 1988) :

$$f(V) = b_1 \bar{V}^2 \quad \dots (2.2a)$$

Où b_1 est une fonction de du diamètre nominale d et de la rugosité du matériau k .

Après combinaison de l'équation (2.1) et l'équation (2.2a), les formules anciennes peuvent être écrites sous la forme:

$$J = \frac{4}{d} b_1 \bar{V}^2 \quad \dots (2.2b)$$

Plusieurs chercheurs ont pu déterminer le coefficient b_1 de façons différentes, quelques formulations de ce coefficient b_1 sont données ci-après (Carlier, 1988) :

3.2.1. Formule de Prony 1803

Prony a proposé en 1803 la formule suivante :

$$b_1 = \frac{0.000017}{\bar{V}} + 0.000348 \quad \dots (2.3)$$

Cette formule a été proposée pour tout type de matériau et de rugosité sans donner trop de précision sur les régimes des écoulements (Carlier, 1988).

3.2.2. Formule de Darcy 1852

Par contre, Darcy a proposé en 1852 une formule similaire à celle de Prony en tenant compte sommairement de l'état de surface (Carlier, 1988):

$$b_1 = \alpha + \frac{\beta}{D} \quad \dots (2.4)$$

où

$\alpha=0.0002535$ et $\beta=0.00000647$ pour des tuyaux de fonte neufs et lisses,

$\alpha=0.000507$ et $\beta=0.00001294$ pour des tuyaux en fonte recouverts de dépôts.

3.2.3. Formule de Dupuit 1854

En 1854, Dupuit a proposé un coefficient b_1 variant entre $2.22 \cdot 10^{-4}$ et $4.0 \cdot 10^{-4}$. Cet intervalle de valeurs a été confirmé auparavant par Chézy (1775), Du Buat (1786), Wlotmann (1791), Eytelwein (1796), Tadini (1844) et par Colombo (1854). (Carlier, 1988)

3.2.4. Formule de Maurice 1867

Après plusieurs expérimentations, Maurice Lévy a proposé les formules suivantes en 1867 (Carlier, 1988) :

- Pour des conduites neuves :

$$J = \frac{2\bar{V}^2}{1324.96d \left(1 + \sqrt{\frac{d}{2}}\right)} \quad \dots (2.5a)$$

- Pour des conduites de fonte recouvertes de dépôts :

$$J = \frac{2\bar{V}^2}{420.25 \left(1 + 3\sqrt{\frac{d}{2}}\right)} \quad \dots (2.5b)$$

3.2.5. Formule de Ganguillet et Kutter 1869

Ganguillet et Kutter ont proposé en 1869 l'expression suivante (Carlier, 1988) :

$$b_1 = \frac{1}{C^2} \quad \dots (2.6)$$

Où

$$C = \frac{23 + \frac{0.00155}{J} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0.00155}{J}\right) \left(\frac{2n}{\sqrt{d}}\right)}$$

et

$$n = 0.011 \text{ jusqu'à } 0.012$$

3.2.6. Formule de Flamant 1892

La formule suivante a été proposée par Flamant en 1892 (Carlier, 1988):

$$b_1 = \frac{k}{4\sqrt[4]{Vd}} \quad \dots (2.7)$$

Le coefficient k est pris égal à 0.00074 pour des tuyaux très lisses et à 0.00092 pour des tuyaux en service ou légèrement incrustés.

3.2.7. Formule de René Kœchlin

René Kœchlin a proposé une formule valable aussi bien pour les canalisations sous pression que pour les canaux (Carlier, 1988); il a recommandé de déterminer b_1 dans l'équation (2.2) par :

$$b_1 = \left(1/k_1 \left(1 + 0.6 \sqrt{\frac{d}{4}}\right)\right)^2 \quad \dots (2.8)$$

Où la valeur de k_1 est prise égale à 51 pour des tuyaux peu usagés et à 42 pour des tuyaux usagés.

3.2.8. Formule de Saph-Schoder et la formule de Mougnié

Saph-Schoder en 1903 ainsi que Mougnié en 1913 ont opté pour la même formule suivante (Carlier, 1988) :

$$J = k \frac{\bar{V}^n}{d^{1.25}} \quad \dots (2.9)$$

$$\text{avec } 620 < k10^6 < 2000$$

$$\text{et } 1.75 < n < 2$$

Le coefficient n représente le type du fluide passant par la conduite et k représente l'état de surface.

3.2.9. Formule de Biegeleisen-Bukowsky

Biegeleisen-Bukowsky ont proposé en 1914 la formule suivante pour le calcul directe de la perte de charge (Carlier, 1988):

$$J = k \frac{\bar{V}^{1.9}}{d^{1.1}} \quad \dots (2.10)$$

3.2.10. Formule de Betz

En 1925 Betz a proposé la formule suivante pour le calcul des pertes de charge (Carlier, 1988) :

$$J = k \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \frac{\bar{V}^2}{2gd} \quad \dots (2.11)$$

$$\text{avec } 1.1 < k < 1.5$$

3.2.11. Formule de Scobey

En 1930 Scobey a proposé la formule suivante (Carlier, 1988):

$$J = 2.58710^{-6} k \frac{\bar{V}^{189}}{d^{1.09}} \quad \dots (2.12)$$

3.2.12. Formule de Manning-Strickler

En 1923 Manning-Strickler ont proposé le coefficient b_1 suivant valable pour les tuyaux et les canaux (Carlier, 1988; Massy, 1975):

$$b_1 = \frac{n^2}{\left(\frac{d}{4}\right)^{\frac{1}{3}}} \dots (2.13)$$

Le paramètre n est pris égal à 0.0140 pour des conduites très incrustées et à 0.005 pour les conduites faiblement incrustées.

3.3. MÉTHODES MODERNES POUR L'ESTIMATION DES PERTES DE CHARGE

La formulation dite moderne de la perte de charge unitaire J a été proposé par Darcy-Weisbach comme suit (Bouhafs, 2009; Carlier, 1988; Massy, 1975) :

$$h_L = \lambda \frac{l \bar{V}^2}{d 2g} \dots (2.14)$$

Avec :

\bar{V} : vitesse d'écoulement dans la conduite [m.s^{-1}]

d : diamètre de la conduite [m]

g : accélération de la pesanteur [m.s^{-2}]

l : longueur de la conduite [m]

λ : coefficient de perte charge dans la conduite

3.4. ESTIMATIONS DU COEFFICIENT λ POUR LE RÉGIME LAMINAIRE

Pour le régime laminaire, le coefficient de perte de charge λ est unique pour tout type de conduites (lisses ou rugueuses). Il est déduit à partir de l'équation de Darcy et de l'équation de Hagen Poiseuille. Il est donné par (Ligen & Le Guay, 2007) (Bouhafsi, 2009) (Massy, 1975) :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \dots (2.15)$$

3.5. LE COEFFICIENT λ POUR LE RÉGIME CRITIQUE

Les problèmes d'écoulement dans ce régime sont très complexes, mais on peut cependant signaler que le régime critique est essentiellement caractérisé par :

Un mouvement aléatoire des particules de fluide moins prononcé que celui du régime turbulent, contrairement à ce régime on ne peut attribuer aux grandeurs (vitesse et pression) des valeurs moyennes stables en fonction du temps, d'où la qualification de ce type d'écoulement d'instationnaire. Par conséquent on peut dire que le nombre de Reynolds et le coefficient de perte de charge λ sont instables dans cet écoulement (Ligen & Le Guay, 2007).

On peut aussi expliquer l'instabilité dans la zone de transition, par la non convergence des courbes du coefficient λ dans les régimes laminaire et turbulent. En prolongeant la courbe de Poiseuille dans le régime critique on trouve des valeurs de λ inférieurs à 0,028. De l'autre côté, en prolongeant le faisceau de courbes de Coolbrok dans le régime critique ($Re < 3200$) on obtient des valeurs de λ supérieures à 0,043.

- Limites du régime critique :

Si la limite $Re=2000$ du régime laminaire semble être admise pour les conduits industriels, on trouve dans la littérature des valeurs bien différentes pour caractériser celles du régime turbulent. Aucune information n'est disponible sur la limite de ce régime en fonction de rugosité relative.

- Evolution du coefficient de perte de charge :

Du point de vue de la détermination de la perte de charge linéique, le calcul du coefficient λ en régime critique ne peut donner un résultat signifiant, l'instabilité de l'écoulement en est la cause principale en particulier dans la zone comprise dans l'intervalle $2000 < Re < 3500$ pour les conduites lisses et dans l'intervalle $2000 < Re < 4000$ pour les conduites rugueuses (cf. normes ASME).

Il n'existe aucune formulation pour l'estimation de λ en régime critique, cependant, l'équation de CHURCHILL (formule II.34) publiée en 1977 permet d'effectuer une interpolation du coefficient de perte de charge dans cette région.

3.6. LE COEFFICIENT λ POUR LE RÉGIME TURBULENT

Pour le régime turbulent, λ est estimé expérimentalement qui après étude statistique des résultats ont donnés naissance à des formules empiriques, ceci explique la diversité des formules anciennes proposées pour sa détermination. La plupart de ces formules sont d'un intérêt relatif puisque valables seulement dans des domaines restreints (Ligen & Le Guay, 2007).

Nous citons, ci-après, les formules les plus utilisées dans le domaine de la pratique et qui existent dans la littérature.

3.6.1. Formules pour les conduites lisses

- **Formule de Hagen**

Hagen a proposé en 1854 la formule suivante (Carlier, 1988):

$$\lambda = \frac{k}{Re^{0.25}} \quad \dots (2.16)$$

Le coefficient k est fonction de la nature de la conduite.

- **Formule de Reynolds**

En 1892 Reynolds a suggéré l'expression suivante (Carlier, 1988):

$$\lambda = \frac{2k}{Re^{2-n}} \quad \dots (2.17)$$

avec $1.82 < n < 2$

Le coefficient k est fonction de la nature de la conduite.

- **Formule de Blasius**

L'allemand Blasius a proposé en 1913, pour les conduites lisses avec $3000 < Re < 10^5$, la formule simple suivante (Zella & Smadhi, 2005; Carlier, 1988; Massy, 1975):

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad \dots (2.18)$$

- **Formule de Lees**

Lees a proposé en 1914 de calculer le coefficient λ de l'équation (2.15) par la formule suivante (Carlier, 1988) (Ligen & Le Guay, 2007):

$$\lambda = 0.00714 + \frac{0.61}{Re^{0.35}} \quad \dots (2.19)$$

- **Formule de Prandtl-Von Karman**

Prandtl-Von Karman ont réussi à déterminer le coefficient λ après des études faites à l'université allemande de Göttingen. Ils ont opté, en 1935, pour la formule suivante (Smits, 2007):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log Re \sqrt{\lambda} - 0.80 \quad \dots (2.20)$$

- **Formule de Lazard**

En 1935 la formule suivante a été proposée par Lazard pour l'estimation de λ (Carlier, 1988):

$$\lambda = 0.00372 + \frac{0.247}{Re^{0.25}} \quad \dots (2.21)$$

- **Formule de Schiller et Hermann**

Schiller et Hermann ont proposé de calculer λ avec (Carlier, 1988):

$$\lambda = 0.0054 + \frac{0.396}{Re^{0.3}} \quad \dots (2.22)$$

3.6.2. FORMULES pour les conduites rugueuses

- **Formule de Nikuradse**

Pour le régime turbulent rugueux Nikuradse a suggéré de calculer λ avec la formule suivante (Carlier, 1988):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \frac{\bar{\epsilon}}{3.7} \quad \dots (2.23)$$

- **Formule de Coolbrok:**

Proposée en 1939, la formule universelle de Cool brook-White est applicable à un fluide quelconque et aux conduites industrielles, dont la rugosité est hétérogène. La formule se présente sous la forme suivante (Carlier, 1988; Massy, 1975; Coolbrook C., 1939) (Ligen & Le Guay, 2007):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\bar{\epsilon}}{3.71} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad \dots (2.24)$$

- **Formule de ACHOUR**

Dans le but de faciliter le calcul du coefficient de frottement λ dans tout le domaine de l'écoulement turbulent en conduit sous pression, Achour propose de remplacer la formule de Coolbrok-White par la relation approchée suivante (Achour, 2007):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\bar{\epsilon}}{3.7} + \frac{4.5}{Re} \log \left(\frac{Re}{6.97} \right) \right) \quad \dots (2.25)$$

- **Formule de Moody**

Moody a proposé la formule suivante pour tous les régimes turbulents. Il a limité son utilisation à $Re \leq 10^7$ et $\bar{\epsilon} \leq 0.01$ avec une erreur inférieure à $\pm 5\%$, (Massy, 1975; Ligen & Le Guay, 2007) :

$$\lambda = 0.0055 \left[1 + \left(2 \cdot 10^4 \bar{\varepsilon} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \dots (2.26)$$

- **Formule de Prandtl -Von-karman**

Pour les tuyaux très rugueux, Prandtl Von-karman ont proposé la formule suivante pour l'estimation du coefficient λ (Zella & Smadhi, 2005):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 + 2 \log \left(\frac{1}{2 \bar{\varepsilon}} \right) \dots (2.27)$$

- **Formule d'Altschoul**

En 1957 Altschoul a proposé la formule suivante pour l'estimation de λ (Ligen & Le Guay, 2007; Idel'cik, 1999):

$$\lambda = 0.1 \left(1.46 \bar{\varepsilon} + \frac{100}{Re} \right)^{0.25} \dots (2.28)$$

- **Formule de Hazen et Williams**

Pour l'écoulement de l'eau à une température ambiante, Hazen et Williams ont proposé, en 1902, la formule suivante pour l'estimation de λ (King & Brater, 1954; Giles, 1982):

$$\lambda = \frac{13.68 g}{C^{1.85} \bar{v}^{0.15} d^{0.17}} \dots (2.29)$$

Où le coefficient C représente la rugosité des conduites et varie de 140 pour les conduites très lisses à 80-60 pour les conduites très rugueuses.

- **Formule de Lehman**

Lehmann a suggérer la formule suivante (Ligen & Le Guay, 2007) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.94 \log \left[\left(\frac{\bar{\varepsilon}}{3.71} \right)^{1.03} + \left(\frac{4.26}{Re \sqrt{\lambda}} \right)^{1.1} \right] \dots (2.30)$$

- **Formule de Chen Hing Hsing**

La formule suivante a été recommandée par Chen Hing (Ligen & Le Guay, 2007):

$$\lambda = \frac{0.25}{\left\{ \log \left[\frac{\bar{\varepsilon}}{3.7065} - \frac{5.042}{Re} \cdot \log \left(\frac{\bar{\varepsilon}^{1.1098}}{2.8257} + \frac{5.8506}{Re^{0.8981}} \right) \right] \right\}^2} \quad \dots (2.31)$$

- **Formule de Swamee-Jain**

En 1976 Swamee et Jain ont proposé la corrélation suivante (Swamee & Jain, 1976; Ligen & Le Guay, 2007):

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{3.71} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \dots (2.32)$$

- **Formule de Barr**

Barr a proposé la modification de l'équation (2.32) comme suit (Ligen & Le Guay, 2007):

$$\lambda = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{3.71} + \frac{5.1286}{Re^{0.89}} \right) \right]^2} \quad \dots (2.33)$$

- **Formule de Churchill**

Churchill proposa en 1977 la formulation suivante pour tous les régimes turbulents et laminaires (Churchill, 1977; Ligen & Le Guay, 2007):

$$\lambda = 8 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{\frac{1}{12}} \quad \dots (2.34)$$

où :

$$A = \left(2.475 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \bar{\varepsilon}} \right) \right)^{16}$$

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

- **Formule de Lobaev**

C'est aussi une formule simple et commode pour la détermination du coefficient de perte de charge, la formule est donnée par (Idel'cik, 1999):

$$\lambda = \frac{1.42}{\left(\log_{10} \left(\frac{Re}{\bar{\epsilon}} \right) \right)^2} \quad \dots (2.35)$$

- **Corrélation de Haaland**

Haaland a proposé en 1983 la corrélation suivante (Haaland, 1983):

$$\lambda = \left(-1.8 \log_{10} \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\bar{\epsilon}}{3.7} \right)^{1.11} \right) \right)^{-2} \quad \dots (2.36)$$

- **Serghides**

En 1984, Serghides a proposé la relation suivante (Serghides, 1984).

$$\lambda = \left(A - \frac{(B - A)^2}{C - 2B + A} \right)^{-2} \quad \dots (2.37)$$

où :

$$A = -2 \log_{10} \left(\frac{\bar{\epsilon}}{3.7} + \frac{12}{Re} \right)$$

$$B = -2 \log_{10} \left(\frac{\bar{\epsilon}}{3.7} + \frac{2.51A}{Re} \right)$$

$$C = -2 \log_{10} \left(\frac{\bar{\epsilon}}{3.7} + \frac{2.51B}{Re} \right)$$

- **Corrélation de Goudar – Sonnad**

En 2007, Goudar et Sonnad ont proposé les relations suivantes (Goudar & Sonnad, 2008):

$$\lambda = \left(a \left(\ln \left(\frac{x}{y} \right) + \delta_1 \right) \right)^{-2} \quad \dots (2.38)$$

$$\lambda = \left(a \left(\ln \left(\frac{x}{y} \right) + \delta_2 \right) \right)^{-2} \quad \dots (2.39)$$

où

$$a = 2/\ln 10$$

$$b = \bar{\varepsilon}/3.7$$

$$x = Re \ln 10/5.02$$

$$s = bx + \ln x$$

$$y = s^{(s/(s+1))}$$

$$w = bx + \ln \left(\frac{x}{y} \right)$$

$$z = \ln \left(\frac{y}{w} \right)$$

$$\delta_1 = z \frac{w}{w+1}$$

$$\delta_2 = \delta_1 \left(1 + \frac{z/2}{(w+1)^2 + (z/3)(2w-1)} \right)$$

- **Formule de Nackab**

Nackab a transformé la relation de Coolbrok (2.11) en l'écrivant bien différemment et qui n'est pas itératif, il la transformé qui la écrit sous cette forme (Zella & Smadhi, 2005):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[0,27\bar{\varepsilon} + \frac{2,51}{\left(Re \sqrt{0,4Re^{-0,3} + 0.0053} \right)} \right] \dots (2.40)$$

- **Formule de citrine**

En 1963, Citrini a aussi proposé une formule explicite. Elle s'écrit (Levin):

$$\lambda = \frac{1 + \frac{8}{Re * \bar{\epsilon}}}{(2 * \log_{10}(3.71 * \frac{1}{\bar{\epsilon}}))^2} \dots (2.41)$$

- **Formule de ECK**

Cette formule peu être utiliser pour des régimes turbulent rugueux qui s'écrit comme suit (Bohl & Wolfgang, 2008):

$$\lambda = \frac{0.25}{(\log_{10}(3.71 * \bar{\epsilon}))^2} \dots (2.42)$$

- **Formule de Lebeau**

Cette formule a été proposée pour un nombre de Reynolds inférieure à 10^6 et qui s'exprime comme suit (Ligen & Le Guay, 2007):

$$\lambda = 1.962 \cdot 10^{-3} \cdot (315 \cdot Re^{-0.36} + 4) \dots (2.43)$$

- **Formule de Filolenko**

Formule proposé pour les régimes turbulents avec un nombre de Reynolds supérieur à 10^4 et qui s'écrit comme suit (Ligen & Le Guay, 2007):

$$\lambda = \frac{1}{(1.8 \cdot \log(Re) - 1.64)^2} \dots (2.44)$$

- **Corrélation de Blench**

C'est une formule qui peut être utilisé qu'en régime pleinement turbulent, la formule est présenté par (Paraschivoiu, Prud'homme, Robillard, & Vasseur, 2003):

$$\lambda = 0.79 * \sqrt{\bar{\epsilon}} \dots (2.45)$$

- **Formule de Pecornic**

Cette formule à été proposé en 1963 pour un nombre de Reynolds compris entre $4 \cdot 10^3$ et 10^8 et pour une rugosité relative comprise entre 0.01 et $5 \cdot 10^{-6}$ (Huilier, écoulement visqueux dans les conduites, 2010).

$$\lambda = \frac{0.25}{\left(\log_{10}\left(\frac{15}{Re} + \frac{\bar{\epsilon}}{3.715}\right)\right)^2} \dots (2.46)$$

3.7. MÉTHODE GRAPHIQUE : DIAGRAMME DE MOODY

Le diagramme de Moody connu aussi sous le nom du diagramme universel des pertes de charge (cf. fig.III.1) regroupe tous les régimes. Pour les régimes turbulents, le diagramme de Moody donnent des valeurs pratiquement égales à celles estimées par l'équation de Coolbrok. A l'opposé de l'équation de Coolbrok, ce diagramme est très commode pour le calcul manuel (Moody, 1944).

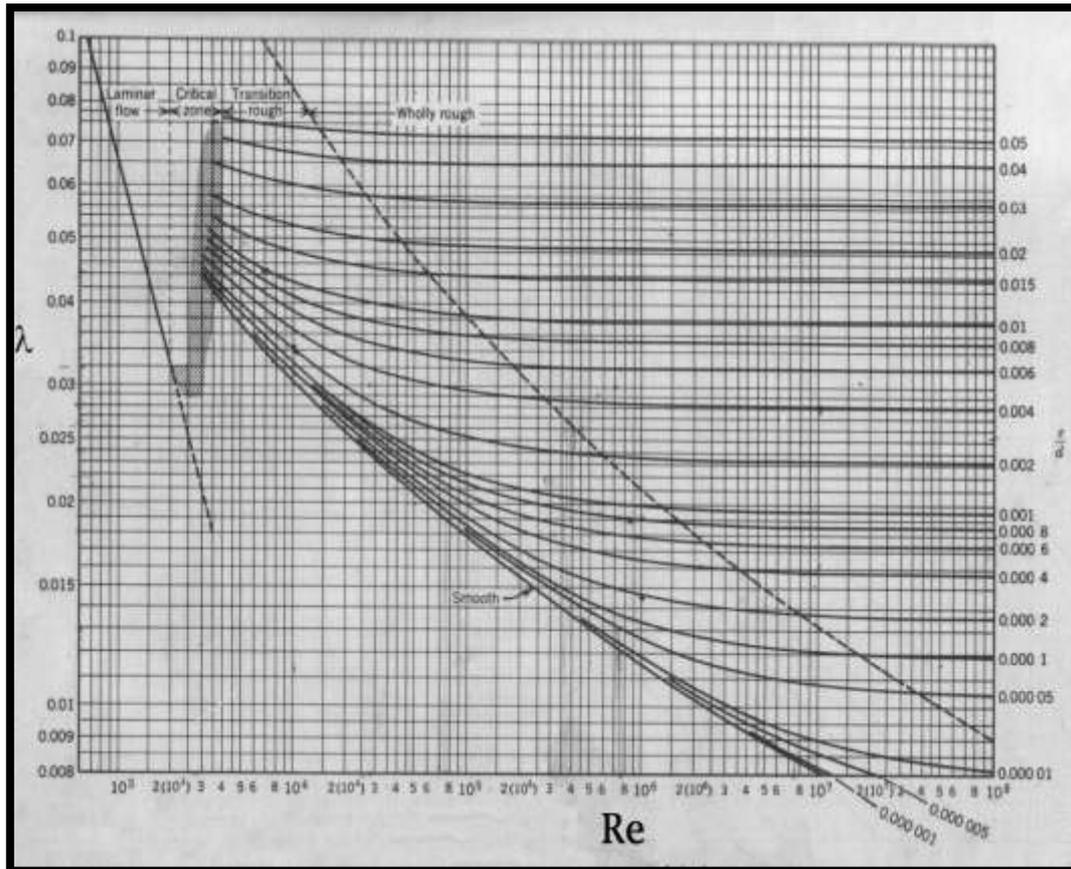


Figure III- 1: Diagramme universel de Moody (Massy, 1975).

3.8. MÉTHODE UTILISANT UN ABAQUE

Les formules modernes font varier le diamètre, le coefficient de rugosité ϵ et le nombre de Reynolds, variations assez faibles toutefois pour des diamètres voisins et du même ϵ . La formule qui est très couramment utilisée est celle de Coolbrok pour laquelle Koch et Vibert (Dupont, 1979) ont dressé un tableau des pertes de charge en fonction des débits pour différents diamètres (voir annexe).

Une conduite de diamètre D qui débite q_1 avec une perte de charge j_1 débitera q_2 avec une perte de charge j_2 selon la relation donnée par l'équation 2.47 (Dupont, 1979)

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{q_1^2}{q_2^2} \dots (2.47)$$

Cette relation peut être avantageusement utilisée lorsque l'on désire exprimer les valeurs de pertes de charge dans une conduite pour différents débits alors que l'on a pu mesurer la perte de charge pour le passage d'un débit connu (Dupont, 1979).

3.9. LOGICIELS DE CALCULS DE PERTES DE CHARGES

Notre objectif est de réaliser, entre autres, un logiciel gratuit disponible en ligne qui permet de résoudre quelques problèmes élémentaires d'hydraulique générale. Avant de nous lancer dans la réalisation de ce logiciel, nous avons fait une recherche et une étude comparative des logiciels de calcul de pertes de charges disponibles.

Plusieurs logiciels ont été développés par des fabricants de pompe, conduite...ou par des institutions d'hydraulique. Pour les fabricants, les logiciels développés permettent aux utilisateurs de calculer les pertes de charge de leurs installations spécifiques. Nous avons pu inventorier 11 logiciels. Nous avons partagé ces logiciels de calcul de pertes de charges en 3 catégories :

A. Logiciels :

- EPANET :

C'est un logiciel gratuit développé pour la simulation du comportement des systèmes de distribution d'eau d'un point de vue hydraulique et également d'un point de vue qualité de l'eau. L'utilisation d'EPANET est très diversifiée, et porte principalement sur la régulation des pressions dans le réseau, la détection des zones de fonctionnement déficitaire et le dimensionnement de travaux d'amélioration du réseau.

La formule de perte de charge est, par défaut, celle de Darcy-Weisbach, avec une possibilité d'utiliser Hazen-Williams ou de Chezy-Manning. Ce logiciel prend en charge les pertes de charges singulières aux différentes accessoires du réseau.

Les unités utilisées par le moteur de calcul sont, par défaut, celles du Système International. Toutefois, le maintien des unités américaines est toujours possible.

- **Porteau :**

C'est un logiciel, de simulation hydraulique et de cinétique, adapté aux réseaux d'eau sous-pression. Il permet une schématisation du réseau, la représentation de son fonctionnement en pointe, sur un horizon de plusieurs heures ou jours. Il est utile comme outil de gestion et d'aide au dimensionnement.

Pour calculer la perte de charge, l'utilisateur a le choix entre les 3 formules (William-Hazen , Colebrook ou Lechapt-Calmon). C'est un logiciel gratuit.

- **Mecaflux Standard:**

C'est un logiciel de calcul de pertes de charge linéaires et singulières mais payant à plus de 70€. (Mecaflux Team)

B. Site web de calcul hydraulique en ligne:

- **SIHIdeltaP :**

Il permet la détermination des pertes de charge de l'écoulement d'un fluide à travers des tuyauteries, des coudes, et autres accessoires. Cette application Web permet de calculer la chute de pression (ΔP) et le NPSH disponible pour des systèmes complexes avec une large gamme de fluides (SIHI GMBH.).

- **PhiCalculator :**

C'est un utilitaire gratuit d'aide à la sélection de diamètres en hydraulique. Cette application a été pensée pour être utilisée de la même façon qu'une calculatrice. Cette application fonctionne suivant trois modes de calculs (Guestbox): a) Perte de charge maximum ; b) Vitesse maximum et c) Diamètre imposé.

- **TLV :**

C'est un Calculateur en ligne et gratuit de pertes de charges (TLV)

- **Reefcentral :**

C'est un calculateur en ligne et gratuit pour les pompe (Reefcentral Team).

- Thermexcel :

C'est un Calculateur en ligne et gratuit de pertes de charges (thermexcel)

C. Application sur Android

- Head loss calculator :

Elle permet de calculer la chute de pression causée par la friction dans des tuyaux en matériaux différents version. C'est une application gratuite.

- Le calcul de pertes de charge :

Cette application permet de calculer les pertes de pressions ou de charges dans une conduite avec l'équation de William-Hazen et donne la perte en [m] avec comme données d'entrée (d, L, C_{wh}). Cette application est aussi gratuite.

- Perte de charge ou de pression :

C'est une application pour l'estimation de la perte de charge ou de pression dans un tuyau. C'est une application payante.

CHAPITRE 04

4. CONCEPTION DU LOGICIEL « HYDROLEARN CALCUL »

Pour contribuer à la résolution des problèmes liés au calcul hydraulique nous avons conçu un logiciel composé de trois simulateurs. Ce logiciel fournit une aide précieuse aux hydrauliciens du domaine universitaire et professionnel, car les idées que nous avons développées sont rapportées à des cas très fréquents en hydraulique générale. Le premier logiciel appelé « *Hydrolearn compare formules* » consiste à comparer le coefficient des pertes de charge λ , de plusieurs formules que nous avons sélectionnées, au λ estimé par la formule de Coolbrok. Ceci permettra un gain de temps pour connaître le domaine de validité de chaque formule. Le deuxième appelé « *Hydrolearn pertes dans des conduites* » est un simulateur qui sert à calculer les pertes de charge dans cinq conduites en série. Tandis que le troisième appelé « *Hydrolearn calcul surface libre* » traite les calculs élémentaires des écoulements à surface libre. Ces logiciels sont simples à utiliser et peuvent être d'une grande utilité pour les hydrauliciens.

Ces logiciels sont exécutables à partir d'une plateforme commune développée sous l'environnement Delphi 7 et appelée « *HYDROLEARN CALCUL* ». Cette application peut être utilisée directement sans être installée et elle est compatible avec les versions anciennes et nouvelles de Windows (Windows XP, Windows 2000, Windows Vista, Windows 7, Windows 8 et Windows 10).

4.1. PRÉSENTATION DE « *HYDROLEARN COMPARE FORMULES* »

Ce simulateur aide l'utilisateur à comparer d'une manière rapide, simple et facile le coefficient des pertes de charge linéaires « λ » de différentes formules (modernes) par rapport à la formule de Coolbrok qui reste à nos jours la référence incontestable dans ce domaine et ce dans le but vérifier le domaine de validation des 21 formules que nous citons ci-dessous :

« Coolbrok » « Blasius » « Lees » « Prandtl von karman 1 » « Lazard » « Schiller ET Herman » « Nikuradse » « Hagen » « Moody » « Altschoul » « Prandtl von karman 2 » « Lehman » « Chen hing hsing » « Swamee Jain » « Barr » « William-Hazen » « Lobaev » « Serghides » « Halland » « Achour » « Nackab ».

4.1.1. Mode d'utilisation

Le simulateur « *HYDROLEARN Compare Formules* », illustré dans la figure IV.1, est constitué plusieurs fenêtres. Une boîte de dialogue pour le choix de la formule, une autre pour introduire les données, une troisième pour afficher les résultats communs aux différentes formules et une quatrième pour afficher les résultats estimés par la formule de Coolbrok. Les résultats obtenus, par les différentes formules sélectionnées, sont comparés en pourcentage d'erreur par rapport à l'équation de Coolbrok. Les résultats sont affichés dans différentes fenêtres. En outre, cette interface permet de donner directement le coefficient de rugosité à adopter en fonction du matériau de la canalisation.

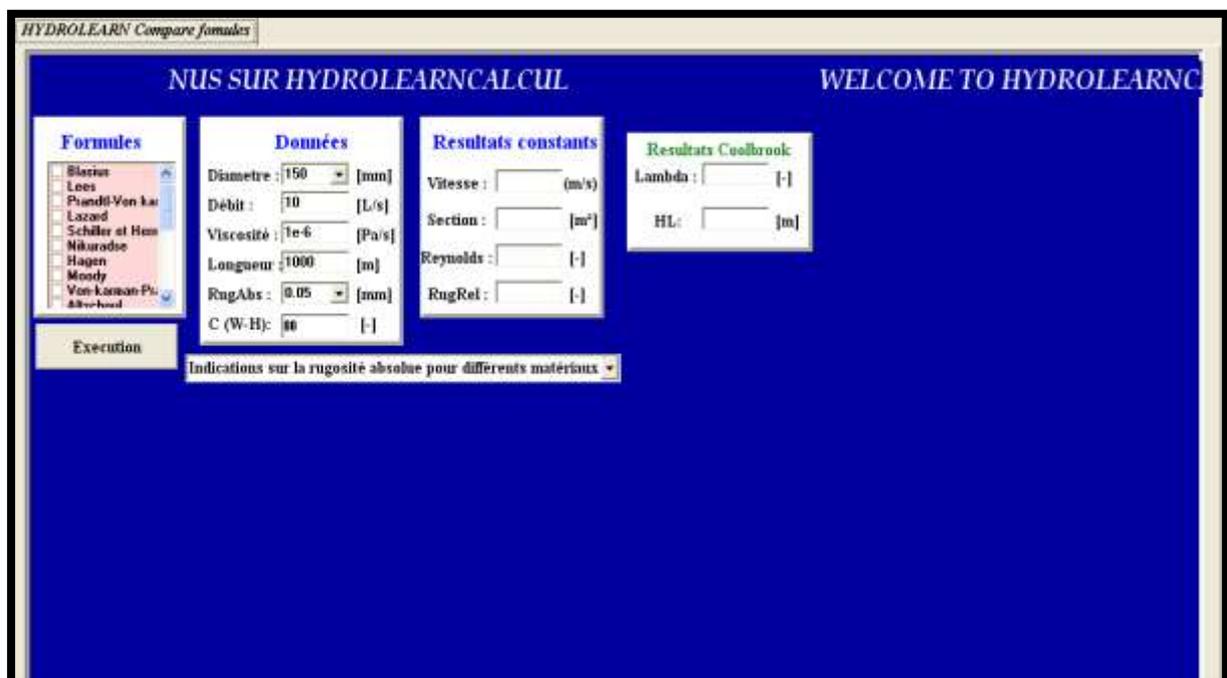


Figure IV- 1: Interface utilisateur de Compare formules.

La première fenêtre de gauche (figure IV-1) sert à choisir les formules de calcul précédemment citées. L'utilisateur a la main pour sélectionner les formules qu'il veut comparer (une ou plusieurs) à celle de Coolbrok, en les cochant comme nous le montre la (figure IV-2) .



Figure IV- 2: Boîte de dialogue pour le choix des formules à comparer.

La fenêtre « **données** » voir (figure IV.1 & IV.3) de l’interface utilisateur sert à introduire les valeurs du diamètre, de la longueur et de la rugosité (ϵ en mm ou C pour la formule de William-Hazen) de la conduite ainsi que la valeur du débit et de la viscosité du fluide véhiculé.

The image shows a dialog box titled "Données" with several input fields. The fields are: "Diametre" with a dropdown menu showing "150" and "[mm]"; "Débit" with a text box showing "10" and "[L/s]"; "Viscosité" with a text box showing "1e-6" and "[Pa/s]"; "Longueur" with a text box showing "1000" and "[m]"; "RugAbs" with a dropdown menu showing "0.05" and "[mm]"; and "C (W-H)" with a text box showing "80" and "[-]".

Figure IV- 3: Boîte de dialogue pour saisir les données.

L'utilisateur a la possibilité de choisir parmi les diamètres normalisés qui existent dans le commerce. Il suffit de choisir celui qui lui convient (figure V.4).

Données

Diametre : 150 [mm]

Débit : 150 [L/s]

Viscosité : 300 [Pa/s]

Longueur : 400 [m]

RugAbs : 600 [mm]

Figure IV- 4: Boite de dialogue pour le choix du diamètre normalisé.

Le logiciel permet de choisir les valeurs de la rugosité absolue en millimètre ainsi que le coefficient de William-Hazen C pour différents types de matériaux (figure IV.5).

Matériaux	Rugosité absolue
Cuivre, Laiton, Verre, Plomb	0.001-0.015-0.002
Aluminium, Plastique	0.002
PVC	0.001
Acier neuf	0.02-0.05-0.1
Acier rouillé	0.15-0.25
Acier incrusté	1.5-3

Figure IV- 5: Boite de dialogue pour le choix du coefficient de rugosités.

Dans le cas où l'utilisateur ne choisit aucune formule, les calculs sont effectués par défaut en utilisant la formulation Coolbrok-Darcy et les résultats sont affichés dans les fenêtres de la (figure IV.6).

The image shows two software windows side-by-side. The left window has a blue title 'Resultats constants' and four rows of labels followed by input boxes and units: 'Vitesse : [] (m/s)', 'Section : [] [m²]', 'Reynolds : [] [-]', and 'RugRel : [] [-]'. The right window has a green title 'Resultats Coolbrook' and two rows: 'Lambda : [] [-]' and 'HL: [] [m]'. Both windows have a white background and a thin black border.

Figure IV- 6: Fenêtres pour affichage des résultats communs, de λ estimé par l'équation de Coolbrook et de la perte linéaire estimée par l'équation de Darcy.

Afin de faire la comparaison entre les formules, l'utilisateur doit cocher les formules qu'il veut comparer, introduire les données et appuyer sur le bouton « **Exécution** ». Les résultats s'affichent dans les fenêtres qui leur ont été attribuées comme nous le montre l'exemple de la (figure IV.7).

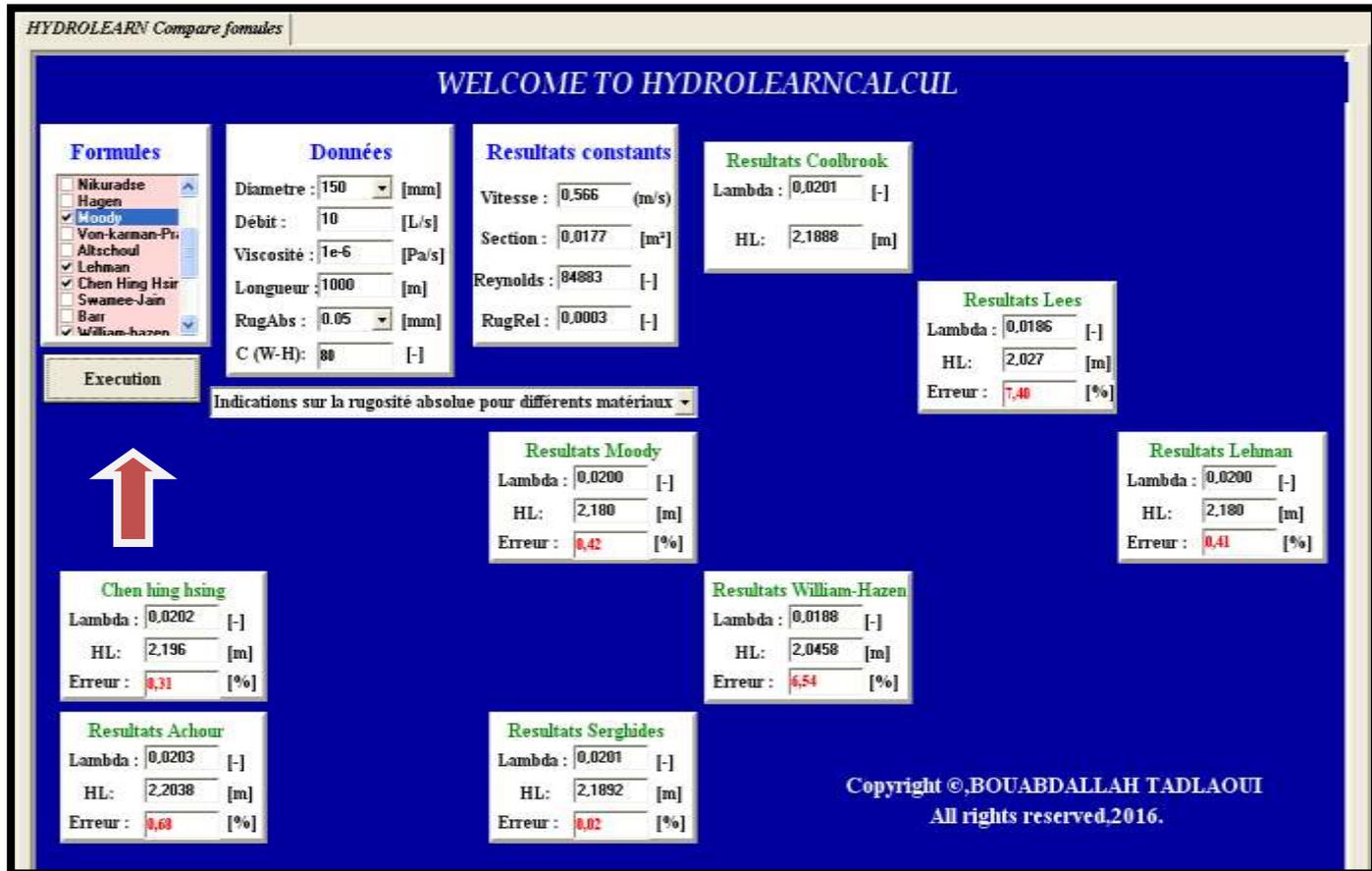


Figure IV- 7: Exemple de calcul avec une comparaison de 7 formules par rapport à celle de Coolbrook

4.1.2. Validation des résultats obtenus

Afin de valider les résultats obtenus par notre simulateur développé sous Delphi 7, nous avons réalisé des programmes sous Matlab pour les 21 formules traitées et ensuite nous avons comparé les résultats. Cette vérification nous a permis de corriger un certain nombre d'erreurs de programmation qui existaient sur notre calculateur. Nous donnons en annexe 4 les programmes développés sous Matlab et qui ont servi pour valider le logiciel « *HYDROLEARN Compare Formules* ». Le logiciel a été développé en deux unités distinctes (figure IV-8). Une unité principale pour la gestion des différentes fenêtres d'affichage et de saisi de données, et une unité secondaire contenant les différentes procédures de calcul.

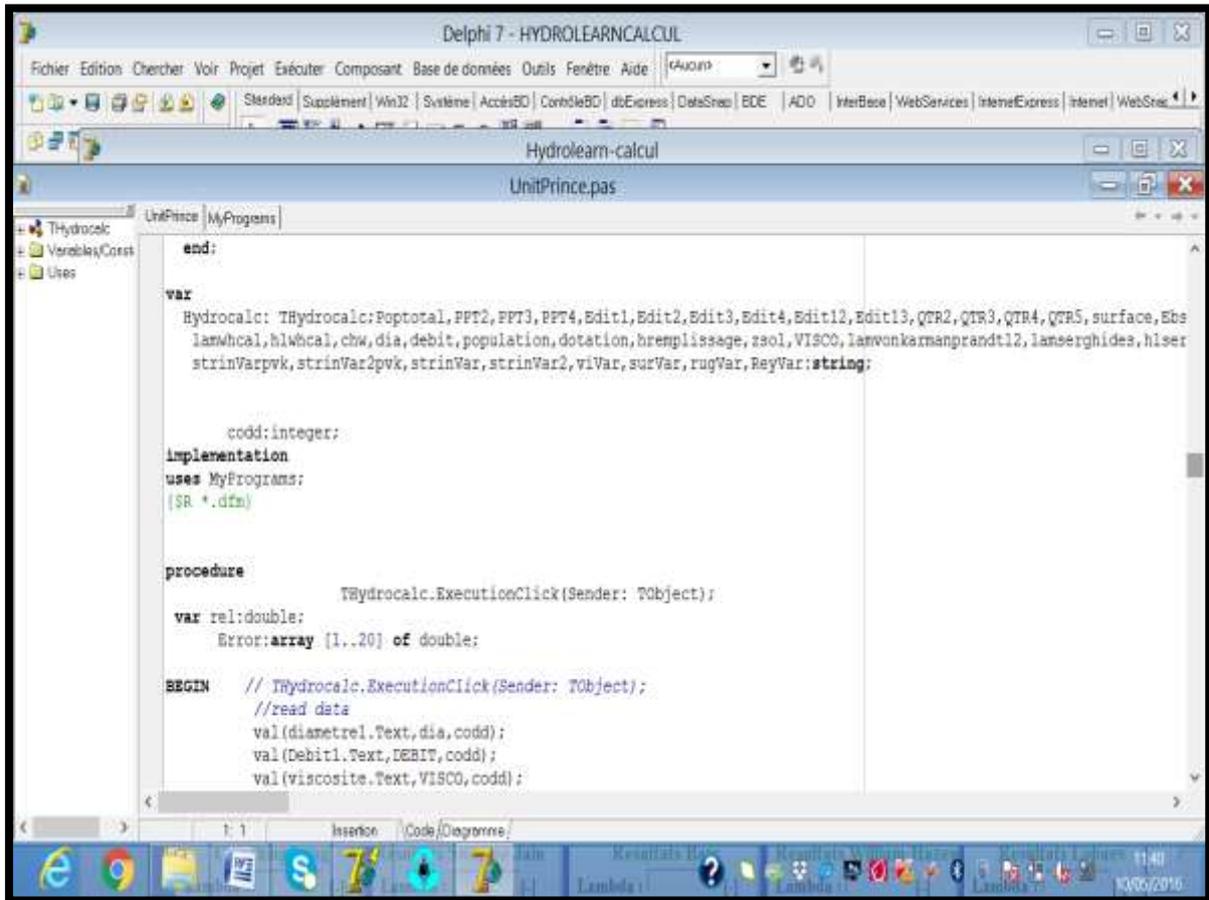


Figure IV- 8: Un exemple de script réalisé sous Delphi 7.

4.2. PRÉSENTATION DE « *HYDROLEARN PERTES DANS DES CONDUITES* »

Ce logiciel sert à calculer les pertes de charges dans des conduites en série. Il permet le calcul pour un maximum de cinq conduites en série. Ce calculateur, dont l'interface utilisateur est montré dans la (figure IV.9), permet un calcul rapide avec une interface conviviale et beaucoup plus intuitive que celles d'un grand nombre de logiciels proposés sur le web.

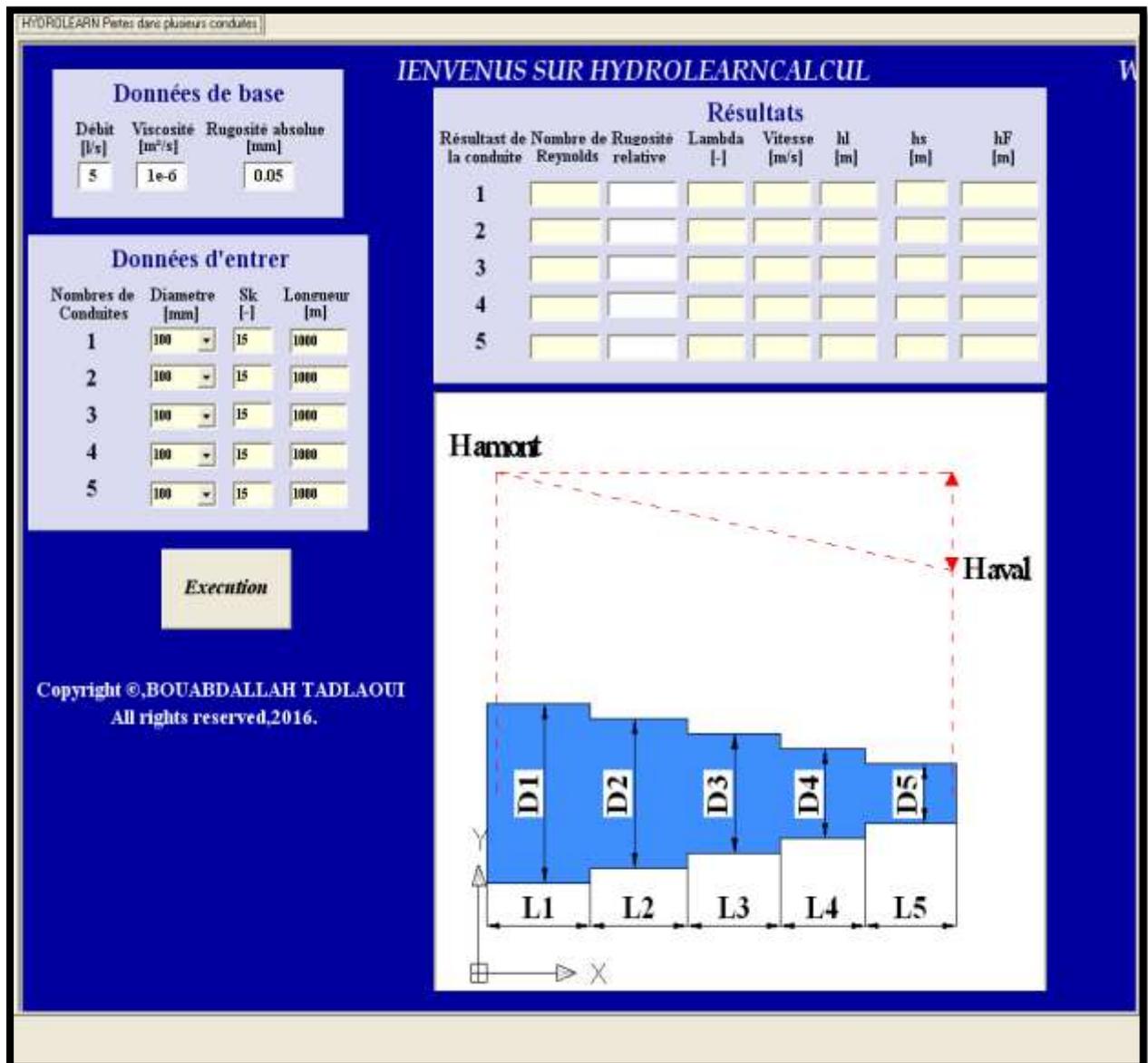


Figure IV- 9: Interface utilisateur du logiciel « Hydrolearn pertes dans des conduites ».

4.2.1. Mode d'utilisation

Comme le montre la (figure IV.10), l'utilisateur commence par introduire les données de base de l'écoulement (rugosité du matériau, débit et la viscosité du fluide) ainsi que les données relatives aux caractéristiques des conduites (longueur, diamètre et le coefficient SK des pertes singulières).

Données de base		
Débit [l/s]	Viscosité [m ² /s]	Rugosité absolue [mm]
5	1e-6	0.05

Données d'entrer			
Nombres de Conduites	Diametre [mm]	Sk [-]	Longueur [m]
1	100	15	1000
2	100	15	1000
3	100	15	1000
4	100	15	1000
5	100	15	1000

Figure IV- 10: Fenêtre de saisi des données du réseau.

Le champ relatif à la saisie du diamètre permet une sélection directe des diamètres normalisés et commercialisés.

Un simple click sur le bouton « *Exécution* » permet de calculer le nombre de Reynolds, la rugosité relative, le coefficient λ des pertes linéaires, la vitesse d'écoulement, les pertes linéaires h_f et les pertes singulières h_s pour chaque conduite ainsi que la perte totale HL à travers tout le réseau (somme de h_f et h_s).

Pour illustrer cette application, un réseau de cinq conduites en série a été traité et validé par d'autres logiciels. Les résultats de calcul sont représentés en (figure IV-11).

Pour valider les résultats donnés par notre calculateur, nous avons comparé (entre autres) les résultats obtenus dans cet exemple avec ceux estimés sous l'environnement Matlab. La valeur de la perte de charge totale estimée sous Matlab était égale à 565.2246m en comparaison à 565.215m montrée sur la (figure IV.11).

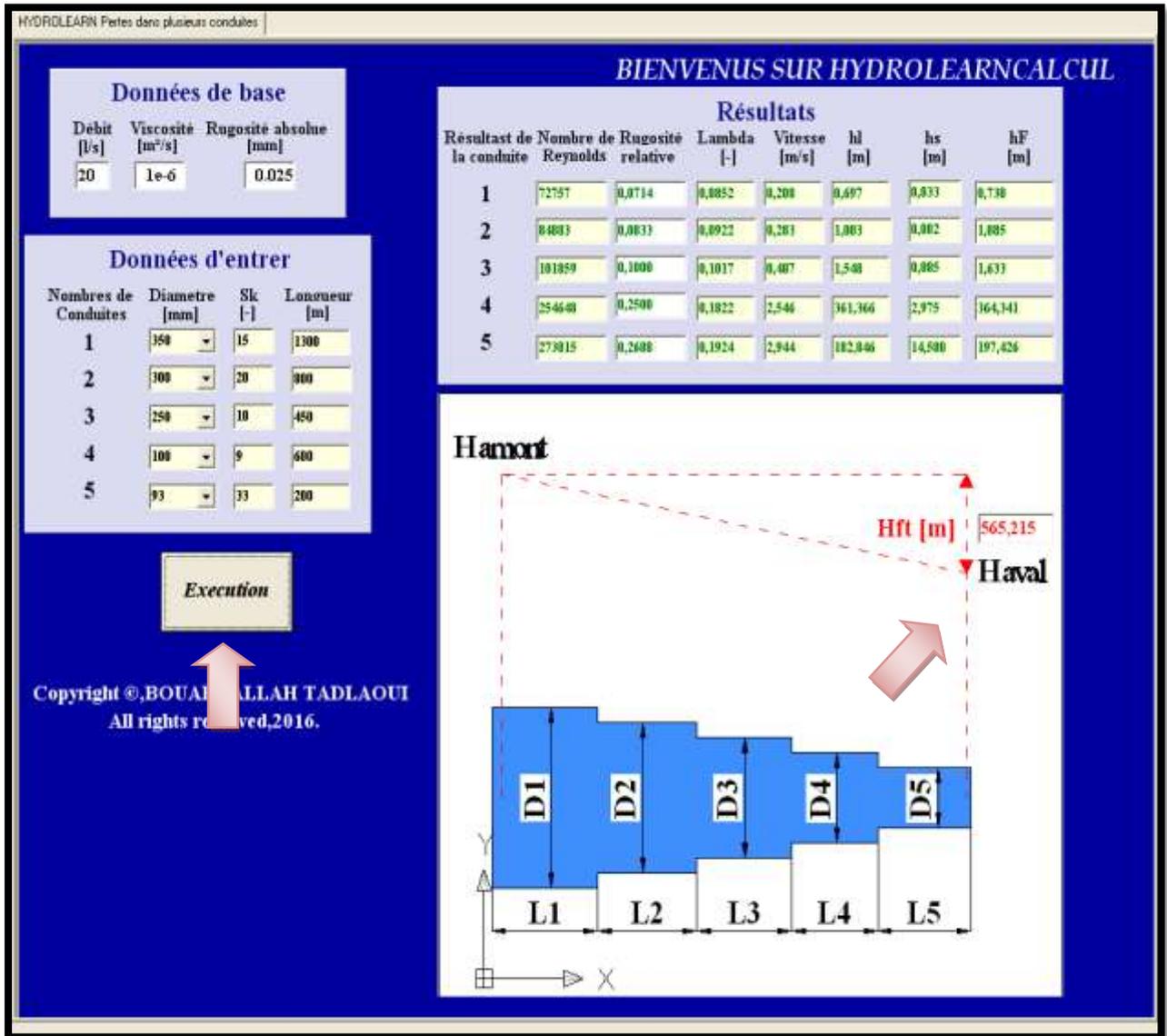


Figure IV- 11: Exemple de calcul d'un réseau à cinq conduites.

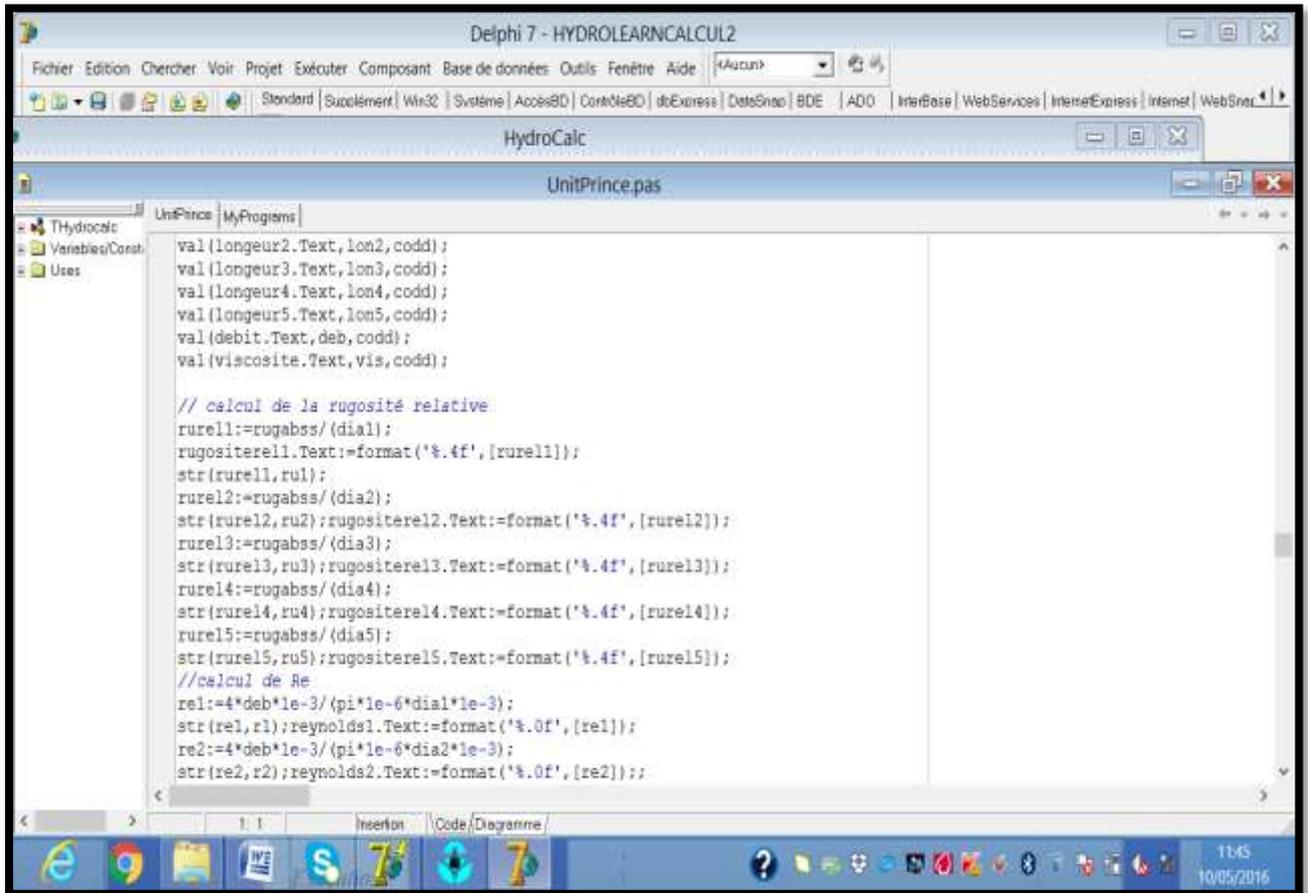


Figure IV- 12: Script sous Delphi 7 de « pertes dans des conduits ».

4.3. PRÉSENTATION DE « HYDROCALCUL SURFACE LIBRE »

Ce programme traite les calculs relatifs aux écoulements à surface libre. Il permet de calculer la hauteur normale, la hauteur critique, le nombre de Froude, la vitesse d'écoulement, la charge spécifique, la section, le périmètre mouillé et le rayon hydraulique dans les canaux trapézoïdaux. L'interface utilisateur illustrée en (figure IV.13) est simple et conviviale.



Figure IV- 13: Interface utilisateur de l'application « HYDROLEARN surface libre ».

4.3.1. Mode d'utilisation

L'utilisateur doit d'abord choisir le type de canal (rectangulaire, triangulaire ou bien trapézoïdal) par la suite il remplit les données qui caractérisent le canal (la largeur, la pente, le coefficient de Manning, le débit et l'angle α de l'inclinaison des talus) dans la boîte de dialogue illustrée en (figure IV.14) pour un exemple type. L'utilisateur peut sélectionner le coefficient de Manning en fonction du type de matériau constituant le canal. Ce choix peut être effectué en utilisant la fenêtre illustrée en (figure IV.15).

Choisissez le type de canal et sa rugosité

Types de canal	Indications sur la rugosité de maning	
Rectangulaire	<p>Données d'entrer</p> <p>0.013</p> <p>0.005</p> <p>10</p> <p>100</p> <p>0.5</p> <p style="text-align: center;">Compute</p>	
Triangulaire		
<input checked="" type="radio"/> Trapezoidale		
Pente [m/m]		
Largeur [m]		
Débit [m ³ /s]		
m (trapèze et triangle)		

Figure IV- 14 : Fenêtre de saisi des données relatives au calcul des écoulements à surface libre.

Indications sur le coefficient de maning

Parois très lisses	
Mortier de ciment et sable très lisse	
planches rabotées, tôles métalliques	
sans soudures saillantes	0.010 à 0.0111
Mortier	0.0119
Parois lisses	
planches avec des joints mal soignés	
enduits ordinaire, grès	0.0125

Figure IV- 15: Boite de dialogue pour le choix du coefficient de Manning.

Après saisi des données et activation du bouton « *compute* » de l’interface utilisateur, les résultats de calcul sont affiché dans la fenêtre « *Résultats* » comme le montre la (figure IV.16).

HYDROLEARN Surface Libre

LEARNCALCUL

WELCOME TO HYDROL

Choisissez le type de canal et sa rugosité

Trapezoidale des joints nombreux 0.0134

Données d'entrer

Coef. maning (n) 0.013

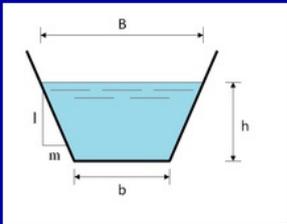
Pente [m/m] 0.005

Largeur [m] 10

Débit [m³/s] 100

m (trapèze et triangle) 0.5

Compute



Résultats

Froude [-]	1,663	Hs [m]	2,023
Hn [m]	1,505	Section mouillé [m ²]	16,183
Hc [m]	2,091	Perimètre mouillée [m]	13,687
Vitesse [m/s]	6,179	Rayon hydraulique [m]	1,182

Copyright ©,BOUABDALLAH TADLAOUI
All rights reserved,2016.

Figure IV- 16: Exemple de calcul pour un canal trapézoïdal.

4.3.2. Validation des résultats

La validation du programme pour le calcul des écoulements à surface libre, (figure IV.17), a été effectuée en comparaison aux résultats obtenus par le logiciel *HecRas* pour un grand nombre de problèmes traitant les canaux trapézoïdaux.

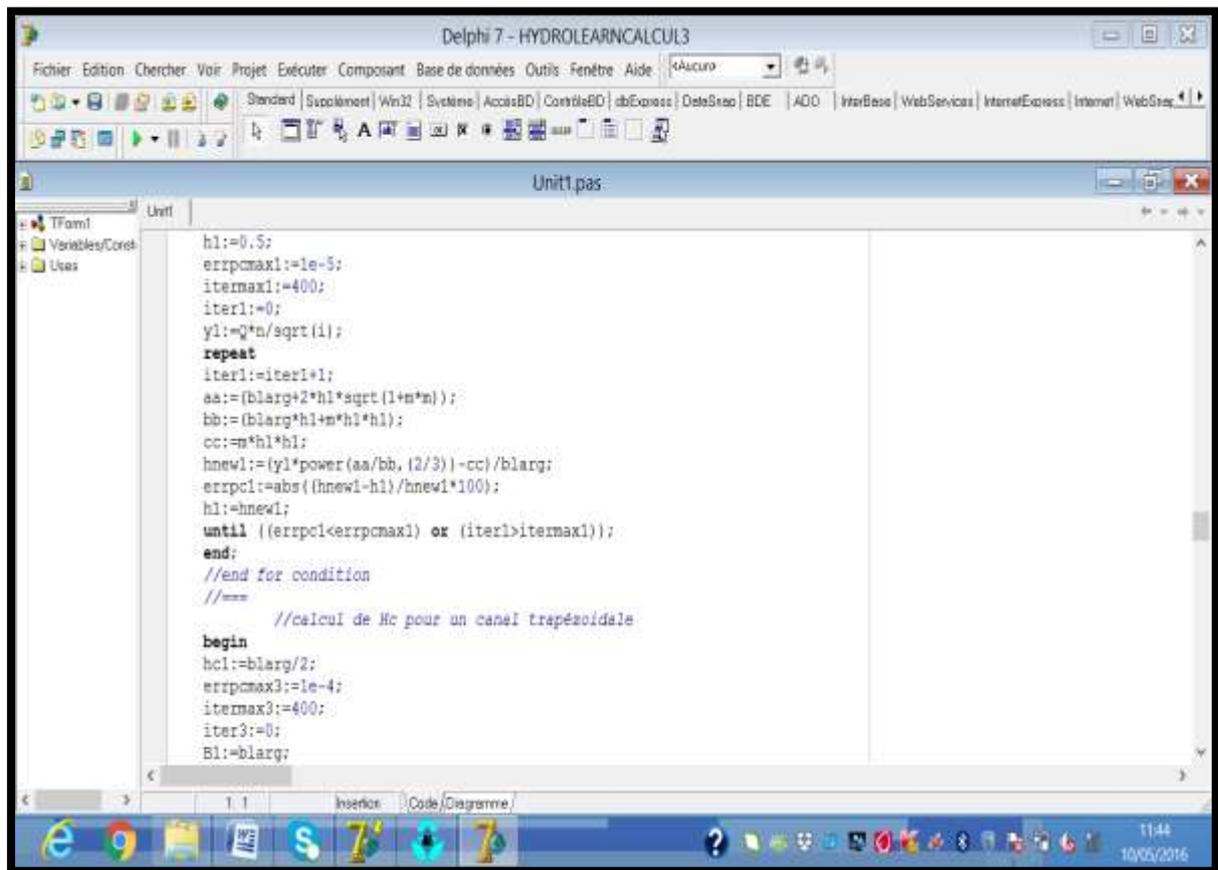


Figure IV- 17: Script de Surface libre sous Delphi .

CHAPITRE 05

5. CONCEPTION DU SITE WEB « HYDROLEARN »

La technologie évolue si vite, l'étudiant passe son temps devant un ordinateur à chercher l'information sur le net plutôt que dans des livres et les revues scientifique. En effet le web est devenue la destination de celui qui veut comprendre ses cours, faire des recherches ainsi que réviser. C'est aussi un moyen pour télécharger des cours et essayer de trouver des logiciels simple à l'utilisation et qui seront nécessaire pour ses études.

Les raisons qui nous ont motivées la création de ce site sont les suivantes :

- Un nombre incalculable de logiciels très intéressants qui ont été réalisés par les anciens étudiants mais malheureusement jamais exploités par les autres promotions par ce qu'ils n'ont pas été mis en ligne.
- Absence de moyens de partage et d'échange de documents utiles entre les étudiants.
- La difficulté de communication et d'échange entre enseignant et étudiants.
- Le manque d'un référentiel de base de notions élémentaires du domaine d'hydraulique
- Le manque d'informations sur les programmes de formations.

5.1. DÉFINITION DES OBJECTIFS ET BESOINS

Avant la création du site il faut définir nos besoins et ceux des utilisateurs (internautes). Ensuite il faut analyser l'ensemble de ces besoins pour passer à la réalisation du site Web. La définition des besoins comporte ainsi deux volets : a) les besoins de l'organisation, correspondant à nos objectifs et b) les besoins des utilisateurs, correspondant à la catégorie ciblée.

- **Notre objectif ?**

Vu les raisons précédemment citées, nous avons pensé à créer un site web pour aider les étudiants durant leur formation en hydraulique et d'aider les enseignants à assurer leurs cours. Ils auront une plateforme ou se partager les documents, l'information et l'échange des cours exercices aussi les annonces et toute chose nécessaire durant la formation de l'hydraulicien. Cette plateforme va servir aussi à avoir un contact direct avec les anciens

étudiants qui sont devenus des employés. Le site permettra aussi à avoir une bonne coordination entre les étudiants et leurs professeurs. Ceci va améliorer la rapidité et la qualité de l'échange entre les deux. Le site sert en effet à diffuser de l'information, échanger les idées et établir des relations entre les étudiants et leurs enseignants.

- **Les besoins:**

Nous avons mis en place des questionnaires pour les trois types d'utilisateurs à savoir les étudiants, les enseignants et les professionnels. Nous allons voir les 3 questionnaires que nous avons formulés et les réponses que nous avons obtenues.

La définition des besoins dépend de la mise en place des questionnaires. C'est-à-dire selon les réponses qu'obtenues, on a pu définir les besoins et les objectifs de chaque catégorie.

5.1.1. Questionnaire pour Enseignants

Nous avons envoyé ce questionnaire dont le détail est donné en tableau V-I en mois de janvier à 40 enseignants et nous avons reçu seulement 15 réponses. Ce questionnaire à été envoyé à tous les enseignants qui assurent des cours depuis la 2^{ème} année licence (spécialité hydraulique).

Tableau V- 1: Questionnaire no.1

Nom :..... Prénom :
1) Seriez-vous intéressé par un site internet pour le département d'hydraulique réalisé et développer par vos étudiants ? <input type="checkbox"/> Très intéressé(e) <input type="checkbox"/> Plutôt intéressé(e) <input type="checkbox"/> Pas tellement intéressé(e) <input type="checkbox"/> Pas intéressé(e) du tout
2) Seriez-vous intéressé(e) par la possibilité de confier certaines de vos cours TD contrôle et examen à nous, de façon régulière ou ponctuelle pour les mettre sur le site ? <input type="checkbox"/> Très intéressé(e)

- Plutôt intéressé(e)
- Pas tellement intéressé(e)
- Pas intéressé(e) du tout

3) Quels devraient être, selon vous, les principaux conditions pour les quelle vous acceptez de nous confier certaines de vos cours, TD, contrôle et Examen ?

- Site sécurisé
- Accès limité
- Droit d'auteurs réservé
- Ne pas déposer les corrigés sur le site

4) Quels moyens de communications avec les étudiants utilisez-vous?

- Email
- CD
- USB
- Plateforme eLearn de l'université de Tlemcen
- Réseaux sociaux
- Skype/Viber
- Polycopie

5) Quelles adresses internet vous proposez à mettre sur le site ?

6) Quels moyens de communications utilisez-vous avec vos collègues enseignants ?

- Email
- CD
- USB
- Réseaux sociaux
- Skype/Viber

7) Quels moyens de communications utilisez-vous avec l'administration ?

- Email
- CD
- USB
- Réseaux sociaux
- Skype/Viber
- Polycopie

<p>8) Quel est le support de cours que vous utilisez ?</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Tableau<input type="checkbox"/> Power-point<input type="checkbox"/> Autres
<p>9) Est-ce que les moyens que vous utilisez couvrent l'ensemble de vos besoins ?</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Oui<input type="checkbox"/> Non
<p>10) Quel type de programme/logiciels souhaitez-vous disposer pour un meilleur enseignement ?</p>
<p>11) Avez-vous des suggestions qui pourraient aider à améliorer les services de notre site ?</p>

Les réponses retournées par les enseignants, qui ont bien voulu contribuer à la réussite de ce travail, sont récapitulées ci-dessous.

Pour les questions no.1, 2, 3 & 4, nous avons reçu des réponses que nous avons formulées en pourcentage tel que monté en (figure V.1).

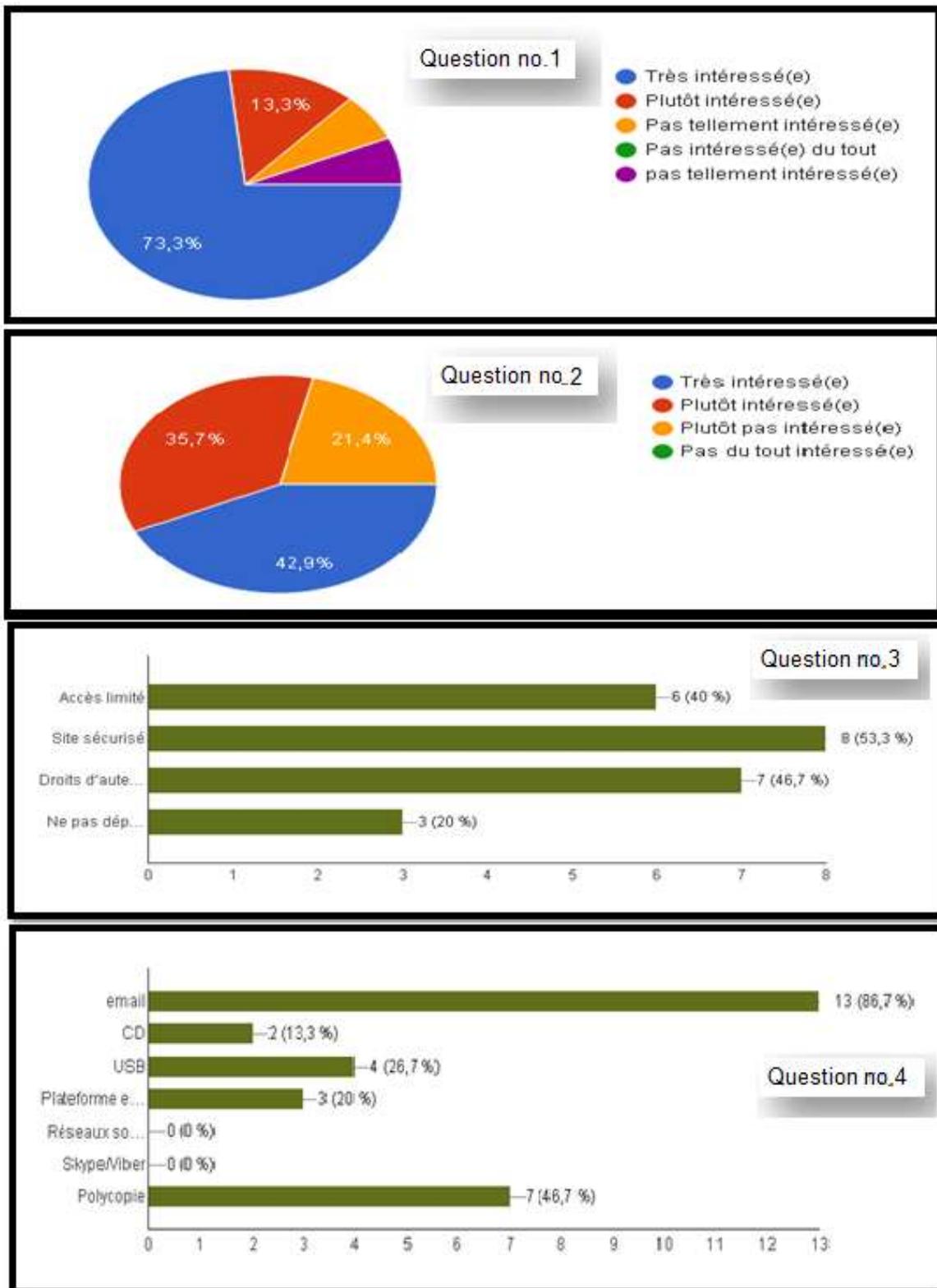


Figure V- 1: Réponses reçues pour les questions 1, 2,3 & 4 du questionnaire No.1.

Pour la question no.5, nous avons retenu dans ce mémoire que les réponses suivantes qui ont été jugées intéressantes :

Réponse1: Tous les supports de cours sur le Net

Réponse2:

- http://www.thermexcel.com/french/ressourc/mot_pump.htm
<http://www.savinobarbera.com/francais/scelta-pompe.html>
- <http://www.mecaflux.com/pompes.htm>

Réponse3: Les adresses qui donnent accès à la documentation de toutes les spécialités qui touchent la formation en hydraulique ainsi que l'actualité de la recherche universitaire.

Pour les questions no.6, 7, 8 & 9, les réponses reçues sont formulées sous forme de pourcentage en (figure V.2).

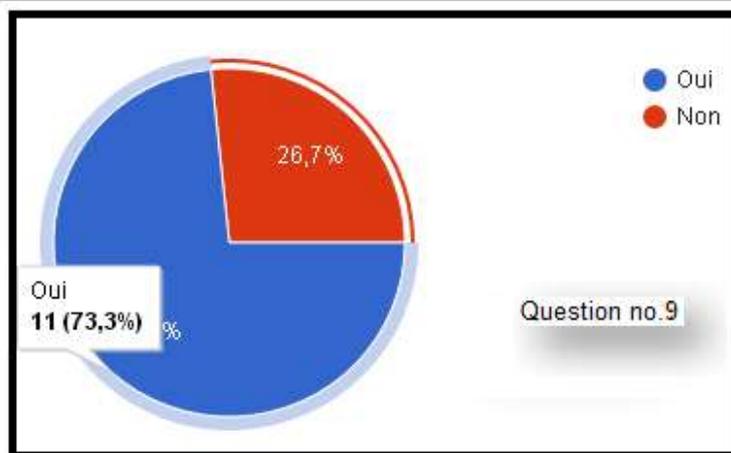
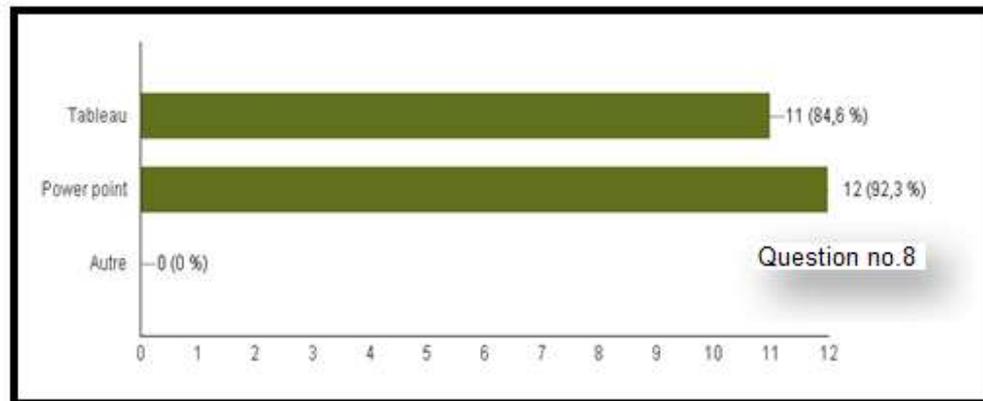
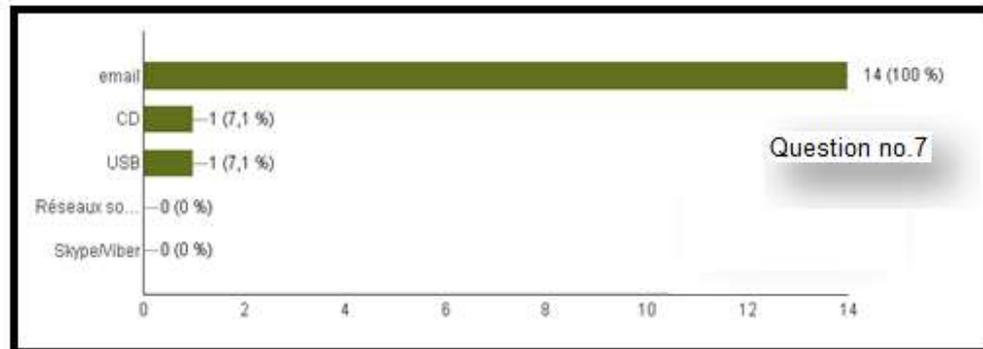
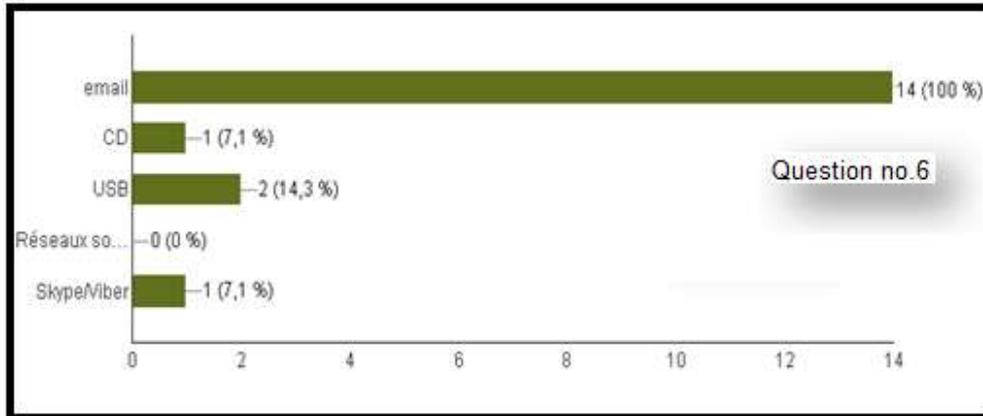


Figure V- 2: Réponses reçues pour les questions 6, 7, 8 & 9 du questionnaire No.1.

Pour la question no.10, nous n'avons pas reçus de réponses. Tandis que pour la question no.11, nous avons retenu les réponses les plus intéressantes suivantes:

Réponse1: *Il faut le maintenir vivant le long de son cycle de vie (C'est très important, la continuité pour la survie). Il faut qu'il soit dynamique et non statique. La tâche n'est pas simple mais très faisable.*

Réponse2:*Il faut que tous les étudiants et enseignants du département s'y mettent pour enrichir le site. Je pense que ce site aura comme objectif de relever le niveau des diplômés en Hydraulique. Pour cela, Il faut penser scientifiquement et rien que scientifiquement.*

Réponse3 : *il faut veiller à l'actualiser en permanence.*

Réponse4 : *Nécessité d'une plateforme interactive.*

5.1.2 Questionnaire pour étudiants

Ce questionnaire à pour objectif de recenser les différents problèmes rencontrés par les étudiants durant leur formation, afin de créer pour eux un site-web permettant de résoudre la majorité de leurs problèmes relatifs à leur formation et acquisition de l'information. Ce questionnaire (tableau V.II) a été envoyé à 75 étudiants en hydraulique. Nous avons reçu seulement 20 réponses.

Tableau V- 2: Questionnaire no.2

Nom :..... Prénom : Promotion :..... Diplôme en préparation :.....																			
<p>1) Avez-vous été assez informé (e) par votre département quant aux aspects suivants ? L'organisation des études et le contenu du</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="width: 60%;"></th> <th style="width: 15%;">Bien</th> <th style="width: 15%;">Moyen</th> <th style="width: 10%;">Mal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Programme d'étude</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Structure du département</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Le déroulement des cours</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					Bien	Moyen	Mal	Programme d'étude				Structure du département				Le déroulement des cours			
	Bien	Moyen	Mal																
Programme d'étude																			
Structure du département																			
Le déroulement des cours																			
<p>2) A qui demandez-vous des informations sur vos études si vous avez des questions ou des difficultés ?</p>																			

	Toujours	En générale	Parfois	Jamais
Enseignants				
Etudiants				
Administration				
Autres				

3) Quelles sont les principales contraintes que vous rencontrez pendant votre formation ?

- a) Connaissances de base insuffisantes
- b) Problèmes et difficulté de rentrer en contact avec les enseignants
- c) Des difficultés dans la documentation et les livres

4) Quelles média utilisez-vous pour étudier et réviser?

- a) Les cours donnés par vos enseignants
- b) Prise de note
- c) Livres
- d) Sites internet

5) Quelles difficultés en termes d'informations vous rencontrez pendant votre formation ?

6) Qu'est ce que vous voudriez trouver sur notre site web ?

7) Avez-vous des remarques et des suggestions qui pourraient aider à améliorer les services de l'enseignement

Les réponses obtenues pour les questions 1, 2, 3 et 4 sont données en (figure V.3).

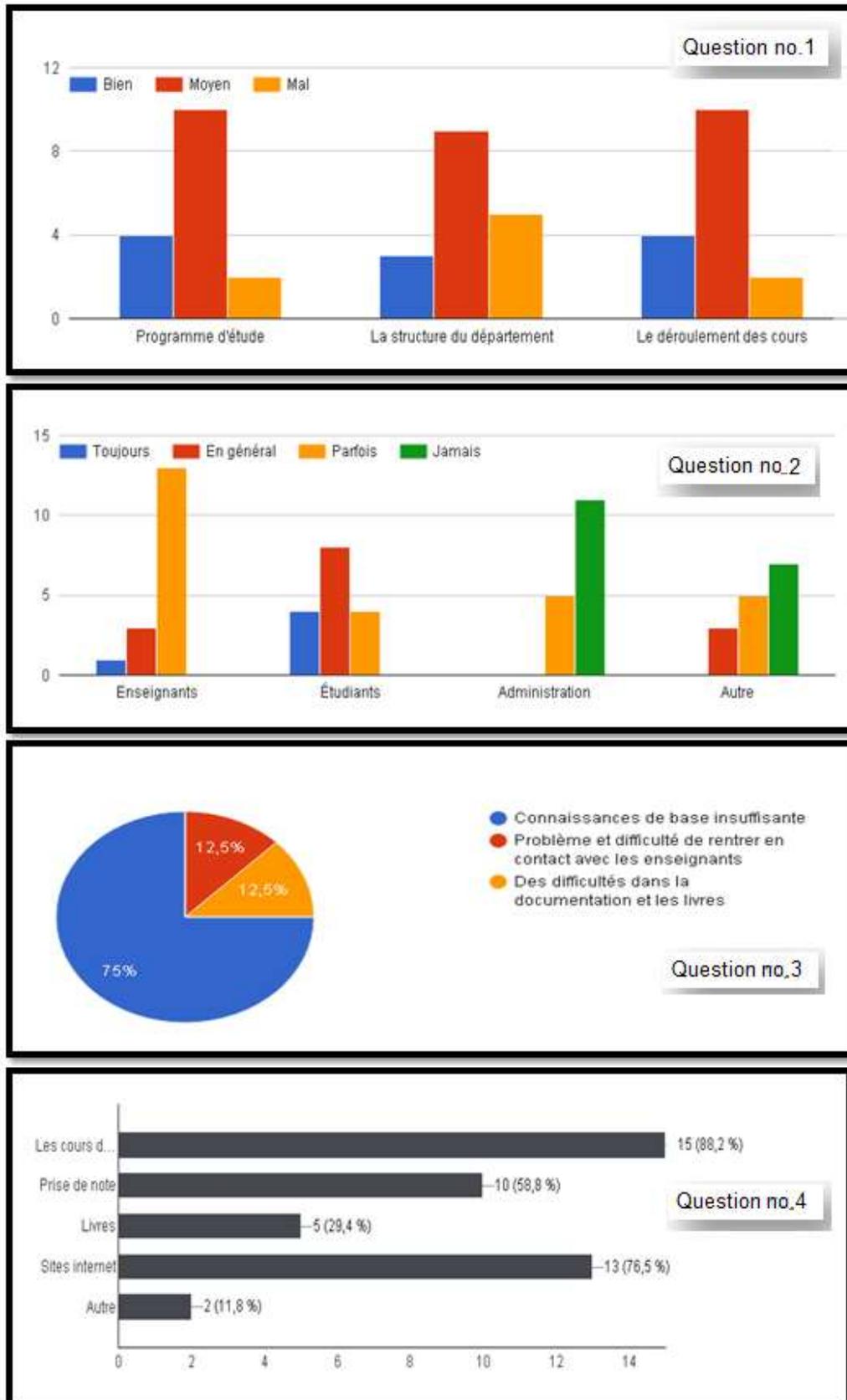


Figure V- 3: Réponses aux questions 1, 2, 3 & 4 du questionnaire no.2.

Les réponses obtenues pour les questions 5, 6 et 7 ont été comme suit:

Réponses pour la question no.5:

- Réponse 01: Connaissance de base insuffisante.
- Réponse 02: insuffisance d'explication de quelques modules manque d'exercices.
- Réponse 03 : pour moi j'ai deux difficultés au cours de mes recherches je maintenant; la 1^{ère} c'est la difficulté de trouver des données (pluviométriques, hydrométriques, temps, documentation.....) et la 2^{ème}, c'est que les laboratoires ne sont pas très performant, aussi le problème de connexion.
- Réponse 04:j'aurais préféré faire un peu plus le pratique et d'autres sorties sur le terrain.

Reponses pour la question no.6:

- Réponse 01:Mémoires, logiciels de calcul... Ce qu'on a besoin dans les calculs hydraulique (AEP, hydrologie, assainissement...).
- Réponse 02: Toutes les informations qui nous concerne et une mis a jour quotidienne.
- Réponse 03 Un échange entre les étudiants et aussi avec les professeurs de département
- Réponse 04: Des cours bien expliqués (schéma, illustration, exercices avec solution etc.) exemples de projets d'aménagement hydraulique (étapes de réalisation) thèses soutenue (magister master doctorat) ouvrages d'hydraulique, Une base des données ouvrages scientifique et multi-spécialité (livres, cours, donnés météorologies, des cartes, les résultats scientifiques dans tous les domaines...)

Reponses pour la question no7:

- Réponse 01:Une base des données ouvrages scientifique et multi-spécialité (livres, cours, donnés météorologies, des cartes, les résultats scientifiques dans tous les domaines...)
- Réponse 02 : Des contacts avec des autres étudiants partout dans le monde et des échanges d'informations et des expériences
- Réponse 03:Tout ce qui pourrait être utile a la formation des prochains étudiants et qui concerne notre spécialité
- Réponse 04:Des cours bien expliqués (schéma, illustration, exercices avec solution etc.) exemples de projets d'aménagement hydraulique (étapes de réalisation) thèses soutenue (magister master doctorat)

5.1.3 Questionnaire pour professionnels

Nous avons envoyé le questionnaire, ci-dessous, en mois de janvier à 20 personnes exerçant dans le secteur de l'eau et nous avons reçu que huit réponses. Ce questionnaire, (Tableau V.3) est constitué de six questions pertinentes.

Tableau V- 3: Questionnaire no.3

Nom : Prénom : Diplôme et date d'obtention : Adresse électronique : Quel est votre statut professionnel :
1) Seriez-vous intéressé(e) par un site internet pour les hydrauliciens de Tlemcen (étudiants, enseignants et professionnels) ? <input type="checkbox"/> Très intéressé(e) <input type="checkbox"/> Intéressé(e) <input type="checkbox"/> Pas tellement intéressé(e) <input type="checkbox"/> Pas intéressé(e) du tout
2) Accepteriez-vous d'être contacté pour nous fournir en cas de besoin de plus amples informations durant et/ou après la construction du site en question ? <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
3) Seriez-vous prêt (e) à collaborer avec nous, pour l'intérêt des hydrauliciens ?
4) Quelles sont les lacunes majeures que vous avez vécues durant votre formation ?
5) Que suggérez-vous pour améliorer la formation des futurs hydrauliciens?
6) Qu'est ce que vous voudriez trouver sur un site web conçu pour hydrauliciens ?

Les réponses qui nous ont été envoyées pour les questions no. 1, 2 et 3 sont données sous forme de pourcentage en (figure V-4).

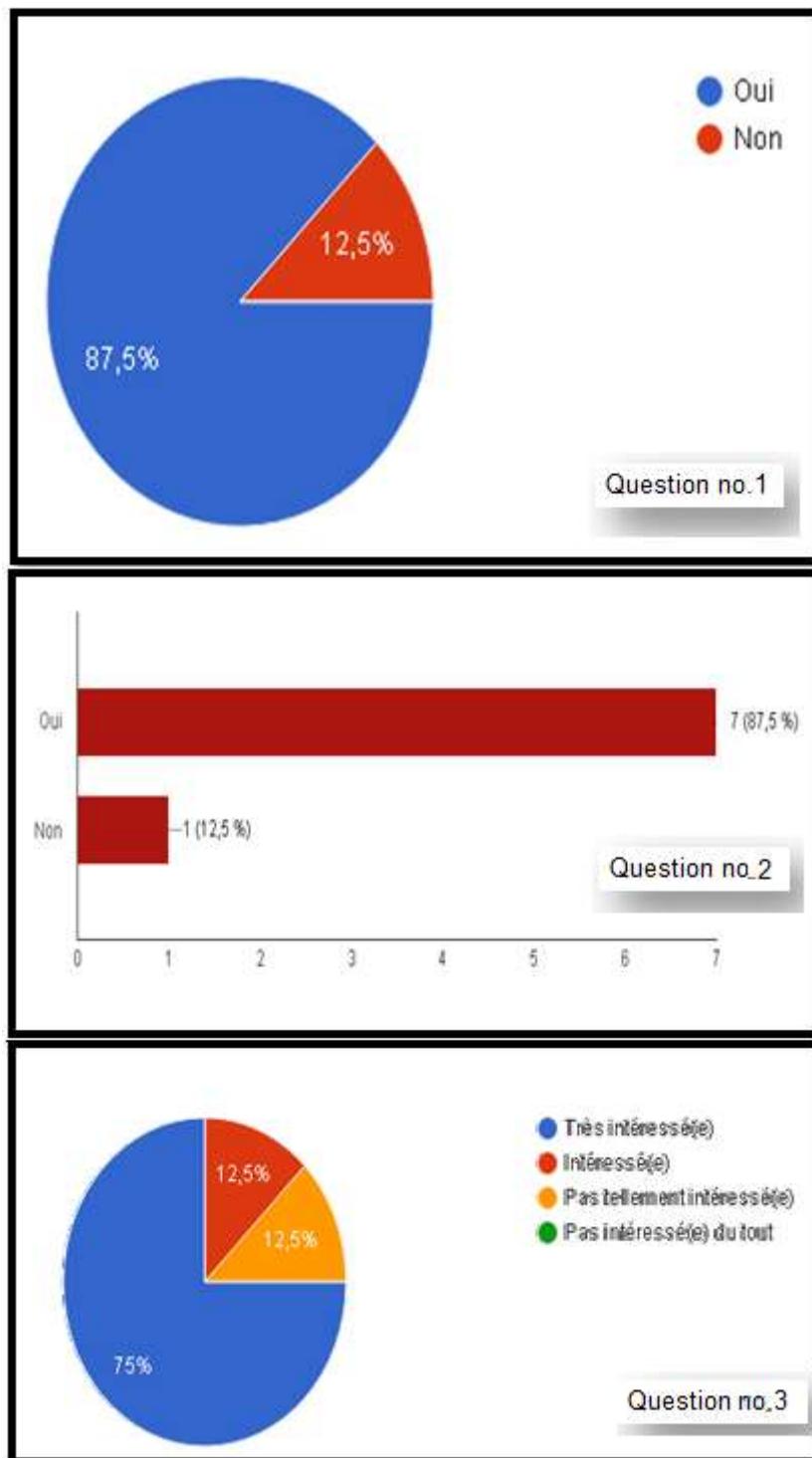


Figure V- 4: Réponses aux questions 1, 2 et 3 du questionnaire no.3.

Les réponses qui nous ont été envoyées pour les questions no. 4, 5 et 6 ont été formulées comme suit:

Réponse à la question no.4 :

- **Réponse 01:** Manque de moyens (Internet), manque de revues et d'ouvrages bibliographiques
- **Réponse 02:** Je n'ai pas eu la chance d'être formé convenablement par l'établissement
- **Réponse 03:** Manque d'ouvrages hydraulique, Stages pratiques insuffisants, Absence de projection

Réponse à la question no.5 :

- **Réponse 01:** Procéder a un stage de perfectionnement sur site des projets ou de formation à longue durée. Prévoir un réseau qui regroupe les hydrauliciens à travers les universités
- **Réponse 02:** Beaucoup de pratique et sortie sur terrain
- **Réponse 03:** Enrichir la formation des étudiants par des stages en continu sur terrain, échange d'information entre les différentes universités du pays

Réponse à la question no.6 :

- **Réponse 01:** Tout ouvrages hydraulique ou publication ou nouvelles techniques utiliser par les entreprises qui sert à améliorer mon niveau
- **Réponse 02:** Des plans (réservoir, adduction station de pompage).
- **Réponse 02:** Toutes les informations utiles et nécessaires pour l'achèvement des projets ainsi que les nouvelles technologies dans le domaine d'hydraulique et du management

5.1.4. Synthèse des réponses

Une partie des enseignants est d'accord pour la mise en marche de notre site et sont prêt à collaborer avec nous pour le voir au sommet un jour. On peut voir aussi que certains n'utilisent pas l'outil internet pour le partage de données entre eux et les étudiants.

La majorité des étudiants et des enseignants sont intéressés par l'idée de la création du site web.

Le manque de connaissances de base et le manque de communication entre l'administration et les étudiants ont été les lacunes les plus importantes, ainsi qu'un nombre important d'étudiants à recours a l'utilisation du Web pour couvrir ses besoins.

L'idée du site est bien appréciée de la part des professionnels et leur collaboration avec les étudiants par la suite serait possible. Ceci pour enrichir l'expérience nécessaire des étudiants. Les ingénieurs hydrauliciens ont noté que les lacunes qu'ils ont eues durant leurs

études ont été en rapport avec le manque d'ouvrages spécialisés, problème résolu à nos jours étant donné la grande diversité d'ouvrages dont dispose actuellement notre faculté.

Les 3 types d'utilisateurs nous ont suggéré de réaliser les fonctionnalités suivantes :

- les notions de base et données qui peuvent être utiles aux étudiants en hydraulique,
- une rubrique pour les livres les mémoires,
- l'archivage d'anciens sujets d'examens et différents tests d'évaluation,
- Un moyen de communication entre étudiants et enseignants, et entre étudiants de différentes spécialités d'hydraulique pour échange d'information,
- Des applications que l'hydraulicien a besoin durant la formation ou après,
- Un service d'annonces importantes pour hydrauliciens, étudiants ou travailleurs.

5.2. ETUDE DES DIFFÉRENTS SITES WEB

Avant de concevoir notre site web, nous avons consulté différents sites éducatifs qui ressemblent à notre site. Ceci nous a permis de savoir comment les sites sont structurés et quelles sont les services offerts. Parmi les sites que nous avons consultés, nous citons :

- ✓ www.ensh.dz
- ✓ www.usherbrooke.ca
- ✓ www.infoterre.brgm.fr/
- ✓ www.tiziouzou-dz.com
- ✓ www.calculatoredge.com
- ✓ www.hydrolearning.ir
- ✓ www.futura-sciences.com
- ✓ www.hydrauliquesansfrontieres.org

5.3. LA CONCEPTION DU SITE WEB

Pour réaliser notre plateforme d'échange d'informations utiles pour hydrauliciens et d'aide aux étudiants, nous sommes passés par plusieurs étapes :

5.3.1. Installation de Easyphp

En premier lieu, nous avons installé EASYPHP qui est une plateforme de développement web permettant de faire fonctionner localement des scripts PHP.

EASYPHP est un environnement comprenant deux serveurs (un serveur web Apache et un serveur de bases de données MySQL), un interpréteur de script (PHP), ainsi qu'une administration SQLphpMyAdmin. Il dispose d'une interface d'administration permettant de gérer les alias (dossiers virtuels disponibles sous Apache), et le démarrage/arrêt des serveurs. Il permet donc d'installer en une seule fois tout le nécessaire au développement local du PHP. Par défaut, le serveur Apache crée un nom de domaine virtuel (en local) 127.0.0.1 ou localhost. Ainsi, quand on choisit « Web local » dans le menu d'EasyPhp, le navigateur s'ouvre sur le site local et affiche la page index.php de ce site qui correspond en fait au contenu du dossier www d'EASYPHP.

5.3.2. Installation de WORDPRESS en local

En seconde partie on a installé WORDPRESS qui est un Système de Gestion de Contenu (SGC) ou (Content Management System (CMS) en anglais) gratuit écrit en PHP, reposant sur une base de données MySQL, et distribué par l'entreprise américaine Automattic. WordPress est surtout utilisé comme moteur de blog, mais ses fonctionnalités lui permettent également de gérer n'importe quel site web.

Nous avons installé EasyPhp et Wordpress en local pour pouvoir apprendre à développer un site Web et pour pouvoir faire des tests. La figure ci-dessous montre notre premier site sur le réseau local :



Figure V- 5: Site vitrine réalisé en réseau local

5.3.3. Installation de FILEZILLA

Le 3ème logiciel que nous avons installé est FileZilla qui permet de se connecter à un serveur de fichiers. Ce logiciel permet, entre autre de faire :

- Pause et reprise d'un envoi de fichiers ou d'un téléchargement
- File d'attente de fichiers
- Interface glisser-déposer de fichiers
- Gestionnaire de site avec ses dossiers

5.3.4. Hébergement du site Internet

Nous avons déposé le nom de domaine www.hydrolearn.com et acheter un hébergement professionnel de chez l'hébergeur Français (OVH). Ensuite nous avons déposé les fichiers de notre site sur l'espace de stockage de cet hébergement en utilisant FileZilla.

5.3.5. Réalisation du site Internet

Dans cette phase, nous avons réalisé les étapes suivantes :

- Définition du nom de site : pour choisir le nom du site et un slogan, on a proposé aux étudiants une quinzaine de noms et ils ont fait un choix. Pour le nom c'est « HydroLearn » et pour le slogan « Hydraulique entre vos mains » ;
- Établissement d'une structure des pages Web ;
- Choix du graphisme du site : on a fait le choix du graphisme selon notre menu est celui qui s'est adapté le plus est Styleshop de Elegantthemes (Elegantthemes Team).

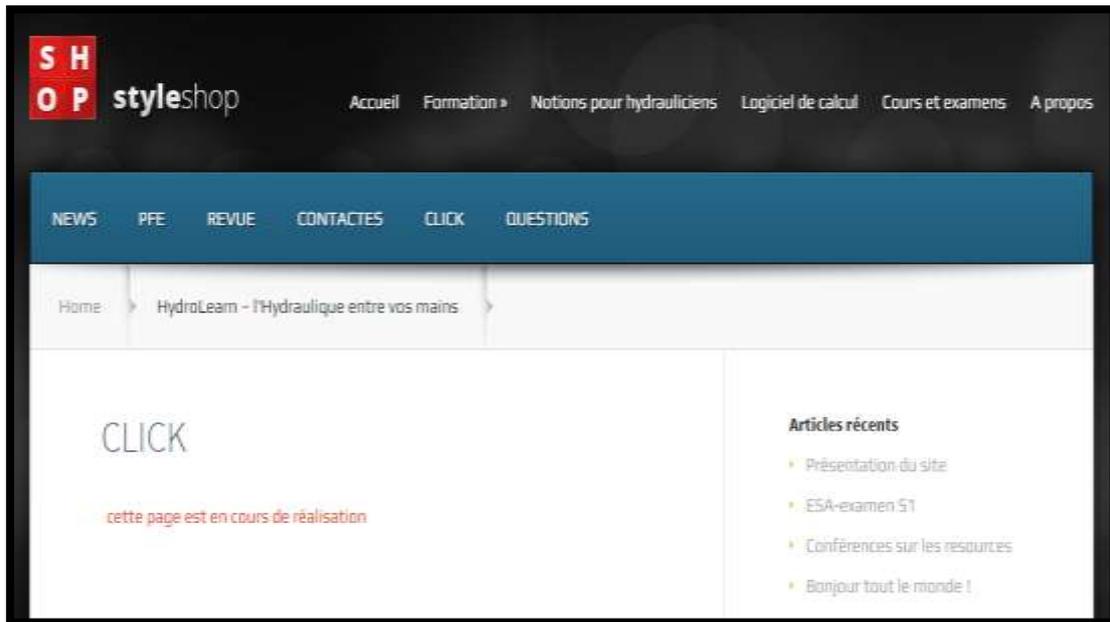


Figure V- 6: Thème actuel utilisé sur le site

- Réalisation du Logo: on a conçu un logo qui contient le nom du site et regroupe entre l'eau et l'hydraulique



Figure V- 7: Logo et slogan du site (Cruz, 2013)

- Réalisation du menu et de l'interface graphique

Le 1^{er} menu contient : A propos, membres et contacter nous

Le 2^{ème} menu contient : Accueil, Formation, Logiciels de calcul, Données utiles, Cours et examens, Mémoire et PFE, Groupe.

➤ **Accueil :**



Figure V-8: Page d'accueil du site

La page d'accueil, sert a présenté les derniers articles qui ont été mis en ligne

➤ **Formation :**

Dans cette catégorie destinée aux étudiants, ils retrouveront toutes les informations nécessaires sur le programme des cours ainsi qu'une description sur chacun, aussi l'équipe de formation qui gèrent le département.



Figure V-9 Page des formations

➤ **Logiciels de calcul :**

Dans cette page, l'utilisateur du site retrouvera tous les simulateurs développés dans ce mémoire sous forme d'un fichier exécutable et qui peut être téléchargé.



Figure V-10: Page de logiciels de calculs

➤ **Données utiles :**

Cette page contient des informations de bases qui peuvent servir aux étudiants en hydraulique, et en même elle servira comme porte d'ouverture aux nouveaux bacheliers intéressé par le domaine de l'hydraulique.



Figure V. 1: Page de données utiles

➤ **Cours et examens :**

Partie consacré pour les cours et examens de plusieurs modules, nous avons mis des cours de certains de nos professeurs qui été d'accord pour mettre leurs cours sur le site, ainsi que des fichiers « PDF », aussi d'anciens examens.



Figure V-13: Page de cours et examens

➤ **Mémoire et PFE :**

Plusieurs Mémoire de fin d'étude de plusieurs thématique sont disponibles dans cette catégorie, et l'utilisateur du site a la possibilité de lire le résumé du « PFE » et en même temps, le choix de télécharger le fichier ou pas.



Figure V-14: Page de mémoire et PFE.

➤ **Groupe :**

Forum de discussion est disponible sur notre site, ce dernier permettra d'avoir une relation directe entre les professeurs et leurs étudiants dans le cas et de résoudre des problèmes liés aux études.



Figure V-15: Forum de discussion.



Figure V- 8: Page d'accueil du site

5.3.6 Maintenance et Gestion du site web

- La sauvegarde : le site web est exposé à plusieurs menaces : crash de serveur web, piratage, les virus, les bugs..., alors pour des mesures de sécurité, il est très important de faire des sauvegardes régulières pour les données du site web (Base de données, contenus (documents, images, textes))
- Maintenance : la maintenance d'un site web consiste en général à assurer son bon fonctionnement
- Suivi : c'est un nous les développeurs de ce site de faire le suivi pour assurer son fonctionnement
- Lancement du site : mise en ligne juin 2016
- Annonce : Faire connaître le site à travers les réseaux sociaux, annonce à l'université et autre publicité
- La mise à jour : la mise à jour est une action fondamentale de la vie d'un site web. C'est pour cela que nous l'actualisons de temps à autre.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre objectif principal, dans ce travail, était le développement de simulateurs pour résoudre certains problèmes courants d'hydraulique générale, ainsi que le développement d'un site web pour assister la communauté hydraulicienne, en particulier à Tlemcen et en général à travers le territoire algérien, à s'entraider pour mieux mener sa noble tâche.

En particulier notre contribution peut être considérée comme aide précieuse pour les promotions futures du département d'hydraulique de notre université. En effet, le logiciel de calcul de perte de charge, que nous avons développé et publié sur notre site « www.HydroLearn.com » est un outil très utile pour les futurs étudiants. Il leur permet d'évaluer les pertes de charge tout en comparant toutes les formules d'évaluation existantes à nos jours. Il intègre plus de 20 formules afin de permettre le bon choix pour un bon dimensionnement des conduites. Le logiciel « *HydroLearn Calcul* » assurant ces calculs est offert gratuitement pour tous les acteurs de l'eau. Outre le calcul des pertes de charge, ce logiciel à utilisation intuitive permet le calcul des éléments normaux et critiques des écoulement à surface libre dans les canaux trapézoïdaux..

En outre, notre site web est un outil qui sert, à faciliter la tâche aux futurs étudiants afin de dépasser certains problèmes spécifiques que nous avons rencontrés durant notre formation, il permet entre autres à :

- accéder rapidement à l'information technique et administrative
- accéder rapidement à une documentation sélectionnée (livres, pdf, logiciels, sites-web etc..)
- accéder rapidement aux cours proposés par les enseignants de notre département
- obtenir les différents sujets d'examens et de concours des années précédentes
- Communiquer entre étudiants, enseignants et ingénieurs du secteur d'hydraulique
- être orienté conseillé en temps réel pour tout problème relatif à la noble fonction de l'hydraulicien
- aider les futurs étudiants à mieux assimiler leurs cours et effectuer leurs devoirs
- assurer un lien plus intime entre hydrauliciens permettant ainsi un meilleur feed-back pour la réalisation de leurs tâches

Notre projet ne s'arrête pas là, c'est un projet à long terme. Nous voulons l'améliorer encore plus. Nous sommes entrain de réfléchir, entre autres, à compléter nos trois simulateurs par d'autres simulateurs de dimensionnement de réservoirs, de réseaux d'alimentation en eau potable, de stations de pompage, de réseaux d'assainissement et de stations d'épuration.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Achour, B. (2007). *Calcul des conduites et canaux par la MMR*. Biskra: Larhyss.
- Banton, O., & Bangoy, L. (1999). *Hydrogéologie "multiscience environnementale des eaux souterraines"*. Québec: AUPELF.
- Becquet, G. (s.d.). Lycée professionnel B. FRANKLIN.
- Bohl, W., & Wolfgang, E. (2008). *Technische Strömungslehre*. Würzburg, ALLEMAGNE.
- Boillat, J., & Pfister, M. (2013). Le dimensionnement hydraulique. *Séminaire VSA/EPFL Hydraulique des canalisations*. lausanne, Suisse.
- Bouabdallah, E., & Tadlaoui, S. (2014, juin). Etude critique des différentes méthodes d'évaluation des pertes de charge. Tlemcen, Hydraulique, Tlemcen.
- Bouhafsi, S. (2009). Conception d'un logiciel pour la modélisation des canalisations sous pression. *Mémoire de Licence*. Tlemcen: Université de Tlemcen, Faculté de Technologie.
- Carbonnet, J., & Roques, M. (s.d.). *Mécanique des fluides*. (Ministère de l'enseignement supérieur) Consulté le mars 2, 2014, sur Académie nancy-ETZ: <http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/PHYS/Term/Mecaflu/Poly-mecaflu.htm>
- Carlier, M. (1988). *Hydraulique générale et appliquée*. Paris: Ed. Eyrolles, EDF.
- Churchill, S. (1977). Friction factor equations spans all fluid-flow ranges. *Chem. Eng.*, 91.
- Coolbrook C., F. (1939, February). Turbulent flow in pipes, with particular references to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *Jour. Inst. Civil Engrs*, p. 133.
- Degoutte, G. (s.d.). *aide mémoire hydraulique à surface libre*. Consulté le avril 10, 2016, sur <https://tice.agroparistech.fr>:
<https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/COURSDHYDRAULIQUEEDYN/document/Texte%20de%20cours/degoutte1.pdf?cidReq=COURSDHYDRAULIQUEEDYN>
- Département Voies Navigables et Eau. (2001, Aout). *Hydraulique*. France: Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales.
- Dupont, A. (1979). *Hydraulique urbaine " Tome II "*. PARIS: EYROLLES.

- Elegantthemes Team. (s.d.). *www.elegantthemes.com*. Consulté le Février 20, 2016, sur <http://www.elegantthemes.com/gallery/styleshop/>
- Gantt Project Team. (s.d.). *www.framasoft.org*. Consulté le Avril 19, 2016, sur [framasoftware: https://framasoftware.org/logiciels/article2071.html](https://framasoftware.org/logiciels/article2071.html)
- Giles, R. V. (1982). *Mécanique des fluides et hydraulique. série de Shaum*.
- Gini, Y. (2012, avril 23). *www.blog.inig-services.com*. Consulté le Avril 19, 2016, sur blog.inig-services.com: <http://blog.inig-services.com/archives/1080>
- Gomella, C., & Guerree, H. (1974). *La distribution d'eau dans les agglomérations urbaines et rural*. Paris: Eyrolles.
- Gorlier, P., & Gabriel, G. (1998). *La Viscosité et sa mesure*. Consulté le mars 26, 2014, sur <http://philippe.gorlier.voila.net/Documents/Viscosite.pdf>.
- Goudar, C., & Sonnad, J. R. (2008, août). Comparison of the iterative approximations of the Colebrook-White equation. *Hydrocarbon Processing*.
- Guestbox, A. (s.d.). <http://www.app-art.fr/>. Consulté le Février 28, 2016, sur [app-art: http://www.app-art.fr/download.php](http://www.app-art.fr/download.php)
- Haaland, S. E. (1983, mars). Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Flow . *Journal of Fluids Engineering*, vol. 105(no 1), pp. 89-90.
- Huilier, D. (s.d.). Consulté le mars 26, 2016, sur www.daniel-huilier.fr: http://www.daniel-huilier.fr/Enseignement/Notes_Cours/Pertes_de_Charges/Laval_SH_Chap2.pdf
- Huilier, D. (2010). *écoulement visqueux dans les conduites*.
- Idel'cik, I. (1999). *Coefficients de pertes de charge singulières et de pertes de charge par frottement*. (C. d. France, Éd.) Eyrolles.
- King, H. W., & Brater, E. F. (1954). *Handbook of Hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- Lancastre, A. (2002). *Hydraulique générale* . Paris: Ed Revue et augmentée.
- Levin, L. (s.d.). difficultés du calcul des pertes de charges linéaires dans les conduites forcées. Saint-Etienne, Loire, France: Ecole nationale supérieure des mines.
- Lewis A., R. (2003, septembre 1). Manuel de l'utilisateur, EPANET2. *Simulation Hydraulique et Qualité pour les réseaux sous pression*. CINCINATTI, USA: Office of research and development.
- Ligen, J., & Le Guay, M. (2007). *Pertes de charge*. Ville: Eyrolles.

- Massy, B. (1975). *Mechanics of fluids*. London: Van Nostrand Reinhold.
- Mecaflux. (s.d.). *Rugosité*. Consulté le 05 03, 2014, sur Mecaflux.com:
<http://www.mecaflux.com/Rugosite.htm>
- Mecaflux Team. (s.d.). *www.mecaflux.com*. Consulté le Février 28, 2016, sur mecaflux:
http://www.mecaflux.com/logiciel_pertes_charge_regulieres.htm#
- Moody, L. (1944). Friction factor for pipe flow. *Trans.A.S.M.E.*, 66.
- OVH. (s.d.). *www.ovh.com/fr*. Consulté le Fevrier 16, 2016, sur OVH:
<https://www.ovh.com/fr/hebergement-web/hebergement-perso.xml>
- Paraschivoiu, I., Prud'homme, M., Robillard, L., & Vasseur, P. (2003). *Mécanique des fluides*. Montréal, Canada: Presses internationales Polytechnique.
- Pimenov, A., & Tagui-Zade, K. (s.d.). *Hydraulique générale*. Alger: O.P.U.
- Policopié Université de Nancy*. (s.d.). Consulté le 03 27, 2014, sur [<http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/PHYS/Term/Mecaflu/Poly-mecaflu.htm>]
- Reefcentral Team. (s.d.). *www.reefcentral.com*. Consulté le mai 11, 2016, sur reefcentral:
<http://www.reefcentral.com/index.php/head-loss-calculator>
- Serghides, T. K. (1984). Estimate friction factor accurately. *Chemical Engineering*, vol. 91(ISSN 0009-2460), pp. 63-64.
- SIHI GMBH. (s.d.). *www.sterlingsihi.com*. Consulté le fevrier 28, 2016, sur sterlingsihi:
<http://www.sterlingsihi.com/cms/fr/accueil/navigation-rapide/calcul-de-pertes-de-charge-sihideltap.html>
- Smits, A. (2007). *Turbulence in Pipes: The Moody Diagram and Moore's Law*. San Diego.
- Swamee, P., & Jain, A. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 102(no 5), pp. 657-664.
- thermexcel. (s.d.). *www.thermexcel.com*. Consulté le mai 11, 2016, sur thermexcel:
http://www.thermexcel.com/french/ressour/pdc_singu.htm
- TLV. (s.d.). *www.tlv.com*. Consulté le mai 6, 2016, sur tlv: www.tlv.com
- Vennard, J. K., & Street R., L. (1976). *Elementary fluid mechanics* (éd. fifth edition). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Zella, L., & Smadhi, D. (2005, juin). L'interet du calcul des pertes de charge en micro irrigation. *Larhyss Journa*, 13.

ANNEXES

ANNEXES

ANNEXE 1 : RUGOSITÉ DE DIFFÉRENTS MATÉRIAUX

Tableau A- 1: Rugosité de différents matériaux (Ligen & Le Guay, 2007)

Matériau	Rugosité absolue
cuivre, laiton, verre, plomb	0.001-0.015-0.002
Aluminium, plastique	0.002
PVC	0.001
Acier neuf	0.02-0.05-0.1
Acier rouillé	0.15-0.25
Acier incrusté	1.5-3
acier galvanisé neuf	0.1-0.15-0.2
acier inox lisse	0.03
fonte neuve	0.25-1
fonte usagée	0.8-15
fonte incrustée	1.5-2.5
Tôle ou fonte asphaltée	0.04-0.015
Fibre de verre	0.9
Conduit aéraulique flexible	3
ciment et béton bien lissés	0.3-0.8
ciment et béton brut	1.0-2.5

Tableau A- 2 : Rugosité indiqués sur EPANET (Lewis A., 2003).

Matériau	(C) William-Hazen	(ε) Darcy Weisbach	(n) Maning
Fonte revêtue	130-140	0.25	0.012-0.015
Béton ou revêtement en béton	120-140	0.3-..0	0.012-0.017
Fer galvanisé	120	0.15	0.015-0.017
Plastic	140-150	0.0015	0.011-0.015
Acier	140-150	0.03	0.015-0.017
Céramique	110	0.3	0.013-0.015

Tableau A- 3: équivalence entre les rugosités de William-Hazen et Darcy

C (William-Hazen)	95	106	116	130	136	141	145	146.5
ϵ (Darcy-weisbach)	2	1	0.5	0.25	0.1	0.05	0.025	0

ANNEXE 2 : DIAGRAMME UNIVERSEL DE MOODY

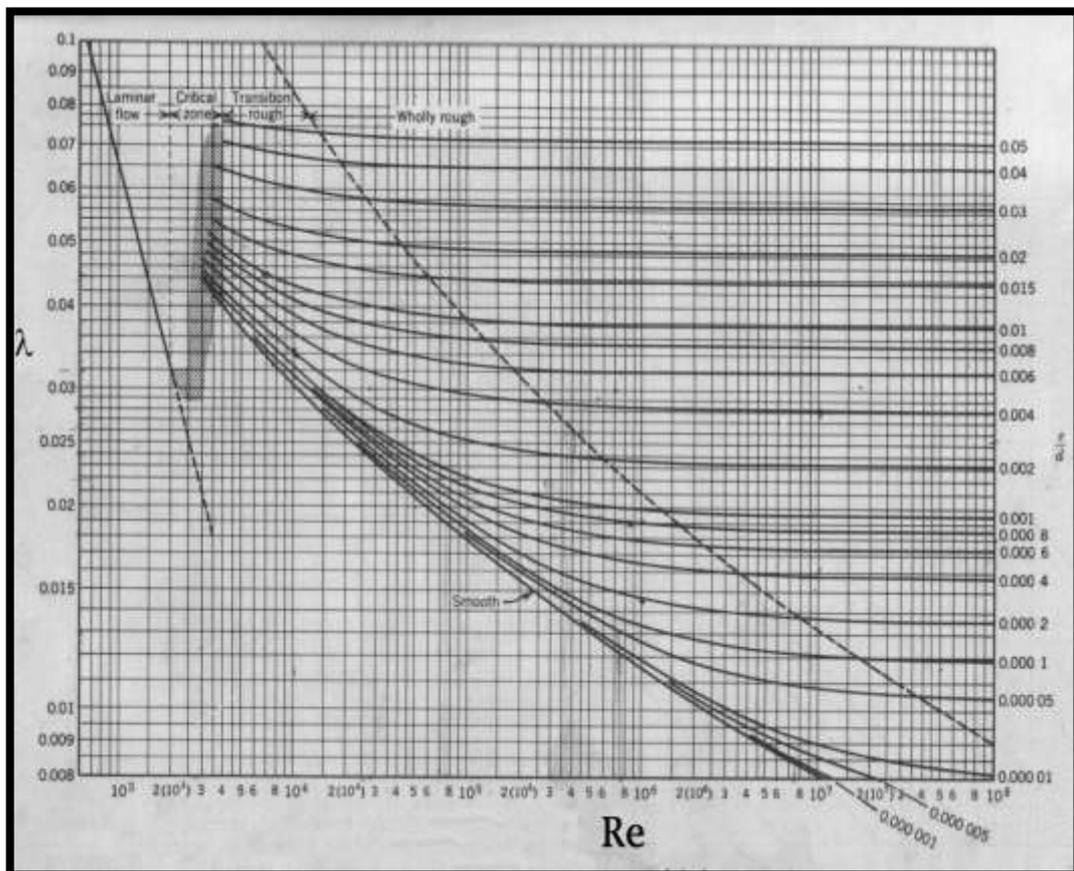


Figure A- 1: Diagramme universel de Moody (Giles, 1982).

ANNEXE 3 : TABLE DE COOLBROK.

Tableau A-4: Table 1 de Coolbrok

VITESSE MOYENNE EN METRES	DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,048 m Section de la conduite 0,002568 m ²			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,060 m Section de la conduite 0,003600 m ²			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,080 m Section de la conduite 0,006400 m ²			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,088 m Section de la conduite 0,007744 m ²		
	Charges par mètre de longueur de conduite	Débit en litres/sec.	Débits en litres/sec.	Charges par mètre de longueur de conduite	Débit en litres/sec.	Débits en litres/sec.	Charges par mètre de longueur de conduite	Débit en litres/sec.	Débits en litres/sec.	Charges par mètre de longueur de conduite	Débit en litres/sec.	Débits en litres/sec.
0,01												
0,05		0,0129	0,019 6		0,008 2	0,014 4		0,008 2	0,014 4		0,008 2	0,014 4
0,10		0,062 8	0,098 2		0,042 3	0,062 8		0,042 3	0,062 8		0,042 3	0,062 8
0,15		0,121 6	0,196 3		0,074 3	0,104 3		0,074 3	0,104 3		0,074 3	0,104 3
0,20		0,180 4	0,262 7		0,106 9	0,146 7		0,106 9	0,146 7		0,106 9	0,146 7
0,25		0,239 2	0,350 9		0,140 9	0,190 9		0,140 9	0,190 9		0,140 9	0,190 9
0,30		0,308 0	0,439 1		0,174 9	0,234 9		0,174 9	0,234 9		0,174 9	0,234 9
0,35		0,376 8	0,527 3		0,208 9	0,282 9		0,208 9	0,282 9		0,208 9	0,282 9
0,40		0,445 6	0,615 5		0,242 9	0,326 9		0,242 9	0,326 9		0,242 9	0,326 9
0,45		0,514 4	0,703 7		0,276 9	0,370 9		0,276 9	0,370 9		0,276 9	0,370 9
0,50		0,583 2	0,791 9		0,310 9	0,414 9		0,310 9	0,414 9		0,310 9	0,414 9
0,55		0,652 0	0,880 1		0,344 9	0,458 9		0,344 9	0,458 9		0,344 9	0,458 9
0,60		0,720 8	0,968 3		0,378 9	0,502 9		0,378 9	0,502 9		0,378 9	0,502 9
0,65		0,789 6	1,056 5		0,412 9	0,546 9		0,412 9	0,546 9		0,412 9	0,546 9
0,70		0,858 4	1,144 7		0,446 9	0,590 9		0,446 9	0,590 9		0,446 9	0,590 9
0,75		0,927 2	1,232 9		0,480 9	0,634 9		0,480 9	0,634 9		0,480 9	0,634 9
0,80		0,996 0	1,320 9		0,514 9	0,678 9		0,514 9	0,678 9		0,514 9	0,678 9
0,85		1,064 8	1,408 9		0,548 9	0,722 9		0,548 9	0,722 9		0,548 9	0,722 9
0,90		1,133 6	1,496 9		0,582 9	0,766 9		0,582 9	0,766 9		0,582 9	0,766 9
0,95		1,202 4	1,584 9		0,616 9	0,810 9		0,616 9	0,810 9		0,616 9	0,810 9
1,00		1,271 2	1,672 9		0,650 9	0,854 9		0,650 9	0,854 9		0,650 9	0,854 9
1,05		1,340 0	1,760 9		0,684 9	0,898 9		0,684 9	0,898 9		0,684 9	0,898 9
1,10		1,408 8	1,848 9		0,718 9	0,942 9		0,718 9	0,942 9		0,718 9	0,942 9
1,15		1,477 6	1,936 9		0,752 9	0,986 9		0,752 9	0,986 9		0,752 9	0,986 9
1,20		1,546 4	2,024 9		0,786 9	1,030 9		0,786 9	1,030 9		0,786 9	1,030 9
1,25		1,615 2	2,112 9		0,820 9	1,074 9		0,820 9	1,074 9		0,820 9	1,074 9
1,30		1,684 0	2,200 9		0,854 9	1,118 9		0,854 9	1,118 9		0,854 9	1,118 9
1,35		1,752 8	2,288 9		0,888 9	1,162 9		0,888 9	1,162 9		0,888 9	1,162 9
1,40		1,821 6	2,376 9		0,922 9	1,206 9		0,922 9	1,206 9		0,922 9	1,206 9
1,45		1,890 4	2,464 9		0,956 9	1,250 9		0,956 9	1,250 9		0,956 9	1,250 9
1,50		1,959 2	2,552 9		0,990 9	1,294 9		0,990 9	1,294 9		0,990 9	1,294 9
1,55		2,028 0	2,640 9		1,024 9	1,338 9		1,024 9	1,338 9		1,024 9	1,338 9
1,60		2,096 8	2,728 9		1,058 9	1,382 9		1,058 9	1,382 9		1,058 9	1,382 9
1,65		2,165 6	2,816 9		1,092 9	1,426 9		1,092 9	1,426 9		1,092 9	1,426 9
1,70		2,234 4	2,904 9		1,126 9	1,470 9		1,126 9	1,470 9		1,126 9	1,470 9
1,75		2,303 2	2,992 9		1,160 9	1,514 9		1,160 9	1,514 9		1,160 9	1,514 9
1,80		2,372 0	3,080 9		1,194 9	1,558 9		1,194 9	1,558 9		1,194 9	1,558 9
1,85		2,440 8	3,168 9		1,228 9	1,602 9		1,228 9	1,602 9		1,228 9	1,602 9
1,90		2,509 6	3,256 9		1,262 9	1,646 9		1,262 9	1,646 9		1,262 9	1,646 9
1,95		2,578 4	3,344 9		1,296 9	1,690 9		1,296 9	1,690 9		1,296 9	1,690 9
2,00		2,647 2	3,432 9		1,330 9	1,734 9		1,330 9	1,734 9		1,330 9	1,734 9
2,05		2,716 0	3,520 9		1,364 9	1,778 9		1,364 9	1,778 9		1,364 9	1,778 9
2,10		2,784 8	3,608 9		1,398 9	1,822 9		1,398 9	1,822 9		1,398 9	1,822 9
2,15		2,853 6	3,696 9		1,432 9	1,866 9		1,432 9	1,866 9		1,432 9	1,866 9
2,20		2,922 4	3,784 9		1,466 9	1,910 9		1,466 9	1,910 9		1,466 9	1,910 9
2,25		2,991 2	3,872 9		1,500 9	1,954 9		1,500 9	1,954 9		1,500 9	1,954 9
2,30		3,060 0	3,960 9		1,534 9	1,998 9		1,534 9	1,998 9		1,534 9	1,998 9
2,35		3,128 8	4,048 9		1,568 9	2,042 9		1,568 9	2,042 9		1,568 9	2,042 9
2,40		3,197 6	4,136 9		1,602 9	2,086 9		1,602 9	2,086 9		1,602 9	2,086 9
2,45		3,266 4	4,224 9		1,636 9	2,130 9		1,636 9	2,130 9		1,636 9	2,130 9
2,50		3,335 2	4,312 9		1,670 9	2,174 9		1,670 9	2,174 9		1,670 9	2,174 9
2,55		3,404 0	4,400 9		1,704 9	2,218 9		1,704 9	2,218 9		1,704 9	2,218 9
2,60		3,472 8	4,488 9		1,738 9	2,262 9		1,738 9	2,262 9		1,738 9	2,262 9
2,65		3,541 6	4,576 9		1,772 9	2,306 9		1,772 9	2,306 9		1,772 9	2,306 9
2,70		3,610 4	4,664 9		1,806 9	2,350 9		1,806 9	2,350 9		1,806 9	2,350 9
2,75		3,679 2	4,752 9		1,840 9	2,394 9		1,840 9	2,394 9		1,840 9	2,394 9
2,80		3,748 0	4,840 9		1,874 9	2,438 9		1,874 9	2,438 9		1,874 9	2,438 9
2,85		3,816 8	4,928 9		1,908 9	2,482 9		1,908 9	2,482 9		1,908 9	2,482 9
2,90		3,885 6	5,016 9		1,942 9	2,526 9		1,942 9	2,526 9		1,942 9	2,526 9
2,95		3,954 4	5,104 9		1,976 9	2,570 9		1,976 9	2,570 9		1,976 9	2,570 9
3,00		4,023 2	5,192 9		2,010 9	2,614 9		2,010 9	2,614 9		2,010 9	2,614 9
3,05		4,092 0	5,280 9		2,044 9	2,658 9		2,044 9	2,658 9		2,044 9	2,658 9
3,10		4,160 8	5,368 9		2,078 9	2,702 9		2,078 9	2,702 9		2,078 9	2,702 9
3,15		4,229 6	5,456 9		2,112 9	2,746 9		2,112 9	2,746 9		2,112 9	2,746 9
3,20		4,298 4	5,544 9		2,146 9	2,790 9		2,146 9	2,790 9		2,146 9	2,790 9
3,25		4,367 2	5,632 9		2,180 9	2,834 9		2,180 9	2,834 9		2,180 9	2,834 9
3,30		4,436 0	5,720 9		2,214 9	2,878 9		2,214 9	2,878 9		2,214 9	2,878 9
3,35		4,504 8	5,808 9		2,248 9	2,922 9		2,248 9	2,922 9		2,248 9	2,922 9
3,40		4,573 6	5,896 9		2,282 9	2,966 9		2,282 9	2,966 9		2,282 9	2,966 9
3,45		4,642 4	5,984 9		2,316 9	3,010 9		2,316 9	3,010 9		2,316 9	3,010 9
3,50		4,711 2	6,072 9		2,350 9	3,054 9		2,350 9	3,054 9		2,350 9	3,054 9
3,55		4,780 0	6,160 9		2,384 9	3,098 9		2,384 9	3,098 9		2,384 9	3,098 9
3,60		4,848 8	6,248 9		2,418 9	3,142 9		2,418 9	3,142 9		2,418 9	3,142 9
3,65		4,917 6	6,336 9		2,452 9	3,186 9		2,452 9	3,186 9		2,452 9	3,186 9
3,70		4,986 4	6,424 9		2,486 9	3,230 9		2,486 9	3,230 9		2,486 9	3,230 9
3,75		5,055 2	6,512 9		2,520 9	3,274 9		2,520 9	3,274 9		2,520 9	3,274 9
3,80		5,124 0	6,600 9		2,554 9	3,318 9		2,554 9	3,318 9		2,554 9	3,318 9
3,85		5,192 8	6,688 9		2,588 9	3,362 9		2,588 9	3,362 9		2,588 9	3,362 9
3,90		5,261 6	6,776 9		2,622 9	3,406 9		2,622 9	3,406 9		2,622 9	3,406 9
3,95		5,330 4	6,864 9		2,656 9	3,450 9		2,656 9	3,450 9		2,656 9	3,450 9
4,00		5,399 2	6,952 9		2,690 9	3,494 9		2,690 9	3,494 9		2,690 9	3,494 9
4,05		5,468 0	7,040 9		2,724 9	3,538 9		2,724 9	3,538 9		2,724 9	3,538 9
4,10		5,536 8	7,128 9		2,758 9	3,582 9		2,758 9	3,582 9		2,758 9	3,582 9
4,15		5,605 6	7,216 9		2,792 9	3,626 9		2,792 9	3,626 9		2,792 9	3,626 9
4,20		5,674 4	7,304 9		2,826 9	3,670 9		2,826 9	3,670 9		2,826 9	3,670 9
4,25		5,743 2	7,392 9		2,860 9	3,714 9		2,860 9	3,714 9		2,860 9	3,714 9
4,30		5,812 0	7,480 9		2,894 9	3,758 9		2,894 9	3,758 9		2,894 9	3,758 9
4,35		5,880 8	7,568 9		2,928 9	3,802 9		2,928 9	3,802 9		2,928 9	3,802 9
4,40		5,949 6	7,656 9		2,962 9	3,846 9		2,962 9	3,846 9		2,962 9	3,846 9
4,45		6,018 4	7,744 9		2,996 9	3,890 9		2,996 9	3,890 9		2,996 9	3,890 9
4,50		6,087 2	7,832 9		3,030 9	3,934 9		3,030 9	3,934 9		3,030 9	3,934 9
4,55		6,156 0	7,920 9		3,064 9	3,978 9		3,064 9	3,978 9		3,064 9	3,978 9
4,60		6,224 8	8,008 9		3,098 9	4,022 9		3,098 9	4,022 9		3,098 9	4,022 9
4,65		6,293										

Tableau A- 5: Table 2 de Coolbrok

0,95	0,035 190	0,082 110	1,193 2	0,026 486	0,039 524	1,863 3	0,020 968	0,045 771	2,086 1	0,014 651	0,030 590	4,775 2
1,00	0,038 546	0,090 981	1,256 6	0,029 135	0,065 955	1,963 5	0,023 064	0,050 715	2,527 4	0,016 119	0,033 895	5,026 6
1,05	0,042 143	0,100 299	1,319 4	0,031 916	0,072 710	2,061 7	0,025 257	0,055 909	2,968 8	0,017 644	0,037 367	5,277 9
1,10	0,046 021	0,110 081	1,382 2	0,034 782	0,079 801	2,159 8	0,027 556	0,061 361	3,110 2	0,019 241	0,041 011	5,529 2
1,15	0,050 052	0,120 337	1,445 1	0,037 750	0,087 229	2,258 0	0,029 941	0,067 073	3,251 6	0,020 906	0,044 828	5,780 5
1,20	0,054 224	0,131 019	1,507 9	0,040 884	0,094 980	2,356 2	0,032 418	0,073 033	3,392 9	0,022 635	0,048 811	6,031 9
1,25	0,058 335	0,142 157	1,570 7	0,044 152	0,103 054	2,454 4	0,034 975	0,079 242	3,534 3	0,024 420	0,052 961	6,283 2
1,30	0,063 011	0,153 760	1,633 5	0,047 549	0,111 465	2,552 5	0,037 615	0,085 709	3,675 7	0,026 273	0,057 283	6,534 5
1,35	0,067 647	0,165 809	1,696 3	0,051 090	0,120 200	2,650 7	0,040 392	0,092 426	3,817 0	0,028 181	0,061 772	6,785 8
1,40	0,072 428	0,178 322	1,759 2	0,054 745	0,129 271	2,748 9	0,043 257	0,099 401	3,958 4	0,030 145	0,066 434	7,037 2
1,45	0,077 423	0,191 281	1,822 0	0,058 509	0,138 665	2,847 1	0,046 204	0,106 624	4,099 8	0,032 175	0,071 261	7,288 5
1,50	0,082 570	0,204 704	1,884 6	0,062 386	0,148 396	2,945 2	0,049 235	0,114 106	4,241 2	0,034 261	0,076 262	7,539 8
1,55	0,087 865	0,218 591	1,947 4	0,066 373	0,158 463	3,043 4	0,052 392	0,121 848	4,382 5	0,036 478	0,081 436	7,791 1
1,60	0,093 293	0,232 907	2,010 5	0,070 459	0,168 841	3,141 6	0,055 606	0,129 828	4,523 9	0,038 733	0,086 769	8,042 5
1,65	0,098 874	0,247 704	2,073 3	0,074 658	0,179 568	3,239 7	0,058 908	0,138 076	4,665 3	0,041 093	0,092 283	8,293 7
1,70	0,104 657	0,262 931	2,136 2	0,078 953	0,190 606	3,337 9	0,062 308	0,146 564	4,806 6	0,043 490	0,097 955	8,545 1
1,75	0,110 597	0,278 639	2,199 0	0,083 420	0,201 993	3,436 1	0,065 796	0,155 320	4,948 0	0,045 952	0,103 807	8,796 5
1,80	0,116 671	0,294 775	2,260 8	0,088 020	0,213 691	3,534 3	0,069 359	0,164 314	5,089 4	0,048 489	0,109 818	9,047 8
1,85	0,122 891	0,311 375	2,323 6	0,092 732	0,225 725	3,632 4	0,073 003	0,173 568	5,230 8	0,051 089	0,116 003	9,299 1
1,90	0,129 260	0,328 440	2,386 4	0,097 557	0,238 096	3,730 6	0,076 759	0,183 080	5,372 1	0,053 751	0,122 360	9,550 5
1,95	0,135 764	0,345 951	2,449 9	0,102 487	0,250 790	3,828 8	0,080 625	0,192 841	5,513 5	0,056 472	0,128 884	9,801 8
2,00	0,142 410	0,363 926	2,513 2	0,107 526	0,263 821	3,927 0	0,084 576	0,202 861	5,654 9	0,059 253	0,135 580	10,053 1
2,05	0,149 244	0,382 347	2,576 0	0,112 569	0,277 175	4,025 1	0,088 607	0,213 129	5,796 3	0,062 118	0,142 443	10,304 4
2,10	0,156 222	0,401 232	2,638 8	0,117 920	0,290 865	4,123 3	0,092 722	0,223 656	5,937 6	0,065 046	0,149 479	10,555 8
2,15	0,163 337	0,420 564	2,701 6	0,123 271	0,304 879	4,221 5	0,096 914	0,234 432	6,079 0	0,068 032	0,156 680	10,807 1
2,20	0,170 586	0,440 342	2,764 5	0,128 772	0,319 217	4,319 7	0,101 266	0,245 457	6,220 3	0,071 078	0,164 040	11,058 4
2,25	0,178 048	0,460 601	2,827 3	0,134 336	0,333 904	4,417 9	0,105 710	0,256 749	6,361 7	0,074 187	0,171 597	11,309 7
2,30	0,185 708	0,481 290	2,888 8	0,140 046	0,348 901	4,516 0	0,110 234	0,268 282	6,503 1	0,077 350	0,179 304	11,561 0
2,35	0,193 518	0,502 442	2,951 6	0,145 863	0,364 235	4,614 2	0,114 844	0,280 072	6,644 5	0,080 574	0,187 184	11,812 4
2,40	0,201 476	0,524 058	3,015 8	0,151 786	0,379 905	4,712 4	0,119 540	0,292 122	6,785 9	0,083 857	0,195 238	12,063 7
2,45	0,209 576	0,546 121	3,078 6	0,157 870	0,395 809	4,810 6	0,124 318	0,304 420	6,927 2	0,087 196	0,203 457	12,315 0
2,50	0,217 815	0,568 630	3,141 2	0,164 058	0,412 217	4,908 7	0,129 176	0,316 967	7,068 6	0,090 591	0,211 842	12,566 4
3,00	0,307 923	0,818 833	3,769 8	0,233 035	0,593 257	5,890 5	0,183 110	0,456 436	8,482 3	0,126 731	0,305 056	15,079 5
3,50	0,414 432	1,114 518	4,398 1	0,312 190	0,807 948	6,872 3	0,246 110	0,621 258	9,996 0	0,172 875	0,415 213	17,592 8
4,00	0,536 204	1,455 703	5,026 4	0,404 498	1,055 283	7,854 0	0,318 732	0,811 442	11,309 8	0,224 268	0,542 321	20,106 0

Tableau A- 6: Table 3 de Coolbrok

VITESSE MOYENNE EN METRES	DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,100 m Section de la conduite 0,007854 m ²		DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,125 m Section de la conduite 0,012272 m ²		DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,150 m Section de la conduite 0,0176725 m ²		DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,200 m Section de la conduite 0,031416 m ²	
	Charges par mètre de longueur de conduite k = 10 ⁻⁴	Débit en litres/sec. k = 2.10 ⁻³	Charges par mètre de longueur de conduite k = 10 ⁻⁴	Débit en litres/sec. k = 2.10 ⁻³	Charges par mètre de longueur de conduite k = 10 ⁻⁴	Débit en litres/sec. k = 2.10 ⁻³	Charges par mètre de longueur de conduite k = 10 ⁻⁴	Débit en litres/sec. k = 2.10 ⁻³
0,01		0,078 5		0,122 7		0,176 7		0,314 2
0,05		0,392 7		0,613 6		0,883 6		1,570 8
0,10		0,785 4		1,227 2		1,767 1		3,141 6
0,15		1,178 1	0,000 207	1,840 8	0,000 114	2,650 7	0,000 024	4,712 4
0,20		1,570 8	0,000 449	2,454 4	0,000 232	3,534 3	0,000 079	6,283 2
0,25		1,963 5	0,000 486	3,068 0	0,000 387	4,417 9	0,000 162	7,854 0
0,30		2,356 2	0,001 204	3,681 6	0,000 578	5,301 4	0,000 270	9,434 8
0,35		2,748 9	0,001 712	4,295 2	0,000 801	6,185 0	0,000 400	10,995 6
0,40		3,141 6	0,002 311	4,908 8	0,001 059	7,068 6	0,000 557	12,566 4
0,45		3,534 3	0,003 004	5,522 4	0,001 351	7,952 2	0,000 736	14,137 2
0,50		3,927 0	0,003 785	6,136 0	0,001 674	8,835 7	0,001 169	15,708 0
0,55		4,319 7	0,004 636	6,749 6	0,002 031	9,719 3	0,001 692	17,278 8
0,60		4,712 4	0,005 618	7,363 2	0,002 421	10,602 9	0,002 298	18,849 6
0,65		5,105 1	0,006 668	7,976 8	0,002 842	11,486 5	0,003 041	20,420 4
0,70		5,497 8	0,007 804	8,590 4	0,003 293	12,370 0	0,003 980	21,991 2
0,75		5,890 5	0,009 037	9,204 0	0,003 777	13,253 6	0,005 043	23,562 0
0,80		6,283 2	0,010 356	9,817 6	0,004 289	14,137 2	0,006 281	25,132 8
0,85		6,675 9	0,011 769	10,431 2	0,004 834	15,020 8	0,007 696	26,703 6
0,90		7,068 6	0,013 279	11,044 8	0,005 411	15,904 3	0,009 284	28,274 4
			0,014 878		0,006 017		0,011 572	
			0,016 478		0,006 644		0,013 166	
			0,018 078		0,007 299		0,014 760	
			0,019 678		0,007 984		0,016 354	
			0,021 278		0,008 699		0,017 948	
			0,022 878		0,009 444		0,019 542	
			0,024 478		0,010 229		0,021 136	
			0,026 078		0,010 954		0,022 730	
			0,027 678		0,011 719		0,024 324	
			0,029 278		0,012 524		0,025 918	
			0,030 878		0,013 369		0,027 512	
			0,032 478		0,014 254		0,029 106	
			0,034 078		0,015 179		0,030 700	
			0,035 678		0,016 144		0,032 294	
			0,037 278		0,017 149		0,033 888	
			0,038 878		0,018 194		0,035 482	
			0,040 478		0,019 279		0,037 076	
			0,042 078		0,020 404		0,038 670	
			0,043 678		0,021 569		0,040 264	
			0,045 278		0,022 774		0,041 858	
			0,046 878		0,024 019		0,043 452	
			0,048 478		0,025 304		0,045 046	
			0,050 078		0,026 639		0,046 640	
			0,051 678		0,028 014		0,048 234	
			0,053 278		0,029 439		0,049 828	
			0,054 878		0,030 914		0,051 422	
			0,056 478		0,032 439		0,053 016	
			0,058 078		0,034 014		0,054 610	
			0,059 678		0,035 639		0,056 204	
			0,061 278		0,037 314		0,057 798	
			0,062 878		0,039 039		0,059 392	
			0,064 478		0,040 814		0,060 986	
			0,066 078		0,042 639		0,062 580	
			0,067 678		0,044 514		0,064 174	
			0,069 278		0,046 439		0,065 768	
			0,070 878		0,048 414		0,067 362	
			0,072 478		0,050 439		0,068 956	
			0,074 078		0,052 514		0,070 550	
			0,075 678		0,054 639		0,072 144	
			0,077 278		0,056 814		0,073 738	
			0,078 878		0,059 039		0,075 332	
			0,080 478		0,061 314		0,076 926	
			0,082 078		0,063 639		0,078 520	
			0,083 678		0,066 014		0,080 114	
			0,085 278		0,068 439		0,081 708	
			0,086 878		0,070 914		0,083 302	
			0,088 478		0,073 439		0,084 896	
			0,090 078		0,076 014		0,086 490	
			0,091 678		0,078 639		0,088 084	
			0,093 278		0,081 314		0,089 678	
			0,094 878		0,084 039		0,091 272	
			0,096 478		0,086 814		0,092 866	
			0,098 078		0,089 639		0,094 460	
			0,099 678		0,092 514		0,096 054	
			0,101 278		0,095 439		0,097 648	
			0,102 878		0,098 414		0,099 242	
			0,104 478		0,101 439		0,100 836	
			0,106 078		0,104 514		0,102 430	
			0,107 678		0,107 639		0,104 024	
			0,109 278		0,110 814		0,105 618	
			0,110 878		0,114 039		0,107 212	
			0,112 478		0,117 314		0,108 806	
			0,114 078		0,120 639		0,110 400	
			0,115 678		0,124 014		0,112 004	
			0,117 278		0,127 439		0,113 608	
			0,118 878		0,130 914		0,115 202	
			0,120 478		0,134 439		0,116 806	
			0,122 078		0,138 014		0,118 400	
			0,123 678		0,141 639		0,120 004	
			0,125 278		0,145 314		0,121 608	
			0,126 878		0,149 039		0,123 202	
			0,128 478		0,152 814		0,124 806	
			0,130 078		0,156 639		0,126 400	
			0,131 678		0,160 514		0,128 004	
			0,133 278		0,164 439		0,129 608	
			0,134 878		0,168 414		0,131 202	
			0,136 478		0,172 439		0,132 806	
			0,138 078		0,176 514		0,134 400	
			0,139 678		0,180 639		0,136 004	
			0,141 278		0,184 814		0,137 608	
			0,142 878		0,189 039		0,139 202	
			0,144 478		0,193 314		0,140 806	
			0,146 078		0,197 639		0,142 400	
			0,147 678		0,202 014		0,144 004	
			0,149 278		0,206 439		0,145 608	
			0,150 878		0,210 914		0,147 202	
			0,152 478		0,215 439		0,148 806	
			0,154 078		0,220 014		0,150 400	
			0,155 678		0,224 639		0,152 004	
			0,157 278		0,229 314		0,153 608	
			0,158 878		0,234 039		0,155 202	
			0,160 478		0,238 814		0,156 806	
			0,162 078		0,243 639		0,158 400	
			0,163 678		0,248 514		0,160 004	
			0,165 278		0,253 439		0,161 608	
			0,166 878		0,258 414		0,163 202	
			0,168 478		0,263 439		0,164 806	
			0,170 078		0,268 514		0,166 400	
			0,171 678		0,273 639		0,168 004	
			0,173 278		0,278 814		0,169 608	
			0,174 878		0,284 039		0,171 202	
			0,176 478		0,289 314		0,172 806	
			0,178 078		0,294 639		0,174 400	
			0,179 678		0,300 014		0,176 004	
			0,181 278		0,305 439		0,177 608	
			0,182 878		0,310 914		0,179 202	
			0,184 478		0,316 439		0,180 806	
			0,186 078		0,322 014		0,182 400	
			0,187 678		0,327 639		0,184 004	
			0,189 278		0,333 314		0,185 608	
			0,190 878		0,339 039		0,187 202	
			0,192 478		0,344 814		0,188 806	
			0,194 078		0,350 639		0,190 400	
			0,195 678		0,356 514		0,192 004	
			0,197 278		0,362 439		0,193 608	
			0,198 878		0,368 414		0,195 202	
			0,200 478		0,374 439		0,196 806	
			0,202 078		0,380 514		0,198 400	
			0,203 678		0,386 639		0,200 004	
			0,205 278		0,392 814		0,201 608	
			0,206 878		0,399 039		0,203 202	
			0,208 478		0,405 314		0,204 806	
			0,210 078		0,411 639		0,206 400	
			0,211 678		0,418 014		0,208 004	
			0,213 278		0,424 439		0,209 608	
			0,214 878		0,430 914		0,211 202	
			0,216 478		0,437 439		0,212 806	
			0,218 078		0,444 014		0,214 400	
			0,219 678		0,450 639		0,216 004	
			0,221 278		0,457 314		0,217 608	
			0,222 878		0,464 039		0,219 202	
			0,224 478		0,470 814		0,220 806	
			0,226 078		0,477 639		0,222 400	
			0,227 678		0,484 514		0,224 004	
			0,229 278		0,491 439		0,225 608	
			0,230 878		0,498 414		0,227 202	
			0,232 478		0,505 439		0,228 806	
			0,234 078		0,512 514		0,230 400	

Tableau A- 7: Table 4 de Coolbrok

0,95	0,010 980	0,022 402	7,461 3	0,008 332	0,016 467	11,658 4	0,006 652	0,012 883	16,787 9	0,004 658	0,008 717	29,845 2
1,00	0,012 080	0,024 822	7,854 0	0,009 166	0,018 349	12,272 0	0,007 316	0,014 268	17,671 5	0,005 639	0,009 689	31,416 0
1,05	0,013 233	0,027 365	8,246 7	0,010 037	0,020 228	12,885 6	0,008 009	0,015 722	18,555 0	0,005 619	0,010 648	32,986 8
1,10	0,014 431	0,030 033	8,639 4	0,010 962	0,022 201	13,459 2	0,008 732	0,017 147	19,438 6	0,006 139	0,011 686	34,537 6
1,15	0,015 673	0,032 820	9,032 1	0,011 913	0,024 268	14,112 8	0,009 487	0,018 832	20,322 2	0,006 680	0,012 774	36,128 4
1,20	0,016 955	0,035 746	9,424 8	0,012 901	0,026 424	14,726 4	0,010 271	0,020 527	21,205 8	0,007 241	0,013 909	37,699 2
1,25	0,018 301	0,038 785	9,817 5	0,013 921	0,028 670	15,340 0	0,011 086	0,022 273	22,089 3	0,007 821	0,015 092	39,270 0
1,30	0,019 692	0,041 950	10,210 2	0,014 968	0,031 010	15,953 6	0,011 933	0,024 091	22,972 9	0,008 424	0,016 324	40,840 8
1,35	0,021 142	0,045 237	10,602 9	0,016 089	0,033 440	16,567 2	0,012 813	0,025 978	23,856 5	0,009 047	0,017 603	42,411 6
1,40	0,022 637	0,048 651	10,995 6	0,017 231	0,035 964	17,180 8	0,013 726	0,027 939	24,740 1	0,009 695	0,018 931	43,982 4
1,45	0,024 197	0,052 187	11,388 3	0,018 406	0,038 578	17,794 4	0,014 667	0,029 970	25,623 7	0,010 362	0,020 307	45,553 2
1,50	0,025 803	0,055 849	11,781 0	0,019 615	0,041 285	18,408 0	0,015 642	0,032 072	26,507 2	0,011 049	0,021 737	47,124 0
1,55	0,027 456	0,059 638	12,173 7	0,020 837	0,044 086	19,021 6	0,016 646	0,034 248	27,390 8	0,011 756	0,023 206	48,694 8
1,60	0,029 149	0,063 544	12,566 4	0,022 140	0,046 973	19,635 2	0,017 684	0,036 491	28,274 4	0,012 480	0,024 726	50,265 6
1,65	0,030 890	0,067 581	12,959 1	0,023 458	0,049 957	20,248 8	0,018 752	0,038 809	29,158 0	0,013 232	0,026 297	51,836 4
1,70	0,032 671	0,071 735	13,351 8	0,024 805	0,053 028	20,862 4	0,019 846	0,041 195	30,041 5	0,014 001	0,027 913	53,407 2
1,75	0,034 514	0,076 021	13,744 5	0,026 200	0,056 196	21,476 0	0,020 970	0,043 656	30,925 1	0,014 790	0,029 581	54,978 0
1,80	0,036 397	0,080 423	14,137 2	0,027 625	0,059 450	22,089 6	0,022 129	0,046 184	31,808 7	0,015 597	0,031 294	56,548 8
1,85	0,038 324	0,084 952	14,529 9	0,029 097	0,062 796	22,703 2	0,023 317	0,048 785	32,692 2	0,016 424	0,033 056	58,119 6
1,90	0,040 296	0,089 608	14,922 6	0,030 581	0,066 240	23,316 8	0,024 533	0,051 459	33,575 8	0,017 268	0,034 868	59,690 4
1,95	0,042 347	0,094 385	15,315 3	0,032 126	0,069 772	23,930 4	0,025 777	0,054 202	34,459 4	0,018 141	0,036 727	61,261 2
2,00	0,044 446	0,099 290	15,708 1	0,033 714	0,073 397	24,544 0	0,027 062	0,057 018	35,343 0	0,019 032	0,038 635	62,832 0
2,05	0,046 589	0,104 315	16,100 7	0,035 334	0,077 112	25,157 6	0,028 374	0,059 905	36,226 5	0,019 942	0,040 591	64,402 8
2,10	0,048 777	0,109 468	16,493 4	0,036 990	0,080 921	25,771 2	0,029 716	0,062 863	37,110 1	0,020 882	0,042 596	65,973 6
2,15	0,051 010	0,114 742	16,886 1	0,038 678	0,084 820	26,384 8	0,031 085	0,065 892	37,993 7	0,021 841	0,044 648	67,544 4
2,20	0,053 285	0,120 138	17,278 8	0,040 437	0,088 808	26,998 4	0,032 497	0,068 991	38,877 2	0,022 831	0,046 748	69,115 2
2,25	0,055 608	0,125 665	17,671 5	0,042 236	0,092 894	27,612 0	0,033 941	0,072 165	39,760 8	0,023 843	0,048 899	70,686 0
2,30	0,057 970	0,131 310	18,064 2	0,044 068	0,097 067	28,225 6	0,035 411	0,075 406	40,644 4	0,024 873	0,051 093	72,256 8
2,35	0,060 377	0,137 081	18,456 9	0,045 960	0,101 333	28,839 2	0,036 911	0,078 720	41,527 9	0,025 924	0,053 340	73,827 6
2,40	0,062 828	0,142 978	18,849 6	0,047 850	0,105 692	29,453 8	0,038 441	0,082 107	42,411 5	0,026 981	0,055 635	75,398 4
2,45	0,065 320	0,148 998	19,242 3	0,049 858	0,110 142	30,066 4	0,039 998	0,085 564	43,295 1	0,028 071	0,057 978	76,969 2
2,50	0,065 853	0,155 139	19,635 0	0,051 862	0,114 682	30,680 0	0,041 583	0,089 090	44,178 7	0,029 180	0,060 367	78,540 0
3,00	0,096 333	0,223 402	23,563 0	0,073 580	0,165 143	36,816	0,059 023	0,128 291	53,014 5	0,041 400	0,086 529	94,248 0
3,50	0,129 559	0,304 073	27,489 0	0,098 802	0,224 777	42,952	0,079 296	0,174 618	61,850 3	0,055 757	0,118 320	109,856
4,00	0,167 569	0,397 158	31,416 0	0,128 004	0,293 457	49,088	0,102 483	0,228 073	70,686 0	0,072 051	0,154 541	125,664

Tableau A- 9: Table 6 de Coolbrok

0,95	0,003 571	0,006 440	46,613 3	0,002 866	0,005 076	67,151 7	0,002 352	0,004 147	91,400 9	0,002 026	0,003 485	119,380 8
1,00	0,003 935	0,007 136	49,087 5	0,003 137	0,005 624	70,086 0	0,002 626	0,004 595	96,211 3	0,002 233	0,003 861	125,664 0
1,05	0,004 315	0,007 867	51,541 8	0,003 461	0,006 200	74,220 3	0,002 878	0,005 063	101,022 1	0,002 447	0,004 237	131,947 2
1,10	0,004 712	0,008 634	53,996 2	0,003 778	0,006 804	77,274 5	0,003 142	0,005 559	105,832 6	0,002 672	0,004 672	138,230 4
1,15	0,005 123	0,009 437	56,450 6	0,004 110	0,007 438	81,288 9	0,003 417	0,006 077	110,643 2	0,002 905	0,005 106	144,513 6
1,20	0,005 555	0,010 276	58,905 0	0,004 453	0,008 099	84,821 2	0,003 701	0,006 616	115,453 8	0,003 147	0,005 560	150,795 8
1,25	0,006 002	0,011 150	61,359 3	0,004 808	0,008 787	88,357 5	0,003 998	0,007 179	120,264 4	0,003 399	0,006 033	157,080 0
1,30	0,006 464	0,012 060	63,813 7	0,005 174	0,009 504	91,891 8	0,004 304	0,007 765	125,074 9	0,003 659	0,006 525	163,363 2
1,35	0,006 944	0,013 005	66,268 1	0,005 561	0,010 249	95,426 1	0,004 623	0,008 373	129,885 5	0,003 929	0,007 037	169,646 4
1,40	0,007 441	0,013 986	68,722 5	0,005 957	0,011 022	98,960 4	0,004 952	0,009 003	134,696 1	0,004 208	0,007 567	175,929 6
1,45	0,007 956	0,015 002	71,176 9	0,006 365	0,011 823	102,494 7	0,005 291	0,009 660	139,506 7	0,004 498	0,008 117	182,212 8
1,50	0,008 486	0,016 055	73,631 2	0,006 785	0,012 653	106,029 0	0,005 642	0,010 338	144,317 2	0,004 796	0,008 687	188,496 0
1,55	0,009 033	0,017 144	76,085 6	0,007 217	0,013 511	109,563 3	0,006 004	0,011 039	149,127 8	0,005 107	0,009 276	194,779 2
1,60	0,009 593	0,018 267	78,540 0	0,007 669	0,014 397	113,097 6	0,006 375	0,011 762	153,938 4	0,005 425	0,009 884	201,062 4
1,65	0,010 169	0,019 428	80,994 4	0,008 123	0,015 311	116,631 9	0,006 760	0,012 509	158,749 0	0,005 752	0,010 512	207,345 6
1,70	0,010 759	0,020 623	83,448 7	0,008 602	0,016 252	120,166 2	0,007 155	0,013 278	163,559 5	0,006 087	0,011 158	213,628 8
1,75	0,011 364	0,021 854	85,903 1	0,009 090	0,017 223	123,700 5	0,007 560	0,014 071	168,370 1	0,006 431	0,011 825	219,912 0
1,80	0,011 989	0,023 120	88,357 5	0,009 595	0,018 231	127,234 8	0,007 979	0,014 886	173,180 7	0,006 783	0,012 509	226,195 2
1,85	0,012 629	0,024 422	90,811 8	0,010 106	0,019 247	130,769 1	0,008 403	0,015 725	177,991 3	0,007 143	0,013 214	232,478 4
1,90	0,013 285	0,025 760	93,266 2	0,010 615	0,020 302	134,303 4	0,008 842	0,016 586	182,801 8	0,007 516	0,013 938	238,761 6
1,95	0,013 954	0,027 133	95,720 6	0,011 170	0,021 384	137,837 7	0,009 286	0,017 470	187,612 4	0,007 898	0,014 681	245,044 8
2,00	0,014 639	0,028 543	98,175 0	0,011 723	0,022 495	141,372 0	0,009 745	0,018 378	192,423 0	0,008 288	0,015 444	251,328 0
2,05	0,015 345	0,029 988	100,629 3	0,012 288	0,023 633	144,906 3	0,010 214	0,019 309	197,233 6	0,008 686	0,016 226	257,611 2
2,10	0,016 067	0,031 469	103,083 7	0,012 865	0,024 801	148,440 6	0,010 693	0,020 262	202,044 1	0,009 092	0,017 027	263,894 4
2,15	0,016 804	0,032 983	105,538 1	0,013 461	0,025 996	151,974 9	0,011 188	0,021 239	206,854 7	0,009 513	0,017 848	269,177 6
2,20	0,017 564	0,034 537	107,992 4	0,014 070	0,027 218	155,509 2	0,011 693	0,022 237	211,665 3	0,009 942	0,018 687	276,460 8
2,25	0,018 341	0,036 126	110,446 8	0,014 691	0,028 470	159,043 5	0,012 239	0,023 261	216,475 9	0,010 380	0,019 547	282,744 0
2,30	0,019 133	0,037 748	112,901 2	0,015 324	0,029 749	162,577 8	0,012 734	0,024 305	221,286 4	0,010 826	0,020 425	289,027 2
2,35	0,019 940	0,039 407	115,355 5	0,015 969	0,031 057	166,112 1	0,013 270	0,025 373	226,097 0	0,011 280	0,021 322	295,310 4
2,40	0,020 763	0,041 103	117,809 9	0,016 627	0,032 393	169,646 4	0,013 816	0,026 465	230,907 6	0,011 744	0,022 240	301,593 6
2,45	0,021 600	0,042 833	120,264 3	0,017 296	0,033 756	173,180 7	0,014 371	0,027 579	235,718 2	0,012 215	0,023 176	307,876 8
2,50	0,022 465	0,044 598	122,718 7	0,017 988	0,035 148	176,715 0	0,014 945	0,028 716	240,528 7	0,012 695	0,024 131	314,160 0
3,00	0,031 873	0,064 222	147,262 5	0,025 490	0,050 613	212,058	0,021 167	0,041 151	286,634 5	0,017 971	0,034 749	376,992
3,50	0,042 207	0,087 413	171,806 3	0,034 341	0,068 890	247,401	0,028 543	0,056 383	336,740 3	0,024 273	0,047 297	439,824
4,00	0,055 455	0,114 173	198,350 0	0,044 527	0,089 979	282,744	0,036 908	0,073 513	384,846 0	0,031 296	0,061 276	502,656

Tableau A- 10: Table 7 de Coolbrok

VITESSE MOYENNE EN METRES	DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,450 m Section de la conduite 0,1590435 m ²			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,500 m Section de la conduite 0,19635 m ²			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,600 m Section de la conduite 0,282744 m ²			DIAMETRE DE LA CONDUITE 0,800 m Section de la conduite 0,502656 m ²		
	Charges par mètre de longueur de conduite	Débit en litres/sec.	k = 2,10 ⁻³	Charges par mètre de longueur de conduite	Débit en litres/sec.	k = 2,10 ⁻³	Charges par mètre de longueur de conduite	Débit en litres/sec.	k = 2,10 ⁻³	Charges par mètre de longueur de conduite	Débit en litres/sec.	k = 2,10 ⁻³
0,01	0,000 008	1,590 4	0,000 007	1,963 5	0,000 006	2,827 4	0,000 004	5,026 5				
0,05	0,000 029	7,952 2	0,000 025	9,817 5	0,000 020	14,137 2	0,000 014	25,132 8				
0,10	0,000 059	15,904 3	0,000 052	19,635 0	0,000 041	28,274 4	0,000 029	50,265 6				
0,15	0,000 089	23,856 5	0,000 088	29,452 5	0,000 068	42,411 6	0,000 049	75,398 4				
0,20	0,000 149	31,808 7	0,000 131	39,270 0	0,000 105	56,549 6	0,000 074	100,531 2				
0,25	0,000 207	39,760 9	0,000 182	49,087 5	0,000 146	70,686 0	0,000 103	125,664 0				
0,30	0,000 275	47,713 0	0,000 242	58,905 0	0,000 193	84,823 2	0,000 137	150,796 8				
0,35	0,000 352	55,665 2	0,000 310	68,722 5	0,000 247	98,960 4	0,000 174	175,929 6				
0,40	0,000 438	63,617 4	0,000 386	78,540 0	0,000 307	113,097 6	0,000 216	201,062 4				
0,45	0,000 533	71,569 6	0,000 469	88,357 5	0,000 372	127,234 8	0,000 262	226,195 2				
0,50	0,000 636	79,521 7	0,000 560	98,175 0	0,000 443	141,372 0	0,000 312	251,328 0				
0,55	0,000 746	87,473 9	0,000 658	107,992 5	0,000 521	155,509 2	0,000 367	276,460 8				
0,60	0,000 865	95,426 1	0,000 763	117,810 0	0,000 605	169,646 4	0,000 425	301,593 6				
0,65	0,000 994	103,378 3	0,000 875	127,627 5	0,000 695	183,783 6	0,000 489	326,726 4				
0,70	0,001 131	111,330 4	0,001 001	137,445 0	0,000 790	197,920 8	0,000 557	351,859 2				
0,75	0,001 276	119,282 6	0,001 123	147,262 5	0,000 890	212,058 0	0,000 628	376,992 0				
0,80	0,001 429	127,234 8	0,001 258	157,080 0	0,000 996	226,195 2	0,000 703	402,124 8				
0,85	0,001 589	135,187 0	0,001 400	166,897 5	0,001 107	240,332 4	0,000 781	427,257 6				
0,90		143,139 1	0,001 488	176,715 0	0,001 107	254,469 6	0,001 279	452,390 4				

Tableau A- 11: Table 8 de Coolbrok

0,95	0,001 757	0,002 291	151,091 3	0,001 548	0,002 606	186,532 5	0,001 221	0,002 089	268,606 8	0,000 864	0,001 425	477,533 2
1,00	0,001 936	0,003 313	159,043 5	0,001 704	0,002 885	196,300 0	0,001 341	0,002 279	282,744 0	0,000 952	0,001 579	502,656 8
1,05	0,002 122	0,003 652	166,995 7	0,001 869	0,003 180	206,167 5	0,001 472	0,002 513	296,881 2	0,001 044	0,001 741	527,788 8
1,10	0,002 316	0,004 008	174,947 8	0,002 040	0,003 491	215,985 0	0,001 609	0,002 738	311,018 4	0,001 139	0,001 910	552,921 6
1,15	0,002 520	0,004 352	182,900 0	0,002 219	0,003 815	225,802 3	0,001 750	0,003 014	325,155 6	0,001 239	0,002 088	578,054 4
1,20	0,002 730	0,004 771	190,852 2	0,002 405	0,004 154	235,620 0	0,001 897	0,003 282	339,292 8	0,001 341	0,002 274	603,187 2
1,25	0,002 948	0,005 177	198,804 4	0,002 596	0,004 508	245,437 5	0,002 049	0,003 561	353,430 0	0,001 448	0,002 467	628,320 0
1,30	0,003 174	0,005 599	206,756 5	0,002 794	0,004 876	255,255 0	0,002 208	0,003 852	367,567 2	0,001 559	0,002 668	653,452 8
1,35	0,003 408	0,006 038	214,708 7	0,003 009	0,005 258	265,072 5	0,002 372	0,004 154	381,704 4	0,001 673	0,002 877	678,585 6
1,40	0,003 650	0,006 494	222,660 9	0,003 213	0,005 634	274,890 0	0,002 541	0,004 467	395,841 6	0,001 791	0,003 095	703,718 4
1,45	0,003 901	0,006 965	230,613 1	0,003 436	0,006 065	284,707 5	0,002 715	0,004 792	409,978 8	0,001 914	0,003 319	728,851 2
1,50	0,004 162	0,007 454	238,565 2	0,003 665	0,006 491	294,525 0	0,002 896	0,005 128	424,116 0	0,002 041	0,003 552	753,984 0
1,55	0,004 430	0,007 960	246,517 4	0,003 902	0,006 931	304,342 5	0,003 082	0,005 476	438,253 2	0,002 174	0,003 793	779,116 8
1,60	0,004 706	0,008 481	254,469 6	0,004 144	0,007 385	314,160 0	0,003 273	0,005 835	452,390 4	0,002 309	0,004 298	804,249 6
1,65	0,004 990	0,009 020	262,421 8	0,004 393	0,007 854	323,977 5	0,003 469	0,006 205	466,527 6	0,002 449	0,004 563	829,382 4
1,70	0,005 280	0,009 574	270,373 9	0,004 649	0,008 337	333,795 0	0,003 673	0,006 587	480,664 8	0,002 593	0,004 835	854,515 2
1,75	0,005 578	0,010 147	278,326 1	0,004 911	0,008 855	343,612 5	0,003 879	0,006 980	494,802 0	0,002 740	0,005 115	879,648 0
1,80	0,005 883	0,010 734	286,278 3	0,005 179	0,009 347	353,430 0	0,004 099	0,007 384	508,939 2	0,002 890	0,005 403	904,780 8
1,85	0,006 194	0,011 338	294,230 5	0,005 456	0,009 873	363,247 5	0,004 309	0,007 800	523,076 4	0,003 044	0,005 699	929,913 6
1,90	0,006 518	0,011 960	302,182 6	0,005 741	0,010 414	373,065 0	0,004 533	0,008 228	537,213 6	0,003 202	0,006 003	955,046 4
1,95	0,006 848	0,012 598	310,134 8	0,006 031	0,010 970	382,882 5	0,004 761	0,008 666	551,350 8	0,003 363	0,006 315	980,179 2
2,00	0,007 186	0,013 252	318,087 0	0,006 328	0,011 540	392,700 0	0,004 995	0,009 117	565,488 0	0,003 530	0,006 635	1,005,312 0
2,05	0,007 530	0,013 923	326,039 2	0,006 632	0,012 124	402,517 5	0,005 234	0,009 578	579,625 2	0,003 700	0,006 963	1,030,444 8
2,10	0,007 887	0,014 611	333,991 3	0,006 946	0,012 723	412,335 0	0,005 473	0,010 051	593,762 4	0,003 875	0,007 298	1,055,577 6
2,15	0,008 252	0,015 315	341,943 5	0,007 266	0,013 336	422,152 5	0,005 729	0,010 536	607,899 6	0,004 052	0,007 641	1,080,710 4
2,20	0,008 623	0,016 035	349,895 7	0,007 593	0,013 963	431,970 0	0,005 986	0,011 031	622,036 8	0,004 234	0,007 993	1,105,843 2
2,25	0,009 003	0,016 773	357,847 9	0,007 927	0,014 605	441,787 5	0,006 249	0,011 530	636,174 0	0,004 419	0,008 352	1,130,976 0
2,30	0,009 389	0,017 526	365,800 0	0,008 267	0,015 261	451,605 0	0,006 516	0,012 057	650,311 2	0,004 611	0,008 719	1,156,108 8
2,35	0,009 783	0,018 296	373,752 2	0,008 613	0,015 932	461,422 5	0,006 788	0,012 587	664,448 4	0,004 806	0,009 094	1,181,241 6
2,40	0,010 184	0,019 083	381,504 4	0,008 966	0,016 617	471,240 0	0,007 066	0,013 128	678,585 6	0,005 006	0,009 477	1,206,374 4
2,45	0,010 593	0,019 887	389,656 6	0,009 325	0,017 317	481,057 5	0,007 353	0,013 681	692,722 8	0,005 209	0,009 867	1,231,507 2
2,50	0,011 008	0,020 706	397,608 7	0,009 697	0,018 030	490,875 0	0,007 645	0,014 245	706,860 0	0,005 416	0,010 269	1,256,640 0
3,00	0,015 607	0,029 817	477,130 5	0,013 762	0,025 964	589,08	0,010 841	0,020 513	848,232	0,009 867	0,014 269	1,507,968
3,50	0,021 035	0,040 585	556,652 3	0,018 519	0,035 340	687,225	0,014 610	0,027 920	989,604	0,010 357	0,019 340	1,759,296
4,00	0,027 034	0,053 089	636,174	0,023 976	0,046 158	785,4	0,018 893	0,036 467	1,130,976	0,013 905	0,025 261	2,010,624

Tableau A- 12: Table 9 de Coolbrok

VITESSE MOYENNE EN METRES	DIAMETRE DE LA CONDUITE 1,000 m Section de la conduite 0,785398 m ²		DIAMETRE DE LA CONDUITE 1,250 m Section de la conduite 1,22719 m ²		DIAMETRE DE LA CONDUITE 1,500 m Section de la conduite 1,76715 m ²		DIAMETRE DE LA CONDUITE 1,750 m Section de la conduite 2,405281 m ²	
	Charges par mètre de longueur de conduite		Charges par mètre de longueur de conduite		Charges par mètre de longueur de conduite		Charges par mètre de longueur de conduite	
	k = 10 ⁻⁴	k = 2,10 ⁻³	k = 10 ⁻⁴	k = 2,10 ⁻³	k = 10 ⁻⁴	k = 2,10 ⁻³	k = 10 ⁻⁴	k = 2,10 ⁻³
0,01	0,000 003	0,000 004	0,000 002	0,000 003	0,000 002	0,000 002	0,000 002	0,000 002
0,05	0,000 010	0,000 013	0,000 008	0,000 010	0,000 006	0,000 006	0,000 005	0,000 007
0,10	0,000 022	0,000 029	0,000 017	0,000 022	0,000 013	0,000 013	0,000 011	0,000 014
0,15	0,000 037	0,000 051	0,000 028	0,000 038	0,000 023	0,000 023	0,000 019	0,000 025
0,20	0,000 056	0,000 078	0,000 043	0,000 059	0,000 034	0,000 034	0,000 028	0,000 038
0,25	0,000 078	0,000 111	0,000 060	0,000 084	0,000 048	0,000 047	0,000 040	0,000 055
0,30	0,000 103	0,000 150	0,000 079	0,000 113	0,000 063	0,000 067	0,000 053	0,000 074
0,35	0,000 132	0,000 190	0,000 101	0,000 147	0,000 081	0,000 090	0,000 068	0,000 096
0,40	0,000 164	0,000 246	0,000 125	0,000 185	0,000 101	0,000 117	0,000 084	0,000 121
0,45	0,000 200	0,000 302	0,000 152	0,000 227	0,000 122	0,000 148	0,000 102	0,000 149
0,50	0,000 239	0,000 365	0,000 182	0,000 274	0,000 146	0,000 182	0,000 122	0,000 181
0,55	0,000 280	0,000 433	0,000 213	0,000 326	0,000 172	0,000 219	0,000 144	0,000 215
0,60	0,000 325	0,000 507	0,000 248	0,000 382	0,000 200	0,000 260	0,000 167	0,000 251
0,65	0,000 372	0,000 587	0,000 285	0,000 443	0,000 230	0,000 305	0,000 191	0,000 291
0,70	0,000 423	0,000 673	0,000 324	0,000 509	0,000 261	0,000 353	0,000 217	0,000 334
0,75	0,000 478	0,000 765	0,000 366	0,000 579	0,000 295	0,000 405	0,000 246	0,000 380
0,80	0,000 536	0,000 863	0,000 409	0,000 653	0,000 330	0,000 461	0,000 276	0,000 429
0,85	0,000 596	0,000 966	0,000 456	0,000 732	0,000 368	0,000 521	0,000 306	0,000 481
0,90								
		7,853 9		12,271 5		17,671		24,053
		39,269 4		61,357 5		86,355		120,264
		78,538 9		122,715 0		176,710		240,528
		117,808 3		184,072 5		265,005		360,792
		157,077 8		245,430 0		353,420		481,056
		196,347 2		306,787 5		441,775		601,320
		235,616 7		368,145 0		530,130		721,584
		274,886 1		429,502 5		618,483		841,548
		314,155 6		490,860 0		706,840		962,112
		353,425 0		552,217 5		795,195		1,082,376
		392,694 5		613,575 5		883,550		1,202,641
		431,963 9		674,932 5		971,905		1,322,905
		471,233 4		736,290 0		1,060,260		1,443,169
		510,502 8		797,647 5		1,148,615		1,563,433
		549,772 3		859,005 0		1,236,970		1,683,697
		589,041 7		920,362 5		1,325,325		1,803,961
		628,311 2		981,720 0		1,413,680		1,924,225
		667,580 6		1,043,077 5		1,502,035		2,044,489
		706,850 1		1,104,435 0		1,590,390		2,164,753

Tableau A- 13: Table 10 de Coolbrok

0,95	0,000 660	0,001 076	746,119 5	0,000 305	0,000 815	1,165,792 5	0,000 406	0,000 651	1,678,745	0,000 339	0,000 536	2,282,917
1,00	0,000 726	0,001 193	785,398 0	0,000 256	0,000 903	1,227,150 0	0,000 447	0,000 721	1,767,100	0,000 373	0,000 394	2,460,281
1,05	0,000 795	0,001 315	824,638 4	0,000 609	0,000 995	1,288,507 5	0,000 490	0,000 795	1,855,455	0,000 409	0,000 634	2,522,545
1,10	0,000 868	0,001 443	863,927 9	0,000 665	0,001 092	1,349,865 0	0,000 535	0,000 872	1,943,810	0,000 447	0,000 718	2,645,809
1,15	0,000 944	0,001 577	903,197 3	0,000 723	0,001 193	1,411,222 5	0,000 582	0,000 953	2,032,165	0,000 486	0,000 785	2,766,073
1,20	0,001 024	0,001 718	942,466 8	0,000 783	0,001 299	1,472,580 0	0,000 631	0,001 038	2,120,520	0,000 527	0,000 854	2,886,337
1,25	0,001 106	0,001 864	971,736 2	0,000 846	0,001 409	1,533,937 5	0,000 682	0,001 126	2,208,875	0,000 570	0,000 927	3,006,601
1,30	0,001 191	0,002 016	1,021,005 7	0,000 911	0,001 524	1,595,295 0	0,000 735	0,001 218	2,297,230	0,000 614	0,001 003	3,126,865
1,35	0,001 280	0,002 174	1,050,275 1	0,000 979	0,001 644	1,656,652 5	0,000 789	0,001 314	2,385,585	0,000 659	0,001 081	3,247,129
1,40	0,001 372	0,002 338	1,099,544 6	0,001 049	0,001 767	1,718,010 0	0,000 845	0,001 412	2,473,940	0,000 706	0,001 163	3,367,393
1,45	0,001 466	0,002 508	1,138,814 0	0,001 121	0,001 895	1,779,367 5	0,000 903	0,001 515	2,562,295	0,000 754	0,001 247	3,487,657
1,50	0,001 563	0,002 684	1,178,083 5	0,001 196	0,002 028	1,840,725 0	0,000 963	0,001 621	2,650,650	0,000 805	0,001 335	3,607,922
1,55	0,001 663	0,002 866	1,217,352 9	0,001 274	0,002 166	1,902,082 5	0,001 025	0,001 731	2,739,005	0,000 857	0,001 425	3,728,186
1,60	0,001 767	0,003 053	1,256,622 4	0,001 353	0,002 307	1,963,440 0	0,001 089	0,001 844	2,827,360	0,000 911	0,001 519	3,848,500
1,65	0,001 873	0,003 247	1,295,891 8	0,001 434	0,002 454	2,024,797 5	0,001 155	0,001 961	2,915,715	0,000 966	0,001 615	3,968,714
1,70	0,001 983	0,003 447	1,335,161 3	0,001 518	0,002 604	2,086,155 0	0,001 223	0,002 082	3,004,070	0,001 023	0,001 715	4,088,978
1,75	0,002 095	0,003 653	1,374,430 7	0,001 603	0,002 760	2,147,512 5	0,001 292	0,002 206	3,092,425	0,001 080	0,001 817	4,209,242
1,80	0,002 213	0,003 864	1,413,700 2	0,001 691	0,002 920	2,208,870 0	0,001 363	0,002 334	3,180,780	0,001 140	0,001 922	4,329,506
1,85	0,002 332	0,004 082	1,452,969 6	0,001 782	0,003 084	2,270,227 5	0,001 436	0,002 466	3,269,135	0,001 201	0,002 030	4,449,770
1,90	0,002 455	0,004 306	1,492,238 1	0,001 875	0,003 253	2,331,585 0	0,001 512	0,002 601	3,357,490	0,001 264	0,002 142	4,570,034
1,95	0,002 580	0,004 535	1,531,507 5	0,001 971	0,003 427	2,392,942 5	0,001 589	0,002 739	3,445,845	0,001 329	0,002 256	4,690,298
2,00	0,002 708	0,004 771	1,570,778 0	0,002 068	0,003 605	2,454,300 0	0,001 669	0,002 882	3,534,200	0,001 396	0,002 373	4,810,562
2,05	0,002 838	0,005 012	1,610,047 4	0,002 168	0,003 787	2,515,657 5	0,001 749	0,003 027	3,622,555	0,001 463	0,002 493	4,930,826
2,10	0,002 972	0,005 260	1,649,316 9	0,002 269	0,003 974	2,577,015 0	0,001 833	0,003 177	3,710,910	0,001 531	0,002 617	5,051,090
2,15	0,003 108	0,005 513	1,688,586 3	0,002 375	0,004 166	2,638,372 5	0,001 916	0,003 330	3,799,265	0,001 602	0,002 742	5,171,354
2,20	0,003 246	0,005 773	1,727,855 8	0,002 483	0,004 361	2,699,730 0	0,002 003	0,003 487	3,887,620	0,001 675	0,002 872	5,291,618
2,25	0,003 388	0,006 038	1,767,125 2	0,002 593	0,004 562	2,761,087 5	0,002 092	0,003 647	3,975,975	0,001 749	0,003 004	5,411,882
2,30	0,003 532	0,006 309	1,806,394 7	0,002 705	0,004 767	2,822,445 0	0,002 182	0,003 811	4,064,330	0,001 824	0,003 138	5,532,146
2,35	0,003 679	0,006 587	1,845,664 1	0,002 819	0,004 976	2,883,802 5	0,002 274	0,003 978	4,152,685	0,001 901	0,003 277	5,652,410
2,40	0,003 831	0,006 870	1,884,933 6	0,002 936	0,005 191	2,945,160 0	0,002 378	0,004 149	4,241,040	0,001 980	0,003 417	5,772,674
2,45	0,003 985	0,007 159	1,924,203 0	0,003 053	0,005 409	3,006,517 5	0,002 462	0,004 324	4,329,395	0,002 058	0,003 561	5,892,938
2,50	0,004 141	0,007 454	1,963,472 5	0,003 178	0,005 632	3,067,875 0	0,002 557	0,004 502	4,417,750	0,002 139	0,003 708	6,013,203
3,00	0,005 895	0,010 734	2,356,194	0,004 510	0,008 110	3,681,57	0,003 633	0,006 483	5,301,45	0,003 035	0,005 340	7,215,843
3,50	0,007 930	0,014 610	2,748,893	0,006 084	0,011 039	4,295,165	0,004 891	0,008 825	6,185,025	0,004 092	0,007 268	8,418,484
4,00	0,010 259	0,019 083	3,141,592	0,007 875	0,014 418	4,908,76	0,006 350	0,011 526	7,068,600	0,005 303	0,009 493	9,621,174


```

1 function lambdaN=Estimlambdamoody(Re,RugRel);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de Moody en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=0.0055*(1+((2*10^4*RugRel)+(10^6)/Re)^(1/3));
8 end
9
10
11
12

```

Figure A- 4: Script formule de Moody

```

1 function lambdaN=Estimlambdavankarmanprandtl(Re,RugRel);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de vankarmanprandtl en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 % Retourne lambdaN=-Inf si vankarmanprandtl ne converge pas
5 if Re<=2000 ;
6     lambdaN=64/Re;
7 else
8     %constantes
9     a=(RugRel/3.71);
10    b=2.51/Re;
11    ErMaxPc=0.0001;
12    ErPc=Inf;
13    NbrIter=0;
14    NbrIterMax=100;
15    lambda0=0.02;
16    while and(ErPc>ErMaxPc,NbrIter<NbrIterMax)
17        NbrIter=NbrIter+1;
18        lambdaN=(-2*log10(Re*lambda0)-0.8)^(-2);
19        ErPc=abs((lambdaN-lambda0)/lambdaN*100);
20        lambda0=lambdaN;
21    end;
22    if NbrIter==NbrIterMax;
23        lambdaN=-Inf;end;

```

Figure A- 5: Script formule de Vankarmanprandtl

```

1 function lambdaN=Estimlambdaswameejain(Re,RugRel);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de swamee jain en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 % Retourne lambdaN=-Inf si swamee jain ne converge pas
5 if Re<=2000 ;
6     lambdaN=64/Re;
7 else
8     lambdaN=0.25/((log10(RugRel/3.71+5.74/(Re^(0.9))))^2);
9 end
10
11
12
13

```

Figure A- 6: Script formule de Swamee Jain

```

1 function lambdaN=Estimlambdaschilleretherman(Re);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de schilleretherman en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=0.0054+0.396/(Re^0.3);
8 end

```

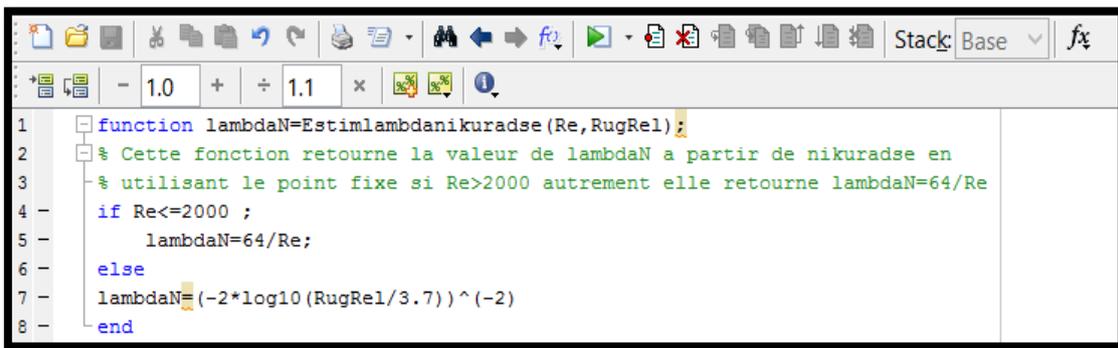
Figure A- 7: Script formule de Schilleretherman

```

1 function lambdaN=Estimlambdaprandtlvankarman(Re,RugRel);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de prandtlvankarman en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=1/(1.74+2*log(1/RugRel));
8 end
9

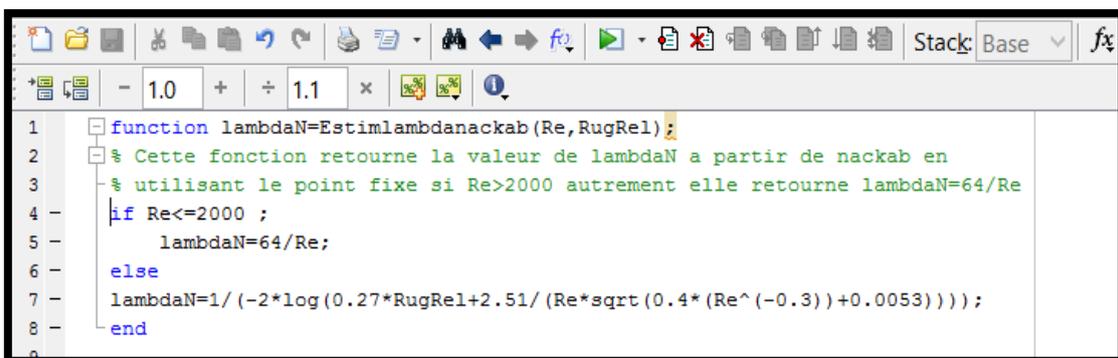
```

Figure A- 8: Script formule de Prandtlvankarman



```
1 function lambdaN=Estimlambdanikuradse (Re, RugRel) ;
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de nikuradse en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=(-2*log10(RugRel/3.7)) ^ (-2)
8 end
```

Figure A- 9: Script formule de Nikuradse



```
1 function lambdaN=Estimlambdanackab (Re, RugRel) ;
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de nackab en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=1/(-2*log(0.27*RugRel+2.51/(Re*sqrt(0.4*(Re^(-0.3))+0.0053))));
8 end
```

Figure A- 10: Script formule de Nackab

```

1 function lambdaN=Estimlambdalehman(Re, RugRel);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de lehman en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 % Retourne lambdaN=-Inf si lehman ne converge pas
5 - if Re<=2000 ;
6 -     lambdaN=64/Re;
7 - else
8     %constantes
9     a=(RugRel/3.71);
10    b=2.51/Re;
11    ErMaxPc=0.0001;
12    ErPc=Inf;
13    NbrIter=0;
14    NbrIterMax=100;
15    lambda0=0.02;
16    while and(ErPc>ErMaxPc,NbrIter<NbrIterMax)
17        NbrIter=NbrIter+1;
18        lambdaN=(-1.94*log10(((RugRel/3.71)^(1.03))+((4.26/Re/lambda0)^(1.1))^(1.03)))^(1.03);
19        ErPc=abs((lambdaN-lambda0)/lambdaN*100);
20        lambda0=lambdaN;
21    end;
22    if NbrIter==NbrIterMax;
23        lambdaN=-Inf;end;
24
25 end;

```

Figure A- 11: Script formule de Lehman

```

1 function lambdaN=Estimlambdalazard(Re);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de lazard en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 % Retourne lambdaN=-Inf si Colebrook ne converge pas
5 - if Re<=2000 ;
6 -     lambdaN=64/Re;
7 - else
8     lambdaN=0.00372+0.247/(Re^0.25);
9 - end;

```

Figure A- 12: Script formule de Lazard

```

1 function lambdaN=Estimlambdahaland(Re,RugRel);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de haland en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=(-1.8*log(6.9/Re+((RugRel/3.7)^(1.11))))^(-2);
8 end

```

Figure A- 13: Script formule de Haland

```

1 function lambdaN=Estimlambdahagen(Re,RugRel);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de hagen en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=RugRel/(Re^0.25);
8 end

```

Figure A- 14: Script formule de Hagen

```

1 function lambdaN=Estimlambdablasius(Re);
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de blasius en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=0.3164/(Re^0.25);
8 end

```

Figure A- 15: Script formule de Blasius

```

1 function lambdaN=Estimlambdabarr (Re, RugRel) ;
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de barr en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=0.25/((log10(RugRel/3.71+5.1286/(Re^(0.89))))^2);
8 end

```

Figure A- 16: Script formule de Barr

```

1 function lambdaN=Estimlambdaaltschoul (Re, RugRel) ;
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de altschoul en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=0.1*[(1.46*RugRel+100/Re)]^0.25;
8 end

```

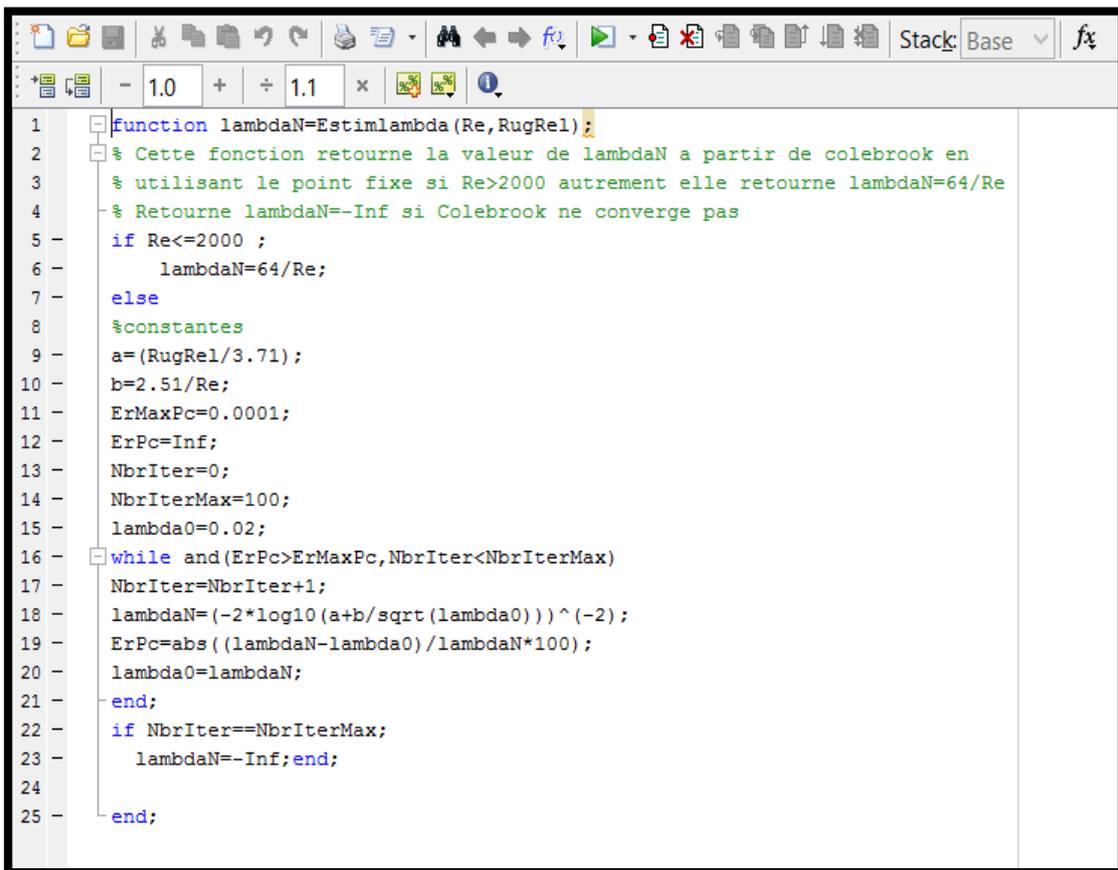
Figure A- 17: Script formule d'Altschoul

```

1 function lambdaN=Estimlambdaachour (Re, RugRel) ;
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de achour en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 if Re<=2000 ;
5     lambdaN=64/Re;
6 else
7     lambdaN=1/((-2*log10(RugRel/3.7+4.5/Re*log(Re/6.97)))^2);
8 end

```

Figure A- 18: Script formule de Achour



```
1 function lambdaN=Estimlambda (Re, RugRel) ;
2 % Cette fonction retourne la valeur de lambdaN a partir de colebrook en
3 % utilisant le point fixe si Re>2000 autrement elle retourne lambdaN=64/Re
4 % Retourne lambdaN=-Inf si Colebrook ne converge pas
5 - if Re<=2000 ;
6 -     lambdaN=64/Re;
7 - else
8 -     %constantes
9 -     a=(RugRel/3.71);
10 -    b=2.51/Re;
11 -    ErMaxPc=0.0001;
12 -    ErPc=Inf;
13 -    NbrIter=0;
14 -    NbrIterMax=100;
15 -    lambda0=0.02;
16 -    while and(ErPc>ErMaxPc,NbrIter<NbrIterMax)
17 -        NbrIter=NbrIter+1;
18 -        lambdaN=(-2*log10(a+b/sqrt(lambda0)) )^(-2);
19 -        ErPc=abs((lambdaN-lambda0)/lambdaN*100);
20 -        lambda0=lambdaN;
21 -    end;
22 -    if NbrIter==NbrIterMax;
23 -        lambdaN=-Inf;end;
24 -
25 - end;
```

Figure A- 19: Script formule de Coolbrok