

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE MATÉRIAUX DE GÉNIE CIVIL
ET ENVIRONNEMENT

Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

**Développement d'outils informatiques pour le génie
hydraulique : Simulateur du coup de bélier -
implémentation de nouvelles commandes
(pack d'extension 2019)**

Younes BENAKCHA

Yasser BENMANSOUR

Sous la direction de M. Mohamed Amine BOUKHEMACHA MCA à l'ENP
Présenté et soutenu publiquement le (11/07/2019)

Composition du Jury :

| | | | |
|-----------|------------------------------|-----|---------|
| Président | M. Belhadj Omar | MAA | ENP |
| Encadreur | M. Boukhemacha Mohamed Amine | MCA | ENP |
| Examineur | M. Soukane Sofiane | MCA | ENSSMAL |

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi 16200 Alger
ENP 2019

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE MATÉRIAUX DE GÉNIE CIVIL
ET ENVIRONNEMENT

Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

**Développement d'outils informatiques pour le génie
hydraulique : Simulateur du coup de bélier -
implémentation de nouvelles commandes
(pack d'extension 2019)**

Younes BENAKCHA

Yasser BENMANSOUR

Sous la direction de M. Mohamed Amine BOUKHEMACHA MCA a l'ENP
Présenté et soutenu publiquement le (11/07/2019)

Composition du Jury :

| | | | |
|-----------|------------------------------|-----|---------|
| Président | M. Belhadj Omar | MAA | ENP |
| Encadreur | M. Boukhemacha Mohamed Amine | MCA | ENP |
| Examineur | M. Soukane Sofiane | MCA | ENSSMAL |

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi 16200 Alger
ENP 2019

Dédicaces

*Je dédie ce travail de projet de fin d'études à mes **parents** qui ont été pour moi d'un grand soutien moral. Puisse Allah les protéger.*

Je dédie ce travail également à :

- mes sœurs,*
- mes frères,*
- membres de la grande famille **BENAKCHA**,*
- tous mes amis de la promotion, en particulier **Yasser BENMANSOUR**,*
- tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant l'élaboration de ce projet.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand soutien pour mener à bien mes études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le Tout Puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis jour et nuit pour mon éducation et ma formation.

A mes Frères : Akram et Abdelssamed.

Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A mon très cher oncle SAÏD et sa famille

Vous avez toujours été présents pour les bons conseils. Votre affection et votre soutien m'ont été d'un grand secours au long de ma vie professionnelle et personnelle.

A tous les membres de ma famille, petits, et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection

A MES CHERS AMIS, en particulier Younes BENAÏCHA et Mohamed Reda BENANTAR,

Egalement à tous ceux qui m'ont aidé.

Remerciements

Avant tout, nous remercions notre Créateur **Allah** le Tout Puissant de nous avoir donné la volonté et le courage pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à notre encadrant **Dr. BOUKHEMACHA M.A.** pour avoir proposé et dirigé ce travail, pour ses précieux conseils et sa disponibilité.

Nos vifs remerciements s'adressent aux membres du Jury, M. **BELHADJ Omar** et M. **SOUKANE Sofiane** qui nous ont fait honneur d'examiner et de juger travail. Leurs remarques et suggestions ne feront qu'enrichir ce travail.

Nous sommes également très reconnaissants à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation, ainsi qu'à l'ensemble du personnel administratif de l'Ecole.

Enfin, nous remercions tous nos amis qui nous ont aidés, encouragés et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

اهتمنا في هذا العمل بالدراسة الرقمية للتدفقات الغير دائمة تحت الحمل. ولذلك تم تطوير اصدار جديد لمحاكي ضربة المطرقة (الإصدار الأول عام 2018 في قسم الري/ مخبر الهندسة المدنية في المدرسة الوطنية متعددة التقنيات). استنادا الى طريقة الميزة و مطور في مجال مفتوح (بايثون 3.7) ومؤكد ببيانات مرجعية. يمكن للبرنامج المطور ان يستعمل في تصميم مختلف المنشآت الهيدروليكية ذات التدفقات الغير دائمة و البحث عن حلول وطرق الحماية باستعمال مدخنة التوازن.

الكلمات المفتاحية: الجريان الإنتقالي المضغوط, مطرقة مائية, طريقة الميزة, المحاكاة الرقمية, مدخنة التوازن.

Abstract

We were interested in this work, in the numerical study of the unsteady pressurized pipe flows. To do so, a new version of the Water Hammer Simulator (initially developed in 2018 in the Hydraulic Department/ LMGCE Laboratory of the ENP), based on the method of characteristics, is designed and developed in open-source environment (Python 3.7) and validated with reference datasets ., Presenting a new architecture and new capabilities, ad labium, the tool developed can be used for the study and the dimensioning of different configurations of hydraulic installations under unsteady flow conditions, and for the analysis of protection solutions with surge tanks.

KEY WORDS: Transient pressurized pipe flow, Water hammer, method of characteristics, surge tanks, numerical simulation.

Résumé

Nous nous sommes intéressés dans ce travail, à l'étude numérique des écoulements non-permanents en charge. Pour ce faire, une nouvelle version du Simulateur de Coup de Bélier (initialement développé en 2018 au Département Hydraulique/Laboratoire LMGCE de l'ENP), basé sur la méthode des caractéristiques, est conçue et développée dans l'environnement open source (Python 3.7) et validée avec des données de références. Présentant une nouvelle architecture et de nouvelles capacités, l'outil développé peut être utilisé pour l'étude et le dimensionnement de différentes configurations d'installations hydrauliques, pour des écoulements non-permanents, et pour l'analyse des solutions de protection avec cheminée d'équilibre.

Mots clés: Ecoulement transitoire en charge, Coup de bélier, méthode des caractéristiques, cheminée d'équilibre, simulation numérique.

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figure

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 15 |
| I. Etude bibliographique | 18 |
| I.1 Introduction..... | 18 |
| I.2 Coup de bélier | 18 |
| I.2.1 Définition..... | 18 |
| I.2.2 Causes des coups de bélier..... | 18 |
| I.2.3 Conséquences des coups de bélier..... | 18 |
| I.3 Modélisation mathématique du phénomène du coup de bélier | 19 |
| I.3.1 Equations des écoulements transitoires..... | 19 |
| I.3.2 Équations de base de coup de bélier (équation de <i>Joukowsky</i>)..... | 20 |
| I.3.3 Transmission et réflexion des ondes..... | 22 |
| I.3.4 Vitesse de propagation de l'onde de pression..... | 23 |
| I.3.5 Conduite en béton armé..... | 25 |
| I.4 Méthode des caractéristiques | 25 |
| I.4.1 Introduction..... | 25 |
| I.4.2 Adaptation de la méthode des caractéristiques aux écoulements non permanents en charge..... | 26 |
| I.5 Conditions aux limites | 30 |
| I.5.1 Réservoir en amont | 30 |
| I.5.2 Vanne en aval | 30 |
| I.5.3 Jonction en série..... | 31 |
| I.5.4 Branchement | 31 |
| I.5.5 Extrémité bloquée | 32 |
| I.5.6 Cheminée d'équilibre | 32 |
| I.6 Protection contre les coups de bélier | 33 |
| I.7 Conclusion | 34 |
| II. Algorithmes et validations..... | 36 |
| II.1 Introduction..... | 36 |

| | | |
|---------|--|----|
| II.2 | Paramètres statistiques de performance pour la validation..... | 36 |
| II.3 | Modèle Conceptuel | 37 |
| II.4 | Algorithmes et validations | 39 |
| II.4.1 | Configuration 1 : réservoir- conduite– vanne | 39 |
| II.4.2 | Validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir-conduite -vanne) | 42 |
| II.4.3 | Configuration 2 : réservoir- conduite-cheminée d'équilibre – vanne | 47 |
| II.4.4 | Configuration 3 : réservoir - multi conduites en série –vanne. | 50 |
| II.4.5 | Validation pour la configuration 3 (réservoir - multi conduites en série - vanne)..... | 53 |
| II.4.6 | Configuration 4 : réservoir - multi conduites en série - cheminée d'équilibre - vanne | 59 |
| II.4.7 | Validation pour la configuration 4 (réservoir - multi conduites en série -cheminée d'équilibre - vanne) | 62 |
| II.4.8 | Configuration 5 : réservoir- multi conduites en parallèle - vannes | 64 |
| II.4.9 | Validation pour la configuration 5 (réservoir - multi conduites en parallèle – vannes) | 66 |
| II.4.10 | Configuration 6 : réservoir-multi conduites en parallèle -cheminée d'équilibre –vanne.... | 69 |
| II.4.11 | Validation pour la configuration 6 (réservoir - multi conduites en parallèle -cheminée d'équilibre – vanne)..... | 72 |
| III. | Simulations numériques..... | 75 |
| III.1 | Introduction..... | 75 |
| III.2 | Simulations numériques | 75 |
| III.2.1 | Influence de la variation du coefficient de frottement « f » de <i>Darcy-Weisbach</i> sur la charge hydraulique maximale et minimale | 75 |
| III.2.2 | Influence de la variation du coefficient de perte de charge singulières « k » sur la charge hydraulique maximale et minimale | 76 |
| III.2.3 | Influence de la variation de la charge hydraulique initiale du réservoir $H_{rés}$ sur la charge hydraulique maximale et minimale | 78 |
| III.2.4 | Influence de la variation de la position de la cheminée d'équilibre sur la charge hydraulique maximale et minimale | 79 |
| III.2.5 | Influence de la variation de la position de la cheminée d'équilibre sur la charge hydraulique maximale et minimale | 80 |
| III.3 | Conclusion | 82 |
| | Conclusion générale et perspectives | 83 |
| | Bibliographie | 84 |
| | Annexe | 87 |

Liste des abréviations

A : Section de la conduite [m^2]

a : Célérité de l'onde de pression [m/s]

A_s : Section transversale horizontale de la cheminée d'équilibre [m^2]

C_a : Coefficient dépendant des propriétés de la conduite et du fluide

C_{orf} : Coefficient de perte de charge à l'orifice [-]

D : Diamètre de la conduite [m]

E : Module d'élasticité de Young [GPa]

e : Epaisseur de la paroi de la conduite [m]

F : Onde de pression incidente approchant une frontière [-]

f : Coefficient de frottement de Darcy-Weisbach

f_i : Onde de pression reflétée par une frontière [-]

G : Module d'élasticité de la roche [GPa]

g : Accélération de la pesanteur [m/s^2]

H : Charge hydraulique [m]

$H_{P_{orf}}$: Perte de charge à l'orifice pour un débit $Q_{p_{orf}}$ [m]

H_{res} : Niveau d'eau dans le réservoir [m]

K : Module d'élasticité hydrostatique du fluide [N/m^2]

L : Longueur de la conduite [m]

p : Pression dans la conduite [N/m^2]

Q : Débit d'écoulement [m^3/s]

Q_{orf} : Débit s'écoulant à travers l'orifice au début d'un pas de temps [m^3/s]

$Q_{P_{orf}}$: Débit s'écoulant à travers l'orifice à la fin d'un pas de temps [m^3/s]

R : Paramètre décrivant la géométrie et le frottement dans une conduite égal à $f/(2*D*A)$.

R_0 : Rayon extérieur de la conduite [m]

R_i : Rayon intérieur de la conduite [m]

t : Variable temporelle représentant le temps [s]

v : Vitesse d'écoulement [m/s]

x : Variable spatiale représentant la position [m]

Z & Z_p : Hauteurs du plan d'eau dans le réservoir d'air au-dessus de la référence au début et à la fin d'un pas de temps [m]

ΔH : Charge de pression causée par le coup de bélier [m]

Δv : Changement de vitesse d'écoulement causé par le coup de bélier [m/s]

ρ : Masse volumique du fluide [kg/m^3]

ψ : Paramètre dépendant des propriétés géométriques et élastiques de la conduite et son système de fixation [-]

ν : Coefficient de poisson du matériau de la conduite [-]

τ : Taux d'ouverture de la vanne [-]

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I-1: Equations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement | 20 |
| Tableau I-2: Coefficients de réflexion et de transmission pour les systèmes hydrauliques typiques conduits en série et parallèle | 22 |
| Tableau I-3: Coefficients de réflexion et de transmission pour les systèmes hydrauliques typiques conduites en cas particuliers. | 23 |
| Tableau I-4: expressions de ψ pour diverses conditions | 24 |
| Tableau I-5: Equations pour un réservoir large en amont (Chaudhry, 2014)..... | 30 |
| Tableau I-6: Equations pour une vanne en aval (Chaudhry, 2014)..... | 30 |
| Tableau I-7: Equations pour une jonction en série (Chaudhry, 2014). | 31 |
| Tableau I-8: Equations pour un branchement (Chaudhry, 2014) | 31 |
| Tableau I-9: Equations dans le cas d'une extrémité bloquée (Chaudhry, 2014)..... | 32 |
| Tableau I-10: Equations à condition d'une cheminée d'équilibre (Chaudhry, 2014). | 33 |
| Tableau II-1: Paramètres statistiques utilisés dans la validation (Moriassi, Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel, & Veith, 2007) | 36 |
| Tableau II-2: Niveau de performance selon des paramètres statistiques (Moriassi, Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel, & Veith, 2007) | 37 |
| Tableau II-3: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir-conduite-vanne) | 39 |
| Tableau II-4: Comparaison entre les deux modèles | 42 |
| Tableau II-5: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir-conduite -vanne) | 43 |
| Tableau II-6: Validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir - conduite - vanne) - Paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée sans pertes de charges | 44 |
| Tableau II-7: Validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir - conduite - vanne) - Paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée avec pertes de charges | 45 |
| Tableau II-8: Validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir-conduite-vanne) - Paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture lente sans pertes de charges | 46 |
| Tableau II-9: Validation de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) avec des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture lente avec pertes de charges | 46 |
| Tableau II-10: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 2 (réservoir-conduite - cheminée d'équilibre-vanne)..... | 47 |
| Tableau II-11: Comparaison entre les deux modèles | 50 |
| Tableau II-12: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 3 (réservoir-multi conduites en série - vanne) | 51 |
| Tableau II-13: Comparaison entre les deux modèles | 53 |
| Tableau II-14: Validation de l'algorithme 3 (réservoir - multi conduites en série - vanne) - des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée sans pertes de charges..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Tableau II-15: Validation de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) - des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée avec pertes de charges. | 56 |
| Tableau II-16: Validation de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) - des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée et sans pertes de charges | 57 |
| Tableau II-17: Validation de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) - des paramètres statistiques dans le cas d'une fermeture instantanée et avec pertes de charge | 59 |
| Tableau II-18: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 4 (réservoir-multi conduites -cheminée d'équilibre-vanne) | 60 |
| Tableau II-19: Comparaison entre les deux modèles | 62 |
| Tableau II-20: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 4 (réservoir-multi conduites en série –cheminée d'équilibre -vanne) | 63 |
| Tableau II-21: Validation pour la configuration 4 (réservoir-multi conduites en parallèle-cheminée d'équilibre-vannes) - des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantané sans et avec pertes de charges..... | 63 |
| Tableau II-22: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 5 (réservoir-multi conduites en parallèle -vannes) | 64 |
| Tableau II-23: Comparaison entre les deux modèles | 66 |
| Tableau II-24: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 5 (réservoir-multi conduites en parallèles -vannes)..... | 66 |
| Tableau II-25: Validation de l'algorithme 5 (réservoir - multi conduites en parallèle - vannes) avec des paramètres statistiques pour le cas de fermeture instantanée sans pertes de charges. | 68 |
| Tableau II-26: Validation de l'algorithme 5 (réservoir-multi conduites en parallèles-vanne) avec des paramètres statistiques pour le cas de fermeture instantanée avec pertes de charges | 69 |
| Tableau II-27: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 6 (réservoir-multi conduites en parallèle -cheminée d'équilibre-vanne)..... | 70 |
| Tableau II-28: Comparaison entre les deux modèles | 72 |
| Tableau II-29: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 6 (réservoir-multi conduites en parallèle –cheminée d'équilibre -vanne)..... | 72 |
| Tableau II-30: Validation de l'algorithme 6 (réservoir - multi conduites en parallèle - cheminée d'équilibre - vannes) -Paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée sans et avec pertes de charges..... | 73 |
| Tableau III-1: Données utilisées pour l'étude de l'influence du coefficient « f ». | 75 |
| Tableau III-2: Données utilisées pour l'étude de l'influence du coefficient « k ». | 77 |
| Tableau III-3: Paramètres utilisés pour la simulation de la variation de la charge hydraulique initiale au réservoir « Hrés»..... | 78 |
| Tableau III-4: Paramètres utilisés pour la simulation de la variation de la position de la cheminée d'équilibre..... | 79 |
| Tableau III-5 : Paramètres utilisés pour la simulation de la variation de la position de la cheminée d'équilibre..... | 81 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure I-1: Propagation d'une onde de pression « écoulement non permanent »..... | 21 |
| Figure I-2: Cas d'une conduite en série..... | 22 |
| Figure I-3: Cas d'une conduite en parallèle | 22 |
| Figure I-4: Cas d'un large réservoir | 23 |
| Figure I-5: Cas d'une extrémité bloquée..... | 23 |
| Figure I-6: Section transversale d'une conduite en béton armé | 25 |
| Figure I-7: Lignes caractéristiques dans le plan $x-t$ (Chaudhry, 2014). | 27 |
| Figure I-8: Maille/grille de calcul avec indice pour la méthode des caractéristiques | 29 |
| Figure I-9: Réservoir en amont à niveau constant..... | 30 |
| Figure I-10: Vanne en aval..... | 30 |
| Figure I-11: Jonction en série..... | 31 |
| Figure I-12: Branchement | 31 |
| Figure I-13: Extrémité bloquée | 32 |
| Figure I-14: Cheminée d'équilibre | 33 |
| Figure II-1: Architecture globale du simulateur..... | 38 |
| Figure II-2: Les étapes de simulation..... | 38 |
| Figure II-3: Configuration 1: réservoir- conduite –vanne..... | 39 |
| Figure II-4: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 1 (réservoir - conduite - vanne)..... | 41 |
| Figure II-5: Schéma d'installation étudiée (Amara, 2013)..... | 42 |
| Figure II-6: Confrontation au niveau de la vanne entre les résultats de simulation avec l'algorithme 1 et celles obtenues par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013)) | 43 |
| Figure II-7: Confrontation au niveau de la vanne entre les résultats de simulation avec l'algorithme 1 et celles obtenues par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013)) | 44 |
| Figure II-8: Confrontation au niveau de la vanne entre nos résultats de simulation et ceux obtenus par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013)) | 45 |
| Figure II-9: Confrontation au niveau de la vanne entre les résultats de simulation avec l'algorithme 1 et celles obtenues par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013)) | 46 |
| Figure II-10: Configuration 2: réservoir- conduite-cheminée d'équilibre-vanne. | 47 |
| Figure II-11: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 2 (réservoir - conduite -cheminée d'équilibre - vanne) | 49 |
| Figure II-12: Configuration 3 : réservoir-multi conduites en série - vanne | 51 |
| Figure II-13: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 3 (réservoir-multi conduites en série - vanne)..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Figure II-14: Comparaison des résultats obtenus avec l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) et ceux obtenus avec l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) aux nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ dans le cas où les pertes de charges sont négligées. | 54 |
| Figure II-15: Comparaison des résultats obtenus avec l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) et ceux obtenus avec l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) aux nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ dans le cas où les pertes de charges sont prises en compte. | 56 |
| Figure II-16 : Comparaisons entre les résultats de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) et ceux de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) aux nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ où les pertes de charges sont négligées | 57 |
| Figure II-17: Comparaison entre les résultats de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) et ceux de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) aux nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ où les pertes de charges sont considérées | 58 |
| Figure II-18: Configuration 4 : réservoir-multi conduites en série - cheminée d'équilibre -vanne. | 59 |
| Figure II-19: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 4 (réservoir-multi conduites - cheminée d'équilibre - vanne)..... | 61 |
| Figure II-20: Schéma descriptif de l'aménagement hydro-électrique simulé (Amara, 2013)..... | 62 |
| Figure II-21: Comparaison entre les résultats de simulation avec l'algorithme 4 et celles obtenues par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013)) sans et avec perte de charge..... | 63 |
| Figure II-22: Configuration 5 : réservoir - multi conduites en parallèle - vannes..... | 64 |
| Figure II-23: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration (réservoir - multi conduites en parallèle - vannes)..... | 65 |
| Figure II-24: Comparaison entre les résultats de simulation de l'algorithme 5 (réservoir-multi conduites en parallèle - vannes) et ceux de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) dans les nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ où les pertes de charges sont négligées | 67 |
| Figure II-25: Comparaison entre les résultats de simulation de l'algorithme 5 (réservoir-multi conduites en parallèle - vannes) et ceux de l'algorithme 1 (réservoir - conduite - vanne) sans perte de charge aux nœuds $x=0, 6000$ et 12000 | 69 |
| Figure II-26: Configuration 6 : réservoir - multi branchement - cheminée d'équilibre - vanne ... | 70 |
| Figure II-27: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 6 (réservoir - multi conduites en parallèle -cheminée d'équilibre - vanne) | 71 |
| Figure II-28: Comparaisons entre les résultats de simulation de l'algorithme 4 (réservoir-multi conduites en série - vanne) et celle de l'algorithme 6 (réservoir - multi conduites en parallèle - cheminée d'équilibre - vannes) sans et avec perte de charge. | 73 |
| Figure III-1: Enveloppe de la charge hydraulique maximale dans la conduite pour différentes valeurs du coefficient de frottement « f ». | 76 |
| Figure III-2: Enveloppe de la charge hydraulique minimale dans la conduite pour différentes valeurs du coefficient de frottement « f ». | 76 |
| Figure III-3: Enveloppe de la charge hydraulique maximale dans la conduite pour différentes valeurs du coefficient de perte de charge singulière « k ». | 77 |

| | |
|---|----|
| Figure III-4: Enveloppe de la charge hydraulique minimale dans la conduite pour différentes valeurs du coefficient de perte de charge singulière «k». | 77 |
| Figure III-5: Enveloppe de la charge hydraulique maximale dans la conduite pour différentes valeurs de « Hrés ». | 78 |
| Figure III-6: Enveloppe de la Charge hydraulique minimale dans la conduite pour différentes valeurs de « Hrés ». | 79 |
| Figure III-7: Enveloppe de la charge hydraulique maximale dans la conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre | 80 |
| Figure III-8: Enveloppe de la charge hydraulique minimale dans la conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre | 80 |
| Figure III-9: Enveloppes des charges hydrauliques maximales et minimales dans la 1er conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre | 81 |
| Figure III-10: Enveloppes des charges hydrauliques maximale et minimale dans la 2e conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre | 81 |
| Figure III-11: Enveloppes des charges hydrauliques maximale et minimale dans la 3e conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre | 82 |

Introduction générale

Les changements du régime d'écoulement d'un fluide contenu à l'intérieur d'une conduite entraînent souvent de brusques variations de pression. Ces écarts seront plus importants si le fluide est un liquide et si la modification du débit est brutale. Par rapport au régime permanent, les pressions peuvent atteindre des valeurs excessives.

De telles variations de pression sont appelées coups de bélier. Ce sont des phénomènes oscillatoires dont les causes sont multiples. L'étude des phénomènes de coup de bélier dans les conduites est très importante pour l'usage domestique et l'industrie, en particulier pour l'industrie liée au pipeline.

Le calcul numérique est devenu un outil indispensable pour l'analyse des problèmes du coup de bélier qui sont loin d'être résolus d'une manière efficace par les anciennes méthodes. Pour cela, des techniques d'approximations ont été développées pour la résolution des équations de bases. Parmi ces techniques, la méthode des caractéristiques a de loin marqué le calcul moderne des régimes transitoires par sa puissance et sa facilité de mise en œuvre.

L'objectif du présent travail est d'améliorer les outils informatiques développés à l'ENP les années précédentes et qui sont des simulateurs du coup de bélier dans différents cas fréquemment rencontrés dans les systèmes hydrauliques (vanne, jonction, branchement, cheminée d'équilibre, etc.) (Alili & Bessaci, 1993) (Issad & Mazouni, 2018). La première version du simulateur réalisée sous Matlab dans le cadre du projet de fin d'études de l'année 2017/2018 a porté sur les cas de configurations suivants : (1) Réservoir - conduite - vanne ; (2) Réservoir - deux conduites en série - vanne ; (3) Réservoir - deux conduites en parallèle - vanne, et (4) la cheminée d'équilibre étant ajoutée seulement dans le premier cas (réservoir - conduite - vanne). Pour ce qui est du présent projet, une nouvelle version du simulateur est développée sous environnement Python. Cette nouvelle version, a repris toutes les configurations précédentes avec l'élaboration de codes de calcul plus performants, et généralisée à un nombre de conduites quelconque (en série ou en parallèle) et la possibilité d'intégrer une cheminée d'équilibre dans n'importe quelle conduite et pour tout cas de configuration. En plus, de nouvelles fonctionnalités sont introduites au simulateur incluant : (1) la construction des courbes enveloppes de pressions (maximale et minimales) dans le système, (2) identification des points les plus vulnérables, (3) un calculateur

de la célérité d'onde de pression et la capacité d'analyser des conduites non-horizontales. Enfin, une interface graphique conviviale est réalisée pour faciliter la tâche à l'utilisateur désirant faire ces simulations.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre donne les notions essentielles sur le phénomène du coup de bélier, les équations le régissant et les moyens de protection d'une installation hydraulique. Dans le deuxième chapitre, le modèle conceptuel et les algorithmes de l'outil informatique développé sont présentés et les validations de leurs résultats sont données. Le troisième chapitre donne quelques applications du code pour différents cas traités par le simulateur. Le travail s'achève sur une conclusion qui résume les résultats obtenus et les perspectives futures à ce travail. Un bref manuel d'utilisation de l'interface graphique est fourni en annexe.

Chapitre 1 :
Etude bibliographique

I. Etude bibliographique

I.1 Introduction

Dans le présent chapitre, des définitions et des rappels théoriques succincts sur les coups de bélier et propagations d'ondes élastiques dans des installations en charge sont donnés. Par suite, la technique de résolution des équations différentielles régissant ce phénomène est présenté et enfin des notions sur quelques moyens de protection sont revues.

I.2 Coup de bélier

I.2.1 Définition

Les changements du régime d'écoulement d'un fluide contenu à l'intérieur d'une conduite entraînent souvent de brusques variations de pression. Ces écarts seront plus importants si le fluide est un liquide et si la modification du débit est brutale. Par rapport au régime permanent, les pressions peuvent atteindre des valeurs excessives. Ces variations de pression sont appelées coups de bélier.

I.2.2 Causes des coups de bélier

Les causes du coup de bélier sont diverses mais elles sont fréquentes lors du démarrage ou de l'arrêt d'une installation hydraulique, par exemple, une brusque fermeture de vanne ou un arrêt rapide de pompe. Néanmoins, la coupure électrique soudaine et non programmée dans une station de pompage est la cause la plus fréquente du coup de bélier. D'autres causes peuvent provoquer un coup de bélier à savoir :

- Vidange ou remplissage inadéquat de la conduite chargée ;
- Changement de la vitesse de rotation d'une pompe ;
- Implosion des poches d'air suite à une cavitation .

I.2.3 Conséquences des coups de bélier

Le fonctionnement en régime non stationnaire d'une installation hydraulique doit toujours attirer l'attention de l'ingénieur concepteur. Ces phénomènes peuvent avoir des conséquences fâcheuses telles que la fatigue et la rupture de canalisations et la détérioration des appareils traversés par le fluide. Il est donc capital de prévoir et d'étudier ces phénomènes transitoires afin de réduire leurs effets par l'utilisation de dispositifs spéciaux et le dimensionnement correct des différents composants d'une installation.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Les manœuvres brusques peuvent être à l'origine d'une surpression ou une dépression (Chaudhry, 2014).

a) Cas de surpression

Une fermeture rapide d'une vanne de sectionnement engendre un coup de bélier qui se traduit par une pression importante dans les canalisations. Si la pression totale (pression en régime permanent majorée de la valeur de la surpression due au coup de bélier) dépasse la pression maximale admissible des tuyaux, il y a risque de rupture de ces derniers et déboîtement des joints d'étanchéité.

b) Cas de dépression

Un arrêt brusque d'une pompe ou d'une ouverture instantanée d'une vanne de sectionnement est suivi d'un coup de bélier qui se traduit par l'apparition d'une pression relative négative. Si cette charge de pression devient inférieure à la pression de vapeur, une poche de cavitation prend naissance.

c) Inversement d'écoulement

Si une pompe est démunie d'un clapet anti retour, l'inversion du sens d'écoulement conduit à un fonctionnement en dévirage de cette pompe.

d) Mouvement et vibrations des conduites

Les vibrations des conduites peuvent provoquer de fortes sollicitations des supports d'ancrage et butées. Cela peut conduire à la rupture de ces derniers et des conduites elles mêmes.

I.3 Modélisation mathématique du phénomène du coup de bélier

I.3.1 Equations des écoulements transitoires

(Allievi, 1913) est le fondateur de la théorie générale du phénomène physique du coup de bélier. En effet, il est le premier à pouvoir modéliser avec rigueur ce phénomène. Il justifie ainsi la possibilité de négliger les termes convectifs dans l'équation dynamique du mouvement. Plus tard, différents chercheurs ont proposé des améliorations aux équations de base des écoulements transitoires, à l'image de (Jaeger, 1977), (Parmakian, 1963) et (Streeter & Wylie, 1993). Les efforts combinés de ces chercheurs ont été couronnés par l'obtention des équations de continuité et quantité de mouvement pour les écoulements en charge.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tableau I-1: Equations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement (Chaudhry, 2014).

| | Equation de continuité | Equation de conservation de la quantité de mouvement |
|-------------------|---|---|
| Hypothèses | <ul style="list-style-type: none"> • Fluide légèrement compressible; • Ecoulement unidimensionnel; • Distribution de pression uniforme; • Ecoulement dans une conduite à parois linéairement élastiques; • La vitesse radiale, due aux contractions/expansions, est faible et sera négligée dans l'analyse. Cependant les effets de contractions sont pris en considération. | |
| Expression | L'équation de continuité est dérivée de la loi de conservation de la masse. Elle s'exprime par : $\frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{(I-1)}$ | L'équation de conservation de la quantité de mouvement dans sa forme simplifiée s'écrit : $\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV V }{2D} = 0 \quad \text{(I-2)}$ |
| paramètres | p : Pression dans la conduite [N/m ²]; V : Vitesse d'écoulement [m/s]; ρ : Masse volumique du fluide [kg/m ³]; a : Célérité de l'onde de pression [m/s]; x : Variable spatiale représentant la position [m]; t : Variable représentant le temps [s]. | V : Vitesse longitudinale d'écoulement [m/s]; f : Coefficient de frottement de <i>Darcy-Weisbach</i> ; x : Variable spatiale représentant la position [m]; t : Variable temporelle représentant le temps [s] ρ : Masse volumique du fluide [kg/m ³]; D : Diamètre de la conduite [m]. |

I.3.2 Équations de base de coup de bélier (équation de *Joukowski*)

Le système représenté en **Figure I-1** est composé d'un réservoir, une conduite horizontale et une vanne. Considérant un écoulement sans frottement dans une conduite à parois rigides ou le fluide de l'écoulement est légèrement compressible et s'écoule avec une vitesse V_0 , sous une pression initiale à l'état stationnaire H_0 au niveau du réservoir. A la fermeture instantanée de la vanne (par exemple), la vitesse d'écoulement V_0 passe instantanément à $V_0 + \Delta V$. En raison de cette modification de la vitesse d'écoulement, la pression de refoulement H_0 change à $H_0 + \Delta H$, la densité du fluide ρ_0 passe à $\rho_0 + \Delta \rho$, et une onde de pression de magnitude ΔH se déplace dans la direction de la vanne (Joukowski, 1898).

Chapitre 1 : Etude bibliographique

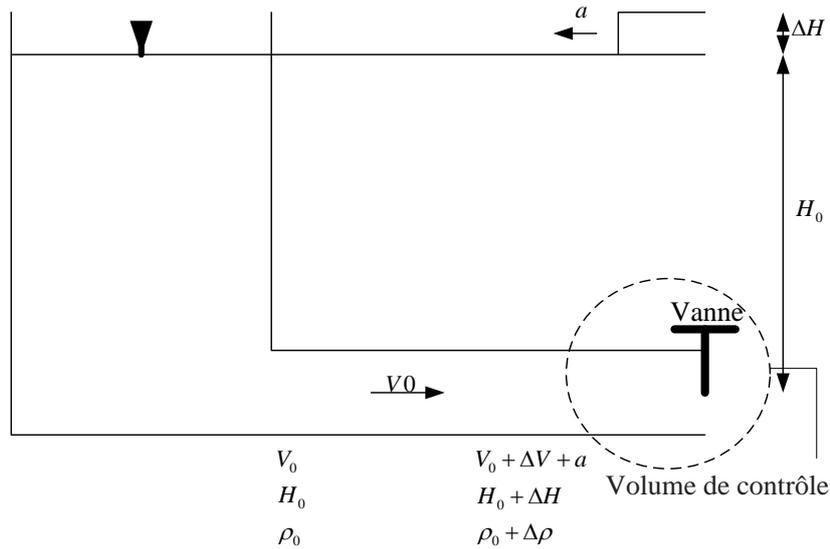


Figure I-1: Propagation d'une onde de pression « écoulement non permanent »
(Chaudhry, 2014).

L'équation de *Joukowsky* (Tijsseling & Anderson, 2006), donnée par (I-3), peut être utilisée pour calculer la variation de pression, due à la variation de la vitesse d'écoulement, dans la conduite.

$$\Delta H = -\frac{a}{g} \Delta V \quad (\text{I-3})$$

Avec :

ΔH : Charge de pression causée par le coup de bélier [m] ;

a : Célérité de l'onde de pression [m/s] ;

g : Accélération de la pesanteur [m/s^2] ;

ΔV : Variation de vitesse d'écoulement causée par le coup de bélier [m/s].

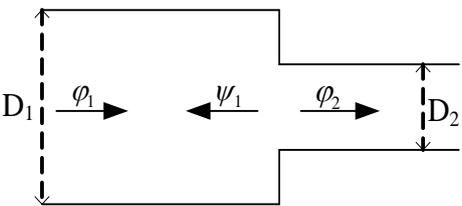
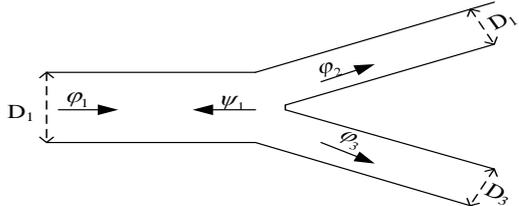
Une augmentation de la vitesse d'écoulement ΔV et une augmentation de la pression ΔH sont considérées comme positives et une diminution comme négatives. Le signe négatif dans Eq (I-3) signifie qu'une augmentation de la vitesse $\Delta V > 0$ s'accompagne d'une diminution de la pression $\Delta H < 0$ et vice versa. On parle d'une onde inverse. Dans le cas d'une onde directe l'augmentation de la vitesse $\Delta V > 0$ s'accompagne d'une augmentation de la pression $\Delta H > 0$ et vice versa. Et dans ce cas, ΔH est donné par :

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta V \quad (\text{I-4})$$

I.3.3 Transmission et réflexion des ondes

Comme pour tout phénomène oscillatoire, on observe la transmission et la réflexion des ondes élastiques. Des changements de conditions de propagation se traduisent aussi bien en termes de pression et que de débit. Les phénomènes de transmission et réflexion peuvent être quantifiés à l'aide des coefficients résumés dans les **Tableau I-2, Tableau I-3**

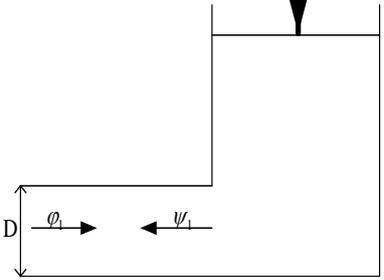
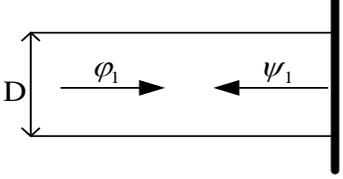
Tableau I-2: Coefficients de réflexion et de transmission pour les systèmes hydrauliques typiques conduits en série et parallèle (Boukhemacha, 2018).

| | Jonction | Branchement |
|--|--|--|
| Figure |  <p>Figure I-2: Cas d'une conduite en série</p> |  <p>Figure I-3: Cas d'une conduite en parallèle</p> |
| Coefficient de réflexion de l'onde de débit l_Q | $l_Q = \frac{\Delta Q_{\psi_1}}{\Delta Q_{\phi_1}} = \frac{\frac{\rho_{\omega_1} a_1}{A_1} - \frac{\rho_{\omega_2} a_2}{A_2}}{\frac{\rho_{\omega_1} a_1}{A_1} + \frac{\rho_{\omega_2} a_2}{A_2}} \quad (\text{I-5})$ | $l_Q = \frac{\Delta Q_{\psi_1}}{\Delta Q_{\phi_1}} = \frac{\frac{A_1}{\rho_{\omega_1} a_1} - \frac{A_2}{\rho_{\omega_2} a_2} - \frac{A_3}{\rho_{\omega_3} a_3}}{\frac{A_1}{\rho_{\omega_1} a_1} + \frac{A_2}{\rho_{\omega_2} a_2} + \frac{A_3}{\rho_{\omega_3} a_3}} \quad (\text{I-6})$ |
| Coefficient de réflexion de l'onde de pression l_P | $l_P = -l_Q \quad (\text{I-7})$ | $l_P = -l_Q \quad (\text{I-8})$ |
| Coefficient de transmission de l'onde de débit r_Q | $r_Q = \frac{\Delta Q_{\phi_2}}{\Delta Q_{\phi_1}} = \frac{\frac{2\rho_{\omega_2} a_2}{A_2}}{\frac{\rho_{\omega_1} a_1}{A_1} + \frac{\rho_{\omega_2} a_2}{A_2}} \quad (\text{I-9})$ | $r_{Q_i} = \frac{\Delta Q_{\phi_i}}{\Delta Q_{\phi_1}} = \frac{\frac{2A_i}{\rho_{\omega_1} a_1}}{\frac{A_1}{\rho_{\omega_1} a_1} + \frac{A_2}{\rho_{\omega_2} a_2} + \frac{A_3}{\rho_{\omega_3} a_3}} \quad (\text{I-10})$ |

Chapitre 1 : Etude bibliographique

| | | |
|---|---|---|
| Coefficient de transmission de l'onde de pression r_P | $r_P = r_Q$ (I-11) | $r_{P_2} = r_{P_3} = \frac{\Delta P_{\phi_2}}{\Delta P_{\phi_1}} = \frac{\frac{2.A_2}{\rho_{\omega_2} a_2}}{\frac{A_1}{\rho_{\omega_1} a_1} + \frac{A_2}{\rho_{\omega_2} a_2} + \frac{A_3}{\rho_{\omega_3} a_3}}$ (I-12) |
| Avec : Ψ_1 : Onde incidente , ϕ_1 : Onde réfléchie, ϕ_2 : Onde transmise | | |

Tableau I-3: Coefficients de réflexion et de transmission pour les systèmes hydrauliques typiques conduites en cas particuliers (Boukhemacha, 2018).

| | Réservoir Large | Extrémité bloquée |
|--|---|--|
| Figure |  <p>Figure I-4: Cas d'un large réservoir</p> |  <p>Figure I-5: Cas d'une extrémité bloquée</p> |
| Coefficient de réflexion de l'onde de débit l_Q | $l_Q = 1$ (I-13) | $l_Q = -1$ (I-14) |
| Coefficient de réflexion de l'onde de pression l_P | $l_P = -1$ (I-15) | $l_P = 1$ (I-16) |

I.3.4 Vitesse de propagation de l'onde de pression

La célérité de l'onde de pression dépend des propriétés élastiques de la conduite : le diamètre, l'épaisseur et le matériau de la paroi, de la nature du fluide qu'il la traverse ainsi que des contraintes externes incluant le type de supports et la liberté de mouvement de conduite dans la direction longitudinale.

(Halliwell, 1963) a présenté l'expression générale suivante pour la vitesse de l'onde :

Chapitre 1 : Etude bibliographique

$$a = \sqrt{\frac{k}{\rho[1 + (k/E)\psi]}} \quad (\text{I-17})$$

ψ : Paramètre adimensionnel qui dépend des propriétés élastiques de la conduite et de son système de fixation;

E : Module d'élasticité de Young du matériau de la conduite;

k : Module d'élasticité hydrostatique du fluide dépendant de sa température, de sa pression et de la quantité de gaz entraînés;

ρ : Densité du fluide.

Cette expression est valable pour :

- Fluide compressible ;
- Paroi mince et élastique ;
- Conduite avec joint de dilatation sur sa longueur.

Tableau I-4: expressions de ψ pour diverses conditions (Chaudhry, 2014).

| Type de fixation de la conduite | | Paroi épaisse $\frac{D}{e} < 25$ | Paroi mince $\frac{D}{e} \geq 25$ |
|---------------------------------|---|---|--|
| Conduite élastique | encastrée contre le mouvement longitudinal à l'extrémité supérieure | $\psi = 2 \left(\frac{R_o^2 + 1.5R_i^2 + \nu(R_o^2 - 3R_i^2)}{R_o^2 - R_i^2} \right)$ (I-18) | $\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2)$ (I-19) |
| | encastrée contre les mouvements longitudinaux sur toute sa longueur | $\psi = 2(1 + \nu) \left(\frac{R_o^2 + R_i^2 - 2\nu R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right)$ (I-20) | $\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2)$ (I-21) |
| | avec joints de dilatation | $\psi = 2(1 + \nu) \left(\frac{R_o^2 + R_i^2 - 2\nu R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right)$ (I-22) | $\psi = \frac{D}{e}$ (I-23) |
| Tunnel en roche | Tunnel sans revêtement | $\psi = 1$ (I-24) $E = G$ Avec, G = module de rigidité de la roche | $\psi = 1$ (I-25) |
| | Tunnel avec revêtement en Acier | $\psi = \frac{DE}{GD + Ee}$ e = épaisseur du revêtement; E = module d'élasticité de l'acier. | $\psi = \frac{DE}{GD + Ee}$ (I-26) |
| Conduite rigide | | $\psi = 0$ | $\psi = 0$ (I-27) |

Chapitre 1 : Etude bibliographique

D : diamètre de la conduite ; e : Epaisseur de la conduite ; ν : Coefficient de *Poisson* ;
 R_i : Rayon intérieur de la conduite ; R_o : Rayon extérieur de la conduite

I.3.5 Conduite en béton armé

Dans ce cas, la conduite en béton armé est remplacée par une conduite en acier équivalente ayant une épaisseur équivalente (Parmakian, 1963).

$$e_e = E_r \cdot e_c + \frac{A_s}{l_s} \quad (\text{I-28})$$

e_e : Epaisseur de la conduite en béton armé.

e_c : Epaisseur de la conduite équivalente en acier.

$$E_r = \frac{E_{\text{Béton}}}{E_{\text{acier}}} \quad (\text{I-29})$$

A_s : Section d'armatures

l_s : Espacement entre armatures

$$A_s = \pi \cdot N \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \quad (\text{I-30})$$

N : nombre de barres ;

ϕ : diamètre d'une armature [m]

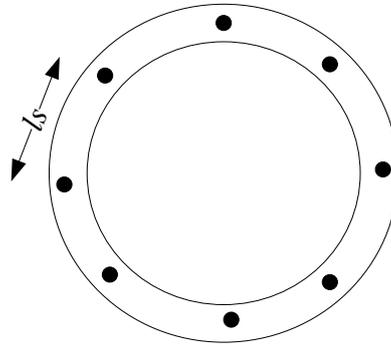


Figure I-6: Section transversale d'une conduite en béton armé (Chaudhry, 2014).

I.4 Méthode des caractéristiques

I.4.1 Introduction

Les équations décrivant les écoulements transitoires dans les conduites en charge (équations (I-1) et (I-2) ou (I-31) et (I-32)) sont des équations aux dérivées partielles. Des méthodes numériques sont développées pour leur solution comme : les éléments finis, les différences finies et la méthode des caractéristiques. Pour ce projet, nous utiliserons la méthode des caractéristiques. Depuis sa mise en œuvre dans les années 1960, la méthode des caractéristiques a fait preuve de son efficacité, comparée à d'autres méthodes. Ce qui lui a permis d'être la méthode la plus populaire dans le calcul des coups de bélier (Amara, 2013).

L'origine de la méthode remonte à *Monge* en 1789 qui développa une procédure graphique pour l'intégration des équations aux dérivées partielles. Il appelle cette procédure la méthode des caractéristiques. Cette méthode a été par la suite utilisée par (Massau, 1899) et reprise ultérieurement par (Craya, 1946) pour l'étude des écoulements variés à surface libre et propagation des crues. Dans les problèmes de coup de bélier, le mérite revient conjointement à (Bergeron, 1950), mais c'est ce dernier qui a su en donner des applications graphiques concrètes en hydraulique et aux autres branches de la mécanique et de l'électricité.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Le principe de la méthode est de transformer les équations aux dérivées partielles en équations aux dérivées totales et puis résoudre ces dernières équations par la méthode des caractéristiques en ajoutant les conditions initiales et les conditions limites.

I.4.2 Adaptation de la méthode des caractéristiques aux écoulements non permanents en charge

Considérons la forme simplifiée des équations aux dérivées partielles régissant les écoulements non permanents en charge :

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQ|Q| = 0 \quad (\text{I-31})$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (\text{I-32})$$

$$\text{Avec : } R = \frac{f}{2DA} \quad (\text{I-33})$$

Les équations (I-31) et (I-32) contiennent deux inconnues (Q et H). Ces équations peuvent être combinées linéairement avec un coefficient λ comme suit :

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (\text{I-34})$$

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + RQ|Q| = 0 \quad (\text{I-35})$$

Cette expression est arrangée de telle façon que les termes entre parenthèse soit une dérivée totale :

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (\text{I-36})$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (\text{I-37})$$

En définissant le multiplicateur inconnu λ comme :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \quad (\text{I-38})$$

$$\text{On obtient : } \lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (\text{I-39})$$

En prenant en considération les valeurs de λ , l'équation (I-35) devient:

Chapitre 1 : Etude bibliographique

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (\text{I-40})$$

Si

$$\frac{dx}{dt} = a \quad (\text{I-41})$$

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (\text{I-42})$$

Si

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad (\text{I-43})$$

Pour comprendre la signification de ces équations, il est commode de considérer la solution dans un plan $(x-t)$ (**Figure I-7**).

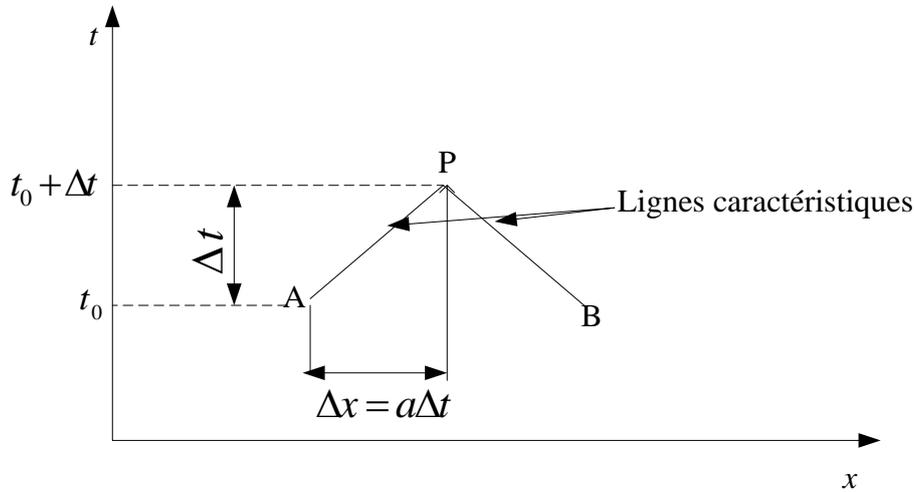


Figure I-7: Lignes caractéristiques dans le plan $x-t$ (Chaudhry, 2014).

Supposons que l'on connaisse Q_A , Q_B , H_A et H_B à l'instant $t = t_0$ et que l'on cherche à trouver Q_P et H_P à l'instant $t = t_0 + \Delta t$. En multipliant par dt et en intégrant les équations (I-40) et (I-42) qui sont valables sur les lignes (AP) et (BP) respectivement, nous obtenons:

$$\int_A^P dQ + \frac{gA}{a} \int_A^P dH + R \int_A^P Q|Q| dt = 0 \quad (\text{I-44})$$

$$\int_B^P dQ - \frac{gA}{a} \int_B^P dH + R \int_B^P Q|Q| dt = 0 \quad (\text{I-45})$$

Nous utilisons les indices A et P pour indiquer les emplacements dans le plan $x-t$. Par exemple, Q_P est le débit au point P . Eq (I-40) n'est valide que le long de la caractéristique

Chapitre 1 : Etude bibliographique

ligne AP , nous avons utilisé les limites d'intégration de A à P . Nous pouvons facilement évaluer les deux premiers termes intégraux des équations (I-44), (I-45) et (I-45). Parce que nous ne connaissons pas explicitement la variation de Q par rapport à t , nous ne pouvons pas évaluer le troisième terme qui représente les pertes de friction. En utilisant une approximation du premier ordre, on peut évaluer l'intégrale du troisième terme comme :

$$R \int_A^P Q|Q|dt \approx RQ_A|Q_A|(t_P - t_A) = RQ_A|Q_A|\Delta t \quad (\text{I-46})$$

$$R \int_B^P Q|Q|dt \approx RQ_B|Q_B|(t_P - t_B) = RQ_B|Q_B|\Delta t \quad (\text{I-47})$$

Par conséquent, les expressions (I-44) et (I-45) deviennent:

$$Q_P - Q_A + \frac{gA}{a}(H_P - H_A) + R\Delta t Q_A|Q_A| = 0 \quad (\text{I-48})$$

$$Q_P - Q_B + \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + R\Delta t Q_B|Q_B| = 0 \quad (\text{I-49})$$

Après simplification, (I-48) et (I-49) s'écrivent :

$$Q_p = C_p - C_a H_p \quad (\text{I-50})$$

$$Q_p = C_n + C_a H_p \quad (\text{I-51})$$

Avec :

$$C_p = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - R\Delta t Q_A|Q_A| \quad (\text{I-52})$$

$$C_n = Q_B - \frac{gA}{a} H_B - R\Delta t Q_B|Q_B| \quad (\text{I-53})$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (\text{I-54})$$

Les valeurs de C_p et C_n sont connues et sont constantes pour chaque pas de temps, bien qu'elles puissent varier d'un intervalle de temps à l'autre. C_a est une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide. Nous faisons référence à l'équation. (I-50) comme l'équation de compatibilité suivant la ligne caractéristique positive et Eq (I-51) comme l'équation de compatibilité suivant la ligne caractéristique négative. Dans les Eqs (I-50) et (I-51) , nous avons deux inconnues, à savoir, H_p et Q_p . Les valeurs de ces inconnues peuvent être déterminées en résolvant simultanément ces deux équations, i.e (Chaudhry, 2014):

$$Q_P = 0.5(C_P + C_n) \quad (\text{I-55})$$

Chapitre 1 : Etude bibliographique

En injectant (I-55) dans (I-50) ou (I-51), on obtient :

$$H_p = \frac{C_p - C_n}{2C_a} \quad (\text{I-56})$$

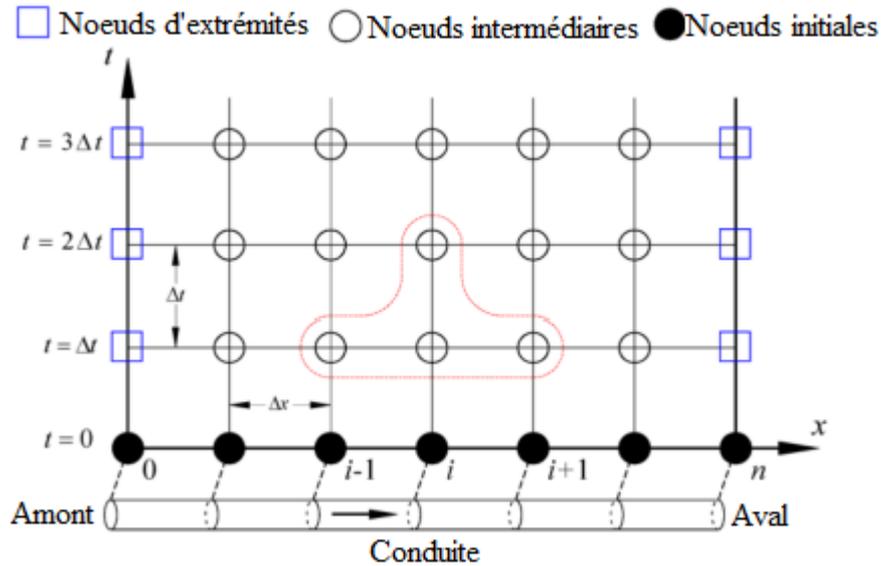


Figure I-8: Maille/grille de calcul avec indice pour la méthode des caractéristiques

(Zhang et al., 2018).

Nœuds intermédiaires

L'utilisation de la méthode des caractéristiques pour calculer Q_p et H_p dans un nœud intermédiaire se fait en utilisant les 2 équations de compatibilité suivant les 2 lignes caractéristiques (Eqs (I-50) et (I-51) simultanément).

Nœud de frontière

Par convention, on considère que la position amont d'un système est celle correspondant à l'écoulement permanent initial. Pour le nœud d'extrémité amont, seule la ligne caractéristique négative est disponible et donc l'Eq (I-51) est seulement valable. Elle doit être complétée par une autre équation issue des conditions aux limites pour pouvoir calculer H_p et Q_p en ce nœud. Pour le nœud extrémité aval, seule la ligne caractéristique positive est disponible et donc l'Eq (I-50) est seulement valable. Elle doit être complétée par une autre équation issue des conditions aux limites pour pouvoir calculer H_p et Q_p en ce nœud.

I.5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites correspondant aux systèmes hydrauliques typiques considérés dans ce projet sont présentées dans les sous-sections suivantes.

I.5.1 Réservoir en amont

Le tableau ci-dessous résume les équations dans un réservoir large en amont.

Tableau I-5: Equations pour un réservoir large en amont (Chaudhry, 2014).

| | |
|--|---|
| <p>Equations</p> $H_{p_{i,1}} = H_{res} - (1+k) \frac{Q_{i,1}^2}{2gA_i^2} \quad (\text{I-57})$ <p>Nous résolvons cette équation simultanément avec l'équation (I-51) caractéristique négative. Nous obtenons l'expression :</p> $Q_{p_{i,1}} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4K_1(C_{ni} + C_{ai}H_{res})}}{2K_1} \quad (\text{I-58})$ <p>Dans laquelle :</p> $K_1 = \frac{C_a(1+K)}{2gA_i^2} \quad (\text{I-59})$ | <p>Figure I-9: Réservoir en amont à niveau constant.</p> |
| <p>Avec : H_{res} [m]: Hauteur de la surface de l'eau du réservoir au-dessus de la référence; K: Coefficient de perte d'entrée; Q_p [m³/S] : Débit d'écoulement; H_p [m]: Charge hydraulique; A [m²] : Section de la conduite, g [m/S²] : Accélération de la pesanteur.</p> | |

I.5.2 Vanne en aval

Le tableau ci-dessous résume les équations dans une vanne en aval.

Tableau I-6: Equations pour une vanne en aval (Chaudhry, 2014).

| | |
|--|---|
| <p>Equations :</p> $C_v = \frac{(\tau Q_{o_{i,n+1}})^2}{(C_a H_{o_{i,n+1}})} \quad (\text{I-60})$ $Q_{p_{i,n+1}} = 0.5 \left(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_{p_i} C_v} \right) \quad (\text{I-61})$ | <p>Figure I-10: Vanne en aval.</p> |
|--|---|

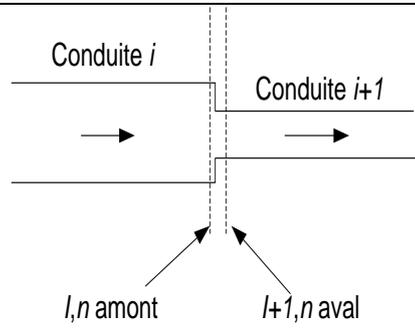
Chapitre 1 : Etude bibliographique

Avec : $Q_{0i,n+1} [m^3/s]$: Débit en régime permanent , $H_{0i,n+1} [m]$: Pression au niveau de la vanne, $\tau [-]$: Degré d'ouverture de la vanne, C_v : Coefficient de débit, en fonction du degré d'ouverture de la vanne.

I.5.3 Jonction en série

Le tableau ci-dessous résume les équations dans une jonction de conduites en série.

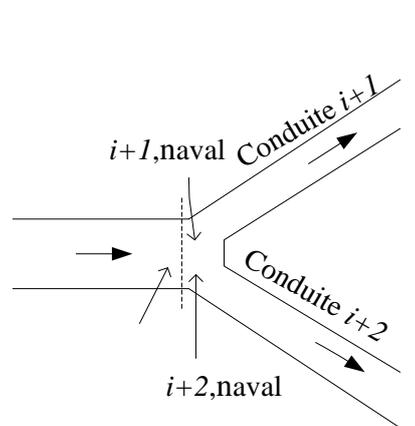
Tableau I-7: Equations pour une jonction en série (Chaudhry, 2014).

| | |
|---|---|
| <p>Equations :</p> $H_{p_{i,n.amont}} = H_{p_{i+1,n.aval}} \quad \text{(I-62)}$ $Q_{p_{i,n.amont}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_{i,n.amont}} \quad \text{(I-63)}$ $Q_{p_{i+1,n.aval}} = C_{n_{i+1}} + C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1,n.aval}} \quad \text{(I-64)}$ $Q_{p_{i,n.amont}} = Q_{p_{i+1,n.aval}} \quad \text{(I-65)}$ $H_{p_{i,n.amont}} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}}} \quad \text{(I-66)}$ |  <p>Figure I-11: Jonction en série</p> |
| <p>Avec : $H_{p_{i,n.amont}}$ et $H_{p_{i+1,n.aval}}$ [m] : Charge hydraulique dans les conduites en amont et en aval</p> <p>$Q_{p_{i,n.amont}}$ et $Q_{p_{i+1,n.aval}}$ [m³/s] : Débit d'écoulement dans les conduites en amont et en aval</p> | |

I.5.4 Branchement

Le tableau ci-dessous résume les équations dans un branchement

Tableau I-8: Equations pour un branchement (Chaudhry, 2014) .

| | |
|---|---|
| <p>Equations</p> <p>Équation de continuité:</p> $Q_{p_{i,n.amont}} = Q_{p_{i+1,n.aval}} + Q_{p_{i+2,n.aval}} \quad \text{(I-67)}$ <p>Equations caractéristiques:</p> $Q_{p_{i,n.amont}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_{i,n.amont}} \quad \text{(I-68)}$ $Q_{p_{i+1,n.amont}} = C_{p_{i+1}} - C_{a_{+1i}} H_{p_{i+1,n.amont}} \quad \text{(I-69)}$ $Q_{p_{i+2,n.amont}} = C_{p_{i+2}} - C_{a_{i+2}} H_{p_{i+2,n.amont}} \quad \text{(I-70)}$ |  <p>Figure I-12: Branchement</p> |
|---|---|

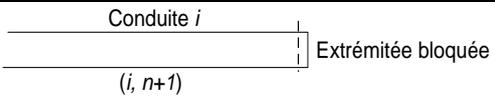
Chapitre 1 : Etude bibliographique

| | |
|--|--|
| <p>Equation énergétique:</p> $H_{P_{i,n.amont}} = H_{P_{i+1,n.aval}} + H_{P_{i+2,n.aval}} \quad \text{(I-71)}$ <p>A partir des cinq dernières équations (de (I-67) à (I-71)) on a :</p> $H_{P_{i,n.amont}} = \frac{C_{P_i} - C_{n_{i+1}} - C_{n_{i+2}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}} + C_{a_{i+2}}} \quad \text{(I-72)}$ | |
| <p>Avec : $H_{P_{i,n.amont}}$, $H_{P_{i+1,n.aval}}$ et $H_{P_{i+2,n.aval}}$: Charge hydraulique dans les conduites amont et aval;</p> <p>$Q_{P_{i,n.amont}}$, $Q_{P_{i+1,n.aval}}$ et $Q_{P_{i+2,n.aval}}$: Débit d'écoulement dans les conduites amont et aval.</p> | |

I.5.5 Extrémité bloquée

Le tableau ci-dessous résume les équations dans une jonction de conduites en série.

Tableau I-9: Equations dans le cas d'une extrémité bloquée (Chaudhry, 2014).

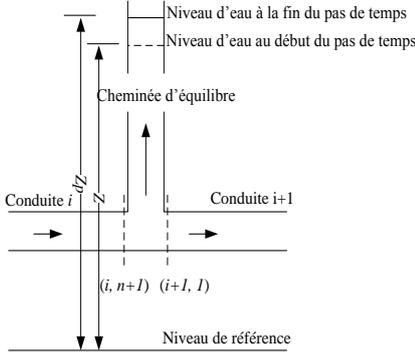
| | |
|---|---|
| <p>Equations :</p> $Q_{P_{i,n+1}} = 0 \quad \text{(I-73)}$ <p>Il résulte donc de l'équation caractéristique positive Eq (I-50) que :</p> $H_{P_{i,n+1}} = \frac{C_{P_i}}{C_{a_i}} \quad \text{(I-74)}$ |  <p>Figure I-13: Extrémité bloquée</p> |
| <p>Avec : $H_p[m]$: La charge hydraulique, $Q_p[m^3/S]$: Débit d'écoulement, i et $i+1$: Représentent le numéro de la conduite.</p> | |

I.5.6 Cheminée d'équilibre

Le tableau ci-dessous résume les équations dans une jonction de conduites en série.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tableau I-10: Equations à condition d'une cheminée d'équilibre (Chaudhry, 2014).

| | |
|--|---|
| <p>Equations Les équations caractéristiques (positive et négative) de la section (i,n+1) (i+1,1) sont respectivement :</p> $Q_{p_{i,n+1}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_{i,n+1}} \quad (\text{I-75})$ $Q_{p_{i+1,1}} = C_{n_i} - C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1,1}} \quad (\text{I-76})$ <p>-L'équation de continuité :</p> $Q_{p_{i,n+1}} = Q_{p_{i+1,1}} + Qps \quad (\text{I-77})$ <p>Niveau d'eau de la cheminée d'équilibre</p> $Zp = Z + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{A_s} (Qps + Qs) \quad (\text{I-78})$ <p>- On résoudre les équations précédentes, on obtient :</p> $H_{p_{i,n+1}} = \frac{C_p - C_n + Qs + 2\left(\frac{A_s Z}{\Delta t}\right)}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}} + 2\left(\frac{A_s Z}{\Delta t}\right)} \quad (\text{I-79})$ |  <p>Figure I-14: Cheminée d'équilibre</p> |
| <p>Avec : Qps [m³/s]: Débit dans le réservoir à la fin du pas de temps , Qp [m³/s]: Débit de décharge à la fin du pas de temps, H_p [m]: La charge hydraulique à la fin du pas de temps, Z et Z_p [m]: Les hauteurs d'eau dans le réservoir au-dessus du niveau de référence au début et à la fin du pas de temps,</p> <p>A_s [m²]: Section transversale horizontale du réservoir , i et $i+1$: Représentent le numéro de la conduite, les indices l et $n+1$: Représentent le numéro de la section.</p> | |

1.6 Protection contre les coups de bélier

L'importance des ondes de pression, qui se produiraient lors de manœuvres volontaires ou accidentelles, nous oblige souvent à atténuer ces ondes au moyen de dispositifs appropriés de protection contre les coups de bélier.

- **Soupape de décharge**

C'est un organe qui s'ouvre et laisse passer un certain débit lorsque la pression intérieure dépasse une valeur déterminée. Elle peut protéger efficacement contre les ondes de surpression.

- **Volant d'inertie**

On peut protéger une conduite en cas de disjonction subite de la pompe en munissant cette dernière d'un gros volant d'inertie qui lui permet de la ralentir plus progressivement.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

- **Vanne à fermeture lente**

La fermeture lente de la vanne diminue sensiblement les dépressions en fonction du temps de fermeture mais elle ne protège généralement pas parfaitement la conduite.

- **Réservoir anti-bélier**

Un réservoir anti-bélier c'est un matelas d'air sous pression qui assure une relative constance de la pression pour amortir le coup de bélier. Très efficace, il est le système le plus répandu maintenant pour les adductions d'eau de petite et moyenne importance.

- **Cheminée d'équilibre**

On évite la propagation d'ondes de pression importante si l'on peut maintenir la conduite à une pression peu variable, en relation par exemple avec la pression atmosphérique. C'est ce que réalise pratiquement une cheminée d'équilibre.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions et définitions générales qui seront adoptées pour le reste du travail, relatives aux écoulements et à la propagation des ondes élastiques dans les conduites. Un accent particulier a été mis sur la présentation du phénomène des coups de bélier, sa définition, ses causes et ses conséquences, dans le but de mettre en évidence l'importance pratique et la nécessité d'une prévision et d'un calcul numérique corrects du phénomène.

Chapitre 2 :
Algorithmes et Validations

II. Algorithmes et validations

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle conceptuel et les algorithmes développés pour la simulation des phonèmes de coup de bélier dans plusieurs configurations de systèmes hydrauliques typiques. Pour ce faire, nous commençons d'abord par définir la structure de chaque configuration, synthétiser les variables d'entrées du système et expliquer le déroulement des calculs de l'algorithme. Une présentation des nouveautés de cette nouvelle version (2019) du simulateur, en contraste avec la première version (2018), est donnée par suite. Enfin, l'algorithme de chaque système hydraulique traité par le simulateur est validé avec des données de références.

II.2 Paramètres statistiques de performance pour la validation

La validation des algorithmes du simulateur s'est basée sur la comparaison des résultats du simulateur avec des jeux de données considérées comme références en utilisant les paramètres statistiques suivants :

- Critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe efficiency -NSE);
- Pourcentage de biais (Percent Bias-PBIAS);
- Observations standard déviation ratio (rapport d'écart type d'observations- RSR-RMSE-).

Les expressions données dans **Tableau II-1** permettent de calculer ces paramètres.

Tableau II-1: Paramètres statistiques utilisés dans la validation (Moriassi et al., 2007)

| Paramètre | Expression | Variable |
|-----------|--|---|
| NSE | $NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obs}^{moyen})^2} \quad (\text{II-1})$ | Y_{obs} : Résultats observés utilisés pour la validation. |
| PBIAS | $PBIAS = 100 \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})}{\sum (Y_{obs})} \quad (\text{II-2})$ | Y_{sim} : Nos résultats simulés. |
| RSR | $RSR = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obs}^{moyen})^2}} \quad (\text{II-3})$ | Y_{obs}^{moyen} : Moyenne des résultats observés. |

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

Les paramètres statistiques précédents permettent de juger des niveaux de performance comme indiqué dans le **Tableau II-2**.

Tableau II-2: Niveau de performance selon des paramètres statistiques (Moriassi et al., 2007)

| Niveau de performance | <i>NSE</i> | <i>RSR</i> | <i>PBIAS</i> [%] |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Très bien | $0.75 \leq NSE \leq 1.00$ | $0.00 \leq RSR \leq 0.50$ | $ PBIAS \leq 10$ |
| Bien | $0.65 \leq NSE \leq 0.75$ | $0.50 \leq RSR \leq 0.60$ | $10 \leq PBIAS \leq 15$ |
| Satisfaisant | $0.50 \leq NSE \leq 0.65$ | $0.60 \leq RSR \leq 0.70$ | $15 \leq PBIAS \leq 25$ |
| Insatisfaisant | $NSE \leq 0.50$ | $RSR \geq 0.70$ | $ PBIAS \geq 25$ |

II.3 Modèle Conceptuel

L'outil a été conçu d'une manière structurée pour offrir une simplicité d'utilisation. L'architecture globale du simulateur est présentée dans la **Figure II-1**. Les étapes de résolution du modèle (prétraitement, traitement, post-traitement) sont schématisées dans **Figure II-2**. Pour réaliser des simulations, l'utilisateur peut choisir entre six (6) systèmes hydrauliques typiques disponibles :

- Réservoir-conduite-vanne, sans et avec cheminée d'équilibre;
- Réservoir-multi conduites en série (jonction)-vanne, sans et avec cheminée d'équilibre;
- Réservoir-multi conduites en parallèle- vannes, sans et avec cheminée d'équilibre.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

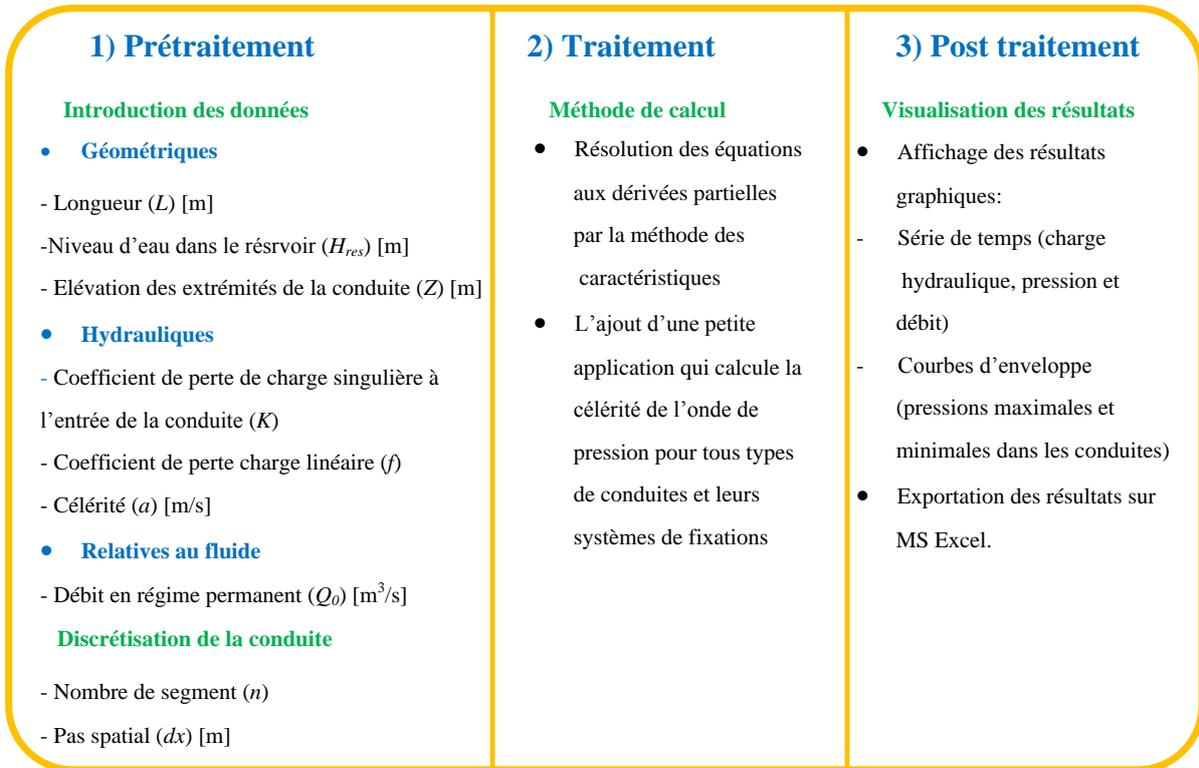


Figure II-1: Architecture globale du simulateur

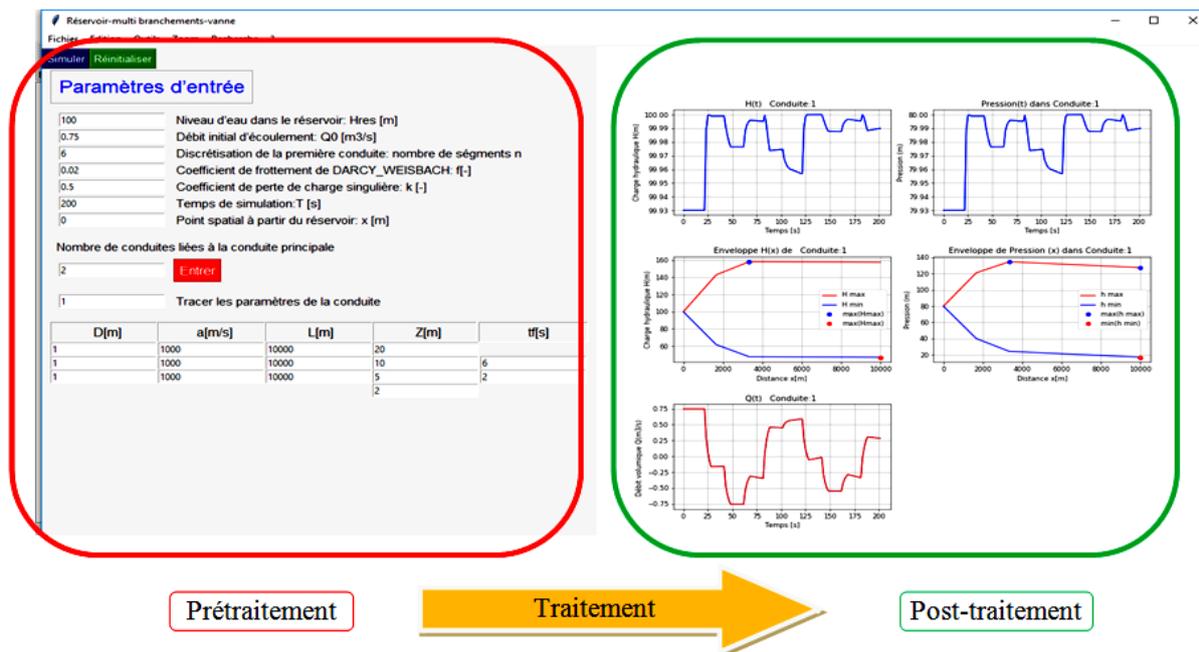


Figure II-2: Les étapes de simulation.

II.4 Algorithmes et validations

II.4.1 Configuration 1 : réservoir- conduite– vanne

La **Figure II-3** décrit une configuration à base d'un réservoir (en amont), une conduite et une vanne de fermeture (en aval). Tous les paramètres et dimensions nécessaires à la simulation sont reportés sur cette figure.

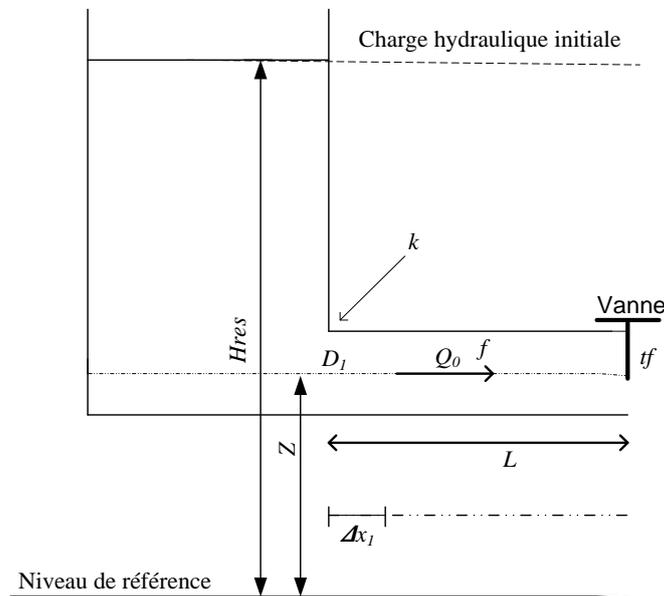


Figure II-3: Configuration 1: réservoir- conduite –vanne

L'algorithme de simulation du coup de bélier pour cette configuration utilise les paramètres résumés dans le **Tableau II-3**.

Tableau II-3: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir-conduite-vanne)

| Variable | Unité | Description |
|-----------|---------------------|---|
| D | [m] | Diamètre de la conduite |
| L | [m] | Longueur de la conduite |
| K | [-] | Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite |
| f | [-] | Coefficient de frottement de <i>Darcy-Weisbach</i> |
| Q_0 | [m ³ /s] | Débit initial d'écoulement |
| n | [-] | Nombre de segments |
| H_{res} | [m] | Niveau d'eau dans le réservoir |
| tf | [s] | Temps de fermeture de la vanne |
| T | [s] | Temps de simulation |
| a | [m/s] | Célérité d'onde de pression. |
| Z_i | [m] | Elévation des nœuds par rapport au niveau de référence |
| dx | [m] | Pas spatiale |
| dt | [s] | Pas du temps |
| A | [m ²] | Section de conduite |
| R | [-] | Voir l'équation (I-33) |

II.4.1.1 Exécution séquentielle des calculs

Les calculs sont menés comme suit :

- Introduction des données de base de l'installation et spécification des conditions d'écoulement en régime permanent;
- Calcul des conditions initiales (à partir du régime permanent);
- Calcul de la première itération du régime transitoire en commençant du temps $t_0 + \Delta t$. On détermine ainsi les variables de ce régime le long de la conduite pour un pas de $\Delta x = L/n$ en utilisant les conditions aux limites du système (réservoir et vanne) imposées en ces points, puis le long de la conduite avec le même pas incrémental;
- Calcul itératif du régime transitoire avec un pas de temps $\Delta t = L/n/a$ jusqu'à la fin du temps de simulation.

L'ensemble des algorithmes développés (et présentés dans la suite), fonctionnent selon le même principe. La différence entre eux réside dans les conditions aux limites utilisées.

L'organigramme de la **Figure II-4** résume les étapes de mise en œuvre de l'algorithme de simulation dans le cas cette configuration.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

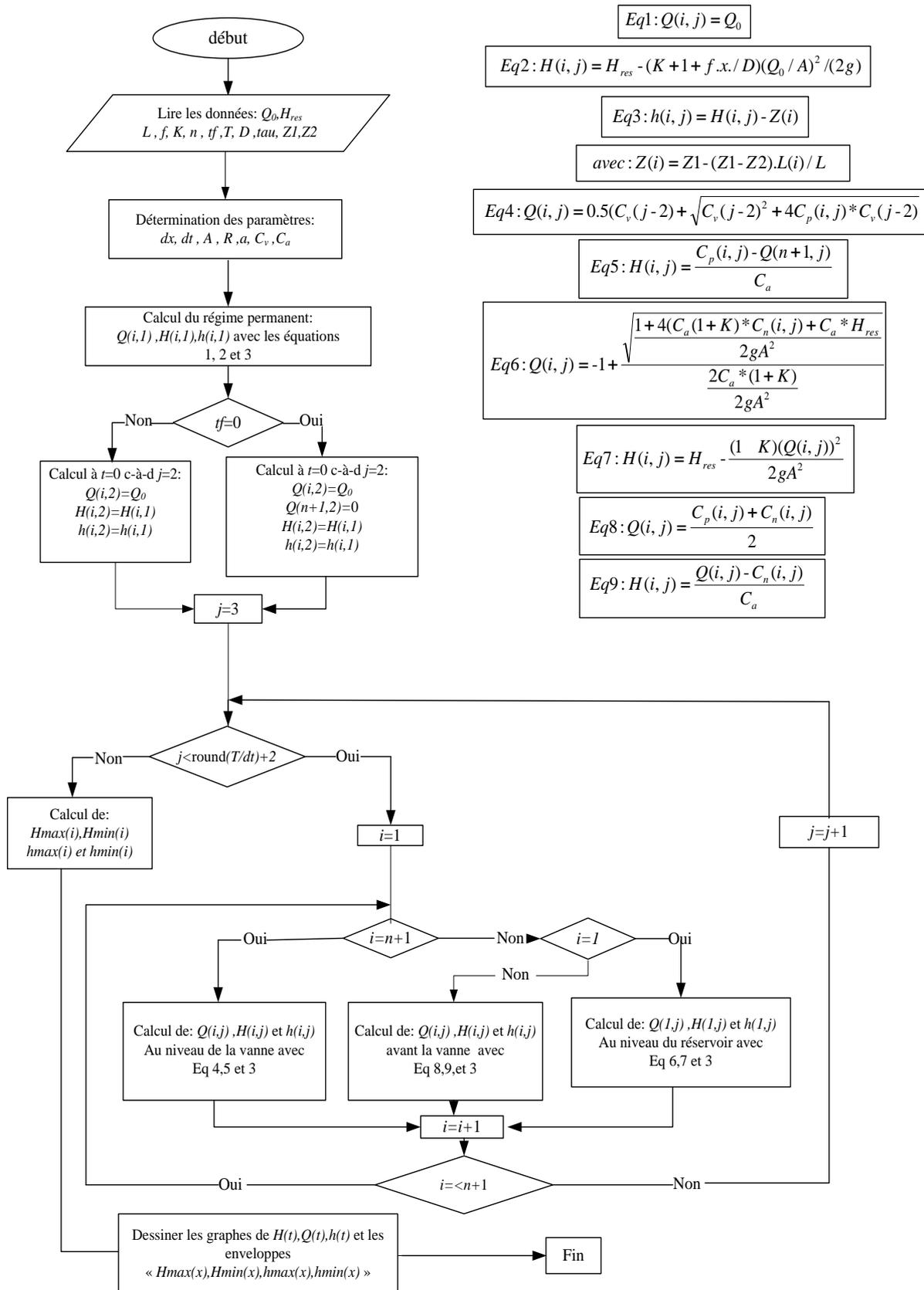


Figure II-4: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 1 (réservoir - conduite - vanne)

II.4.1.2 Nouveautés de cette nouvelle version (2019)

Pour l'algorithme de la configuration 1, une comparaison entre les capacités de cette nouvelle version (2019) en contraste avec les capacités de la première version (2018) est synthétisée dans le **Tableau II-4**.

Tableau II-4: Comparaison entre les deux modèles

| Options | Algorithme Version 2018 | Algorithme Version 2019 |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Courbe enveloppe de la variation des pressions maximales et minimales dans la conduite | Non disponible | Disponible |
| Conduite non horizontale | Non disponible | Disponible |
| Calculateur de la célérité de l'onde de pression | Non disponible | Disponible |

II.4.2 Validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir-conduite - vanne)

Afin de valider les résultats obtenus de cet algorithme basé sur la méthode des caractéristiques (MOC), des comparaisons sont effectuées avec des jeux de données (considérés comme référence) issus de la littérature scientifique. A ce titre, des confrontations sont réalisées avec la méthode analytique, la méthode de *Mac Cormack* (différences finies) et deux méthodes de *RichtmyerLax-Wendroff* et de *Godunov* (volumes finis).

Pour cette validation, différents cas de figure sont considérés en utilisant l'installation schématisée sur la **Figure II-5**:

- Fermeture instantanée de la vanne (sans et avec pertes de charges) ;
- Fermeture progressive de la vanne selon une loi linéaire en un temps supérieur à $2L/a$ (sans et avec pertes de charges);

La comparaison des séries de temps est faite pour les valeurs calculées au niveau de la vanne.

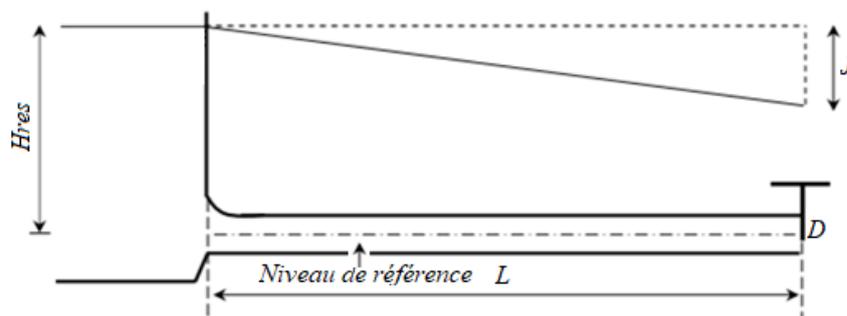


Figure II-5: Schéma d'installation étudiée (Amara, 2013).

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

Cette installation est composée d'un réservoir (de niveau H_{res}), d'une conduite homogène horizontale (de longueur L et de diamètre D) qui est reliée au réservoir et d'une vanne se trouvant à l'autre extrémité de la conduite. Le réservoir est supposé de section très grande par rapport à celle de la conduite de façon à pouvoir supposer que son niveau d'eau n'est pas affecté par le régime transitoire.

Tableau II-5: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir-conduite -vanne)

| Paramètre | $H_{RES}[m]$ | $D[m]$ | $L[m]$ | $a[m/s]$ | $Q_0[m^3/s]$ | $T[s]$ | $n[-]$ |
|-----------|--------------|--------|--------|----------|--------------|--------|--------|
| Valeur | 400 | 1 | 10000 | 1000 | 2 | 120 | 30 |

Dans ce qui suit, nous allons procéder à l'étude et à la comparaison entre les différents cas de figure considérés pour cette validation.

II.4.2.1 Cas 1: Simulation d'une fermeture instantanée

Ce cas se présente lorsque le temps de fermeture de la vanne, placée au bout de la conduite, est inférieur à $2L/a$, on peut admettre que le temps de fermeture t_f est voisin de 0, ce qui est évidemment un cas théorique.

a) Cas 1.1 : Sans pertes de charges

Dans ce cas, le frottement est négligé et l'on pose:

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0$.

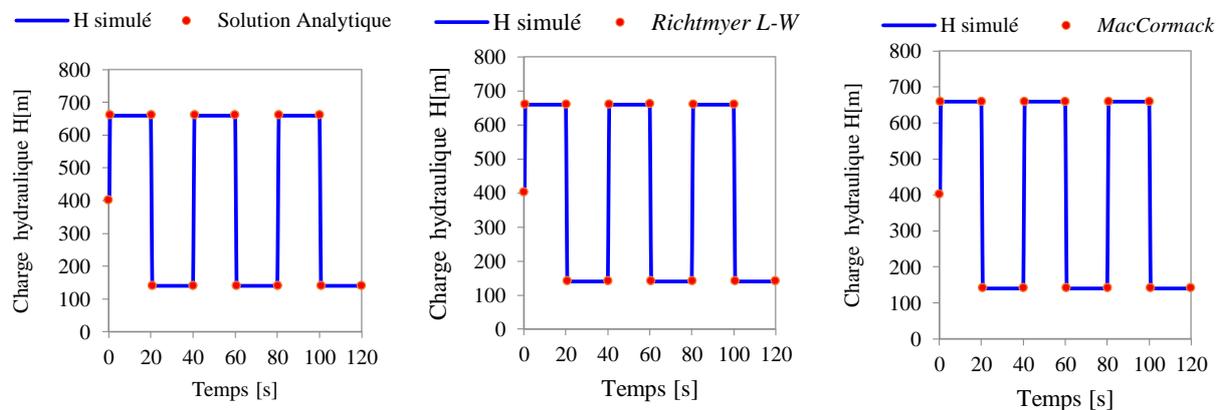


Figure II-6: Confrontation au niveau de la vanne entre les résultats de simulation avec l'algorithme 1 et celles obtenues par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013))

Les résultats de simulateur basé sur la méthode des caractéristiques coïncident pratiquement "parfaitement" avec les résultats des différentes méthodes utilisées pour la validation.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

En négligeant les pertes de charges, il devient possible de voir le caractère oscillatoire avec une amplitude constante du phénomène de coup de bélier d'une période de 40 s qui est rigoureusement la période théorique $4L/a$. De nos résultats, on observe que les charges hydrauliques maximale et minimale sont respectivement : $h_{\max}=659.71$ m, $h_{\min}=140.29$ m.

Le niveau du plan d'eau (charge statique au niveau du réservoir) vaut 400 m.

La surpression et dépression valent donc $\Delta H_{\max} = -\Delta H_{\min} = 259.71$ m. Cette valeur peut être confirmée par le calcul analytique avec la méthode de *Joukovski* :

$$\Delta H_{\max} = aV_0 / g = 259.57 \approx 259.71 \text{ m. Avec } V_0 = Q_0 / (\pi(D/2)^2) = 2.546 \text{ m/s}$$

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-6**.

Tableau II-6: Validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir - conduite - vanne) - Paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée sans pertes de charges

| Méthode | NSE | RSR | PBAIS[%] | Niveau Performance |
|-------------------------------|-------|-------|----------|--------------------|
| Analytique | 0.999 | 0.004 | 0.082 | Très Bien |
| <i>Mac Cormack</i> | 0.999 | 0.004 | 0.104 | Très Bien |
| <i>Richtmyer Lax-Wendroff</i> | 0.999 | 1.334 | 7.829 | Très Bien |

b) Cas 1.2: Avec pertes de charges

Dans le cas où le frottement est pris en compte, on suppose les valeurs suivantes :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K= 0.5$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f= 0.01$.

Les séries de temps obtenues par les différentes méthodes sont données dans **Figure II-7**. Comme pour le cas précédent, on retrouve ici également le caractère oscillatoire, mais cette fois avec une amplitude qui diminue à cause du frottement.

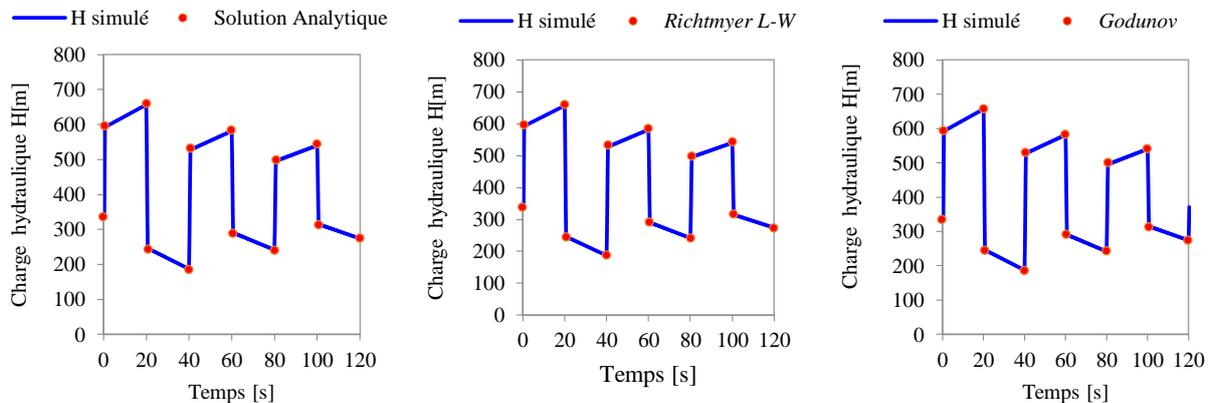


Figure II-7: Confrontation au niveau de la vanne entre les résultats de simulation avec l'algorithme 1 et celles obtenues par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013))

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-7**.

Tableau II-7: Validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir - conduite - vanne) - Paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée avec pertes de charges

| Méthode | NSE | RSR | PBAIS [%] | Niveau Performance |
|------------------------------|-------|-------|-----------|--------------------|
| Analytique | 0.999 | 0.013 | 0.013 | Très Bien |
| <i>RichtmyerLax-Wendroff</i> | 0.999 | 0.013 | 0.159 | Très Bien |
| <i>Godunov</i> | 0.999 | 0.006 | 0.099 | Très Bien |

II.4.2.2 Cas 2: Simulation d'une fermeture lente

Ce cas se présente lorsque le temps de fermeture de la vanne placée en bout de conduite est supérieur à $2L/a$. On ne suppose ici que le temps de fermeture $t_f=30$ s.

a) Cas 2.1 : Sans perte de charge

Dans ce cas le frottement est négligé avec :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0$.

Les séries de temps obtenues par les différentes méthodes sont données dans **Figure II-8**.

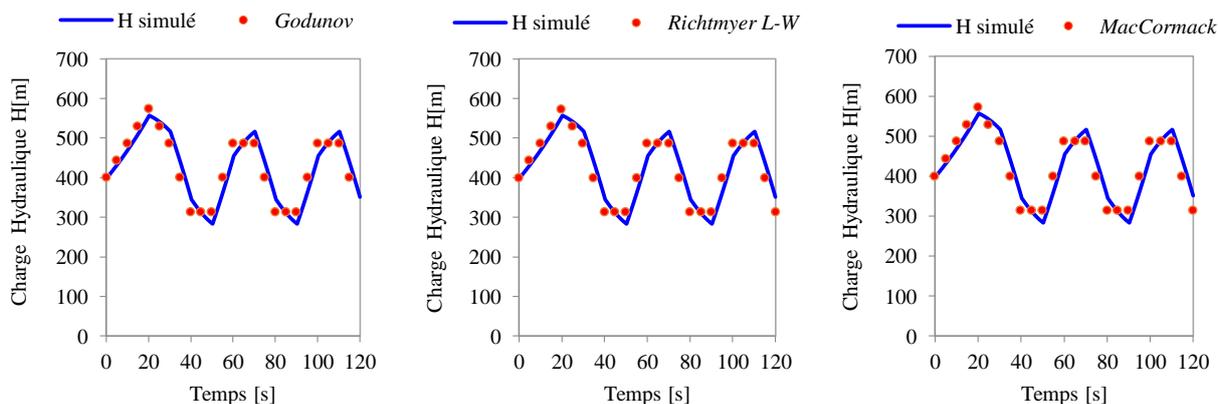


Figure II-8: Confrontation au niveau de la vanne entre nos résultats de simulation et ceux obtenus par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013))

Les séries temps donnant la variation de la charge hydraulique au niveau de la vanne résultant du simulateur présentent les mêmes tendances que celles issues des jeux de données de référence avec un niveau de performance qualifié de très bien, comme l'indiquent les valeurs des paramètres statistiques de cette comparaison (**Tableau II-8**).

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

Tableau II-8: Validation de l'algorithme de la configuration 1 (réservoir-conduite-vanne) - Paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture lente sans pertes de charges

| Méthode | NSE | RSR | PBAIS[%] | Niveau Performance |
|------------------------------|-------|-------|----------|--------------------|
| <i>Mac Cormack</i> | 0.890 | 0.331 | 0.572 | Très Bien |
| <i>RichtmyerLax-Wendroff</i> | 0.886 | 0.336 | 0.507 | Très Bien |
| <i>Godunov</i> | 0.887 | 0.336 | 0.626 | Très Bien |

a) Cas 2.1: Avec pertes de charges

Dans ce cas le frottement est pris en compte et l'on pose :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K= 0.5$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f= 0.01$.

Les séries de temps obtenues par les différentes méthodes sont données dans **Figure II-9**.

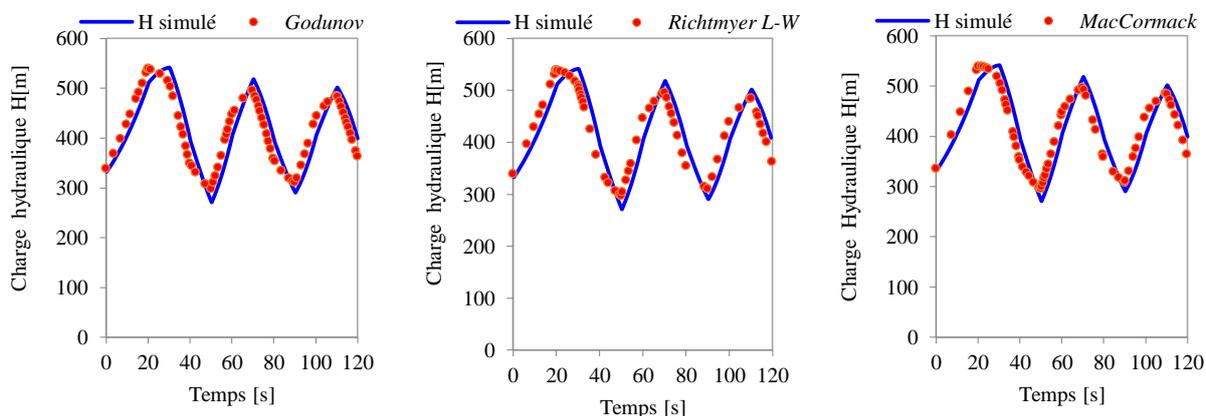


Figure II-9: Confrontation au niveau de la vanne entre les résultats de simulation avec l'algorithme 1 et celles obtenues par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013))

Similairement au cas précédant, les séries temps donnant la variation de la charge hydraulique au niveau de la vanne résultant du simulateur présentent les mêmes tendances que celles issues des jeux de données de référence avec un niveau de performance qualifié de très bien, comme l'indiquent les valeurs des paramètres statistiques de cette comparaison (**Tableau II-9**). De plus, il est possible d'observer que les pertes de charges atténuent l'amplitude du coup de bélier avec le temps.

Tableau II-9: Validation de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) avec des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture lente avec pertes de charges

| Méthode | NSE | RSR | PBAIS [%] | Niveau Performance |
|-------------------------------|-------|-------|-----------|--------------------|
| <i>Mac Cormack</i> | 0.824 | 0.418 | 0.063 | Très Bien |
| <i>Richtmyer Lax Wendroff</i> | 0.831 | 0.410 | 0.728 | Très Bien |
| <i>Godunov</i> | 0.761 | 0.488 | 0.852 | Très Bien |

II.4.3 Configuration 2 : réservoir- conduite-cheminée d'équilibre – vanne

La **Figure II-10** décrit une configuration à base d'un réservoir (en amont), une conduite, une cheminée d'équilibre et une vanne de fermeture (en aval). Tous les paramètres et dimensions nécessaires à la simulation sont reportés sur cette figure.

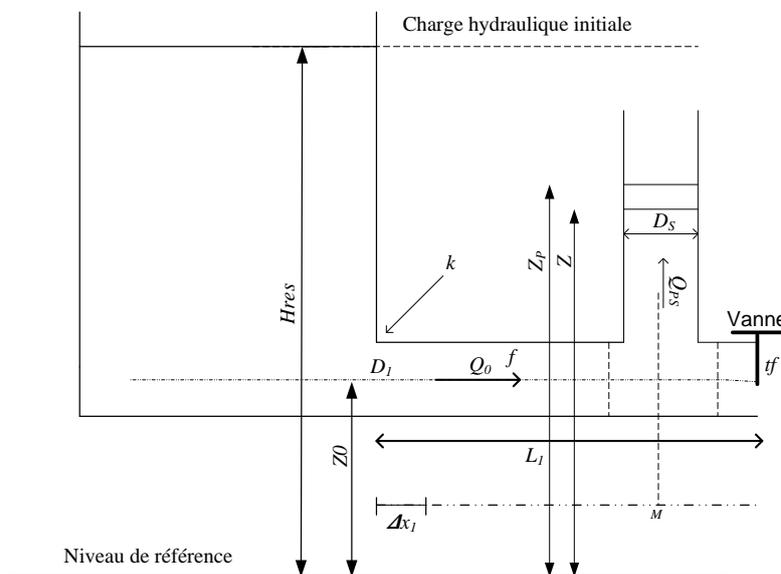


Figure II-10: Configuration 2: réservoir- conduite-cheminée d'équilibre-vanne.

L'algorithme de simulation du coup de bélier pour cette configuration utilise les paramètres résumés dans le **Tableau II-10**.

Tableau II-10: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 2 (réservoir-conduite - cheminée d'équilibre-vanne)

| Variable | Unité | Description |
|-----------|---------------------|---|
| D | [m] | Diamètre de la conduite |
| D_s | [m] | Diamètre de la cheminée d'équilibre |
| M | [m] | Position de la cheminée d'équilibre à partir du réservoir |
| L | [m] | Longueur de la conduite |
| K | [-] | Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite |
| f | [-] | Coefficient de frottement de <i>Darcy-Weisbach</i> |
| Q_0 | [m ³ /s] | Débit initial d'écoulement |
| n | [-] | Nombre de segments |
| nI | [-] | Nœud où la cheminée d'équilibre est placée |
| H_{res} | [m] | Niveau d'eau dans le réservoir |
| tf | [s] | Temps de fermeture de la vanne |
| T | [s] | Temps de simulation |
| a | [m/s] | Célérité d'onde de pression. |
| Z | [m] | Elévation des nœuds par rapport au niveau de référence |
| dx | [m] | Pas spatiale |

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

| | | |
|-------|-------------------|------------------------------------|
| dt | [s] | Pas du temps |
| A | [m ²] | Section de conduite |
| A_s | [m ²] | Section de la cheminée d'équilibre |
| R | [-] | Voir l'équation (I-33) |

L'organigramme de la **Figure II-11** résume les étapes de mise en œuvre de l'algorithme de simulation dans le cas cette configuration.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

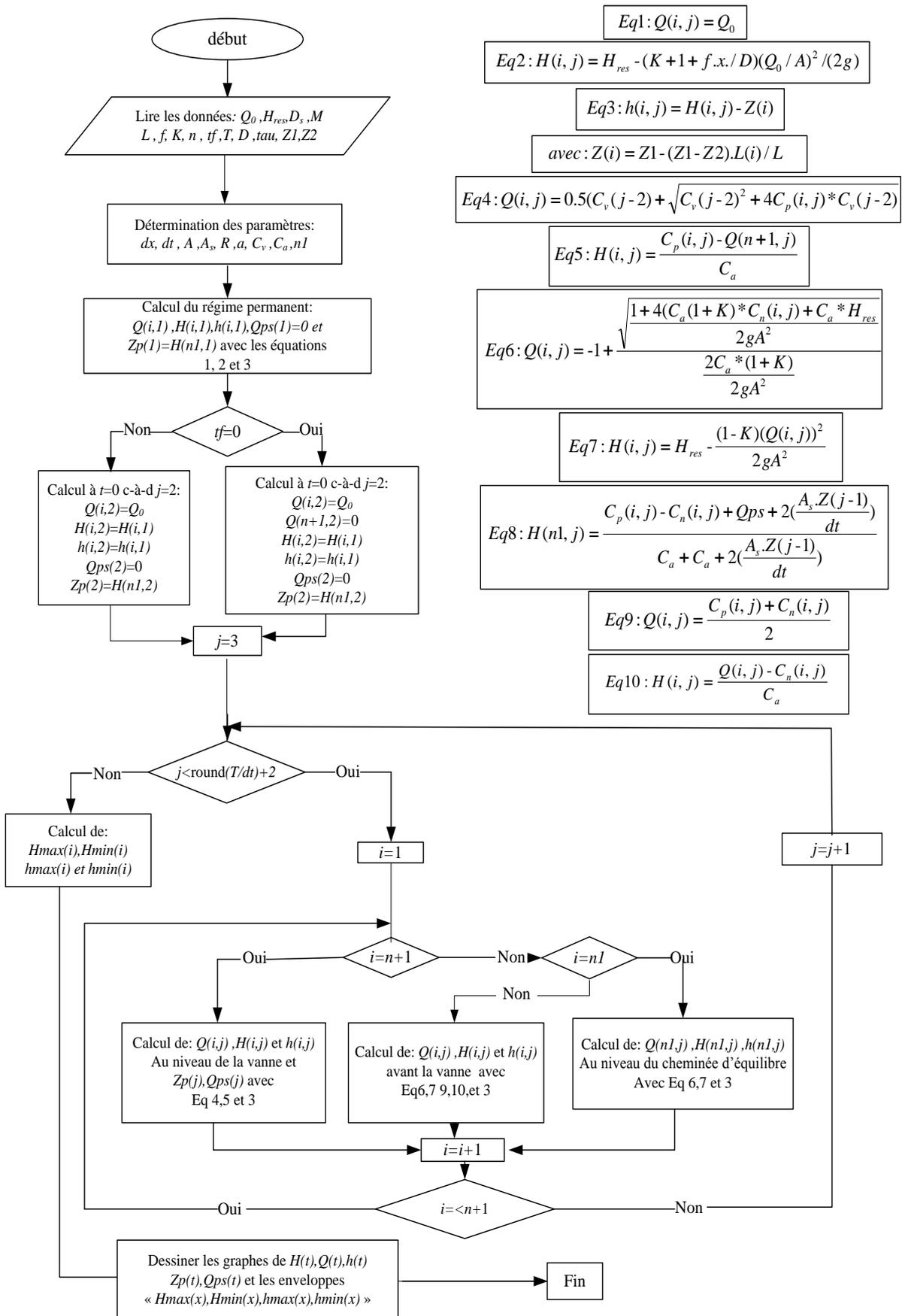


Figure II-11: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 2 (réservoir - conduite - cheminée d'équilibre - vanne)

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

II.4.3.1 Nouveautés de cette nouvelle version (2019)

Pour l'algorithme de la configuration 2, une comparaison entre les capacités de cette nouvelle version (2019) en contraste avec les capacités de la première version (2018) est synthétisée dans le **Tableau II-11**.

Tableau II-11: Comparaison entre les deux modèles

| Options | Algorithme Version 2018 | Algorithme Version 2019 |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Possibilité d'intégrer le cheminée d'équilibre dans n'importe quelle conduite | Non disponible | Disponible |
| Courbe enveloppe de la variation des pressions maximales et minimales dans la conduite | Non disponible | Disponible |
| Conduite non horizontale | Non disponible | Disponible |
| Calculateur de la célérité de l'onde de pression | Non disponible | Disponible |

Remarque

La validation de l'algorithme de la configuration 2 est une conséquence de la validation de l'algorithme de la configuration 4 en utilisant les données de la galerie et la validation de l'algorithme de la configuration 3 basée sur l'adaptation de l'algorithme de la configuration 1.

II.4.4 Configuration 3 : réservoir - multi conduites en série –vanne.

La **Figure II-12** décrit une configuration à base d'un réservoir (en amont), trois conduites de sections différentes en série et une vanne de fermeture (en aval). Tous les paramètres et dimensions nécessaires à la simulation sont reportés sur cette figure.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

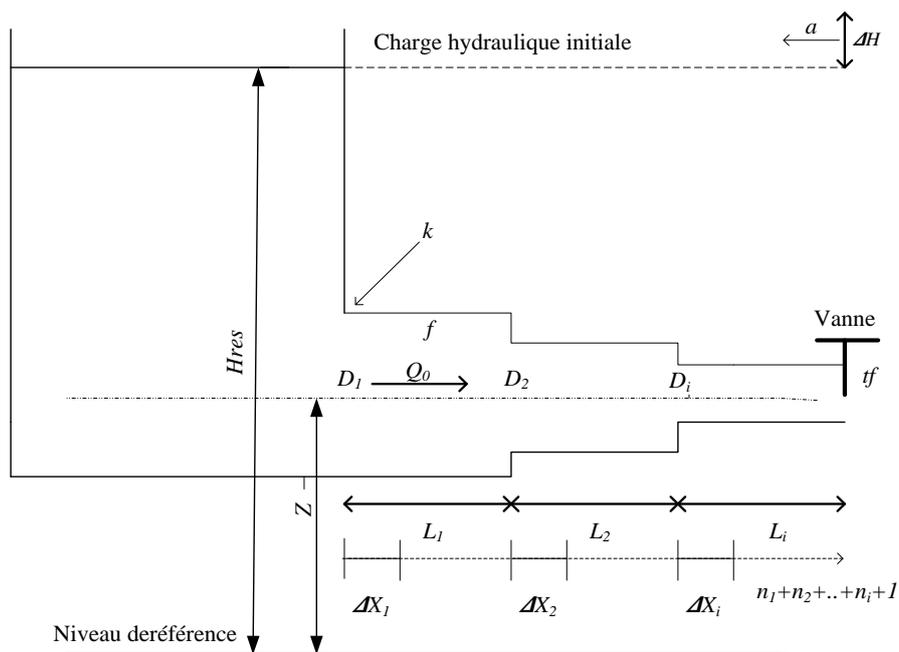


Figure II-12: Configuration 3 : réservoir-multi conduites en série - vanne

L'algorithme de simulation du coup de bélier pour cette configuration utilise les paramètres résumés dans le **Tableau II-12**.

Tableau II-12: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 3 (réservoir-multi conduites en série - vanne)

| Variable | Unité | Description |
|-----------|---------------------|---|
| k | [-] | Indice de conduite $1 < k < n_c$ |
| $D(k)$ | [m] | Diamètre correspond à la conduite k |
| K | [-] | Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite |
| $L(k)$ | [m] | Longueur de la conduite k |
| f | [-] | Coefficient de frottement de <i>Darcy Weisbach</i> |
| Q_0 | [m ³ /s] | Débit initial d'écoulement |
| n | [-] | Nombre de segments |
| H_{res} | [m] | Niveau d'eau dans le réservoir |
| t_f | [s] | Temps de fermeture de la vanne |
| T | [s] | Temps de simulation |
| a | [m/s] | Célérité d'onde de pression. |
| n_c | [-] | Nombre de conduites |
| Z | [m] | Elévation des nœuds par rapport au niveau de référence |
| dx | [m] | Pas spatiale |
| dt | [s] | Pas du temps |
| A | [m ²] | Section de conduite |
| R | [-] | Voir l'équation (I.33) |

L'organigramme de la **Figure II-13** résume les étapes de mise en œuvre de l'algorithme de simulation dans le cas cette configuration.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

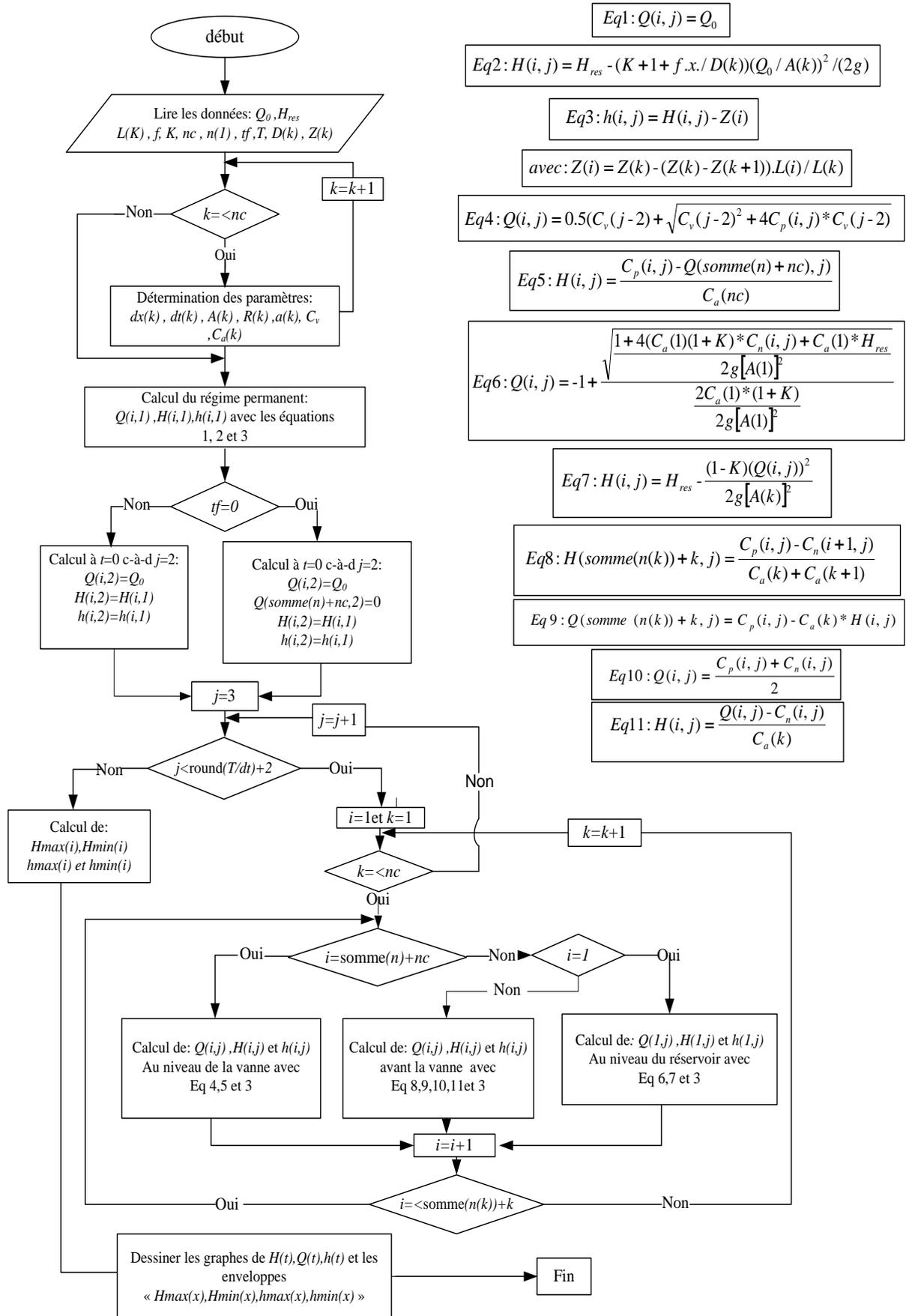


Figure II-13: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 3 (réservoir-multi conduites en série - vanne)

II.4.4.1 Nouveautés de cette nouvelle version (2019)

Pour l'algorithme de la configuration 3, une comparaison entre les capacités de cette nouvelle version (2019) en contraste avec les capacités de la première version (2018) est synthétisée dans le **Tableau II-13**.

Tableau II-13: Comparaison entre les deux modèles

| Options | Algorithme Version 2018 | Algorithme Version 2019 |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Courbe enveloppe de la variation des pressions maximales et minimales dans la conduite | Non disponible | Disponible |
| Conduite non horizontale | Non disponible | Disponible |
| Calculateur de la célérité de l'onde de pression | Non disponible | Disponible |

II.4.5 Validation pour la configuration 3 (réservoir - multi conduites en série - vanne)

En donnant la même valeur du diamètre pour toutes les conduites, les résultats de cette simulation sont validés car on se ramène au cas des résultats de l'algorithme de la configuration 1 qui sont déjà validés. Pour ce faire, on effectue deux simulations avec fermeture instantanée ($t_f=0$) de la vanne sans et avec perte de charge. Dans la première simulation, le système comporte deux conduites en série et dans la deuxième simulation, le système comporte quatre conduites en série. Le tableau ci-dessous résume les paramètres des deux simulations :

Tableau III.3: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 3 (réservoir- multi conduites en série -vanne)

| Paramètre | H_{res} [m] | Q_0 [m ³ /s] | n [-] | L [m] | T [s] | A [m ²] | D [m] |
|---------------------|---------------|---------------------------|---------|---------|---------|-----------------------|---------|
| Simulation 1 | 100 | 0.75 | 12 | 12000 | 300 | 1000 | 1 |
| Simulation 2 | 100 | 0.75 | 12 | 12000 | 300 | 1000 | 1 |

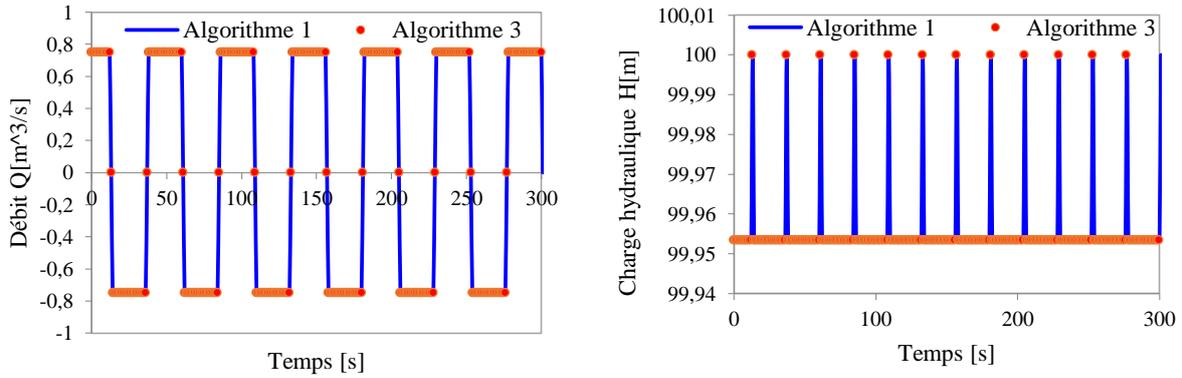
II.4.5.1 Cas 1: Simulation avec deux conduites en série

a) Cas 1.1 : sans pertes de charges

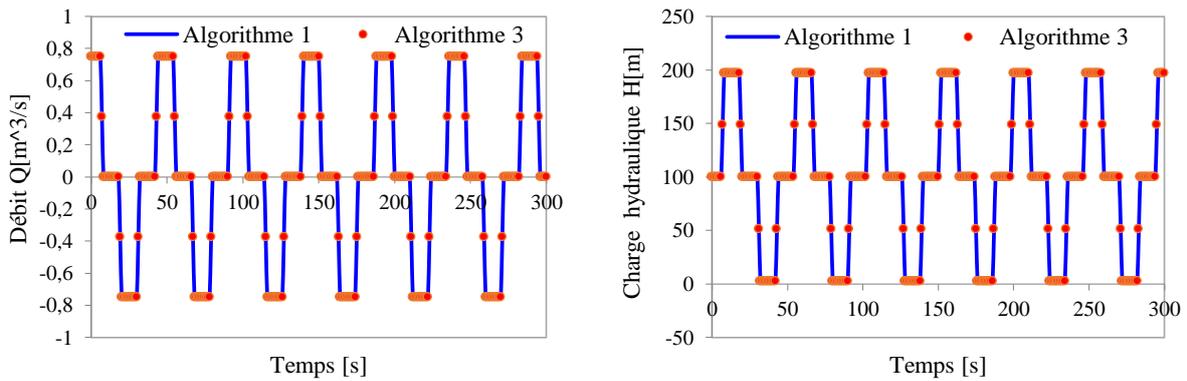
Dans ce cas le frottement est négligé et l'on pose :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0$

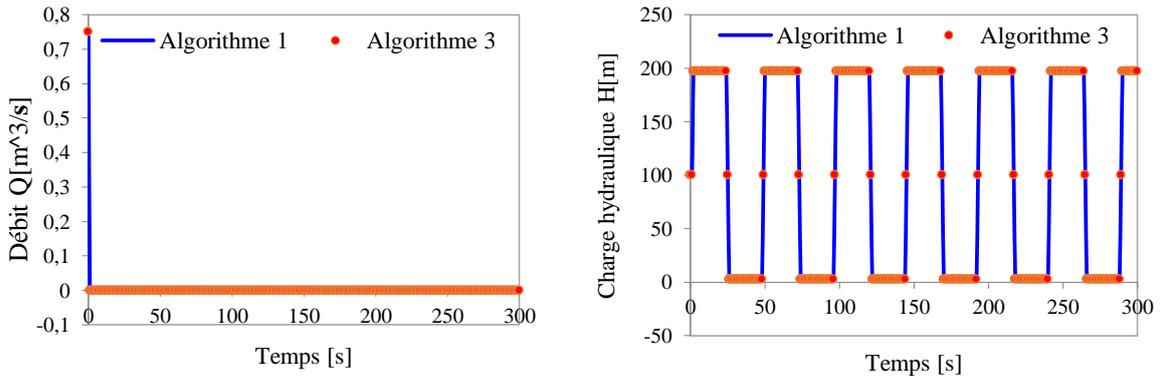
Chapitre 2 : Algorithmes et validations



a) Résultats au nœud $x=0$ m



b) Résultats au nœud $x=6000$ m



a) Résultats au nœud $x=12000$ m

Figure II-14: Comparaison des résultats obtenus avec l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) et ceux obtenus avec l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) aux nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ dans le cas où les pertes de charges sont négligées.

Ici, nous avons validé nos résultats pour trois points spécifiques (l'extrémité de la conduite liée au réservoir, le point de jonction reliant les deux conduites, l'extrémité au niveau de la vanne).

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-14**.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

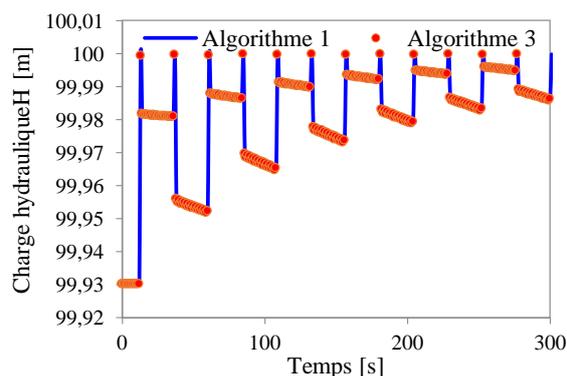
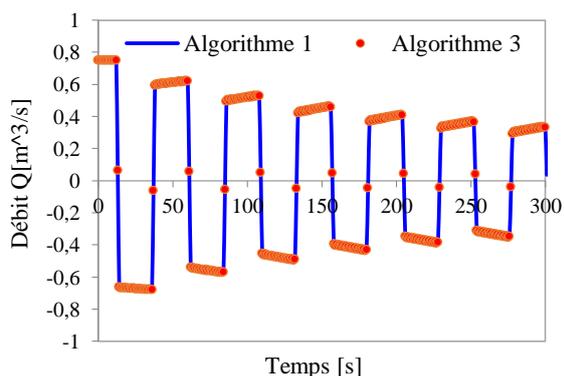
Tableau II-14: Validation de l'algorithme 3 (réservoir - multi conduites en série - vanne) - des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée sans pertes de charges

| Nœud | NSE | RSR | PBIAS[%] | niveau de performance |
|------|-----|-----|----------|-----------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 6000 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 1200 | 1 | 0 | 0 | Très bien |

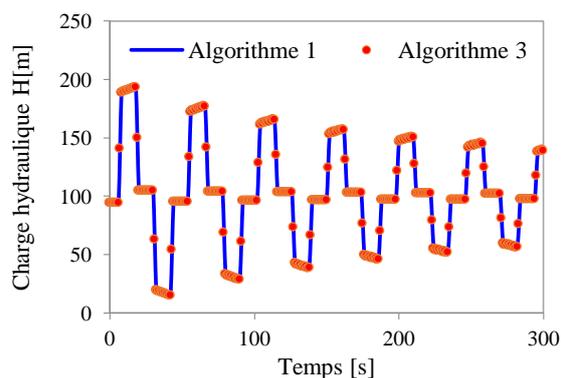
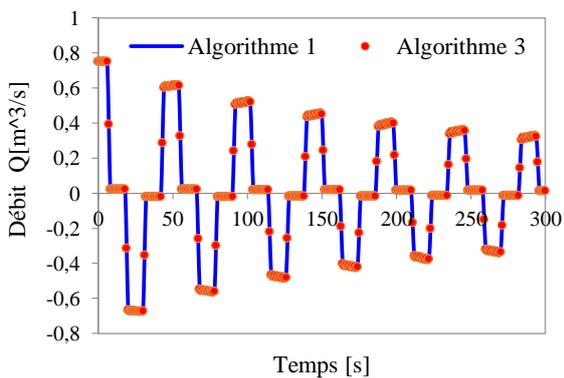
b) Cas 1.2: Avec pertes de charges

Dans ce cas le frottement est pris en compte :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0.5$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0.02$.

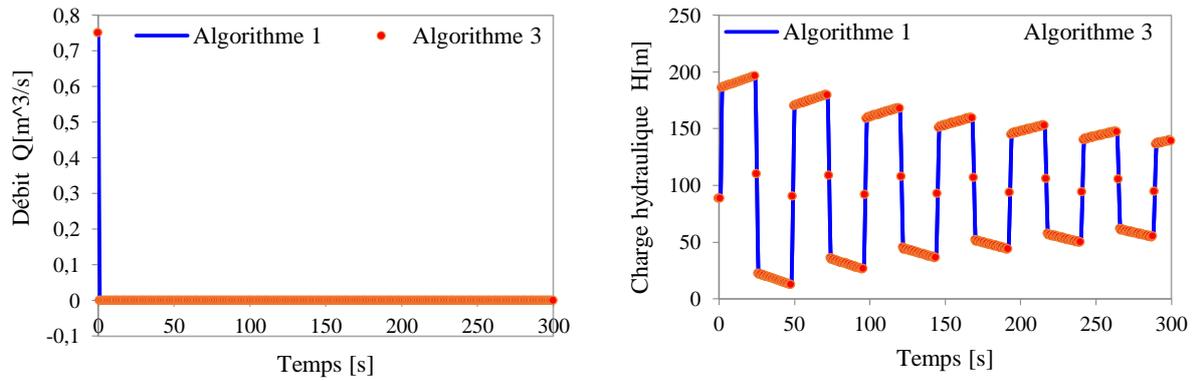


a) Résultats au nœud x=0 m



b) Résultats au nœud x=6000 m

Chapitre 2 : Algorithmes et validations



c) Résultats au nœud $x=12000$ m

Figure II-15: Comparaison des résultats obtenus avec l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) et ceux obtenus avec l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) aux nœuds $x= (0, 6000, 12000)$ dans le cas où les pertes de charges sont prises en compte.

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-15**.

Tableau II-15: Validation de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) - des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée avec pertes de charges.

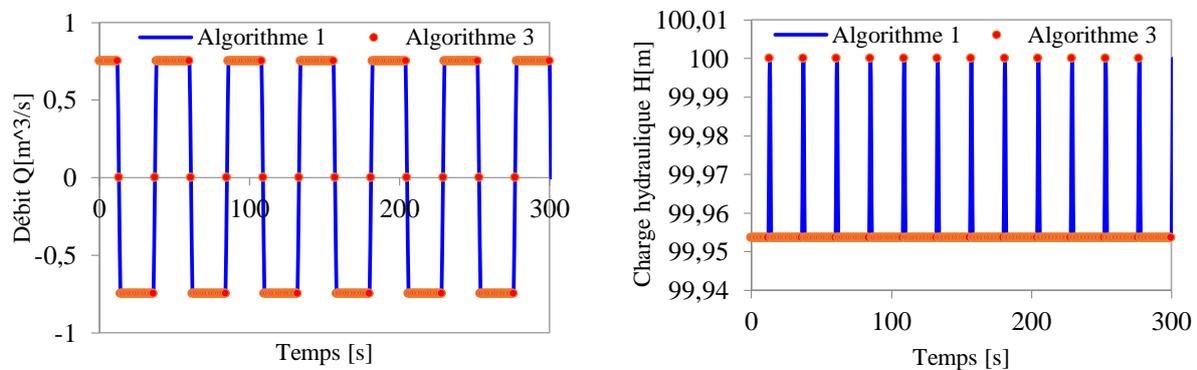
| Nœud | NSE | RSR | PBIAS [%] | Niveau de performance |
|------|-----|-----|-----------|-----------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 6000 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 1200 | 1 | 0 | 0 | Très bien |

II.4.5.2 Cas 2: simulation avec quatre conduites en série

a) Cas 2.1: Sans pertes de charges

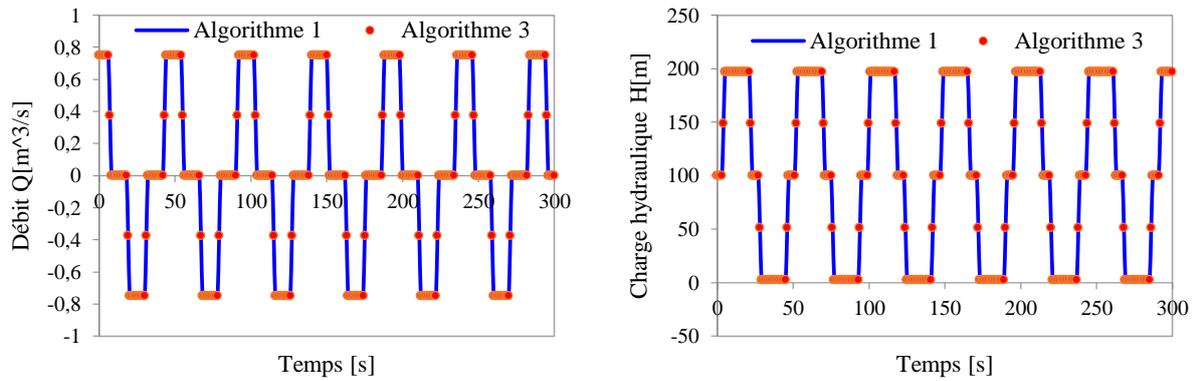
Dans ce cas le frottement est négligé et l'on pose :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0$.

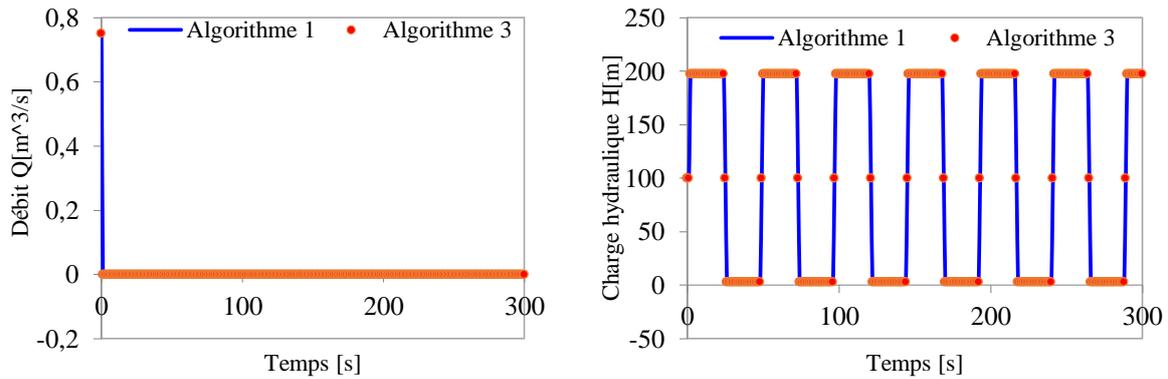


a) Résultats au nœud $x=0$ m

Chapitre 2 : Algorithmes et validations



b) Résultats au nœud $x=6000$ m



c) Résultats au nœud $x=12000$ m

Figure II-16 : Comparaisons entre les résultats de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) et ceux de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) aux nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ où les pertes de charges sont négligées

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-16**.

Tableau II-16: Validation de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) - des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée et sans pertes de charges

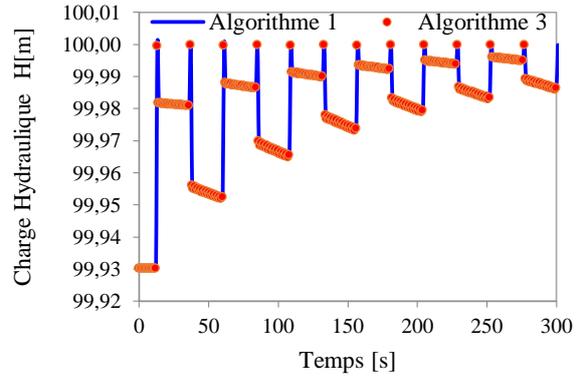
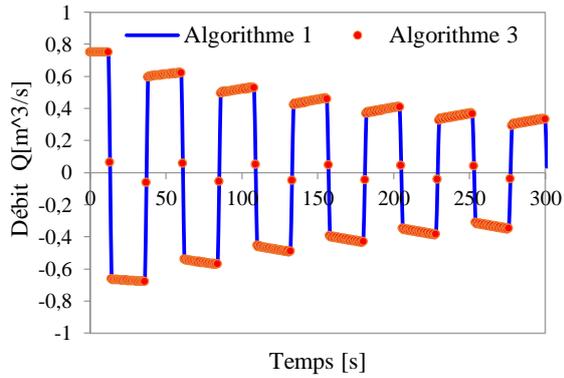
| Nœud | NSE | RSR | PBIAS [%] | Niveau de performance |
|------|-----|-----|-----------|-----------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 6000 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 1200 | 1 | 0 | 0 | Très bien |

b) Cas 2.2: Avec pertes de charges

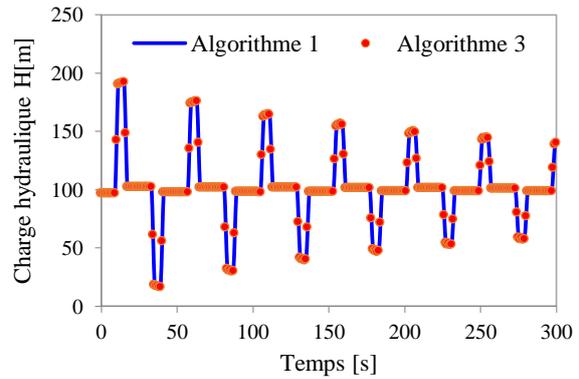
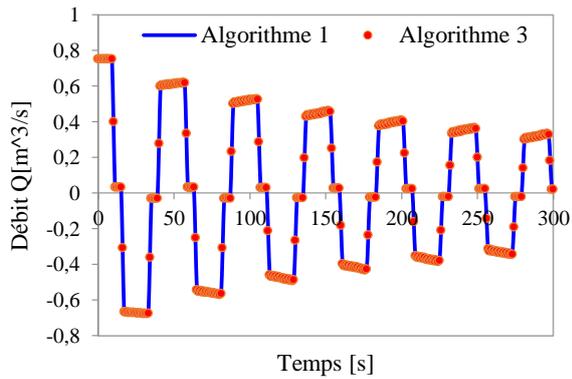
Dans ce cas le frottement est pris en compte.

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0.5$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0.02$.

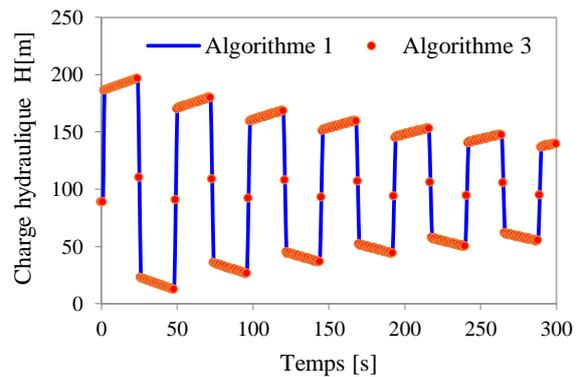
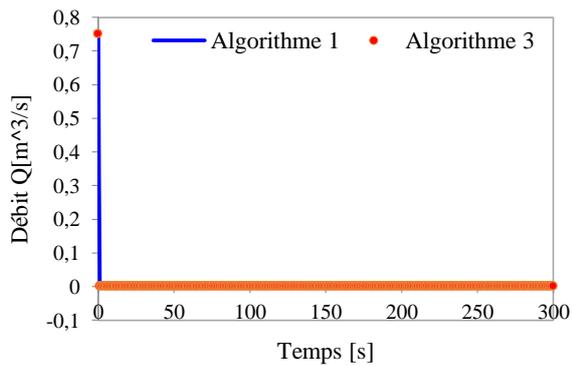
Chapitre 2 : Algorithmes et validations



a) Résultats au nœud $x=0$ m



b) Résultats au nœud $x=6000$ m



c) Résultats au nœud $x=12000$ m

Figure II-17: Comparaison entre les résultats de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) et ceux de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) aux nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ où les pertes de charges sont considérées

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-17**.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

Tableau II-17: Validation de l’algorithme 3 (réservoir-multi conduites en série -vanne) - des paramètres statistiques dans le cas d’une fermeture instantanée et avec pertes de charge

| Nœud | NSE | RSR | PBIAS[%] | Niveau de performance |
|------|-----|-----|----------|-----------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 6000 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 1200 | 1 | 0 | 0 | Très bien |

II.4.6 Configuration 4 : réservoir - multi conduites en série - cheminée d’équilibre - vanne

La **Figure II-18** décrit une configuration à base d’un réservoir (en amont), trois conduites de sections différentes en série, une cheminée d’équilibre et une vanne de fermeture(en aval). Tous les paramètres et dimensions nécessaires à la simulation sont reportés sur cette figure.

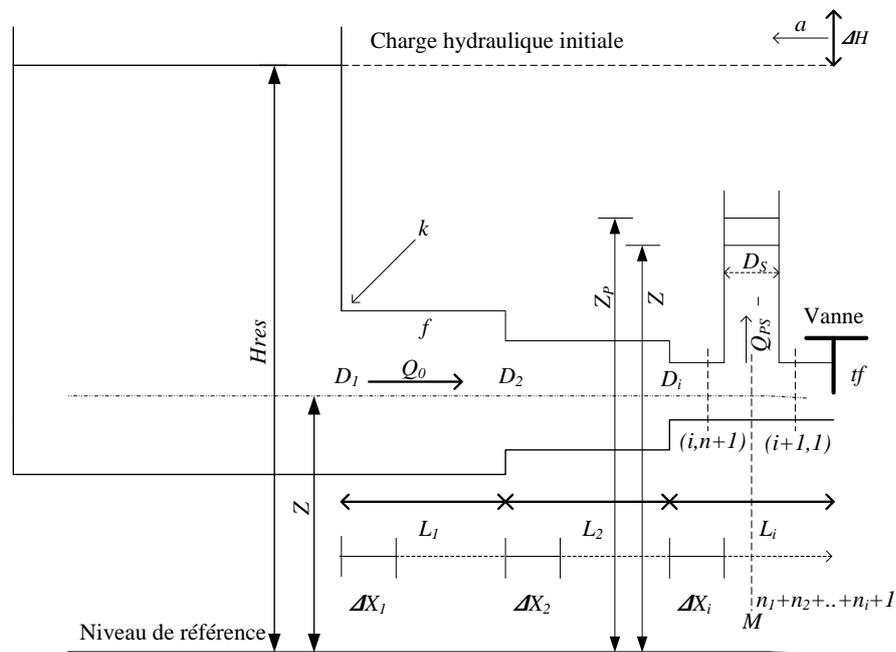


Figure II-18: Configuration 4 : réservoir-multi conduites en série - cheminée d’équilibre – vanne.

L’algorithme de simulation du coup de bélier pour cette configuration utilise les paramètres résumés dans le **Tableau II-18**.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

Tableau II-18: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 4 (réservoir-multi conduites -cheminée d'équilibre-vanne)

| Variable | Unité | Description |
|-----------|---------------------|---|
| k | [-] | Indice de conduite $1 < k < n_c$ |
| D_s | [m] | Diamètre de la cheminée d'équilibre |
| M | [m] | Position de la cheminée d'équilibre à partir du réservoir |
| $D(k)$ | [m] | Diamètre correspondant à la conduite k |
| $L(k)$ | [m] | Longueur de la conduite k |
| K | [-] | Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite |
| f | [-] | Coefficient de frottement de <i>Darcy Weisbach</i> |
| Q_0 | [m ³ /s] | Débit initial d'écoulement |
| n | [-] | Nombre de segments |
| n_1 | [-] | Nœud où la cheminée d'équilibre est placée |
| H_{res} | [m] | Niveau d'eau dans le réservoir |
| t_f | [s] | Temps de fermeture de la vanne |
| T | [s] | Temps de simulation |
| a | [m/s] | Célérité de l'onde de pression |
| n_c | [-] | Nombre de conduites |
| Z | [m] | Elévation des nœuds par rapport au niveau de référence |
| dx | [m] | Pas spatiale |
| dt | [s] | Pas du temps |
| A | [m ²] | Section de conduite |
| A_s | [m ²] | Section de la cheminée d'équilibre |
| R | [-] | Voir l'équation (I-33) |

L'organigramme de la **Figure II-19** résume les étapes de mise en œuvre de l'algorithme de simulation dans le cas cette configuration.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

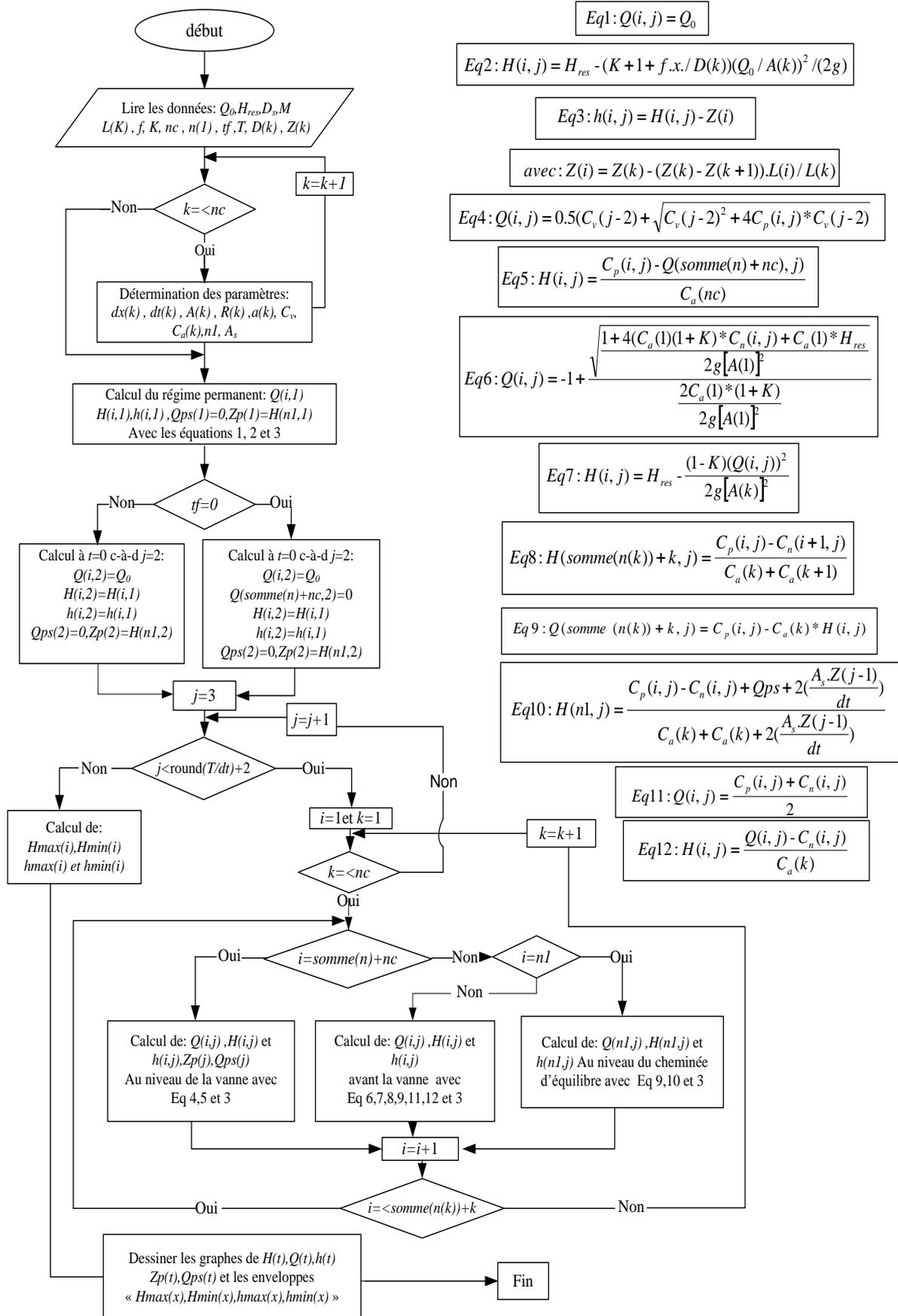


Figure II-19: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 4 (réservoir-multi conduites - cheminée d'équilibre - vanne)

II.4.6.1 Nouveautés de cette nouvelle version (2019)

Pour l'algorithme de la configuration 4, une comparaison entre les capacités de cette nouvelle version (2019) en contraste avec les capacités de la première version (2018) est synthétisée dans le **Tableau II-19**.

Tableau II-19: Comparaison entre les deux modèles

| Options | Algorithme Version 2018 | Algorithme Version 2019 |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Possibilité d'intégrer le cheminée d'équilibre dans n'importe quelle conduite | Non disponible | Disponible |
| Courbe enveloppe de la variation des pressions maximales et minimales dans la conduite | Non disponible | Disponible |
| Conduite non horizontale | Non disponible | Disponible |
| Calculateur de la célérité de l'onde de pression | Non disponible | Disponible |

II.4.7 Validation pour la configuration 4 (réservoir - multi conduites en série -cheminée d'équilibre - vanne)

L'aménagement hydro-électrique étudié ici est tiré du travail de Doctorat de *Hussain Khan* (1966). La configuration de l'étude se compose d'une galerie d'amenée d'eau d'une longueur de 5 km et d'un diamètre de 7.14 m. Cette chambre d'équilibre absorbe les pressions dynamiques transmises par la conduite forcée dont le diamètre est de 3 m avec une longueur atteignant 1000 m (**Figure II-20**) (Amara, 2013).

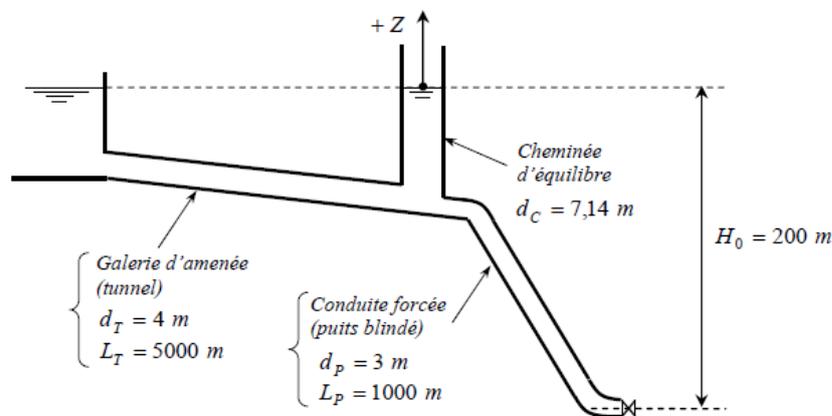


Figure II-20: Schéma descriptif de l'aménagement hydro-électrique simulé (Amara, 2013)

II.4.7.1 Simulations sans et avec perte de charges

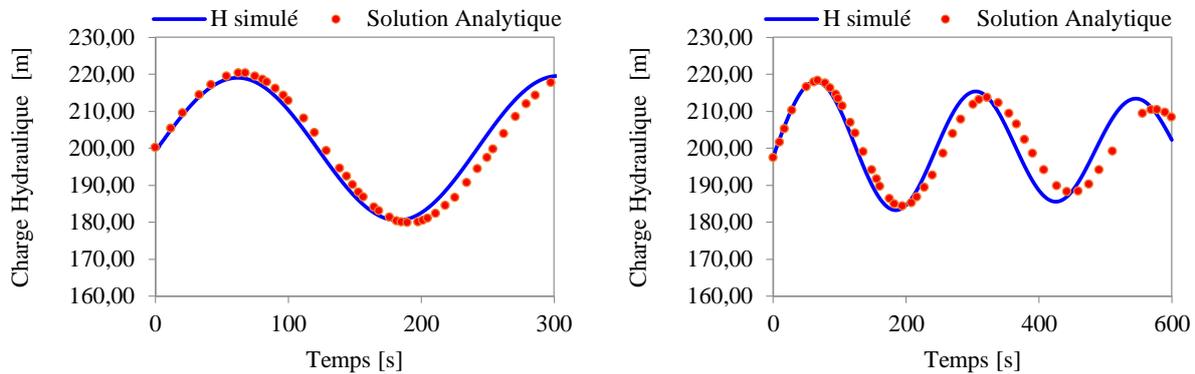
Cette étude vise à comparer les résultats issus du calcul numérique de la propagation des ondes élastiques par la méthode des caractéristiques et ceux que l'on obtient par une solution analytique. Les paramètres de calcul dans ce cas sont :

Tableau II-20: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 4 (réservoir-multi conduites en série –cheminée d'équilibre -vanne)

| Paramètre | $n(1)[-]$ | $n(2)[-]$ | $T[s]$ | $\Delta t [s]$ | $f[-]$ | $K[-]$ |
|----------------------|-----------|-----------|--------|----------------|--------|--------|
| Sans perte de charge | 10 | 2 | 400 | 0.5 | 0 | 0 |
| Avec perte de charge | 10 | 2 | 400 | 0.5 | 0.01 | 0.5 |

Avec :

- $n(1)$: Nombre de segments dans la galerie d'amenée
- $n(2)$: Nombre de segments dans la conduite forcée



(a) Sans pertes de charges

(b) Avec pertes de charges

Résultats au niveau de la cheminée d'équilibre.

Figure II-21: Comparaison entre les résultats de simulation avec l'algorithme 4 et celles obtenues par les méthodes de référence (données de référence de (Amara, 2013)) sans et avec perte de charge.

Les résultats de simulateur basé sur la méthode des caractéristiques coïncident pratiquement "parfaitement" avec les résultats des différentes méthodes utilisées pour la validation.

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-21** .

Tableau II-21: Validation pour la configuration 4 (réservoir-multi conduites en parallèle-cheminée d'équilibre-vannes) - des paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantané sans et avec pertes de charges

| Paramètre | NSE | RSR | PBAIS [%] | Niveau Performance |
|----------------------|-------|-------|-----------|--------------------|
| Sans perte de charge | 0.869 | 0.361 | 0.869 | Très Bien |
| Avec perte de charge | 0.999 | 0.019 | 0.170 | Très Bien |

II.4.8 Configuration 5 : réservoir- multi conduites en parallèle - vannes

La **Figure II-22** décrit une configuration à base d'un réservoir(en amont), trois conduites de sections différentes en parallèle et trois vannes de fermeture(en aval). Tous les paramètres et dimensions nécessaires à la simulation sont reportés sur cette figure.

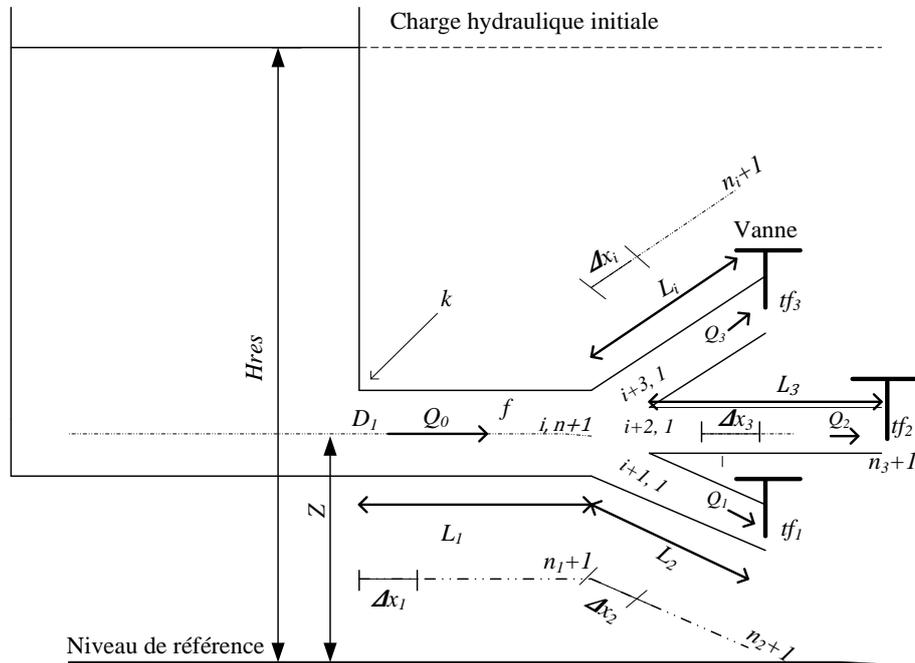


Figure II-22: Configuration 5 : réservoir - multi conduites en parallèle – vannes

L'algorithme de simulation du coup de bélier pour cette configuration utilise les paramètres résumés dans le **Tableau II-22** .

Tableau II-22: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 5 (réservoir-multi conduites en parallèle -vannes)

| Variables | Unité | Description |
|-----------|---------------------|---|
| k | [-] | Indice de conduite $1 < k < nc + 1$ |
| $D(k)$ | [m] | Diamètre correspondant à la conduite k |
| $L(k)$ | [m] | Longueur de la conduite k |
| K | [-] | Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite |
| f | [-] | Coefficient de frottement de <i>Darcy Weisbach</i> |
| $Q0$ | [m ³ /s] | Débit initial d'écoulement |
| n | [-] | Nombre de segment |
| $Hres$ | [m] | Niveau d'eau dans le réservoir |
| tf | [s] | Temps de fermeture de la vanne |
| T | [s] | Temps de simulation |
| a | [m/s] | Célérité d'onde de pression. |
| nc | [-] | Nombre de conduite liée a la conduite principale |
| Z | [m] | Elévation des nœuds par rapport au niveau de référence |

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

| | | |
|------|-------------------|------------------------|
| dx | [m] | Pas spatiale |
| dt | [s] | Pas du temps |
| A | [m ²] | Section de conduite |
| R | [-] | Voir l'équation (I-33) |

L'organigramme de la **Figure II-23** résume les étapes de mise en œuvre de l'algorithme de simulation dans le cas cette configuration.

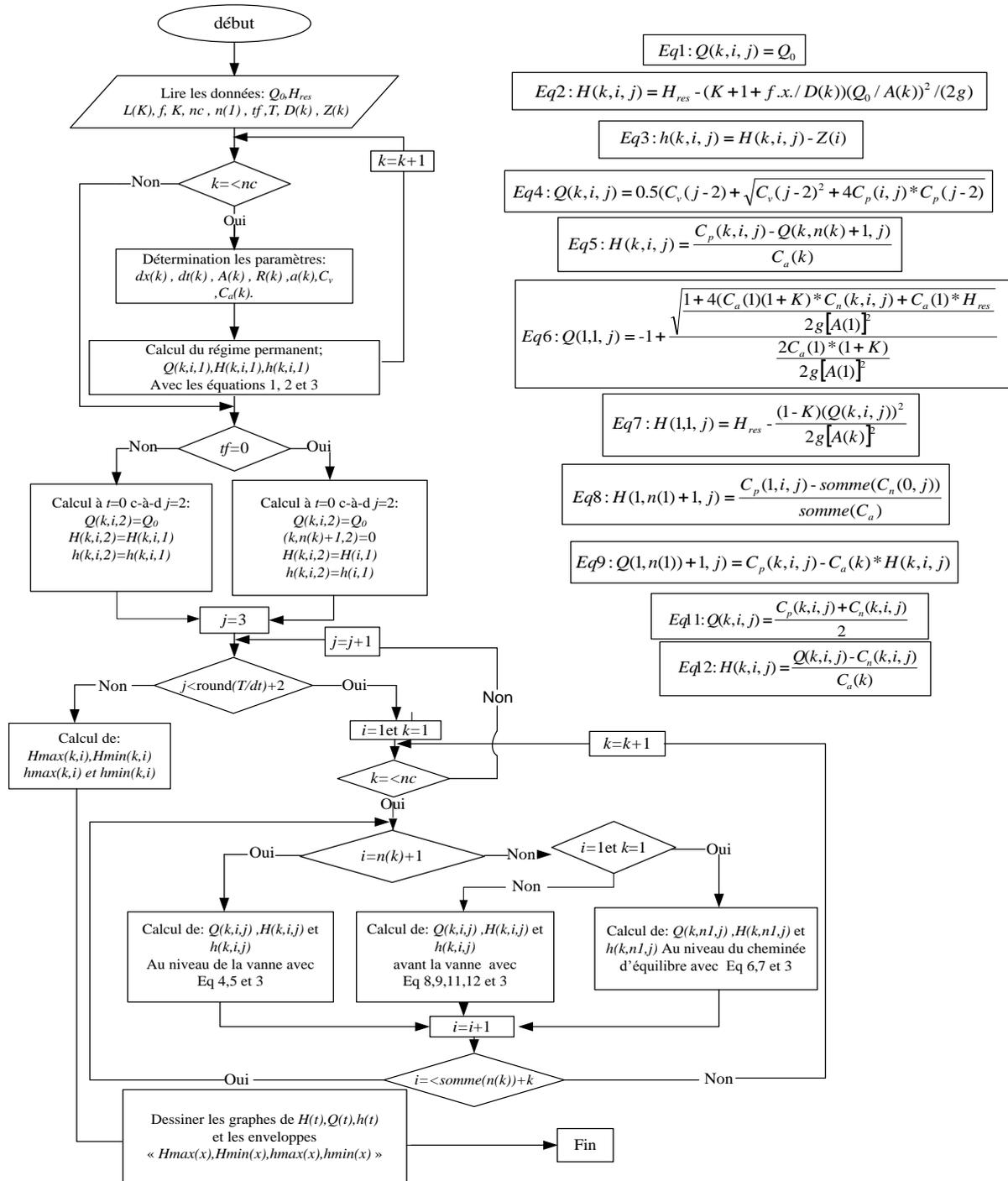


Figure II-23: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration (réservoir - multi conduites en parallèle - vannes)

II.4.8.1 Nouveautés de cette nouvelle version (2019)

Pour l'algorithme de la configuration 5, une comparaison entre les capacités de cette nouvelle version (2019) en contraste avec les capacités de la première version (2018) est synthétisée dans le **Tableau II-23**.

Tableau II-23: Comparaison entre les deux modèles

| Options | Algorithme Version 2018 | Algorithme Version 2019 |
|--|--------------------------------|--------------------------------|
| Courbe enveloppe de la variation des pressions maximales et minimales dans la conduite | Non disponible | Disponible |
| Conduite non horizontale | Non disponible | Disponible |
| Calculateur de la célérité de l'onde de pression | Non disponible | Disponible |

II.4.9 Validation pour la configuration 5 (réservoir - multi conduites en parallèle – vannes)

Simulé pour une fermeture instantanée ($t_f=0$), ce cas de figure est validé en le transformant au cas de la configuration 1 (réservoir - conduite - vanne) qui est déjà validé. Pour ce faire, il suffit de travailler avec deux conduites parallèles liées à la conduite principale et donner une valeur proche de zéro au diamètre de l'une et donner le même diamètre à la deuxième conduite que la conduite principale.

Le **Tableau II-24** résume les valeurs des paramètres utilisés dans la simulation de la configuration 5.

Tableau II-24: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 5 (réservoir-multi conduites en parallèles -vannes)

| Paramètre | H_{res} | Q_0 | n | L | T | a | $D[1]$ | $D[2]$ | $D[3]$ |
|------------------|-----------|-------|-----|-------|-----|------|--------|--------|--------|
| Valeurs | 100 | 0.75 | 12 | 12000 | 300 | 1000 | 1 | 1 | 0 |

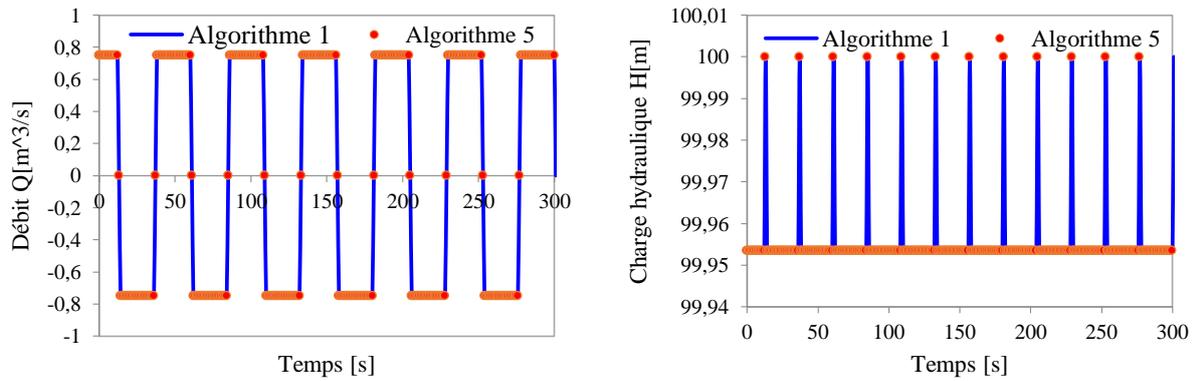
II.4.9.1 Simulation sans et avec perte de charge

a) Cas 1.1 : Sans perte de charge

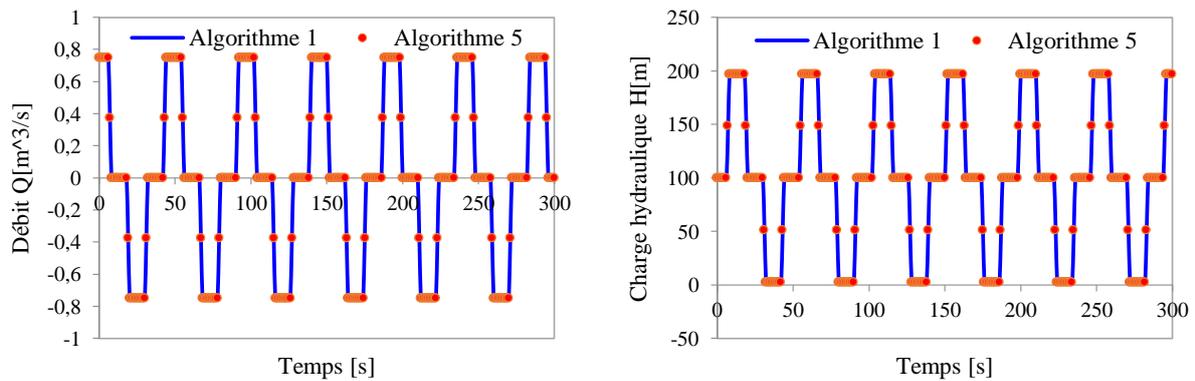
Dans ce cas le frottement est négligé et l'on pose :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0$
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0$

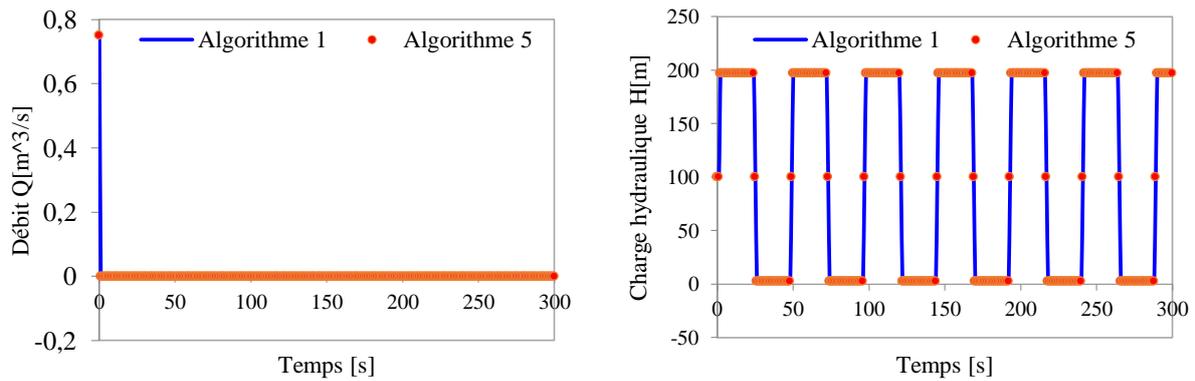
Chapitre 2 : Algorithmes et validations



a) Résultats au nœud $x=0$ m



b) Résultats au nœud $x=6000$ m



c) Résultats au nœud $x=12000$ m

Figure II-24: Comparaison entre les résultats de simulation de l'algorithme 5 (réservoir-multi conduites en parallèle - vannes) et ceux de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-vanne) dans les nœuds $x=(0, 6000, 12000)$ où les pertes de charges sont négligées

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-25**.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

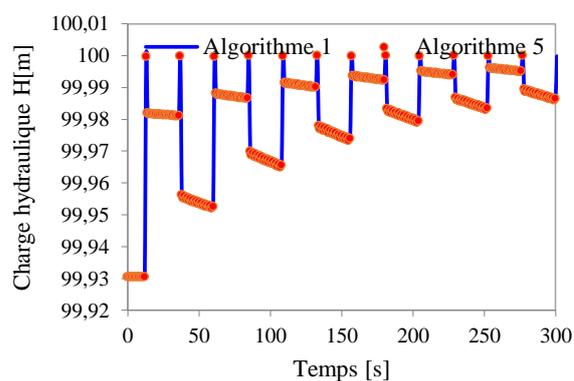
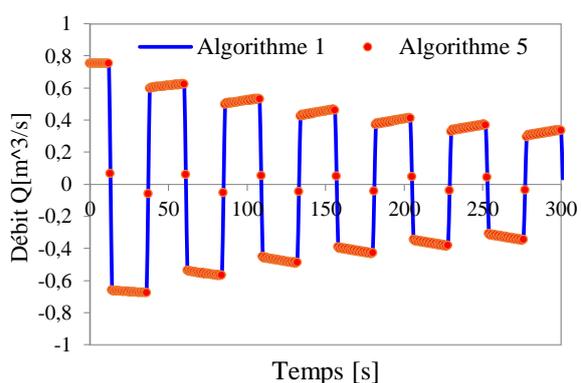
Tableau II-25: Validation de l'algorithme 5 (réservoir - multi conduites en parallèle - vannes) avec des paramètres statistiques pour le cas de fermeture instantanée sans pertes de charges.

| Nœud | NSE | RSR | PBIAS [%] | Niveau de performance |
|------|-----|-----|-----------|-----------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 6000 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 1200 | 1 | 0 | 0 | Très bien |

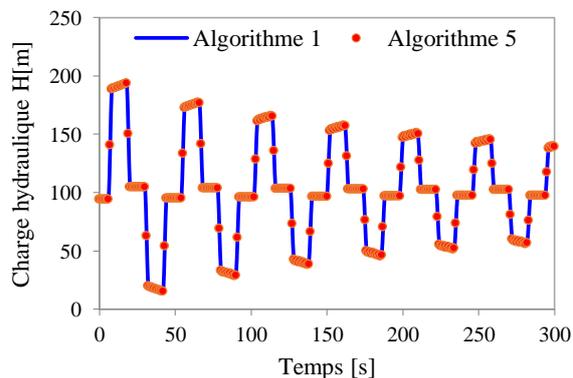
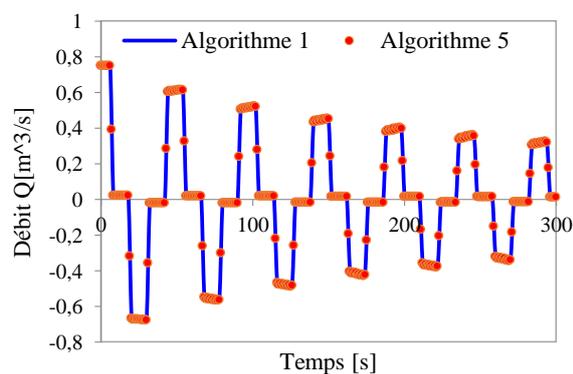
a) Cas 1.2 : Avec pertes de charges

Dans ce cas le frottement est considéré avec :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0.5$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0.02$.

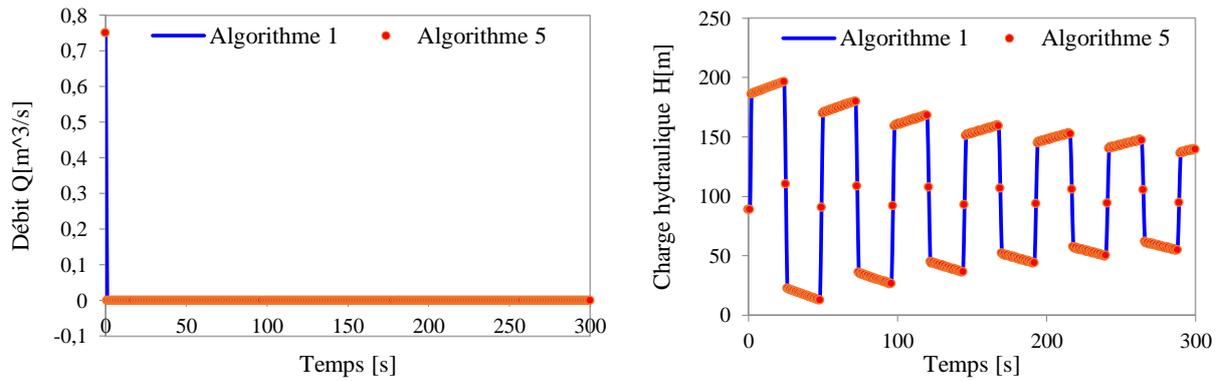


a) Résultats au nœud $x=0$ m



b) Réservoir au nœud $x=6000$ m

Chapitre 2 : Algorithmes et validations



c) Réservoir au nœud $X=12000$ m

Figure II-25: Comparaison entre les résultats de simulation de l’algorithme 5 (réservoir-multi conduites en parallèle - vannes) et ceux de l’algorithme 1 (réservoir - conduite - vanne) sans perte de charge aux nœuds $x=0$, 6000 et 12000

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-26**.

Tableau II-26: Validation de l’algorithme 5 (réservoir-multi conduites en parallèles-vanne) avec des paramètres statistiques pour le cas de fermeture instantanée avec pertes de charges

| Nœud | NSE | RSR | PBIAS [%] | Niveau de performance |
|------|-----|-----|-----------|-----------------------|
| 0 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 6000 | 1 | 0 | 0 | Très bien |
| 1200 | 1 | 0 | 0 | Très bien |

II.4.10 Configuration 6 : réservoir-multi conduites en parallèle - cheminée d’équilibre –vanne

La **Figure II-26** décrit une configuration à base d’un réservoir (en amont), trois conduites de sections différentes en parallèle, une cheminée d’équilibre et une vanne de fermeture (en aval). Tous les paramètres et dimensions nécessaires à la simulation sont reportés sur cette figure.

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

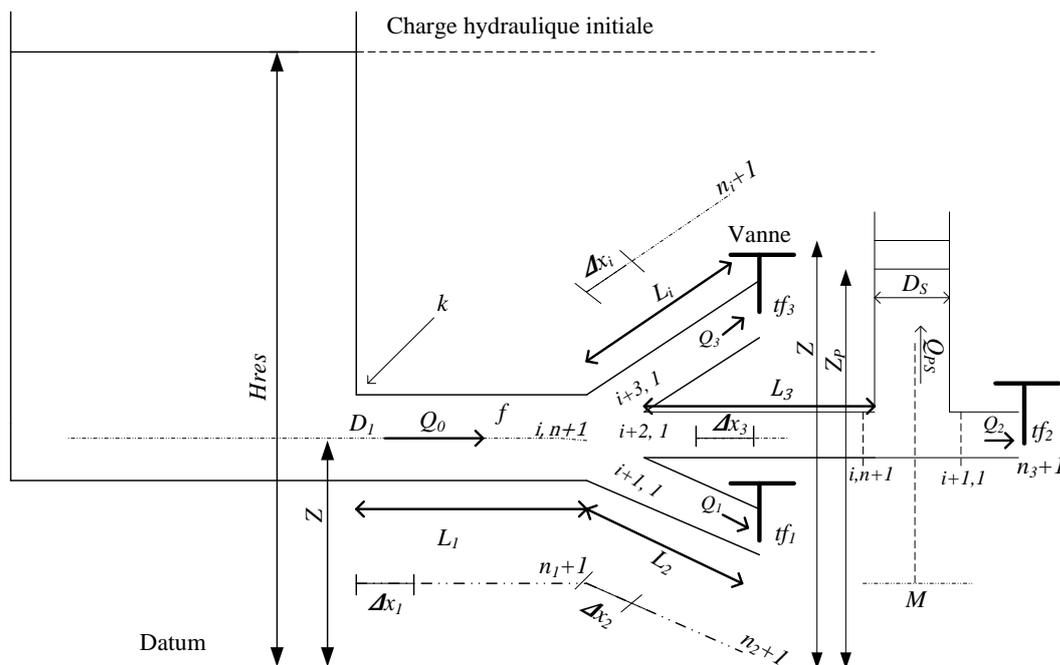


Figure II-26: Configuration 6 : réservoir - multi branchement - cheminée d'équilibre – vanne

L'algorithme de simulation du coup de bélier pour cette configuration utilise les paramètres résumés dans le **Tableau II-27**.

Tableau II-27: Variables d'entrée de l'algorithme de la configuration 6 (réservoir-multi conduites en parallèle -cheminée d'équilibre-vanne)

| Variables | Unité | Description |
|-----------|---------------------|---|
| k | [-] | Indice de conduite $1 < k < nc + 1$ |
| D_s | [m] | Diamètre de la cheminée d'équilibre |
| M | [m] | Position de la cheminée d'équilibre à partir du réservoir |
| $D(k)$ | [m] | Diamètre correspondant à la conduite k |
| $L(k)$ | [m] | Longueur de la conduite k |
| K | [-] | Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite |
| f | [-] | Coefficient de frottement de <i>Darcy-Weisbach</i> |
| Q_0 | [m ³ /s] | Débit initial d'écoulement |
| n | [-] | Nombre de segments |
| n_l | [-] | Nœud où la cheminée d'équilibre est placée |
| H_{res} | [m] | Niveau d'eau dans le réservoir |
| t_f | [s] | Temps de fermeture de la vanne |
| T | [s] | Temps de simulation |
| a | [m/s] | Célérité d'onde de pression. |
| n_c | [-] | Nombre de conduites liées à la conduite principale |
| Z | [m] | Elévation des nœuds par rapport au niveau de référence |
| dx | [m] | Pas spatiale |
| dt | [s] | Pas du temps |
| A | [m ²] | Section de conduite |
| A_s | [m ²] | Section de la cheminée d'équilibre |
| R | [-] | Voir l'équation (I-33) |

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

L'organigramme de la **Figure II-27** résume les étapes de mise en œuvre de l'algorithme de simulation dans le cas cette configuration.

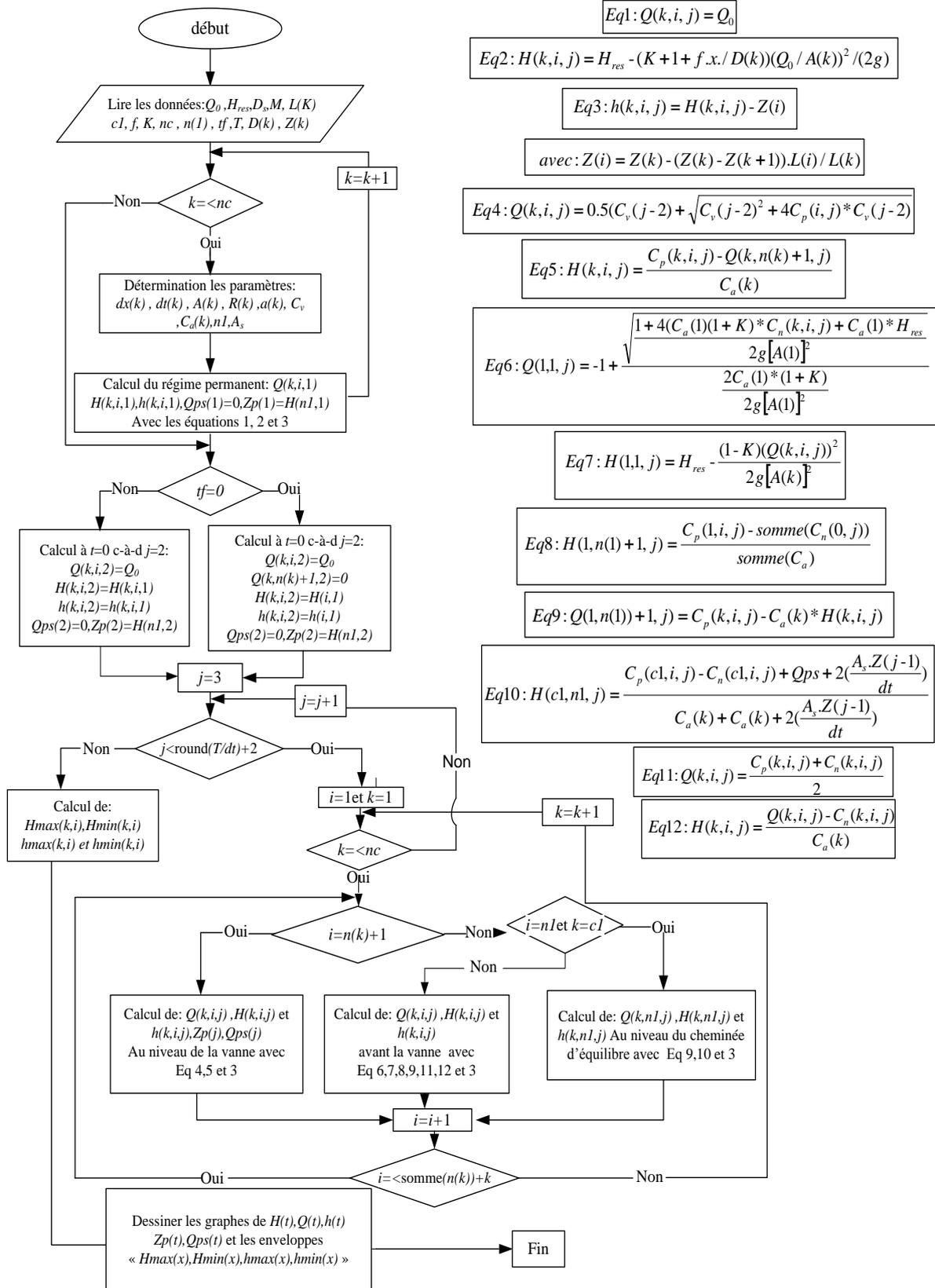


Figure II-27: Organigramme de simulation dans le cas de la configuration 6 (réservoir - multi conduites en parallèle - cheminée d'équilibre - vanne)

Chapitre 2 : Algorithmes et validations

II.4.10.1 Nouveautés de cette nouvelle version (2019)

Pour l'algorithme de la configuration 1, une comparaison entre les capacités de cette nouvelle version (2019) en contraste avec les capacités de la première version (2018) est synthétisée dans le **Tableau II-28**.

Tableau II-28: Comparaison entre les deux modèles

| Options | Algorithme Version 2018 | Algorithme Version 2019 |
|--|-------------------------|-------------------------|
| Possibilité d'intégrer le cheminée d'équilibre dans n'importe quelle conduite | Non disponible | Disponible |
| Courbe enveloppe de la variation des pressions maximales et minimales dans la conduite | Non disponible | Disponible |
| Conduite non horizontale | Non disponible | Disponible |
| Calculateur de la célérité de l'onde de pression | Non disponible | Disponible |

II.4.11 Validation pour la configuration 6 (réservoir - multi conduites en parallèle -cheminée d'équilibre – vanne)

Simulé pour une fermeture instantanée ($t_f=0$), ce cas de figure est validé en le transformant au cas de l'algorithme de la configuration 4 (réservoir - multi conduites en série - cheminée d'équilibre – vanne) qui est déjà validé. Pour ce faire, il suffit de travailler avec deux conduites parallèles liées à la conduite principale et donner une valeur proche de zéro au diamètre de l'une et donner le même diamètre à la deuxième conduite que la conduite principale.

Le **Tableau II-29** résume les valeurs des paramètres utilisés dans la simulation de la configuration 6.

Tableau II-29: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme de la configuration 6 (réservoir-multi conduites en parallèle –cheminée d'équilibre -vanne)

| Paramètre | H_{res} | Q_0 | n | L | T | a | $D[1]$ | $D[2]$ | $D[3]$ | D_s | M |
|---------------------|-----------|---------------------|-----|-------|-----|-------|--------|--------|--------|-------|------|
| Unité | [m] | [m ³ /s] | | [m] | [s] | [m/s] | [m] | [m] | [m] | [m] | [m] |
| Simulation 1 | 100 | 0.75 | 12 | 10000 | 300 | 1000 | 1 | 1 | 0 | 1 | 8000 |

II.4.11.1 Simulation sans et avec perte de charge

a) Cas 1.1 : Sans pertes de charges

Dans ce cas le frottement est négligé avec :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0$;

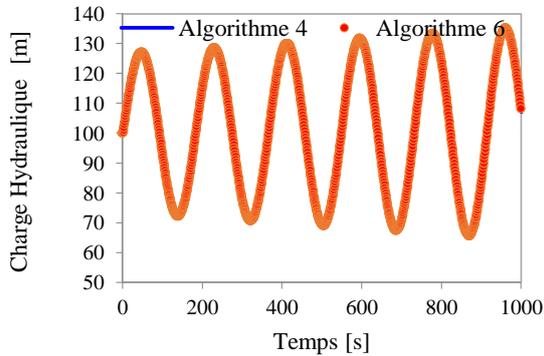
Chapitre 2 : Algorithmes et validations

- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0$.

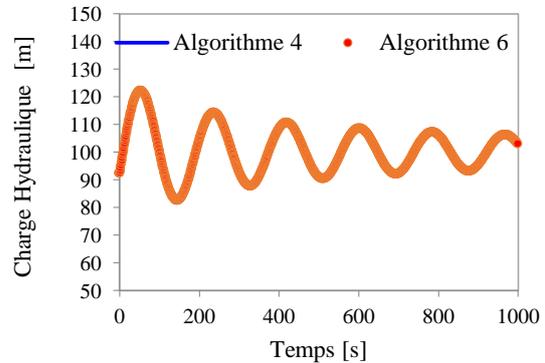
b) Cas 1.1 : Sans pertes de charges

Dans ce cas le frottement est négligé et l'on pose :

- Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite : $K=0.5$;
- Coefficient de frottement de *Darcy-Weisbach* : $f=0.02$.



(a) Sans perte de charge



(b) Avec perte de charge

Résultats au niveau de la cheminée d'équilibre

Figure II-28: Comparaisons entre les résultats de simulation de l'algorithme 4 (réservoir-multi conduites en série - vanne) et celle de l'algorithme 6 (réservoir - multi conduites en parallèle - cheminée d'équilibre - vannes) sans et avec perte de charge.

Les niveaux de performances sont représentés dans le **Tableau II-30**.

Tableau II-30: Validation de l'algorithme 6 (réservoir - multi conduites en parallèle - cheminée d'équilibre - vannes) -Paramètres statistiques pour le cas d'une fermeture instantanée sans et avec pertes de charges

| Paramètre | NSE | RSR | PBAIS [%] | Niveau Performance |
|----------------------|-----|-----|-----------|--------------------|
| Sans perte de charge | 1 | 0 | 0 | Très Bien |
| Avec perte de charge | 1 | 0 | 0 | Très Bien |

Chapitre 3 :
Simulations numériques

III. Simulations numériques

III.1 Introduction

Après validation de nos codes de calcul, nous avons effectué des simulations pour montrer la capacité de l'outil développé. Nous avons, ainsi, analysé l'influence des paramètres, tel que le coefficient de frottement « f » de *Darcy-Weisbach* et la position de la cheminée d'équilibre sur la dynamique de variation des débits et les pressions dans certains systèmes hydrauliques.

III.2 Simulations numériques

III.2.1 Influence de la variation du coefficient de frottement « f » de *Darcy-Weisbach* sur la charge hydraulique maximale et minimale

Pour étudier l'influence du coefficient « f », nous allons le faire varier en fixant les autres paramètres. Cette étude est menée en utilisant l'algorithme de la configuration 1.

Tableau III-1: Données utilisées pour l'étude de l'influence du coefficient « f ».

| Paramètre | Diamètre de la conduite | Longueur de la conduite | Charge hydraulique initiale au réservoir | Débit initial | Coefficient de perte de charge singulière | Durée de la période simulée | Nombre de segments | Célérité de l'onde de pression | Coefficient de frottement |
|-----------|-------------------------|-------------------------|--|---------------------|---|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | D | L | H_{res} | Q_0 | K | T | n | a | f |
| Unité | [m] | [m] | [m] | [m ³ /s] | [-] | [s] | [-] | [m/s] | [-] |
| Valeur | 1 | 12000 | 100 | 0.8 | 0 | 200 | 12 | 1000 | 0, 0.04, 0.09, 0.1.. |

Les courbes enveloppe de la charge hydraulique maximales et de la charge hydraulique minimale le long de la conduite pour différentes valeur de f sont représentées dans **Figure III-1** et **Figure III-2**.

Chapitre 3 : Simulations numériques

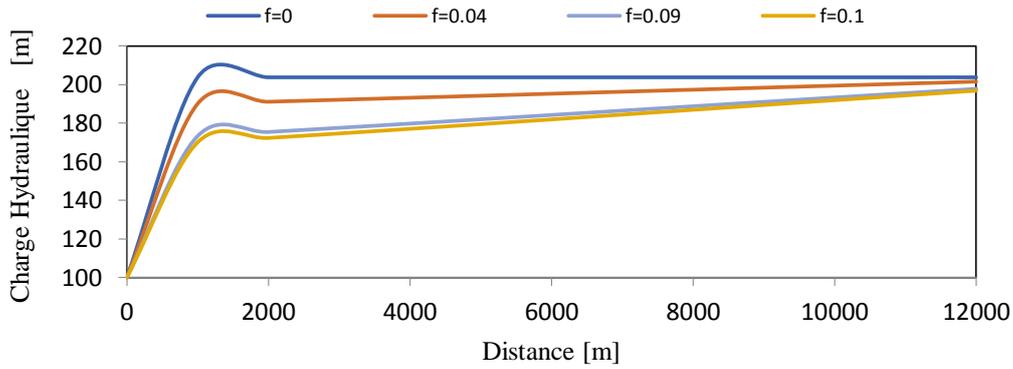


Figure III-1: Enveloppe de la charge hydraulique maximale dans la conduite pour différentes valeurs du coefficient de frottement « f ».

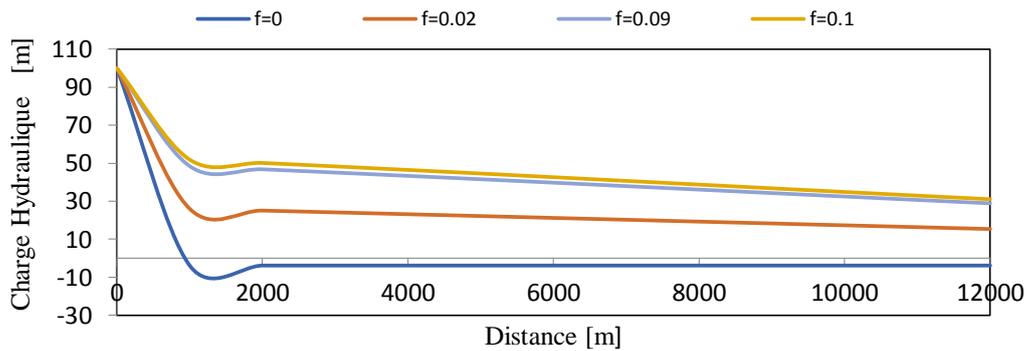


Figure III-2: Enveloppe de la charge hydraulique minimale dans la conduite pour différentes valeurs du coefficient de frottement « f ».

Figure III-1 et **Figure III-2** indiquent que l'amplitude de la charge hydraulique maximale $H_{max}(x)$ est inversement proportionnelle à f . Elle est, par contre, proportionnelle à $H_{min}(x)$.

III.2.2 Influence de la variation du coefficient de perte de charge singulières « k » sur la charge hydraulique maximale et minimale

Pour étudier l'influence du coefficient « k », nous allons le faire varier en fixant les autres paramètres. Cette étude est menée en utilisant l'algorithme de la configuration 1.

Chapitre 3 : Simulations numériques

Tableau III-2: Données utilisées pour l'étude de l'influence du coefficient « k ».

| Paramètre | Diamètre de la conduite | Longueur de la conduite | Charge hydraulique initiale au réservoir | Débit initial | Durée de la période simulée | Nombre de segments | Célérité de l'onde de pression | coefficient de frottement | Coefficient de perte de charge singulière |
|-----------|-------------------------|-------------------------|--|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------|---|
| | D | L | H_{res} | Q_0 | T | n | a | f | K |
| Unité | [m] | [m] | [m] | [m ³ /s] | [s] | [-] | [m/s] | [-] | [-] |
| Valeur | 1 | 12000 | 100 | 0.8 | 200 | 12 | 1000 | 0 | 0, 0.1, 0.5, 0.7. |

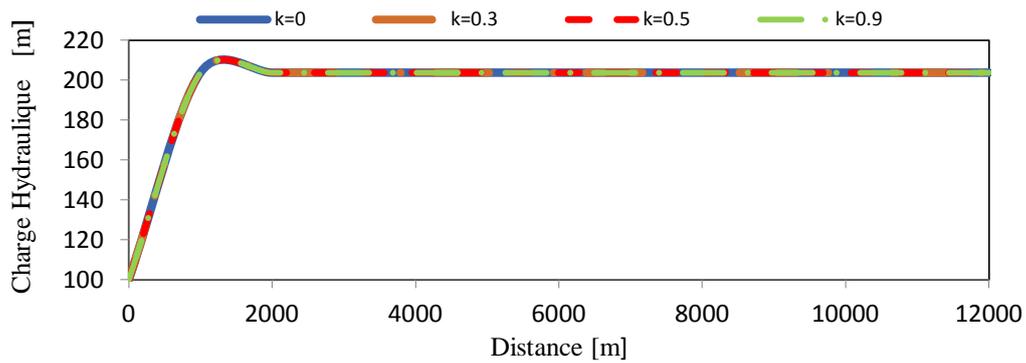


Figure III-3: Enveloppe de la charge hydraulique maximale dans la conduite pour différentes valeurs du coefficient de perte de charge singulière « k ».

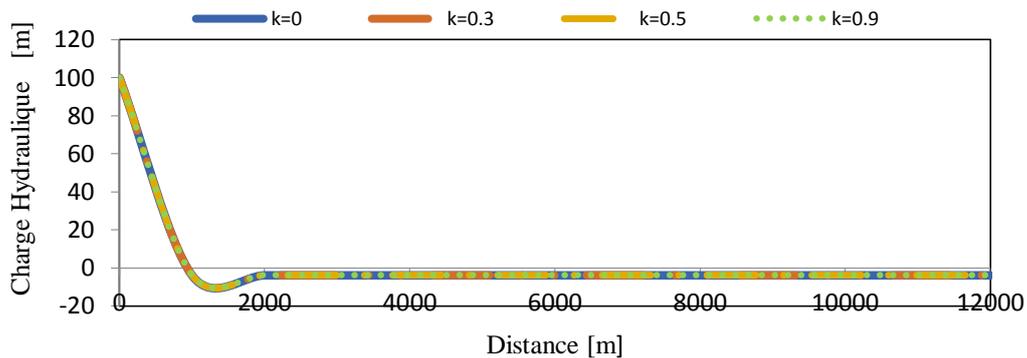


Figure III-4: Enveloppe de la charge hydraulique minimale dans la conduite pour différentes valeurs du coefficient de perte de charge singulière «k».

Figure III-3 et **Figure III-4** indiquent que le coefficient de pertes de charge singulières k n'a pratiquement aucune influence sur les charges hydrauliques maximale et minimale $H_{max}(x)$ et $H_{min}(x)$ le long de la conduite.

III.2.3 Influence de la variation de la charge hydraulique initiale du réservoir $H_{rés}$ sur la charge hydraulique maximale et minimale

Pour étudier l'influence de la charge hydraulique initiale du réservoir « $H_{rés}$ », nous allons le faire varier en fixant les autres paramètres. Cette étude est menée en utilisant l'algorithme de la configuration 1.

Tableau III-3: Paramètres utilisés pour la simulation de la variation de la charge hydraulique initiale au réservoir « $H_{rés}$ »

| Paramètre | Diamètre de la conduite | Longueur de la conduite | Charge hydraulique initiale au réservoir | Débit initial | Durée de la période simulée | Nombre de segments | Célérité de l'onde de pression | coefficient de frottement | Coefficient de perte de charge singulière |
|-----------|-------------------------|-------------------------|--|---------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------|---|
| | D | L | $H_{rés}$ | Q_0 | T | n | a | f | k |
| Unité | [m] | [m] | [m] | [m ³ /s] | [s] | [-] | [m/s] | [-] | [-] |
| Valeur | 1 | 12000 | 100, 150, 200, 250 | 0.8 | 200 | 12 | 1000 | 0 | 0 |

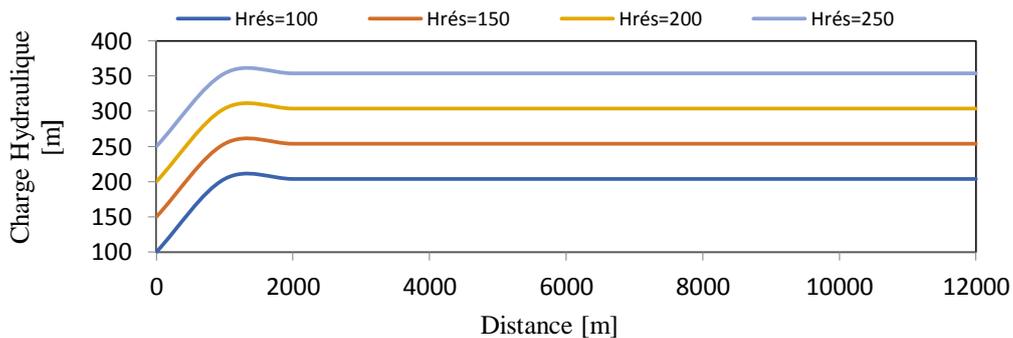


Figure III-5: Enveloppe de la charge hydraulique maximale dans la conduite pour différentes valeurs de « $H_{rés}$ ».

Chapitre 3 : Simulations numériques

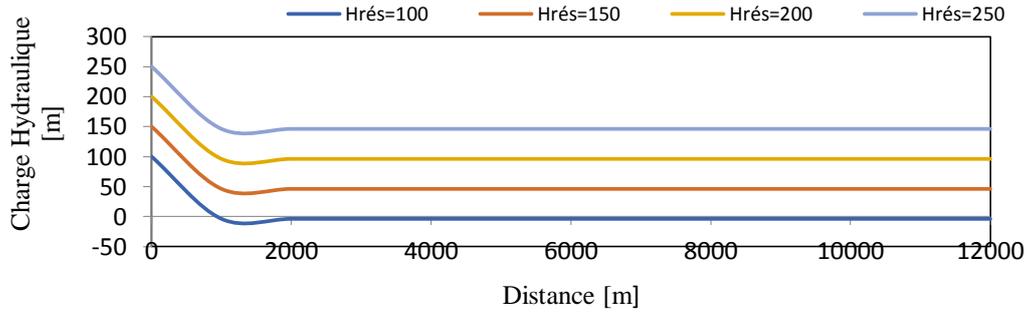


Figure III-6: Enveloppe de la Charge hydraulique minimale dans la conduite pour différentes valeurs de « Hrés ».

Les **Figure III-5** et **Figure III-6** indiquent que l'amplitude de la charge hydraulique maximale $H_{max}(x)$ est proportionnelle à $H_{rés}$. Il en est de même pour l'amplitude $H_{min}(x)$.

III.2.4 Influence de la variation de la position de la cheminée d'équilibre sur la charge hydraulique maximale et minimale

Pour étudier l'influence de la variation de la position de la cheminée, nous allons le faire varier en fixant les autres paramètres. Cette étude est menée en utilisant l'algorithme de la configuration 4.

Tableau III-4: Paramètres utilisés pour la simulation de la variation de la position de la cheminée d'équilibre.

| | | Conduite 1 | Conduite 2 | Conduite 3 |
|--|--------------|------------|------------|------------|
| Diamètre de la conduite | $D[m]$ | 1 | 1 | 1 |
| Longueur de la conduite | $L[m]$ | 1000 | 1000 | 1000 |
| Coefficient de perte de la charge linéaire | $f[-]$ | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| Coefficient de perte de la charge singulière | $k[-]$ | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Célérité de l'onde de pression | $a[m^2/s]$ | 1000 | 1000 | 1000 |
| Nombre de segments | $n[-]$ | 5 | 5 | 5 |
| Charge hydraulique initiale au réservoir | $H_{rés}[m]$ | 100 | - | - |
| Débit initial | $Q_0[m^3/s]$ | 0.8 | - | - |
| Diamètre de la cheminée d'équilibre | $D_s[m]$ | 2 | | |
| Les positions de la cheminée | | à 800 m | à 1800m | à 2800m. |

Chapitre 3 : Simulations numériques

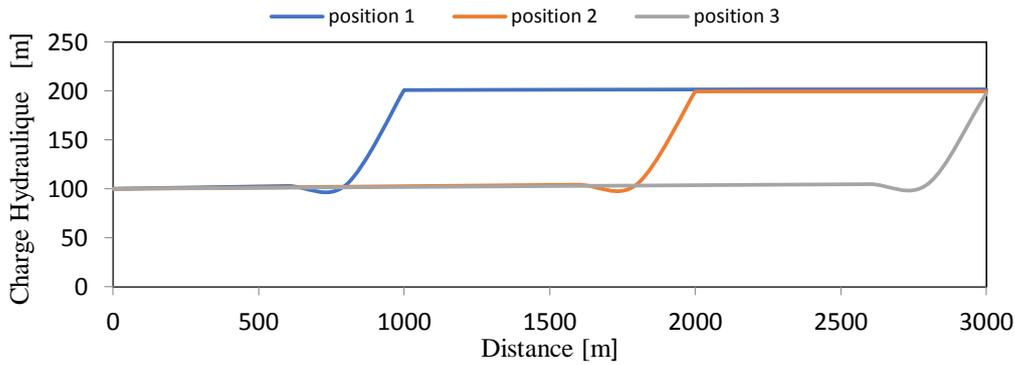


Figure III-7: Enveloppe de la charge hydraulique maximale dans la conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre

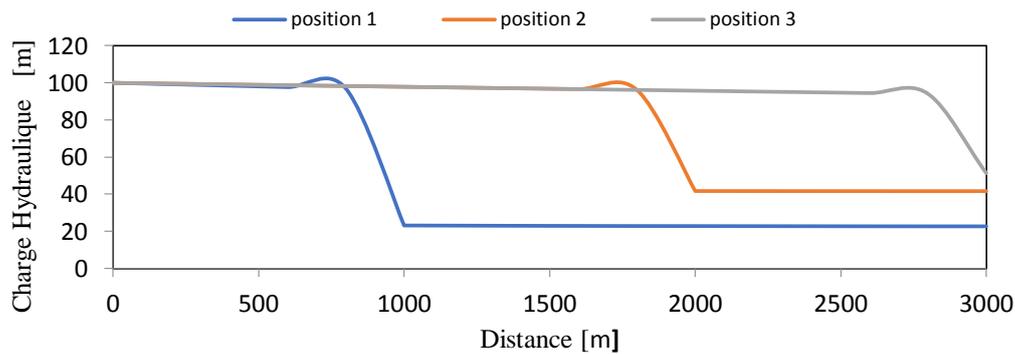


Figure III-8: Enveloppe de la charge hydraulique minimale dans la conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre

Les **Figure III-7** et **Figure III-8** indiquent que l'amplitude de la charge hydraulique maximale $H_{max}(x)$ est directement proportionnelle à la diminution de la distance entre la cheminée et la vanne. Il en est de même pour $H_{min}(x)$. Enfin, on peut voir que la surpression ou la dépression causée par le coup de bélier se fait plus rapidement que la distance entre la cheminée d'équilibre et la vanne est plus petite.

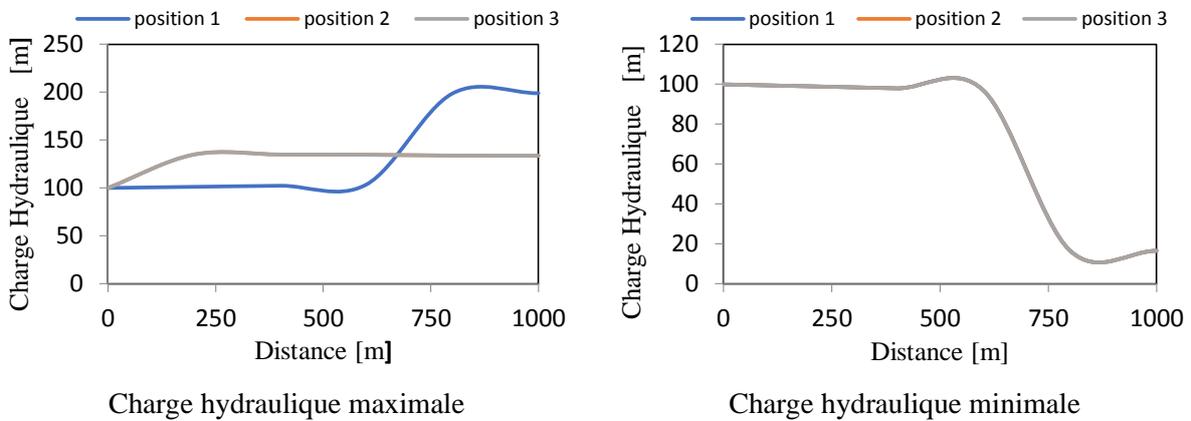
III.2.5 Influence de la variation de la position de la cheminée d'équilibre sur la charge hydraulique maximale et minimale

Pour étudier l'influence de la variation de la position de la cheminée, nous allons le faire varier en fixant les autres paramètres. Cette étude est menée en utilisant l'algorithme de la configuration 6.

Chapitre 3 : Simulations numériques

Tableau III-5 : Paramètres utilisés pour la simulation de la variation de la position de la cheminée d'équilibre

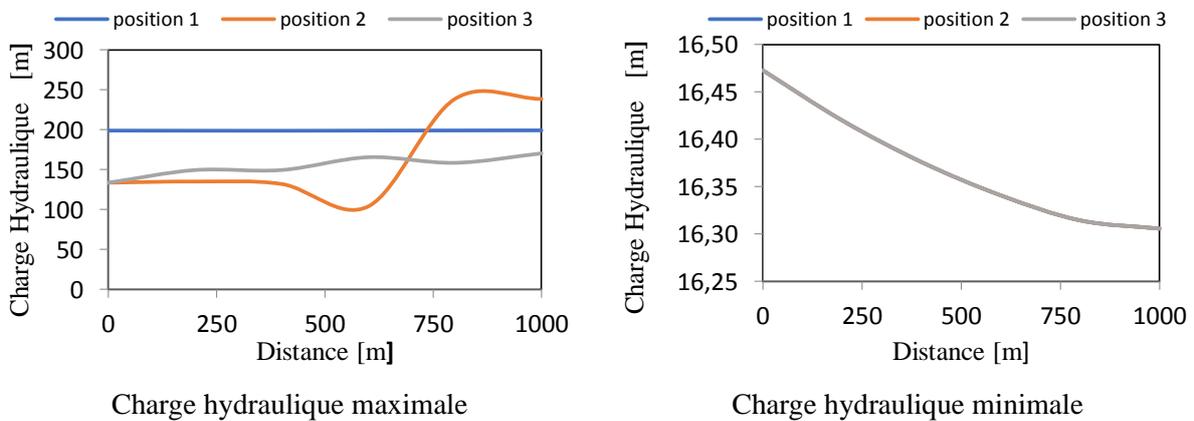
| | | Conduite 1 | Conduite 2 | Conduite 3 |
|---|---------------------------|------------|------------|------------|
| Diamètre de la conduite | D [m] | 1 | 1 | 1 |
| Longueur de la conduite | L [m] | 1000 | 1000 | 1000 |
| Coefficient de perte de charge linéaire | f [-] | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| Coefficient de perte de charge singulière | k [-] | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Célérité de l'onde de pression | a [m ² /s] | 1000 | 1000 | 1000 |
| Nombre de segments | n [-] | 5 | 5 | 5 |
| Charge hydraulique initiale au réservoir | $H_{rés}$ [m] | 100 | - | - |
| Débit initial | Q_0 [m ³ /s] | 0.8 | - | - |
| Diamètre de cheminée d'équilibre | D_s [m] | 2 | | |
| Les positions de la cheminée | | à 600 m | à 1600m | à 2600m. |



Charge hydraulique maximale

Charge hydraulique minimale

Figure III-9: Enveloppes des charges hydrauliques maximales et minimales dans la 1er conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre



Charge hydraulique maximale

Charge hydraulique minimale

Figure III-10: Enveloppes des charges hydrauliques maximale et minimale dans la 2e conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre

Chapitre 3 : Simulations numériques

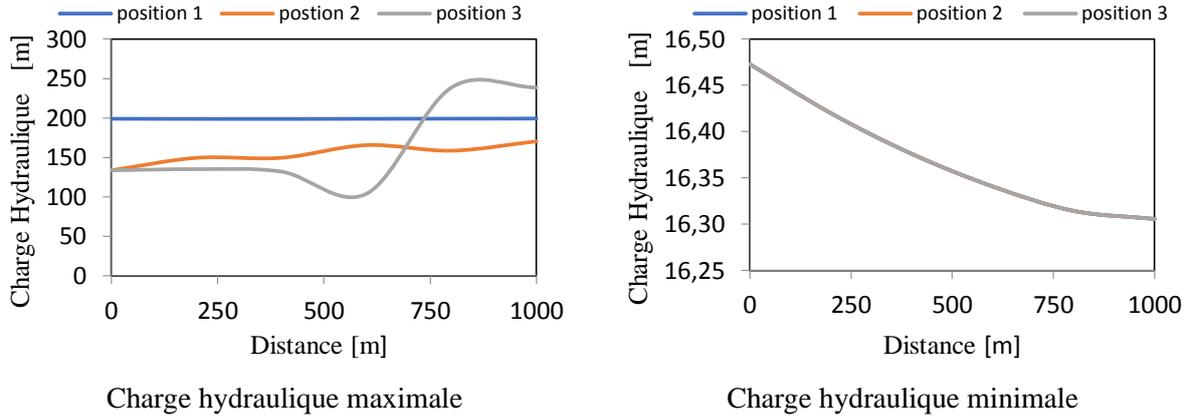


Figure III-11: Enveloppes des charges hydrauliques maximale et minimale dans la 3e conduite pour chaque position de la cheminée d'équilibre

Les **Figure III-10** et **Figure III-11** indiquent que l'amplitude de la charge hydraulique maximale $H_{max}(x)$ est directement proportionnelle à la diminution de la distance entre la cheminée et la vanne (aspect tout à fait attendu). Il n'influence pas la charge hydraulique minimale $H_{min}(x)$. Enfin, on peut dire que la meilleure position de la cheminée d'équilibre pour éviter la surpression ou la dépression causée par le coup de bélier est le plus proche de la vanne.

III.3 Conclusion

Les schémas ainsi que les résultats de la validation prouvent la fiabilité du simulateur développé a traité les configurations couvertes par l'outil. Les nouvelles capacités introduites dans cette version augmentent l'utilité et la flexibilité du simulateur pour des utilisations dans le dimensionnement de réseaux hydrauliques avec des géométries et configurations complexes.

Conclusion générale et perspectives

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à l'étude numérique des écoulements non permanents en charge. Ces régimes transitoires peuvent être l'origine d'un phénomène sévère, dit phénomène du coup de bélier qui peut représenter un danger potentiel pour toute installation hydraulique.

Dans cette étude, on s'est basé sur la méthode des caractéristiques pour le calcul des variations de pression et de débit causées par le coup de bélier dans quelques systèmes hydrauliques typiques :

- réservoir-conduite-vanne,
- réservoir-multi conduites en série (jonction)-vanne,
- réservoir-multi conduites en parallèle (branchement)-vanne, avec possibilité d'intégrer la cheminée d'équilibre dans chacun de ces cas.

Pour les besoins de cette étude, un simulateur du coup de bélier, basé sur la méthode des caractéristiques, est conçu sous environnement Python 3.7 (open source). Les différents algorithmes, mis en œuvre pour le développement de ce logiciel, sont validés en comparant les résultats du simulateur avec différents jeux de données de référence. Par conséquent, nous pouvons dire que notre logiciel est apte à traiter, de façon fiable, le phénomène du coup de bélier dans les cas de configurations sus – cités.

En perspectives et pour l'amélioration du simulateur, nous suggérons de :

- utiliser d'autres approches (méthode des volumes finis, différences finis, élément finis, etc.) pour traiter le phénomène du coup de bélier;
- utiliser d'autres éléments de protection tel que (réservoir d'air, soupapes, etc.);
- intégrer des pompes dans les systèmes de simulations;
- traiter d'autres systèmes comme : réservoir-conduites multi jonctions-multi branchements-vanne;
- améliorer l'interface graphique déjà conçue.

Bibliographie

- Alili, S. & Bessaci, K. Analyse d'un écoulement en charge non stationnaire par la méthode des caractéristiques: Water Hammer. Mémoire de projet fin d'études. Alger: Département Hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique: 1993.
- Allievi, L. Teoria del colpo d'ariete. Milan. English translation by Halmos EE 1929 "The Theory of Waterhammer" Trans. ASME: 1913.
- Amara, L. Modélisation et simulation numérique des écoulements transitoires en charge par la méthode des volumes finis. Mémoire de Magister en hydraulique. Biskra: Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- Bergeron, L. Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité, Paris, Dunod : 1st ed, 1950.
- Boukhemacha, M.A. Notes de cours hydraulique transitoire. Notes de cours, Alger, ENP : 2018.
- Chaudhry, M.H. Applied Hydraulic Transients. Thrid ed. New York: Springer, 2014.
- Craya, A. Calcul graphique des régimes variables dans les canaux. La Houille Blanche. 1946, vol .2. pp.117-30.
- Halliwell, A.R. Velocity of Water-Hammer wave in an Elastic pipe. Journal of the Hydraulics Division-Engineering Database-.1963, vol 89(4). pp.1-21.
- Issad, M. & Mazouni, D.E. Déveleppement d'outils informatiques pour le génie hydraulique : simulateur du coup bélier. Mémoire de projet fin d'études. Alger: Département Hydraulique, Ecole National Polytechnique, 2018.
- Jaeger, C. Fluid transient in hydro-electric engineering practrice. 1st ed. London: Glasgow, Blackie, 1977.
- Joukowski, N.E. Memoirs of the imperial academy soci-ety of st.Petersburg. Water Works Assoc. 1898. vol 9(5). pp.341-424. Russian translated by O Simin 1904.
- Massau, J. Mémoire sur l'intégration graphique des équations aux dérivées partielles. Americana: Mons, G. Delporte, 1899.
- Moriasi, D.N. et al. Model Evaluation Guide Lines For Systematic. Transactions of the ASABE. 2007. vol 50(3). pp. 885-900.
- Parmakian, J. Water hammer analysis. 2nd ed. New York: Dover Publications, 1963.
- Streeter, V. & Wylie, E. Fluid transients in systems. 1st ed. Pearson, 1993.

Tijsseling, A.S. & Anderson, A. The Joukowsky equation for fluids and solids. *Journal of Scientific Computing*. 2006. vol 608. pp. 355-57.

Zhang, B. Wan, W. & Shi, M. Experimental and Numerical Simulation of Water Hammer in Gravitational Pipe Flow with Continuous Air Entrainment. *Water*. 2018 . vol 10(7). pp.928-43. doi:10.3390/w10070928.

Annexe

Annexe

Manuel d'utilisation de l'application

« Water Hammer Simulator »

1. Introduction

« Water Hammer Simulator » est une application conçue pour simuler la dynamique de variation des pressions et le débit dans des systèmes hydraulique sous l'effet du coup de bélier, avec sans dispositifs de protection (anti-bélier).

2. Etapes de simulation

Lancer l'application. L'interface principale s'affiche (**Figure A.1**).

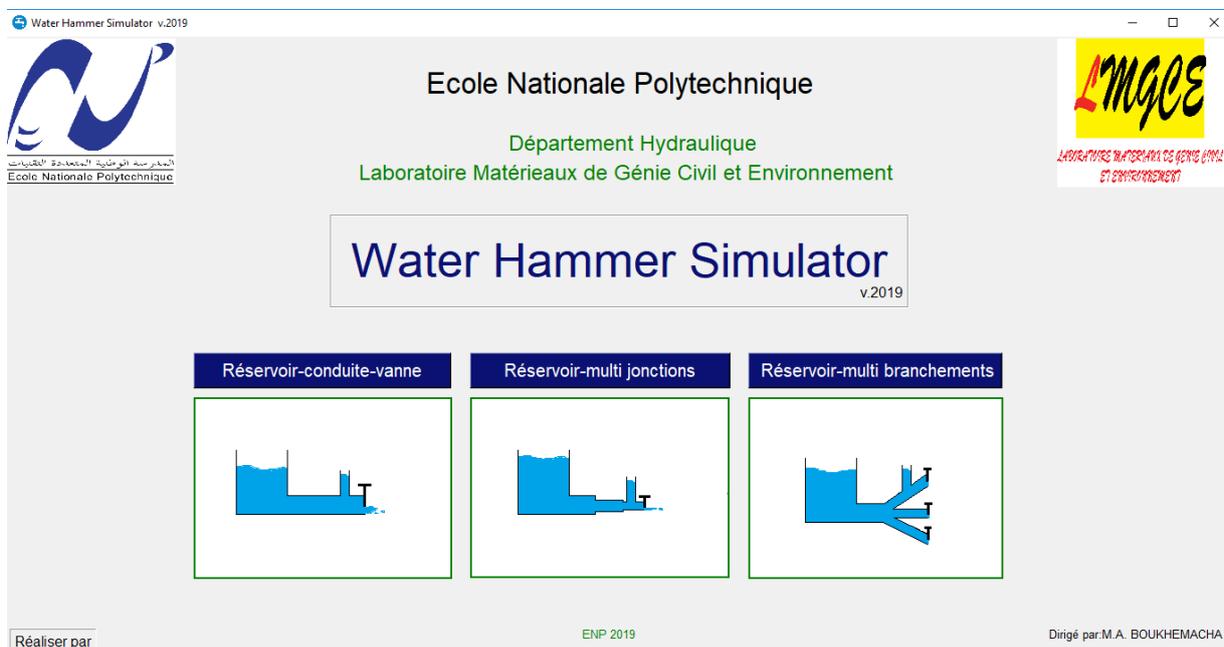


Figure A.1 : Fenêtre principale de l'application

Cette fenêtre propose trois cas de figure à choisir.

2.1 Réservoir - conduite - vanne

Le système est composé d'un réservoir, d'une conduite et d'une vanne.

Clic sur le bouton **Réservoir-conduite-vanne** affiche la fenêtre représentée dans la

Figure A.2 : Cette fenêtre propose deux options :

- Système : sans cheminée d'équilibre,

- Système : avec cheminée d'équilibre.

Avant de choisir le cas de simulation, il est recommandé de voir les paramètres des schémas représentés dans la **Figure A.2**.

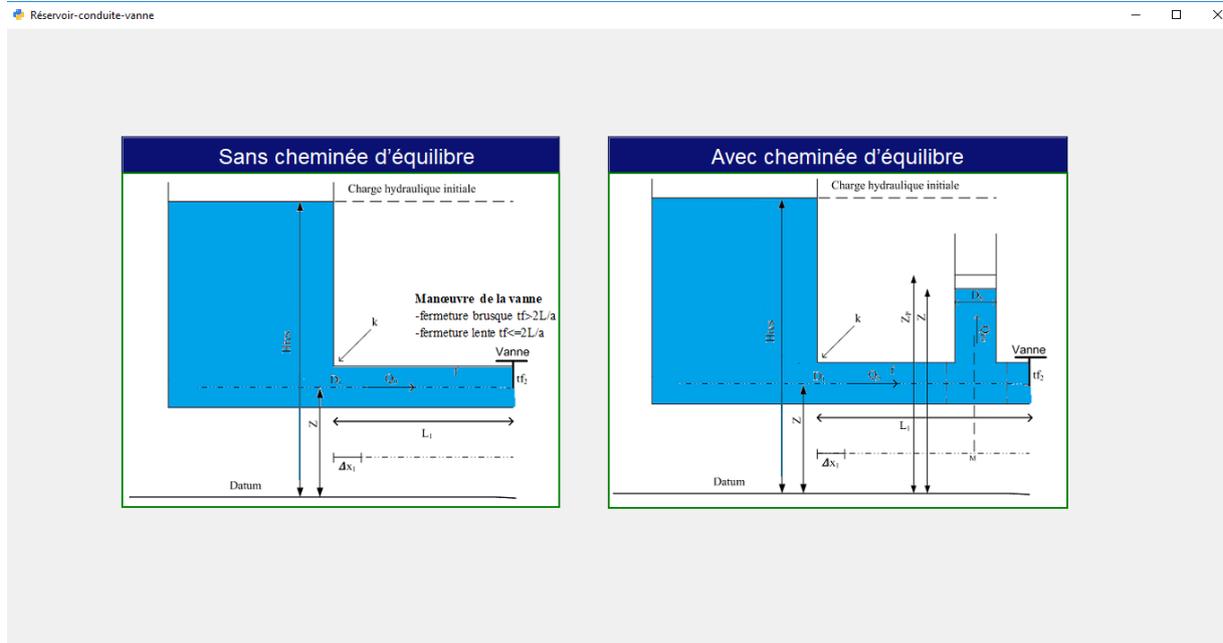


Figure A.2 : Configuration « réservoir - conduite – vanne » sans et avec cheminée d'équilibre.

2.1.1 Système sans cheminée d'équilibre

L'interface représentée dans la **Figure A.3** apparaît. L'utilisateur doit remplir les champs des paramètres :

- Clic sur **Simuler** donne les résultats représentés par les graphes de la **Figure A.3**.
- Clic sur le bouton **Célérité de l'onde de pression a[m/s]** dirige vers un calculateur (nouvelle fenêtre) permettant de calculer la célérité de l'onde de pression pour différents types de conduites et système de fixation. Cette fenêtre est bien détaillée ci-dessous.
- Clic sur menu déroulant **Fichier** affiche les commandes suivantes:
 - Réinitialiser**: réinitialise la fenêtre graphique pour effectuer une nouvelle simulation.
 - Enregistrer**: pour sauvegarder les résultats dans un fichier Excel.
 - Imprimer**: pour imprimer les résultats ou graphes de l'interface.
 - Aide**: pour accéder au manuel d'utilisation de l'application dans un fichier Word.

Quitter: pour quitter l'application.

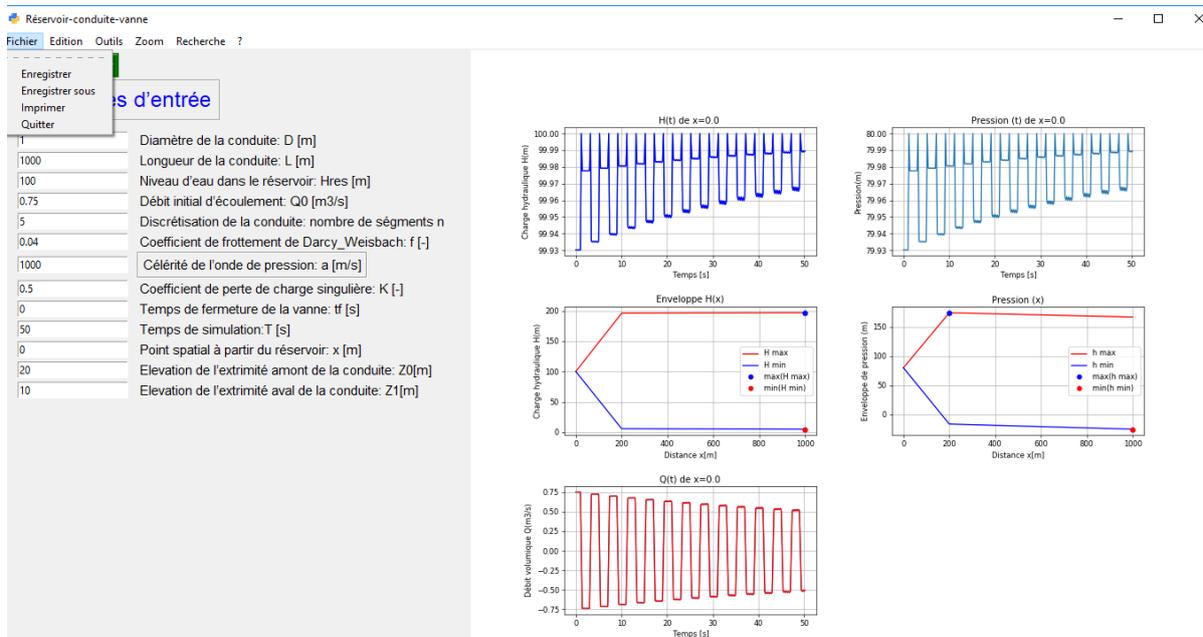


Figure A.3 : Interface d'entrée de données et sortie de résultats

2.2 Réservoir - multi jonctions - vanne

Le système est composé d'un réservoir, d'un nombre de conduites en série au choix de l'utilisateur et enfin d'une vanne.

- Clic sur le bouton **Réservoir – conduite - vanne** ouvre une fenêtre et propose deux options :
 - Système sans cheminée d'équilibre,
 - Système avec cheminée d'équilibre.

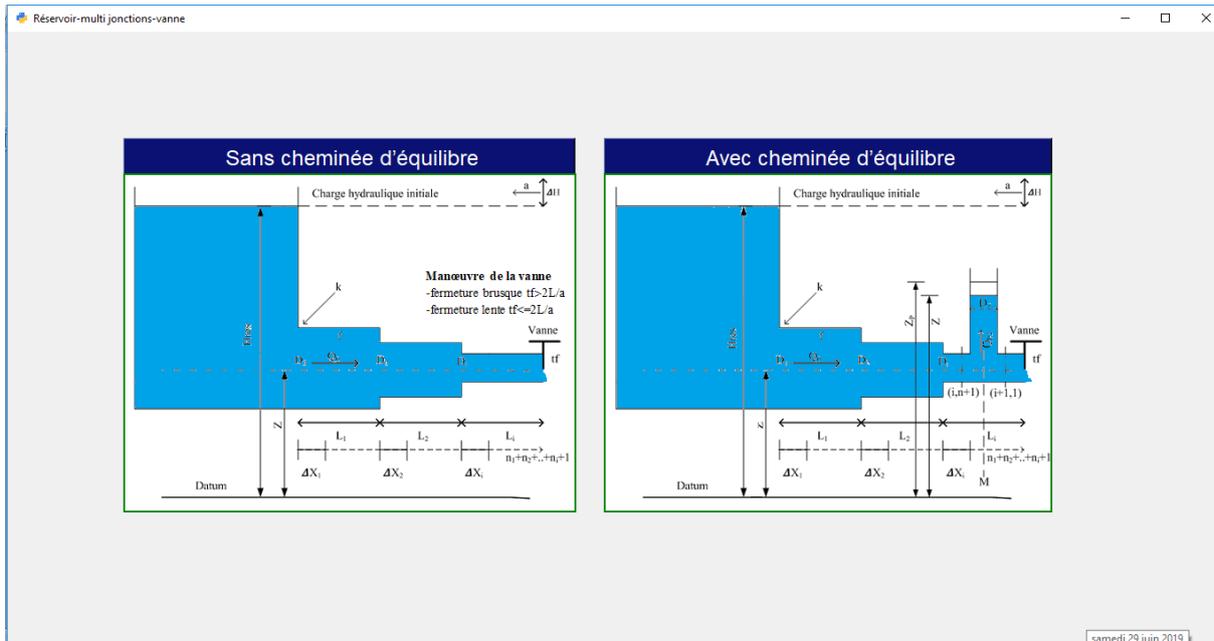


Figure A.4 : Interface « Réservoir - multi jonctions séries - vanne » sans et avec cheminée d'équilibre

2.2.1 Système sans cheminée d'équilibre

L'utilisateur doit remplir les champs des paramètres. Dans le champ **Nombre de conduites**, il doit préciser le nombre de conduites :

- Clic sur **Entrer** affiche un autre champ à remplir.
- Clic sur **Simuler** donne des résultats sous forme de graphes.
-

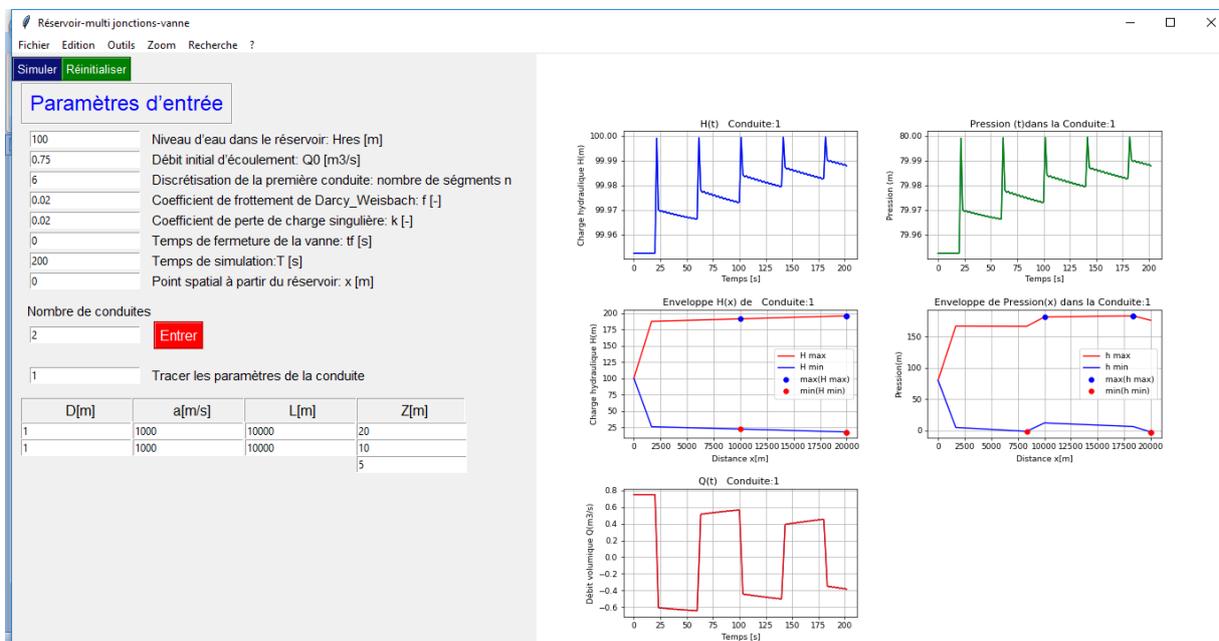


Figure A.5 : Interface d'entrée de données et sortie de résultats.

2.3 Réservoir-multi branchements

Le système est composé d'un réservoir, d'un nombre de conduites en parallèle au choix de l'utilisateur et enfin une vanne.

- Clic sur le bouton **Réservoir - conduites - vanne** affiche une fenêtre qui propose deux choix :
 - Système sans cheminée d'équilibre,
 - Système avec cheminée d'équilibre.

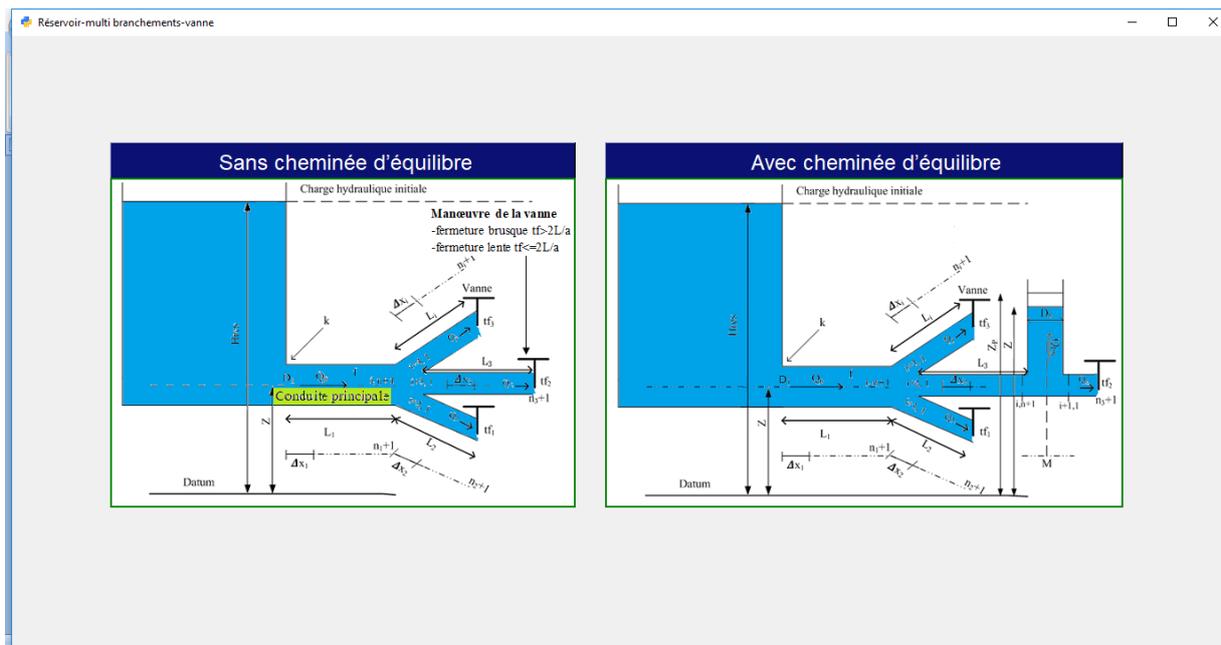


Figure A.6 : Interface « Réservoir - multi jonctions parallèles - vannes » sans et avec cheminée d'équilibre.

2.3.1 Système sans cheminée d'équilibre

La fenêtre ci-dessous s'affiche. On doit remplir les champs de paramètres indiqués dans la **Figure A.7**. L'utilisateur doit ensuite préciser le nombre de conduites.

- Clic sur le bouton **Entrer**, un autre champ à remplir apparaît.
- Clic sur **Simuler** donne les résultats représentés par des graphes (**Figure A.7**).

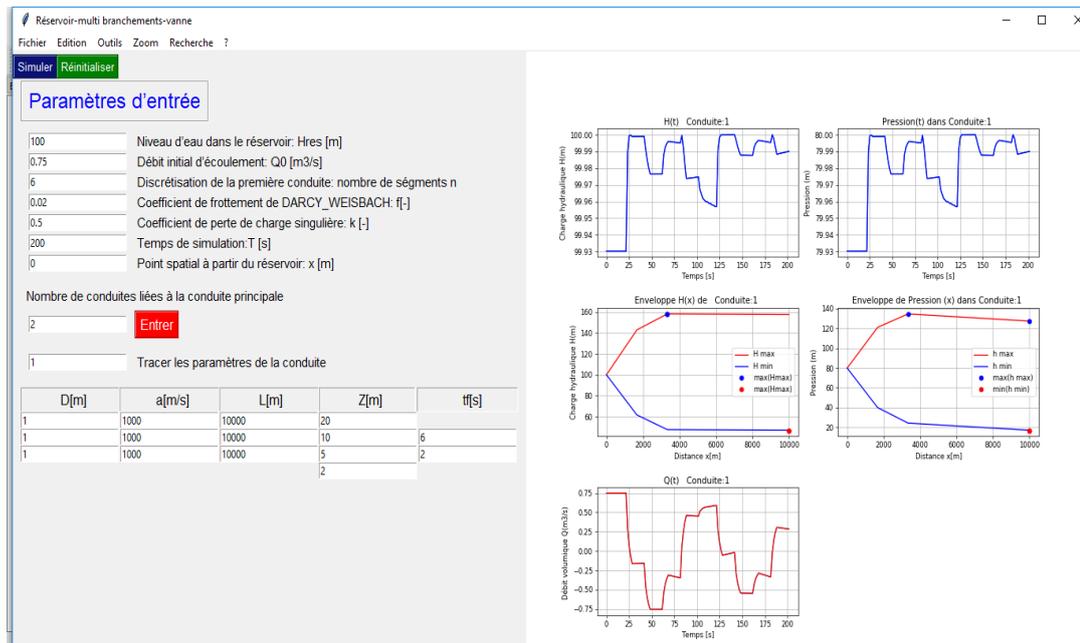


Figure A.7 : Interface d'entrée de données et sortie de résultats.

Remarque

Dans les trois cas (**Réservoir-conduite-vanne**, **Réservoir-multi jonctions** ou bien **Réservoir-multi branchements**), seul le premier cas (**système sans cheminée d'équilibre**) est expliqué dans ce menu d'aide car la même chose pour le deuxième cas, la même interface s'affichera mais avec des champs supplémentaires à remplir correspondant aux données de la cheminée d'équilibre.

3. Calculateur de célérité de l'onde de pression

Ce programme est conçu pour aider les utilisateurs à calculer facilement la célérité de l'onde de pression pour tous types de conduites et systèmes de fixation afin d'utiliser sa valeur dans le programme principal.

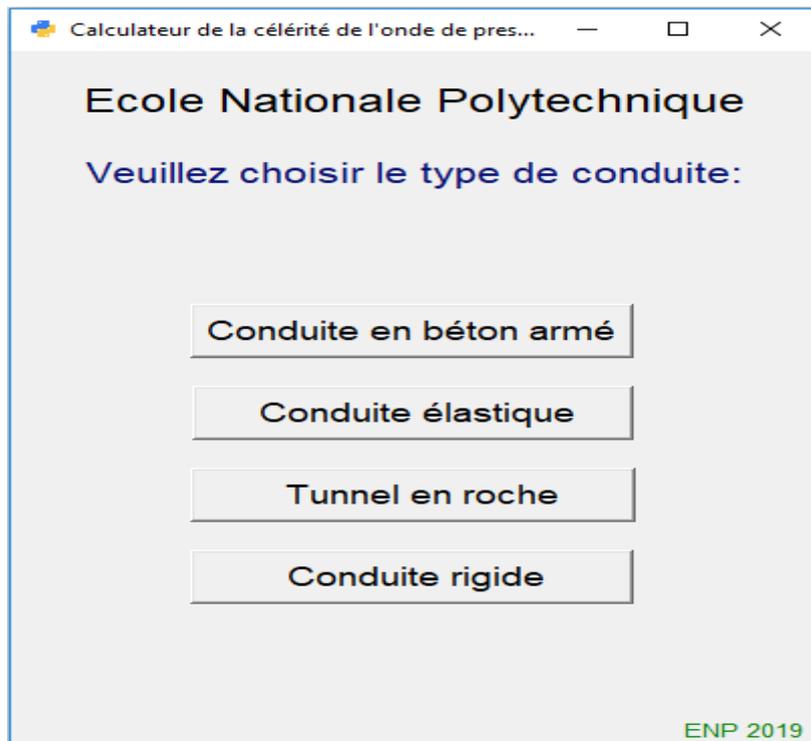


Figure A.8 : Interface « choix du type de conduites »

L'interface de la fenêtre principale (**Figure A.8**) propose quatre choix concernant les types de conduite.

4. Tunnel en roche

Deux choix sont prévus par l'application.

4.1 Tunnel sans revêtement

Remplir les champs de paramètres ci-dessous :

- Clic sur le bouton **Entrer** vous donne le résultat (la valeur de la célérité de l'onde de pression)

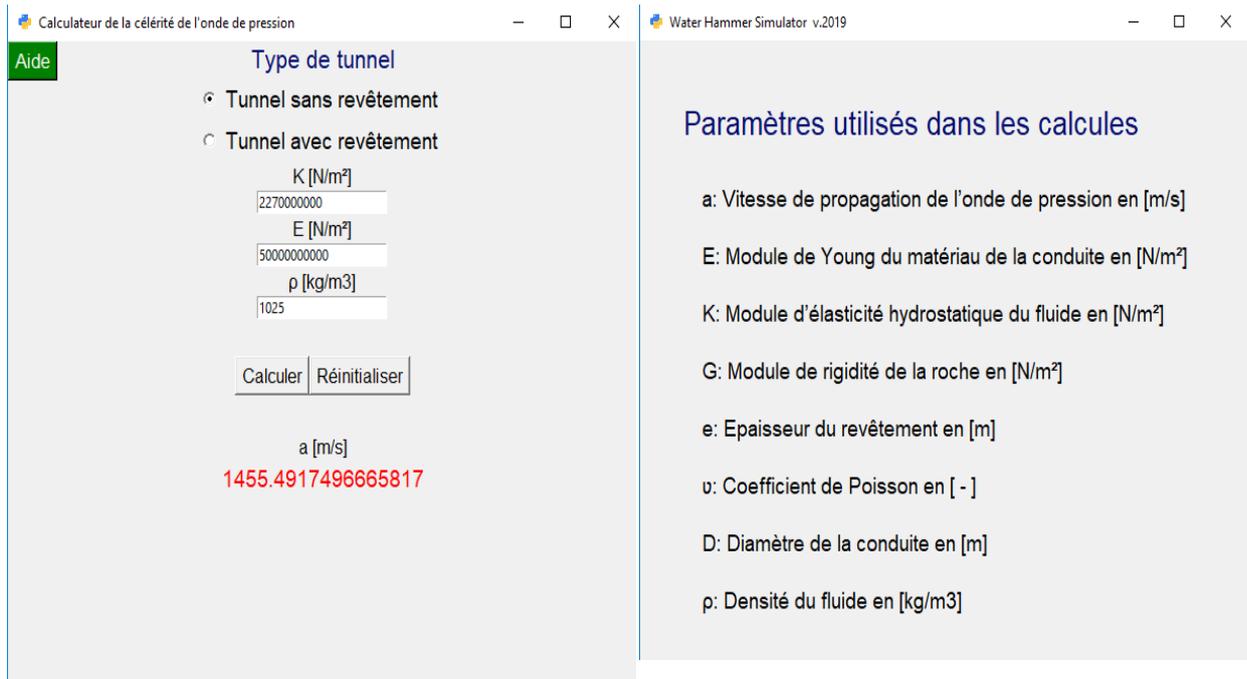


Figure A.9: Interface « choix du type de tunnel »

Figure A.10 : Interface « paramètres utilisés »

Au début, il est recommandé à l'utilisateur de cliquer sur le bouton **Aide** afin de voir la liste des symboles de tous les paramètres utilisés dans le programme (**Figure A.10**).

4.2 Tunnel avec revêtement

- Clic sur le bouton **Réinitialiser** pour supprimer l'historique.
- Clic sur le bouton **Tunnel avec revêtement** presque la même fenêtre que précédemment s'affiche avec des champs de paramètres supplémentaires à remplir.

5. Conduite en béton armé

Après avoir choisi ce type de conduite, trois possibilités concernant le type de fixation sont prévus dans la **Figure A.11**.

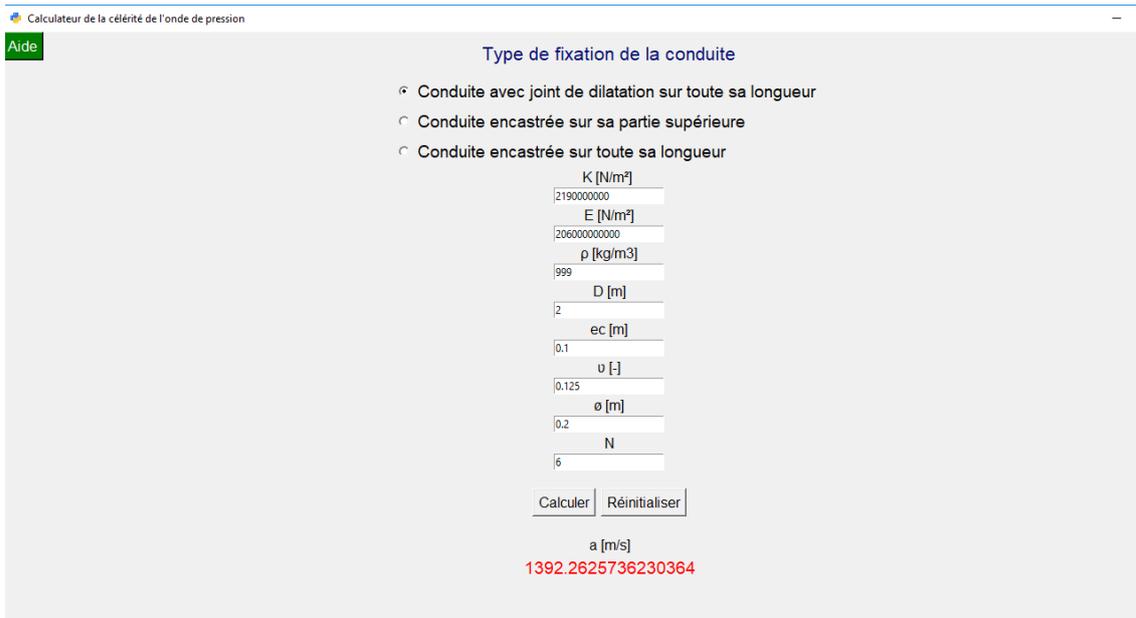


Figure A.11: Interface « choix du type de fixation de la conduite en béton »

A titre d'exemple, prenons le premier cas « **Conduite avec joint de dilatation sur toute sa longueur** ». Toujours le même principe remplir les différents champs.

- Clic sur **Calculer** pour obtenir les résultats,
- Clic sur **Réinitialiser** pour changer le type de fixation.

6. Conduite plastique

L'interface traite toutes les conduites plastiques et offre la possibilité de choisir trois types de fixation.

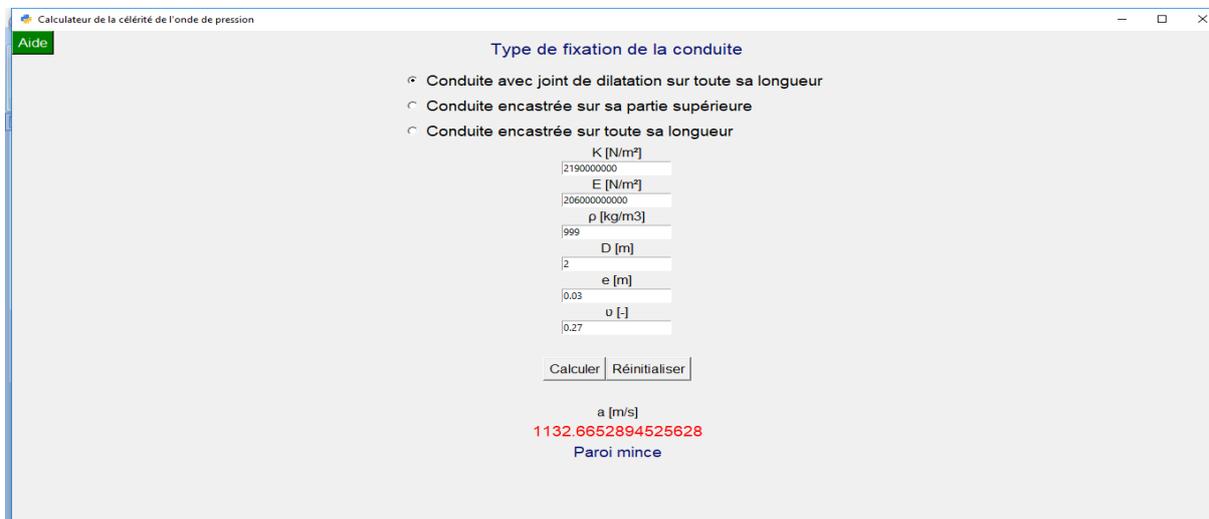


Figure A.12: Interface « choix du type de fixation de la conduite en plastique »

Après avoir rempli les champs de paramètres d'entrée :

- Clic sur **Calculer** donne la valeur de la célérité de l'onde de pression et le type de parois (mince ou épaisse).

7. Conduite rigide

Ce cas est simple seulement deux champs de paramètres à remplir sont nécessaires.

- Clic **Calculer** donne le résultat.

Calculateur de la célérité de l'onde de pres... — □ ×

Aide

K [N/m²]
1500000000

ρ [kg/m³]
900

Calculer

a [m/s]
1290.9944487358057

Figure A.13: Interface « calcul dans le cas d'une conduite rigide »

Remarques

-Dans les deux choix de type de conduite (**Conduite en béton armé** et **Conduite rigide**), la différence entre les trois types de fixation de la conduite (**Conduite avec joint de dilatation sur toute sa longueur**, **Conduite encastrée sur sa partie supérieure**, **Conduite encastrée sur toute sa longueur**) est dans le calcul du paramètre adimensionnel ψ calculé automatiquement dans le programme.

-Si la position indiquée par «X» pour l'affichage des résultats de la simulation ne correspond pas à celle de la discrétisation, elle est automatiquement arrondie à la plus proche position de discrétisation.

Conclusion

Ce guide d'utilisation explique comment utiliser l'outil informatique développé pour chaque cas simulé. Les erreurs et les valeurs aberrantes ne sont pas signalées comme erreur. Donc, il est nécessaire de spécifier des paramètres d'entrée cohérents.