

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE MATERIAUX DE GENIE 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

Dirigé par:

Mr. BOUKHEMACHA Mohamed Amine

Réalisé par :

ISSAD Mustapha

MAZOUNI Djamel Eddine

Présenté et soutenu publiquement le (04/07/2018)

Composition du Jury :

Présidente	Mme. Saadia BENMAMAR	Prof	ENP Alger
Rapporteur/ Encadreur	Mr. Mohamed Amine BOUKHEMACHA	MCA	ENP Alger
Examineur	Mr. Omar BELHADJ	MAA	ENP Alger

ENP 2018

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

Ecole Nationale Polytechnique



LABORATOIRE MATERIAUX DE GENIE 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

Dirigé par:

Mr. BOUKHEMACHA Mohamed Amine

Réalisé par :

ISSAD Mustapha

MAZOUNI Djamel Eddine

Présenté et soutenu publiquement le (04/07/2018)

Composition du Jury :

Présidente

Mme. Saadia BENMAMAR

Prof ENP Alger

Rapporteur/ Encadreur

Mr. Mohamed Amine BOUKHEMACHA

MCA ENP Alger

Examineur

Mr. Omar BELHADJ

MAA ENP Alger

Dédicace

Je dédie Ce travail

A mes très chers parents

Pour tout ce que vous m'avez donné, pour tout ce que

Vous avez fait pour moi

A mes chers frères et sœur

Aucun mot ne pourra décrire vos dévouements et vos sacrifices.

*A tous mes amis, En témoignage de l'amitié sincère qui nous a
liées et des bons moments passés ensemble. Je vous dédie ce
travail en vous*

Souhaitant un avenir radieux et plein de bonnes promesses.

*A tous les gens qui ont cru en moi et qui me donnent l'envie
d'aller en avant.*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce

Projet soit possible, je vous dis merci.

ISSAD MUSTAPHA

Dédicace

Je dédié ce modeste travail à :

Mes chers parents pour leur patience, leur amour, leur

Soutien et leur Encouragements.

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenu tout au long

De ce projet et bien sur

A mes chère frères et sœurs.

A toute ma famille, et mes amis,

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que

Ce projet soit possible, je vous dis merci.

MAZOUNI DJAMAL EDDINE

Remerciements

Avant Tout, Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage pour mener à bien ce travail.

*Nous tenons à remercier vivement notre encadreur **Mr. Boukhemacha M.A.** pour avoir accepté de diriger ce travail et pour ses précieux conseils durant toute la période de ce travail et sa disponibilité.*

Nous remercions l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation ainsi tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail.

Nos vifs remerciements s'adressent à tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

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

إن التغيرات المفاجئة للجريان الدائم في أنبوب مغلق غالباً ما تسبب تغيرات في الضغط وتؤدي إلى ما يسمى بالجريان الانتقالي المضغوط. من الناحية العملية كنا مهتمين بشكل أساسي بتقدير الضغوط التي تسببها هذه الجريانات نضر الأضرار المحتملة التي تسببها للأنابيب والمعدات الهيدروليكية. وقد أجريت دراسة لتحديد تأثير مختلف المتغيرات على الضغط، لذلك قمنا بإعداد برنامج كمبيوتر و الذي يمكننا من محاكاة الجريان الانتقالي لمختلف الشروط النهائية.

الكلمات المفتاحية: الجريان الإنتقالي المضغوط, مطرقة مائية, طريقة الميزة.

ABSTRACT

The sudden changes of the flow regime of a fluid in a pipe often lead to variations in the pressure causing what is called the transient flows in pressurized pipes (water hammer). From the practical point of view, we were interested in estimating the pressures caused by such flows and the possible damages caused in pipes and hydraulic equipment. The study has been carried out to determine the influence of the various parameters on such a charge, to do so a computer tool based on the method of characteristics has been developed. The tool can simulate the transient regime for several typical hydraulic systems.

KEY WORDS: Transient flow in pressurized pipes, Water hammer, method of characteristics.

RESUME

Les changements brusques du régime d'écoulement d'un fluide dans une conduite entraînent souvent des variations de pressions et donnent naissance à ce qu'on appelle les écoulements transitoires en charge (coup de bélier). Du point de vue pratique, on s'est surtout intéressé à l'estimation des pressions provoquées par ces écoulements à cause des dommages possibles qu'elles provoquent dans les canalisations et le matériel hydraulique. Cette étude a été réalisée afin de déterminer l'influence des différents paramètres sur cette charge. Pour cela un outil informatique basé sur la méthode des caractéristiques a été élaboré. Cet outil permet de simuler le régime transitoire dans quelque système hydraulique typique.

MOTS-CLES : Ecoulement transitoire en charge, Coup de bélier, méthode des caractéristiques.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale	13
I. Etude bibliographique	15
I.1 Coup de bélier.....	15
I.1.1 Définition.....	15
I.1.2 Causes du coup de bélier.....	15
I.1.3 Risques dus aux coups de bélier.....	15
I.1.4 Équations de base de coup de bélier (équation de Joukowsky)	16
I.1.5 Réflexion et transmission des ondes	18
I.2 Equations des écoulements transitoires.....	21
I.2.2 Célérité d'onde de pression.....	22
I.3 Calcul numérique du coup de bélier	24
I.3.1 Introduction	24
I.3.2 Équations caractéristiques.....	25
I.3.3 Condition aux limite	29
I.4 Éléments de protection.....	33
I.4.1 Introduction	33
I.4.2 Présentation de quelques éléments de protection.....	33
I.5 Outils informatique pour l'étude de coup de bélier	36
II. Modèle conceptuel et algorithmes	38
II.1 Introduction	38
II.2 Modèle Conceptuel.....	38
II.3 Algorithmes.....	41
II.3.1 Algorithme 1(système : réservoir-conduite-vanne).....	41
II.3.2 Algorithme 2(système : réservoir-2 conduite en série « jonction »-vanne)	44
II.3.3 Algorithme 3(système : réservoir-3 conduites dont 2 sont en parallèle« branchement »-vanne)	47
II.3.4 Algorithme 4 (système : réservoir- conduite-cheminée d'équilibre- vanne)	49
III. Validation et applications	54
III.1 Introduction	54

III.2	Validation du 1 ^{er} l'algorithme (Réservoir-conduite-vanne).....	55
III.3	Description de l'installation.....	55
III.4	Calcul préliminaire	56
III.5	Analyse de la fermeture instantanée de la vanne.....	56
III.5.1	Cas d'analyse sans pertes de charge	57
III.5.2	Cas d'analyse avec pertes de charge	58
III.6	Validation de l'algorithme 2 : Réservoir- jonction-vanne	60
III.7	Validation de l'algorithme 3: réservoir- 3 conduites dont 2 sont en parallèle (branchement)-vannes.....	62
III.8	Simulations.....	64
III.8.1	Exemple de calcul algorithme 1: Influence de la variation du coefficient de frottement « f » de Darcy-Weisbach	64
III.8.2	Exemple de calcul algorithme 1: Influence de la variation du coefficient de pertes de charge singulières.....	67
III.8.3	Exemple de calcul algorithme 1: Influence de la variation du temps de fermeture	68
III.8.4	Exemple de calcul algorithme 4: Influence de la variation du diamètre de la cheminée d'équilibre	72
III.8.5	Exemple de calcul algorithme 4: Influence de la variation de la position de la cheminée d'équilibre.....	75
III.8.6	Exemple de calcul algorithme 2: Influence de la variation du rapport des diamètres avant et après la jonction	78
III.8.7	Exemple de calcul- algorithme 2: Influence de la variation de la position de jonction	80
III.9	Conclusion	82
	Conclusion et recommandations.....	83
	Bibliographie.....	84
	Manuel d'utilisation (Annexe).....	85

Liste des tableaux

Tableau I-1 : tableau des coefficients de réflexion, transmission et les schémas des cas étudiés (Chaudhry 2014)	19
Tableau I-2 : calcul du paramètre ψ dans les différents types de conduites (Chaudhry 2014)	23
Tableau I-3 : tableau des équations des conditions aux limites et leurs paramètres pour les différents cas étudiés (Chaudhry 2014)	30
Tableau I-4 : tableau des éléments de protection, leurs schémas avec les équations gouvernant (Ghidaoui, et al. 2005)	34
Tableau I-5 : quelques outils informatiques pour la simulation du coup de bélier	36
Tableau II-1 : les variables utilisées dans la programmation des algorithmes	41
Tableau II-2: les variables d'entrée de l'algorithme 2	44
Tableau II-3: les variables d'entrée de l'algorithme 3	47
Tableau II-4 : les variables d'entrée de l'algorithme 4	49
Tableau III-1 : les paramètres statistiques utilisés dans la validation (Moriasi, et al. 2007)	54
Tableau III-2 : niveau de performance en terme des paramètres statistiques utilisés (Moriasi, et al. 2007)	54
Tableau III-3: données relatives à l'adduction gravitaire (Amara et al., 2016)	55
Tableau III-4 : paramètres statistiques calculés pour la validation du 1 ^{er} algorithme (Réservoir-Conduite-Vanne) sans perte de charge	58
Tableau III-5 : paramètres statistiques calculés pour la validation du 1 ^{er} algorithme (Réservoir-Conduite-Vanne) avec perte de charge	60
Tableau III-6 : données utilisées pour la validation du code jonction	60
Tableau III-7 : données utilisées pour la validation 2 ^{eme} algorithme	61
Tableau III-8 : données utilisées pour la validation 3 ^{eme} algorithme	62
Tableau III-9 : paramètres statistiques calculés pour la validation du 3 ^{eme} algorithme	63
Tableau III-10 : données utilisées pour la simulation de la variation du coefficient « f »	64
Tableau III-11 : données utilisées pour la simulation de la variation du coefficient « k »	67
Tableau III-12 : données utilisées pour la simulation de la variation du temps de fermeture	69
Tableau III-13 : données utilisées pour la simulation de la variation de « Ds »	72
Tableau III-14: données utilisées pour la simulation de la variation du rapport « D2/D1 »	75
Tableau III-15: données utilisées pour la simulation de la variation du rapport « D2/D1 »	78
Tableau III-16: données pour la simulation de la variation de la position de jonction	81

Liste des figures

Figure I-1: propagation de l'onde de pression « écoulement non permanent »	17
Figure I-2 : ondes incidentes et réfléchies au niveau de réservoir	19
Figure I-3 : ondes incidentes et réfléchies à une extrémité bloquée	19
Figure I-4: incidence, réflexion et transmission de l'onde à une jonction en série.....	19
Figure I-5 : branchement de conduite	20
Figure I-6 : lignes caractéristiques dans le plan x-t.	27
Figure I-7 : maille/grille de calcul avec indice pour la méthode des caractéristiques, (Carlsson 2016).	29
Figure I-8 : réservoir en amont à niveau constant.	30
Figure I-9 : réservoir en aval à niveau constant.....	30
Figure I-10 : vanne à l'extrémité aval.	31
Figure I-11 : jonction en série.....	31
Figure I-12 : branchement	32
Figure I-13 : cheminée d'équilibre.....	34
Figure I-14 : réservoir d'aire	35
Figure II-1 : architecture générale du simulateur	39
Figure II-2 : représentation de modèle conceptuel.....	40
Figure II-3 : système (réservoir-conduite-vanne).....	41
Figure II-4 : l'organigramme de calcul de l'algorithme 1	43
Figure II-5 : système (réservoir-2conduite en série « jonction »-vanne).....	44
Figure II-6 : l'organigramme de calcul de l'algorithme 2	46
Figure II-7 : système (réservoir- 3 conduites dont 2 sont en parallèle« branchement »- vanne)	47
Figure II-8 : l'organigramme de calcul de l'algorithme 3	48
Figure II-9 : algorithme de système : réservoir- cheminée d'équilibre- vanne.....	49
Figure II-10 : l'organigramme de calcul de l'algorithme 4	51
Figure III-1 : schéma explicatif de l'exemple étudié (Amara, Berreksi et Amireche 2016) ...	56
Figure III-2 : comparaison entre des résultats de simulation et les données de référence (Amara et al., 2016) dans trois nœuds de la conduite-cas 1 sans perte de charge.....	57
Figure III-3 : comparaison entre des résultats de simulation et les données de référence (Amara et al., 2016) dans trois nœuds de la conduite-cas 1 avec perte de charge.....	59
Figure III-4 : comparaison de la charge hydraulique obtenue au réservoir et au milieu de la conduite par les deux algorithmes 1 et 2 « avec et sans jonction »	61
Figure III-5 : comparaison de la charge hydraulique obtenue au réservoir et au milieu de la conduite par les deux codes « avec et sans branchement ».....	63
Figure III-6 : la charge hydraulique au milieu de la conduite et à la vanne pour différentes valeurs du coefficient de pertes de charge « f ».....	65
Figure III-7 : le débit au milieu de la conduite et à la vanne pour différentes valeurs du coefficient de pertes de charge « f ».....	66
Figure III-8 : harge hydraulique au réservoir et au milieu de la conduite pour différentes valeur de « k ».....	67

Figure III-9 : le débit au réservoir et au milieu de la conduite pour différentes valeur de « k ».....	68
Figure III-10 : la charge hydraulique au milieu de la conduite et à la vanne pour différentes valeur de temps de fermeture « tf »	70
Figure III-11 : le débit au milieu de la conduite et à la vanne pour différentes valeur de temps de fermeture « tf »	71
Figure III-12 : la charge hydraulique au réservoir et au milieu de la conduite en fonction du diamètre de la cheminée	73
Figure III-13 : le débit au réservoir et au milieu de la conduite en fonction du diamètre de la cheminée.....	74
Figure III-14 : la charge hydraulique au réservoir et au milieu de la conduite en fonction du temps pour chaque position du cheminée d'équilibre.	76
Figure III-15 : la charge hydraulique au réservoir et au milieu de la conduite en fonction du temps pour chaque position du cheminée d'équilibre.	77
Figure III-16 : la charge hydraulique au réservoir et au milieu de la conduite en fonction du rapport des diamètres avant et après la jonction.....	79
Figure III-17 : le débit au réservoir et au milieu de la conduite en fonction du rapport des diamètres avant et après la jonction.....	80
Figure III-18 : la charge hydraulique au milieu de la conduite et à la vanne en fonction du rapport des diamètres avant et après la jonction.....	82
Figure III-19 : le débit au milieu de la conduite et à la vanne en fonction du rapport des diamètres avant et après la jonction.....	82
Figure 0-6 : la première fenêtre du logiciel.....	85
Figure 0-7 : fenêtre du logiciel pour le cas vanne	86
Figure 0-3 : fenêtre du logiciel pour le cas jonction-vanne.....	87
Figure 0-9 : fenêtre du logiciel pour le cas Branchement-Vanne	88
Figure 0-10 : fenêtre du logiciel pour le cas de cheminée d'équilibre	89

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} : Le 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 : L'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 : Coefficient de compressibilité 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 est égal à $f/(2*D*A)$.

R_0 : Rayon extérieur de la conduite [m]

R_i : Rayon intérieur de la conduite [m]

r : Coefficient de réflexion [-]

s : Coefficient de transmission [-]

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 : La charge de pression causée par le coup de bélier [m]

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

ρ : La masse volumique du fluide [kg/m³]

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 [-]

Introduction générale

Depuis la première théorie générale d'ALLIEVI et compte tenu de la complexité du phénomène, plusieurs méthodes de calcul du coup de bélier ont été mises au point pour tenter de donner réponse aux problèmes fréquemment rencontrés dans les installations hydrauliques. Mais la plupart de ces méthodes, analytiques ou graphique étaient d'une complexité insurmontable et aboutirent à des calculs ardues pour les ingénieurs hydrauliciens.

Le calcul numérique est devenu un outil indispensable pour l'analyse des problèmes du coup de bélier, qui est loin d'être résolue d'une manière efficace par les anciennes méthodes. Pour ce faire, des techniques d'approximations ont été appliquées pour la résolution des équations de bases, parmi lesquelles la méthode des caractéristiques qui a marqué de loin le calcul moderne des régimes transitoires par sa puissance et sa facilité de programmation.

L'objectif principal du présent travail est de développer un outil informatique pour le génie hydraulique: un simulateur du coup de bélier utilisant différentes conditions aux limites. L'outil comporte trois composantes; un préprocesseur, et un post-processeur avec une interface graphique et un processeur (*solver*) qui sera basé sur la méthode des caractéristiques, et qui peut être utilisé pour déterminer les variations de pression et du débit, causées par le coup de bélier, en différents points dans certains systèmes hydrauliques typiques.

Le premier chapitre, donne les notions essentielles sur le phénomène, les équations gouvernantes, les moyens de protection ainsi qu'une synthèse des outils informatiques les plus populaires traitant le coup de bélier. Dans le deuxième chapitre, le modèle conceptuel et les algorithmes de l'outil informatique développé sont présentés. Le troisième chapitre, donne quelques applications du code pour les différents cas traités par le simulateur et une validation des résultats en utilisant des données externes. En annexe, un bref manuel d'utilisation est fourni.

Chapitre 1 :
Etude bibliographique

I. Etude bibliographique

I.1 Coup de bélier

I.1.1 Définition

Le coup de bélier étant un cas particulier du régime transitoire, est un phénomène oscillatoire non permanent qui apparaît en moment d'une variation de la vitesse d'écoulement dans les conduites en charge à écoulement gravitaire ou par refoulement. De telles variations peuvent être causées par l'ouverture ou fermeture brusque de la vanne, démarrage ou arrêt des pompes, défaillance mécanique d'un dispositif, des changements rapides dans l'état de la demande, etc. Le coup de bélier est caractérisé par la propagation d'ondes hydrauliques qui véhiculent une énergie élastique non négligeable (ondes de pression), suffisamment parfois pour apporter des dommages aux installations

I.1.2 Causes du coup de bélier

En ingénierie d'hydraulique, les causes les plus fréquentes occasionnant des coups de bélier sont:

- Les manœuvres brusques ou lentes des vannes dans les conduites en charge à écoulement gravitaire ;
- La mise en marche ou l'arrêt des pompes dans les conduites en charge par refoulement ;
- La vidange ou le remplissage inadéquat des conduites en charge d'un système d'alimentation en eau potable ;
- Modification de la vitesse angulaire d'une pompe ;
- Vibration des accessoires de contrôle comme les vannes.

Cette liste est loin d'être exhaustive, et beaucoup d'autres situations complexes engendrent ce phénomène (Meunier, 1980).

I.1.3 Risques dus aux coups de bélier

Les conséquences du coup de bélier peuvent être néfastes; elles deviennent de plus en plus dangereuses à mesure que les paramètres modificateurs deviennent importants (variation de pressions et de débits dans le temps).

Chapitre 1: Etude bibliographique

Ce phénomène se produisant dans une conduite en charge, peut provoquer des risques à la suite d'une dépression ou surpression engendrée par les manœuvres brusques.

I.1.3.1 Cas de surpression

C'est une conséquence du coup de bélier engendrée par une pression importante se produisant à la suite d'une fermeture instantanée ou rapide d'une vanne de sectionnement. Si la pression totale c'est-à-dire la pression en régime permanent majorée de la valeur de 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 (les anneaux d'étanchéité seront délogés).

I.1.3.2 Cas de dépression

C'est une conséquence du coup de bélier engendrée par l'apparition d'une pression relative négative, à la suite d'un arrêt brusque d'une pompe ou d'une ouverture instantanée d'une vanne de sectionnement. Si cette charge de pression devient inférieure à 10m, il se produit une poche de cavitation.

I.1.3.3 Fatigue de la canalisation

En régime transitoire les alternances des surpressions et dépressions qui sont une conséquence inévitable du phénomène provoquent la fatigue pour le matériau de la canalisation même si leur amplitude est faible (Escande, 1971; Meunier, 1980).

I.1.4 Équations de base de coup de bélier (équation de Joukowsky)

Considérons un écoulement dans une conduite horizontale sans perte de charge (**Figure. I-1**) alimentée par un réservoir à l'amont et équipée par une vanne à l'aval dans lequel un fluide est supposé compressible coule initialement avec une vitesse uniforme V_0 . Pour le cas simplifié, la conduite est considérée comme étant rigide (pas de changement de section de la conduite due au changement de pression).

Chapitre 1: Etude bibliographique

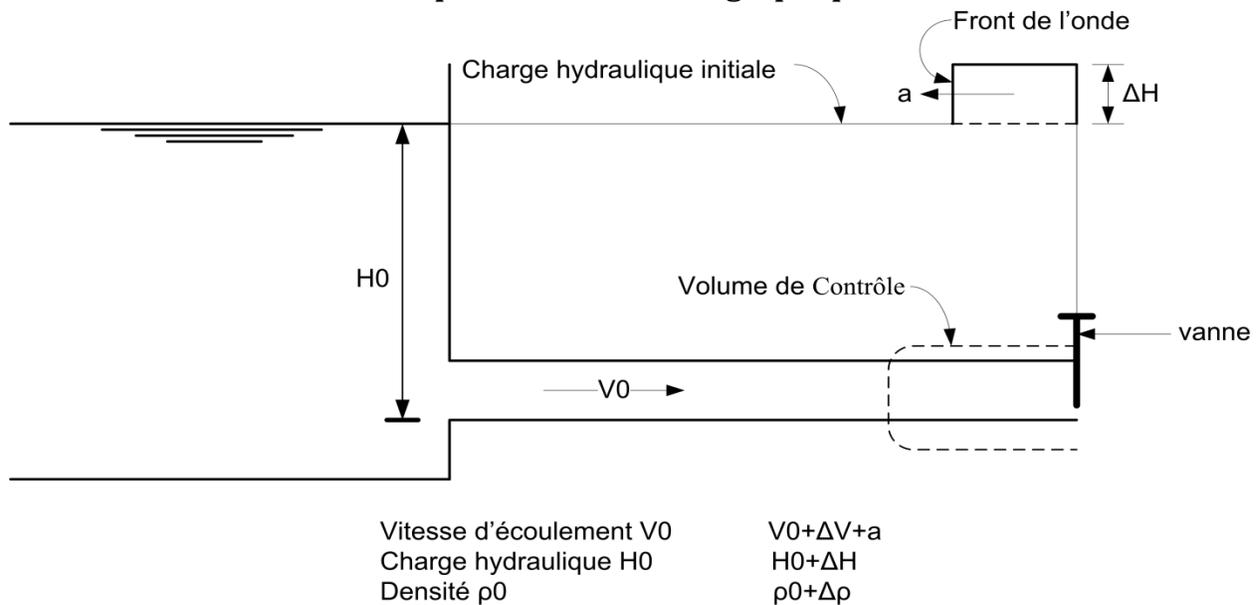


Figure I-1: Propagation de l'onde de pression « écoulement non permanent »

L'équation de Joukowsky (Tijsseling & Anderson, 2006) donnée par Eq I-1 peut être utilisée pour calculer le changement de pression dans la conduite due à la variation de la vitesse d'écoulement.

$$\Delta H = -\frac{a}{g} \Delta V \quad \text{I-1)}$$

Avec :

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

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

g : L'accélération de la pesanteur [m/s²] ;

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

Le signe négatif dans l'équation I-1 indique que la pression augmente (c'est-à-dire que ΔH est positif) pour une réduction de la vitesse (c'est-à-dire pour un ΔV négatif) et vice-versa. L'équation I-1 a été dérivée pour des changements de vitesses instantanées à l'extrémité aval d'une conduite avec des ondes de pression se propageant initialement vers l'amont. Pour un changement de vitesses à l'extrémité amont avec un front d'onde qui se déplace vers l'aval, ΔH est donné par :

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta V \quad \text{I-2)}$$

Chapitre 1: Etude bibliographique

Notez que, contrairement à l'équation. I-1, il n'y a pas de signe négatif dans l'équation I-2. Cela signifie que la pression dans ce cas augmente pour une augmentation de la vitesse d'écoulement et diminue avec une diminution de la vitesse.

La célérité d'onde dans ce cas (conduite rigide) est donnée par (Chaudhry, 2014) :

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \text{I-3)}$$

Avec :

K : Coefficient de compressibilité du fluide [N/m^2] ;

ρ : La masse volumique du fluide [kg/m^3].

I.1.5 Réflexion et transmission des ondes

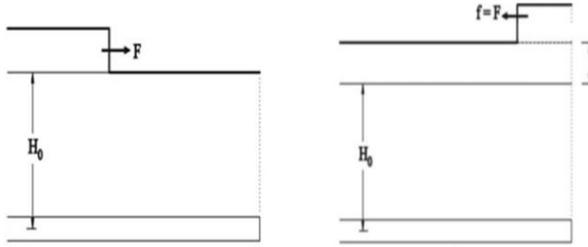
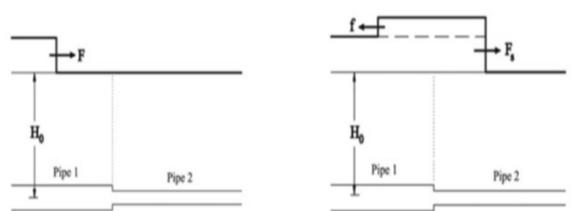
Dans cette section, nous présentons le concept de coefficients de réflexion et de transmission ce qui définit l'amplitude et le signe des ondes réfléchies et transmises. Pour simplifier, nous supposons qu'il n'y a pas de perte d'énergie à cause de la réflexion et la transmission de l'onde dans les limites.

Désignons une onde de pression incidente approchant une frontière comme \mathbf{F} et l'onde reflétée par la frontière comme \mathbf{f} . Ensuite, le coefficient de réflexion, \mathbf{r} , est défini par $\mathbf{r} = \mathbf{f} / \mathbf{F}$. La pression dans une onde de pression positive est plus élevée derrière le front d'onde que devant le front d'onde tandis que la pression dans une onde négative est plus faible derrière le front d'onde que devant le front d'onde.

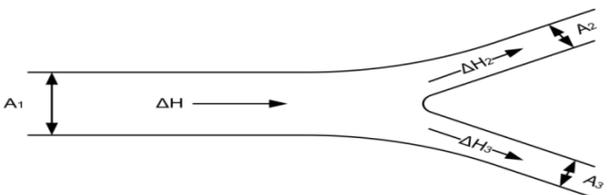
Les différents cas de réflexion et de transmission d'une onde de pression dans des systèmes hydrauliques typiques sont donnés dans le tableau I-1.

Chapitre 1: Etude bibliographique

Tableau I-1 : Coefficients de réflexion et de transmission pour les systèmes hydrauliques typiques étudiés (Chaudhry, 2014)

Cas	Coefficients de réflexion (r)	Coefficients de transmission (s)	Figure
Réservoir à niveau constant	$r = -1$ (I-4)	$s = 1$ (I-5)	 <p>(a) Onde de pression d'incident (b) Onde réfléchie</p> <p style="text-align: center;">Figure I-2 : Onnes incidentes et réfléchies au niveau de réservoir</p>
Extrémité bloquée	$r = 1$ (I-6)	$s = 0$ (I-7)	 <p>(a) Onde incident (b) Onde réfléchie</p> <p style="text-align: center;">Figure I-3 : Onnes incidentes et réfléchies à une extrémité bloquée</p>
Jonction en série	$r = \frac{f}{F} = \frac{\frac{A_1}{a_1} - \frac{A_2}{a_2}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2}}$ (I-8)	$s = \frac{fs}{F} = \frac{2 \frac{A_1}{a_1}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2}}$ (I-9)	 <p>(a) Onde de pression incident (b) réflexion et transmission d'onde</p> <p style="text-align: center;">Figure I-4: Incidence, réflexion et</p>

Chapitre 1: Etude bibliographique

			transmission de l'onde à une jonction en série
Branchement	$r = \frac{f}{F} = \frac{\frac{A_1}{a_1} - \frac{A_2}{a_2} - \frac{A_3}{a_3}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{A_3}{a_3}} \quad \text{(I-10)}$	$s = \frac{f_s}{F} = \frac{2 \frac{A_1}{a_1}}{\frac{A_1}{a_1} + \frac{A_2}{a_2} + \frac{A_3}{a_3}} \quad \text{(I-11)}$	 <p style="text-align: center;">Figure I-5 : Branchement de conduites</p>

I.2 Equations des écoulements transitoires

Les équations aux dérivées partielles gouvernantes les écoulements non-permanents sont dérivées sous les hypothèses suivantes (Chaudhry, 2014) :

- Fluide légèrement compressible ;
- L'écoulement se produit dans une conduite à parois linéairement élastiques ;
- L'écoulement est unidimensionnel ;
- La distribution de pression est uniforme;
- La vitesse radiale due aux contractions/expansions est faible et sera négligée dans l'analyse. Cependant les effets de contractions sont pris en considération.

I.2.1.1 Equation de continuité

L'équation de continuité est écrite en considérant que pendant les écoulements transitoires la paroi de la canalisation se déforme en raison des variations de pression. Cette déformation est un phénomène assez complexe, car il ne s'agit pas seulement de variations de forme radiale, mais également des allongements ou rétrécissements de la canalisation dans la direction longitudinale. L'équation de continuité est dérivée de la loi de conservation de la masse, dans sa forme la plus simplifiée s'écrit (Chaudhry, 2014):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (I-12)$$

Avec :

p : La pression dans la conduite [N/m²] ;

V : La vitesse d'écoulement [m/s] ;

ρ : La masse volumique du fluide [kg/m³];

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

x : Variable spatiale représentant la position [m] ;

t : Variable temporelle représentant le temps [s].

I.2.1.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement

Pour obtenir cette équation le théorème de transport de Reynolds est appliqué en prenant comme propriété extensive B la quantité de mouvement.

Chapitre 1: Etude bibliographique

$$B = mV \Rightarrow \beta = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} V \left(\frac{\Delta B}{\Delta m} \right) = V \quad (\text{I-13})$$

D'après la 2^{ème} loi de Newton :

$$\frac{dM_{sys}}{dt} = \sum F \quad (\text{I-14})$$

M : Quantité de mouvements dans le système [N.m],

F : Les forces extérieures appliquées sur le système [N].

L'équation de conservation de la quantité de mouvement dans sa forme simplifiée s'écrit (Chaudhry, 2014) :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (\text{I-15})$$

Avec :

V : vitesse longitudinale d'écoulement [m/s];

t : temps [s];

f : Coefficient de frottement de Darcy-Weisbach.

x : Variable spatiale représentant la position [m]

t : Variable temporelle représentant le temps [s]

ρ : La masse volumique du fluide [kg/m³]

D : Diamètre de la conduite [m]

I.2.2 Célérité d'onde de pression

En plus du module d'élasticité hydrostatique et de la masse volumique du fluide, la vitesse de l'onde dépend des propriétés élastiques de la conduite ainsi que des contraintes externes. Les propriétés élastiques comprennent la taille de la conduite, l'épaisseur de la paroi et le matériau de la paroi. Et les contraintes externes comprennent le type de fixation et la liberté de mouvement du conduit dans la direction longitudinale. Le module d'élasticité hydrostatique d'un fluide dépend de sa température, de sa pression et de la quantité de gaz entraînés. (Pearsall, 1965) a montré que la vitesse de l'onde varie d'environ

Chapitre 1: Etude bibliographique

1% par 5°C. La compressibilité du fluide augmente par la présence de gaz libres, et il a été rapporté (Pearsall, 1965) qu'une partie d'air dans 10 000 parties d'eau en volume réduit la vitesse de l'onde d'environ 50%.

La présence de solides dans les liquides a une influence moins radicale sur la vitesse de l'onde, à moins qu'ils ne soient compressibles. Des études de laboratoire (Streeter, 1972) et des essais de prototypes (Pearsall, 1965) montrent que les gaz dissous tendent à sortir de la solution lorsque la pression est réduite, même quand elle reste supérieure à la pression de vapeur liquide. Cela entraîne une diminution significative de la vitesse de l'onde.

Par conséquent, la célérité d'une onde de pression positive peut être supérieure à celle d'une onde négative. D'autres tests de prototypes sont nécessaires pour quantifier la réduction de la vitesse de l'onde due à la réduction de la pression. (Halliwell, 1963) a présenté l'expression générale suivante pour la célérité de l'onde de pression:

$$a = \sqrt{\frac{k}{\rho[1 + (k/E)\psi]}} \quad \text{(I-16)}$$

Avec :

ψ : Paramètre adimensionnel dépend des propriétés élastiques et du système de fixation de la conduite [-];

E : module d'élasticité de Young dépendant du matériau de la paroi de la conduite [GPa];

K : module d'élasticité hydrostatique du fluide [GPa];

ρ : masse volumique du fluide [kg/m³].

Tableau I-2: Expression de ψ dans les différents types de conduites (Chaudhry, 2014)

Type de conduite		ψ
Paroi rigide		$\psi = 0$ I-17)
Conduite à paroi épaisse	Encastrée 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-18)
	Encastrée contre les déplacements longitudinaux dans la paroi 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-19)

Chapitre 1: Etude bibliographique

	Avec joints de dilatation	$\psi = 2 \left(\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \nu \right)$	(I-20)
Conduite à paroi mince	Encastrée sur toute sa longueur	$\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2)$	I-21)
	Encastrée contre les déplacements longitudinaux dans la paroi supérieure	$\psi = \frac{D}{e} (1 - 0.5\nu)$	I-22)
	Avec joints de dilatation	$\psi = \frac{D}{e}$	I-23)
Tunnel	Tunnel en roche sans revêtement	$\psi = 1 \ \& \ E = G$	I-24)
	Tunnel en roche avec revêtement en acier	$\psi = \frac{DE}{GD + Ee}$	I-25)

I.3 Calcul numérique du coup de bélier

I.3.1 Introduction

Le calcul des écoulements transitoires en charge (coup de bélier) par les méthodes numériques a beaucoup évolué dans les dernières années. Aujourd'hui, l'ingénieur concepteur n'effectue habituellement plus lui-même ce type d'analyse. En effet, la complexité des problèmes que l'on traite exige souvent l'utilisation de programmes sophistiqués de simulation. Donc, l'apparition des ordinateurs a favorisé le développement rapide de la modélisation mathématique et en conséquence la résolution des équations fondamentales des écoulements des fluides en régime transitoires par des méthodes numériques.

Il existe de nombreuses méthodes pour intégrer numériquement des équations aux dérivées partielles, qui peuvent être regroupées en trois familles principales: les différences finies, les éléments finis et les caractéristiques. Une des premières méthodes d'intégration utilisées pour résoudre le problème du coup de bélier est la méthode des caractéristiques appliquée par (Evangelisti, 1969) au cas d'un écoulement transitoire. Cette méthode s'est avérée facile, rapide et fiable. En fait, de nombreux problèmes ne peuvent pas être confrontés à cette méthode d'intégration, mais elle mérite certainement une description, surtout à cause de sa diffusion mondiale ((Abbott, 1966); (Lister, 1960)).

Chapitre 1: Etude bibliographique

Les modèles de coup de bélier s'améliorent et deviennent de plus en plus utilisés. Aujourd'hui, plusieurs des logiciels de ce phénomène hydraulique disponibles dans le marché utilisent la méthode des caractéristiques parce qu'elle parmi les méthodes numériques les plus populaires traitant des problèmes hydrauliques transitoires unidimensionnelles, surtout si la pression et la vitesse de l'onde sont constantes.

La méthode des caractéristiques est une technique de résolution d'équations différentielles partielles. Typiquement, elle est appliquée pour résoudre les équations du premier ordre, bien que plus généralement elle soit valable pour toute équation différentielle partielle hyperbolique. La méthode consiste à réduire une équation différentielle partielle à une famille d'équations différentielles ordinaires pour laquelle la solution peut être intégrée à partir des données initiales données sur une hyper-surface appropriée (Mambretti, 2014).

I.3.2 Équations caractéristiques

Les équations de la dynamique et de la continuité forment un système d'équations quasi-linéaires différentielles partielles du type hyperbolique, exprimées en fonction de deux variables dépendantes l'une de l'autre, qui sont la vitesse d'écoulement (débit) et la pression, et deux autres variables indépendantes l'une de l'autre, qui sont le temps et l'espace. Les formes simplifiées de l'équation de continuité et l'équation de quantité de mouvement peuvent être données comme :

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQ|Q| = 0 \quad \text{I-26)}$$

$$L_2 = a^2 \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad \text{I-27)}$$

avec :

$$R = \frac{f}{2DA} \quad \text{I-28)}$$

La combinaison linéaire d'Eqs. I-26 et I-27 ($L = L_1 + \lambda L_2$ où λ est un multiplicateur inconnu) donne:

Chapitre 1: Etude bibliographique

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \lambda g A \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x}\right) + RQ|Q| = 0 \quad \text{I-29}$$

Si $H = H(x, t)$ et $Q = Q(x, t)$, alors la dérivée totale s'écrit:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad \text{I-30}$$

Et

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad \text{I-31}$$

D'après l'Eqs. I-29, I-30 et I-31 le multiplicateur inconnu λ est résolu comme suit

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \quad \text{I-32}$$

C'est-à-dire :

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad \text{I-33}$$

Et en utilisant Eqs. I-30 et I-31, équation I-29 peut être écrite comme:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad \text{I-34}$$

Si

$$\frac{dx}{dt} = a \quad \text{I-35}$$

Et

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad \text{I-36}$$

Si

$$\frac{dx}{dt} = -a \quad \text{I-37}$$

Le principe de la méthode des caractéristiques consiste à éliminer la variable indépendante x et de transformer les équations aux dérivées partielles en équations différentielles ordinaires (ODE) dans la variable dépendante t . Cette simplification impose

Chapitre 1: Etude bibliographique

une restriction sur l'emplacement des nouveaux ODE. Les équations originales de la dynamique et de la continuité étaient valables partout dans le plan $x-t$, par contre, les nouvelles ODE elles ne sont valables que le long des courbe (droite si la vitesse de l'onde est constante) décrites par les équations linéaires, **Eq. I-35 et Eq. I-37**. Les deux ODE dérivées sont valables sur toute la longueur L la conduite (c-à-d pour $0 < x < L$) et des conditions aux limites spéciales sont requises aux extrémités, (c-à-d à $x=0$ et à $x=L$).

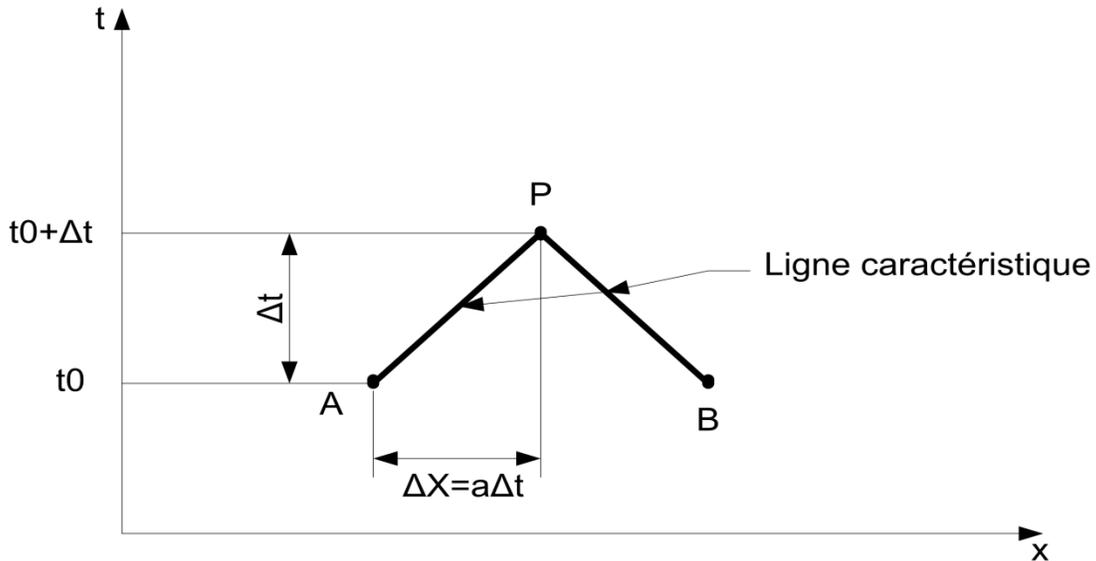


Figure I-6 : Lignes caractéristiques dans le plan $x-t$.

Voyons maintenant comment calculer les pressions et les débits. Nous supposons que la pression, H , et le débit, Q à l'instant $t = t_0$ sont connus. Celles-ci peuvent être initialement connus (c-à-d à $t = 0$, on parle de conditions initiales), ou ils ont été calculés au cours du pas de temps précédent. Nous voulons calculer les valeurs inconnues de H et Q à l'instant $t = t_0 + \Delta t$. En se référant à la **figure I-6**, considérant que les valeurs de Q et H aux points A et B sont connues et cherchons à déterminer leurs valeurs au point P. Cela peut être fait en résolvant des **Eqs. I-34 et I-36** comme suit: en multipliant le côté gauche de l'**équation. I-34** par dt et en intégrant, nous obtenons:

$$\int_A^P dQ + \frac{gA}{a} \int_A^P dH + R \int_A^P Q|Q| dt = 0 \quad \text{I-38}$$

Nous utiliserons 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-34** n'est valide que le long de la caractéristique ligne AP, nous avons utilisé les limites d'intégration de A à P. Nous pouvons facilement évaluer les deux premiers termes intégraux de l'**équation. I-38**. Cependant, nous ne peut

Chapitre 1: Etude bibliographique

pas le faire pour le troisième terme, qui représente les pertes de friction, parce que nous ne connaissons pas explicitement la variation de Q par rapport à t . En utilisant une l'approximation du premier ordre, on peut évaluer l'intégrale du troisième terme comme

$$R \int_A^P Q|Q| dt \approx R Q_A |Q_A| (t_P - t_A) = R Q_A |Q_A| \Delta t \quad \text{I-39}$$

Par conséquent, l'équation. I-38 devient:

$$Q_P - Q_A + \frac{g^A}{a} (H_P - H_A) + R \Delta t Q_A |Q_A| = 0 \quad \text{I-40}$$

En procédant de la même manière, nous pouvons écrire l'Eq. I-36 comme suit :

$$Q_P - Q_B + \frac{g^A}{a} (H_P - H_B) + R \Delta t Q_B |Q_B| = 0 \quad \text{I-41}$$

En combinant les variables connues ensemble, l'Eq. I-40 peut être écrite comme suit:

$$Q_P = C_p - C_a H_p \quad \text{I-42}$$

Et Eq. I-39 comme:

$$Q_P = C_n - C_a H_p \quad \text{I-43}$$

Où

$$C_p = Q_A + \frac{g^A}{a} H_A - R \Delta t Q_A |Q_A| \quad \text{I-44}$$

$$C_n = Q_B - \frac{g^A}{a} H_B - R \Delta t Q_B |Q_B| \quad \text{I-45}$$

Et

$$C_a = \frac{g^A}{a} \quad \text{I-46}$$

Notons que l'Eq. I-40 est valide le long de la ligne caractéristique positive AP et l'Eq. I-41, le long de la ligne caractéristique négative BP (**figure I-6**).

La valeur de C_p et C_n sont connus et sont constants pour chaque pas de temps, bien qu'ils puissent varier d'un intervalle de temps à l'autre, et C_a est une constante qui dépend des propriétés de la conduit et du fluide. Nous nous ferons référence à l'équation. I-42 comme l'équation caractéristique positive et Eq. I-43 comme l'équation caractéristique négative. Dans les Eqs. I-42 et I-43, nous avons deux inconnues, à savoir, H_P et Q_P . Les

Chapitre 1: Etude bibliographique

valeurs de ces les inconnues peuvent être déterminées en résolvant simultanément ces deux équations, i.e (Chaudhry, 2014):

$$Q_P = 0.5(C_P + C_n)$$

I-47

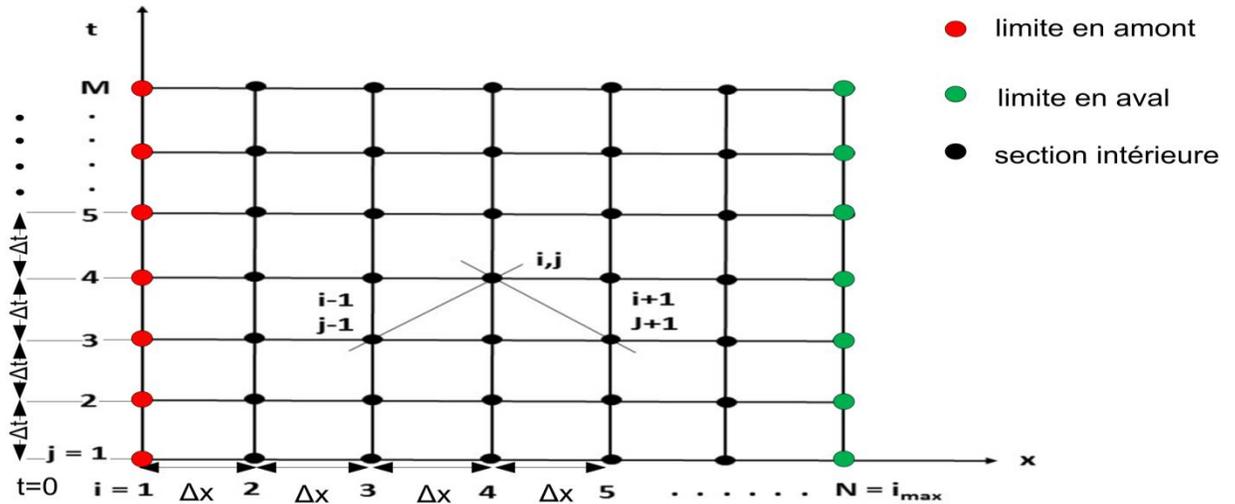


Figure I-7: Maille/grille de calcul avec indice pour la méthode des caractéristiques (Carlsson, 2016).

Maintenant, la valeur de H_P peut être déterminée soit à partir de l'équation. I-43 ou Eq. I-44. Ainsi, en utilisant Eqs. I-42 et I-47, Q_P et H_P à tous les points intérieurs à $t_0 + \Delta t$ (c'est-à-dire, la fin d'un pas de temps donné) peuvent être déterminés (voir Figure. I-7). Cependant, aux limites, soit Eq. I-42 ou I-43 est disponible.

I.3.3 Condition aux limite

Les conditions aux limites correspondant aux systèmes hydrauliques typiques considérés sont synthétisées dans le tableau I-3.

Chapitre 1: Etude bibliographique

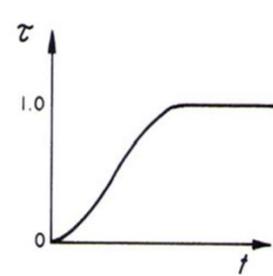
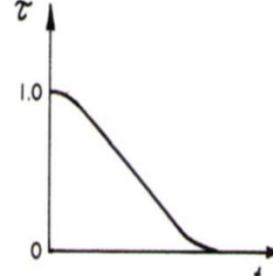
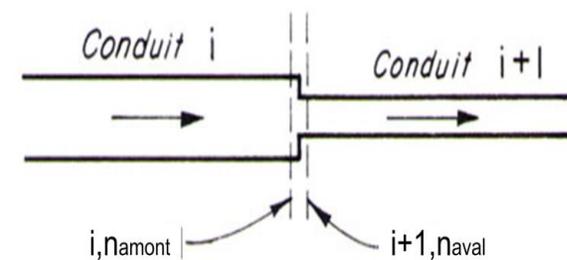
Tableau I-3 : tableau des équations des conditions aux limites et leurs paramètres pour les différents cas étudiés (Chaudhry, 2014)

Condition aux limites	Equations	Paramètres	Unité	Figure
Réservoir amont à niveau constant	<p>$H_{p_{i,1}} = H_{res} - (1+k) \frac{Q_{i,1}^2}{2gA_i^2} \quad \text{I-48}$</p> <p>nous résolvons cette équation simultanément avec l'équation I-43 caractéristique négative, nous obtenons :</p> $Q_{p_{i,1}} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4K_1(C_{ni} + C_{ai}H_{res})}}{2K_1} \quad \text{I-49}$ <p>Dans lequel :</p> $K_1 = \frac{C_a(1+K)}{2gA_i^2} \quad \text{I-50}$	H_{res} : hauteur de la surface de l'eau du réservoir au-dessus de la référence	[m]	
		k : est le coefficient de perte d'entrée	[-]	
		Q_p : Débit d'écoulement	[m ³ /S]	
		H_p : charge hydraulique	[m]	
		A : section de la conduite	[m ² /s]	
		g : l'accélération de la pesanteur	[m/S ²]	
Réservoir en aval à niveau constant	<p>$H_{p_{i,n+1}} = H_{res} - (1-k) \frac{Q_{p_{i,n+1}}^2}{2gA_i^2} \quad \text{I-51}$</p> <p>nous résolvons cette équation simultanément avec l'équation caractéristique positive (Eq. I-42), nous obtenons :</p> $Q_{p_{i,n+1}} = \frac{1 - \sqrt{1 - 4K_2(C_{ni} + C_{ai}H_{res})}}{2K_2} \quad \text{I-52}$ <p>Dans lequel :</p> $K_2 = \frac{C_a(1+K)}{2gA_i^2} \quad \text{I-53}$	H_{res} : hauteur de la surface de l'eau du réservoir au-dessus de la référence	[m]	
		k : est le coefficient de perte d'entrée	[-]	
		Q_p : Débit d'écoulement	[m ³ /S]	
		H_p : charge hydraulique	[m]	
		A : section de la conduite	[m ² /s]	
		g : l'accélération de la pesanteur	[m/S ²]	

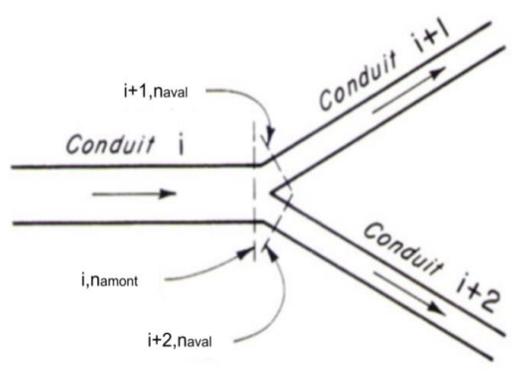
Figure I-8 : Réservoir en amont à niveau constant.

Figure I-9 : Réservoir en aval à niveau constant

Chapitre 1: Etude bibliographique

<p>Vanne à l'aval</p>	$C_v = \frac{(\tau Q_{i,n+1})^2}{(C_a H O_{i,n+1})^2} \quad \text{I-54}$	<p>$Q_{i,n+1}$: débit en régime permanent en</p>	[m ³ /s]	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p>(a) ouverture (b) fermeture</p> <p>Figure I-10: Vanne à l'extrémité aval.</p>
	$Q_{p_{i,n+1}} = 0.5 \left(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_p C_v} \right) \quad \text{I-55}$	<p>$H_{O_{i,n+1}}$: la pression en m.c.e au niveau de a vanne.</p>	[m]	
		<p>τ : degré d'ouverture de la vanne</p>	[-]	
		<p>C_v : coefficient de débit, en fonction de degré d'ouverture de la vanne</p>	[-]	
<p>Jonction en série</p>	$H_{p_{i,n,amont}} = H_{p_{i+1,n,aval}} \quad \text{I-56}$	<p>$H_{p_{i,n,amont}}$ et $H_{p_{i+1,n,aval}}$: Charge hydraulique dans les conduites amont et aval</p>	[m]	 <p style="text-align: center;">i,n,amont i+1,n,aval</p> <p>Figure I-11: Jonction en série</p>
	$Q_{p_{i,n,amont}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_{i,n,amont}} \quad \text{I-57}$			
	$Q_{p_{i+1,n,aval}} = C_{n_{i+1}} + C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1,n,aval}} \quad \text{I-58}$	<p>$Q_{p_{i,n,amont}}$ et $Q_{p_{i+1,n,aval}}$: Débit d'écoulement dans les conduites amont et aval</p>	[m ³ /s]	
	$Q_{p_{i,n,amont}} = Q_{p_{i+1,n,aval}} \quad \text{I-59}$			
	$H_{p_{i,n,amont}} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}}} \quad \text{I-60}$			

Chapitre 1: Etude bibliographique

Branchement	<p>Équation de continuité:</p> $Q_{p_{i,n.amont}} = Q_{p_{i+1,n.aval}} + Q_{p_{i+2,n.aval}} \quad \text{I-61}$ <p>Equations caractéristiques</p> $Q_{p_{i,n.amont}} = C_{p_i} - C_{a_i} H_{p_{i,n.amont}} \quad \text{I-62}$ $Q_{p_{i+1,n.amont}} = C_{p_{i+1}} - C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1,n.amont}} \quad \text{I-63}$ $Q_{p_{i+2,n.amont}} = C_{p_{i+2}} - C_{a_{i+2}} H_{p_{i+2,n.amont}} \quad \text{I-64}$ <p>Equation énergétique</p> $H_{p_{i,n.amont}} = H_{p_{i+1,n.aval}} + H_{p_{i+2,n.aval}} \quad \text{I-65}$ <p>A partir des cinq dernières équations (de I-61 à I-65) on a :</p> $H_{p_{i,n.amont}} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}} - C_{n_{i+2}}}{C_{a_1} + C_{a_{i+1}} + C_{a_{i+2}}} \quad \text{I-66}$	<p>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 style="text-align: center;">Figure I-12: Branchement</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>			
Extrémité bloqué	$Q_{p_{i,n+1}} = 0 \quad \text{I-67}$ <p>Il résulte donc de l'équation caractéristique positive (Eq.I-42) que :</p> $H_{p_{i,n+1}} = \frac{C_{p_i}}{C_{a_i}} \quad \text{I-68}$	<p>Q_p : Débit d'écoulement [m³/S]</p> <p>H_p : la charge hydraulique [m]</p>		

I.4 Éléments de protection

I.4.1 Introduction

Un système de conduite peut être conçu avec un facteur de sécurité permettant de supporter les valeurs extrêmes de pression. Une telle conception peut s'arriver coûteuse, il est donc nécessaire de développer des projets économiques en faisant recours à différents instruments de protection et de procédures de contrôle afin de limiter les effets indésirables du phénomène non permanent (sous-pression, séparation de la colonne d'eau, etc.). Les instruments de contrôle sont généralement coûteux et avec des applications spécifiques (il n'existe pas d'instruments universels pouvant être utilisés sur n'importe quelle condition). Cela donne naissance à la notion de conception avec plusieurs variantes, le choix à retenir étant une variante économique avec un niveau de protection acceptable, une flexibilité dans l'utilisation. Cela se fait généralement en utilisant des anti béliers comme (Chaudhry, 2014):

- Réservoir d'air;
- Cheminée d'équilibre;
- Soupape de protection;
- Volant d'inertie.

I.4.2 Présentation de quelques éléments de protection

Les conditions aux limites utilisées dans la méthode des caractéristiques pour représenter différents types d'éléments de protection sont données dans le tableau I-3.

Chapitre 1: Etude bibliographique

Tableau I-4 : Eléments de protection (anti-béliers) et leurs conditions aux limites (Chaudhry, 2014)

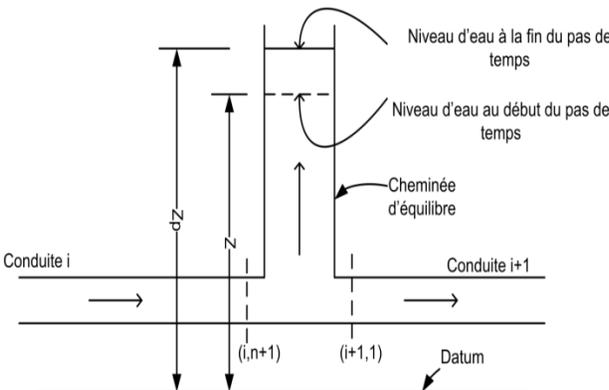
Elément	Les équations gouvernantes	Paramètres utilisés	Unité	Figure	
Cheminée d'équilibre	-Les équations caractéristiques(positive et négative) de la section (i,n+1) (i+1,1) respectivement :	Qps : Le débit dans le réservoir à la fin du pas de temps	[m ³ /s]		
	$Qp_{i,n+1} = Cp_i - Ca_i Hp_{i,n+1} \quad \text{I-69}$	Qp : Débit de décharge à la fin du pas de temps.	[m ³ /s]		
	$Qp_{i+1,1} = Cn_i - Ca_{i+1} Hp_{i+1,1} \quad \text{I-70}$	Hp : La charge hydraulique à la fin du pas de temps.	[m]		
	-L'équation de continuité :	z et z_p les hauteurs d'eau dans le réservoir au-dessus du niveau de référence au début et à la fin du pas de temps.	[m]		
	$Qp_{i,n+1} = Qp_{i+1,1} + Qps \quad \text{I-71}$	A_s : Section transversale horizontale du réservoir.	[m ²]		
	-Niveau d'eau de la cheminée d'équilibre	On résoutre les équations précédentes, on obtient :	i et i+1 représentent le numéro de la conduite. les indices 1 et n+1 représentent le numéro de la section.		[-]
	$Zp = Z + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{A_s} (Qps + Qs) \quad \text{I-72}$	$Hp_{i,n+1} = \frac{Cp - Cn + Qs + 2\left(\frac{A_s Z}{\Delta t}\right)}{Ca_i + Ca_{i+1} + 2\left(\frac{A_s Z}{\Delta t}\right)} \quad \text{I-73}$			

Figure I-13:Cheminée d'équilibre

Chapitre 1: Etude bibliographique

Réservoir d'air	-L'équation de continuité : $Q_{p,i,n+1} = Q_{p,i+1,1} + Q_{orf} \quad \text{I-74}$	H_b : la charge de pression barométrique.	[m]	
	-pour un gaz parfait $H_{p,air}^* \nabla_{p,air}^m = C \quad \text{I-75}$	$H_{p,air}$ et $\nabla_{p,air}^m$ Sont respectivement la charge de la pression absolue et le volume d'air qui reste à la fin du pas de temps.	[m]	
	-La valeur de C est déterminée de l'équation $C = H_{o,air}^* \nabla_{o,air}^m \quad \text{I-76}$	C_{orf} : coefficient de perte de charge à l'orifice.	[-]	
	$h_{Porf} = C_{orf} + Q_{Porf} Q_{Porf} $ $C = H_{o,air}^* \nabla_{o,air}^m \quad \text{I-77}$	$H_{p\ orf}$: perte de charge à l'orifice pour un débit $Q_{p\ orf}$	[m]	
	-Les équations suivantes peuvent être écrites pour le volume d'air inclus:	Q_{porf} : le débit s'écoule à travers l'orifice	[m ³ /s]	
	$H_{Porf}^* = H_{p,i,n+1} + H_b - z_p - h_{porf} \quad \text{I-78}$	A_c : la section transversale horizontale du réservoir d'air.	[m ²]	
	$\nabla_{p,air} = \nabla_{air} - A_c (z_p - z) \quad \text{I-79}$	Q_{orf} : débit d'orifice au début du pas de temps.	[m ³ /s]	
	$z_p = z + 0.5(Q_{orf} + Q_{porf}) \frac{\Delta t}{A_c} \quad \text{I-80}$	z et z_p : hauteurs du plan d'eau dans le réservoir d'air au-dessus de la référence au début et à la fin du pas de temps.	[m]	
	$Q_{Porf} = (C_p - C_n) - (C_{a,i} + C_{a,i+1}) H_{p,i,n+1} \quad \text{I-81}$	θ : indice qui se réfère aux conditions initiales.	[-]	

Figure I-14: Réservoir d'air

I.5 Outils informatique pour l'étude de coup de bélier

Le tableau I-5 donne une synthèse sur quelques outils informatiques disponibles pour l'analyse du coup de bélier (Ghidaoui et al., 2005).

Tableau I-5 : Outils informatiques pour la simulation du coup de bélier

Outil	Utilisation	Licence	Méthode numérique utilisée	Contact
HAMMER	-Simulation de la puissance d'une pompe panne. -Fermeture de vanne. -Rupture tuyau. -Démarrage d'une pompe.	Payante	Méthode des caractéristiques	https://www.hammer-software.com
HYTRAN	Simulation des circuits hydrauliques.	Payante	Méthode des caractéristiques	http://www.hytran.net
AFT IMPULSE	Simulation des écoulements dans les dispositifs hydrauliques.	Gratuite	-Newton Raphson -Méthode des caractéristiques	http://www.aft.com
FLOWMASTER	-Calcul des pressions transitoires et débits dans les réseaux de tuyauterie. -Simulation de la dynamique des écoulements de gaz.	Payante		https://www.mentor.com/products/mechanical/flomaster/flomaster/
SURGE2000	Simulation des écoulements dans les tuyauteries.	Payante	Méthode du plan d'onde ou méthode des différences finies	http://kypipe.com/
WHAMO	Simulation des écoulements dans les tuyauteries.	Payante	Différences finies	http://www.cecer.army.mil/usmt/whamo/whamo.htm

CHAPITRE 2 :
Modèle Conceptuel
Et Algorithme

II. Modèle conceptuel et algorithmes

II.1 Introduction

Le présent chapitre donne une présentation détaillée du modèle conceptuel de l'outil informatique développé et ses différents composants. Nous donnons tout d'abord l'architecture globale de l'outil suivie par une description des algorithmes traitants chacun des systèmes hydraulique typiques considérés.

II.2 Modèle Conceptuel

Le présent outil informatique est conçu pour simuler le phénomène de coup de bélier dans différents cas fréquemment rencontrés dans les systèmes hydrauliques (vanne, jonction, branchement, cheminée d'équilibre, etc.). L'outil a été conçu d'une manière structurée pour offrir une simplicité d'utilisation. L'architecture du simulateur est présentée dans la figure II-1. Les étapes de résolution du modèle et l'interaction entre l'interface graphique de l'outil et les 3 composantes (Pré-processor, *Solver*, Post- Processor) sont schématisées dans **figure II-1 et II-2**.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithmme

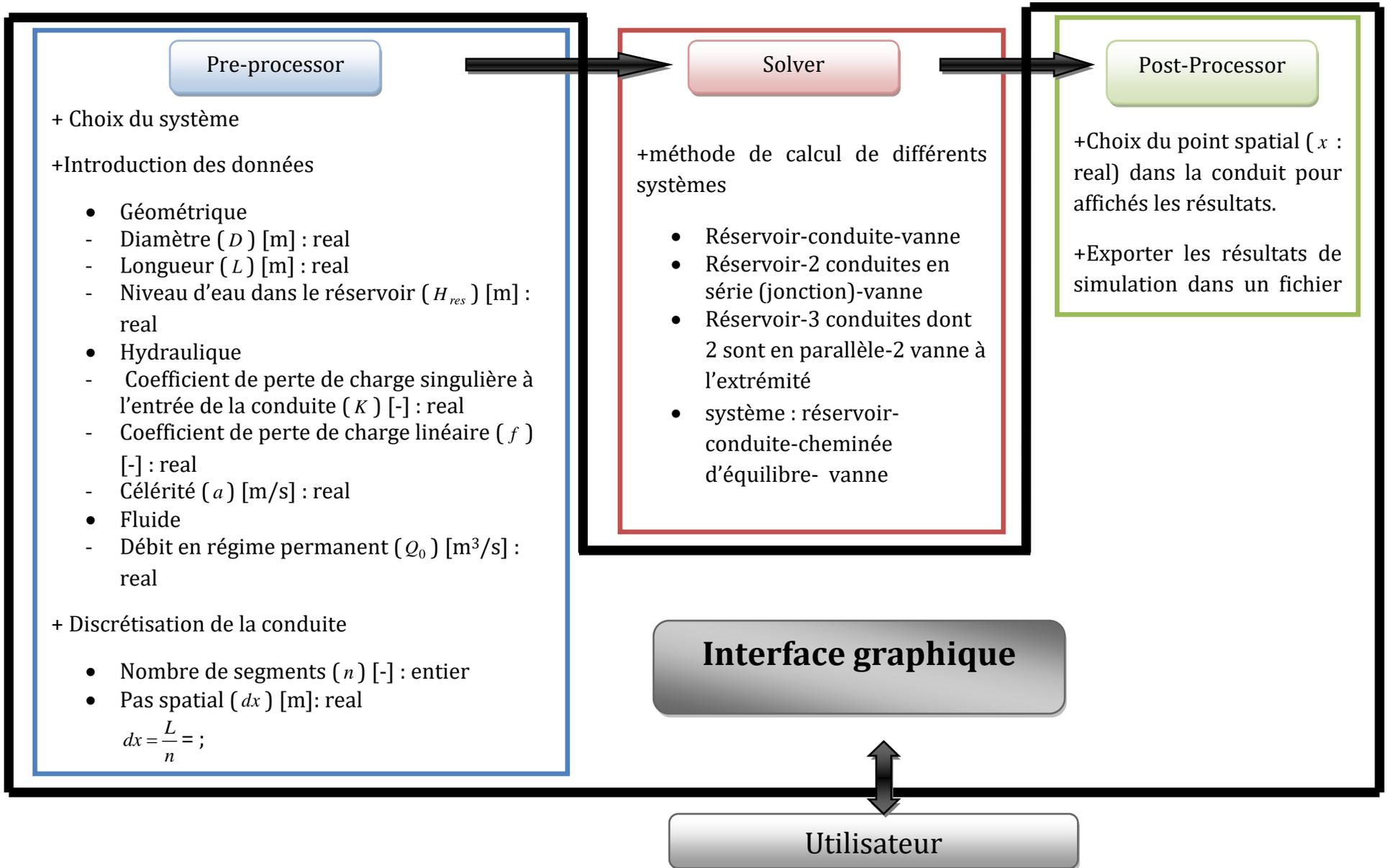


Figure II-1: Architecture générale du simulateur

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

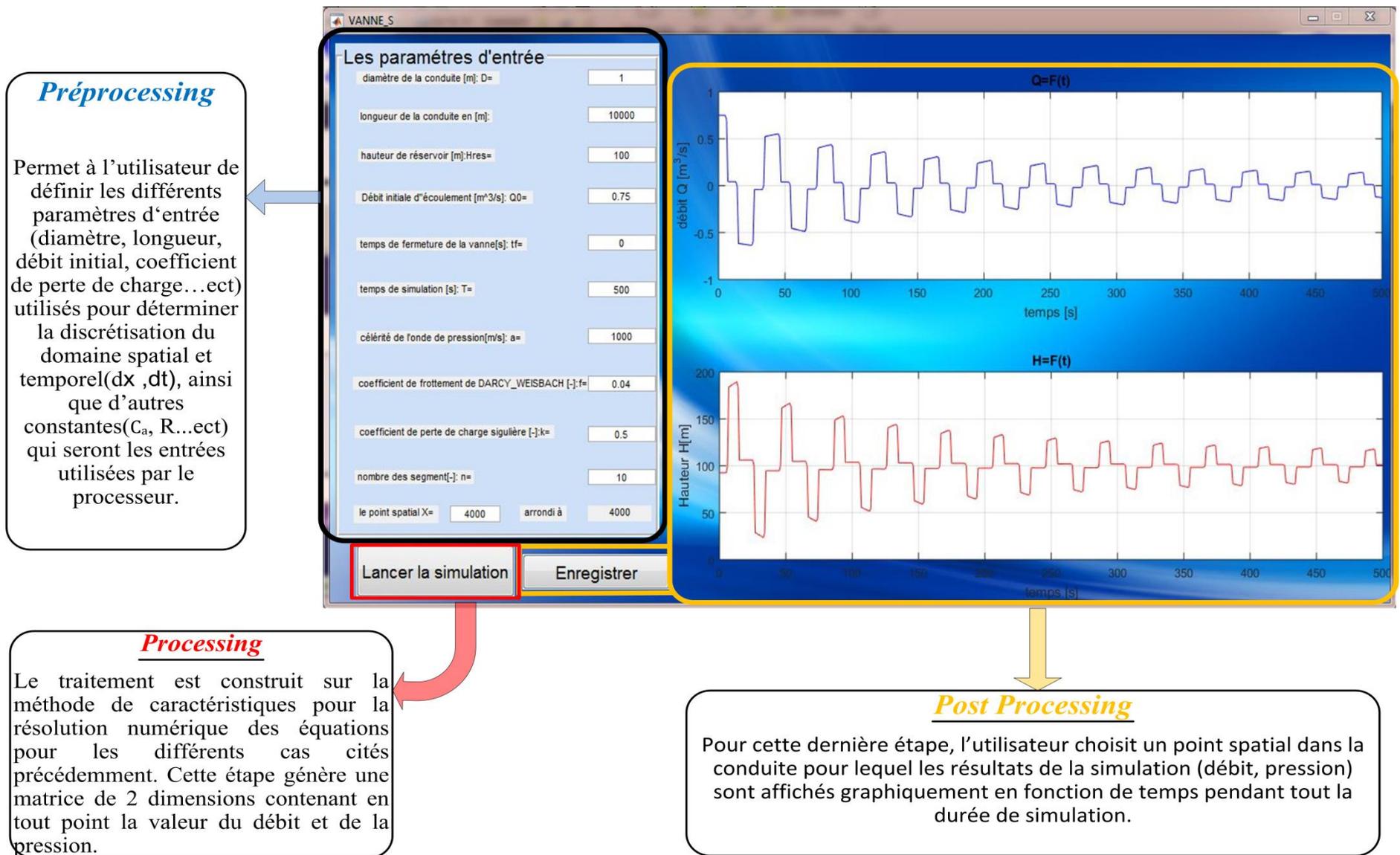


Figure II-2: Représentation de modèle conceptuel

II.3 Algorithmes

II.3.1 Algorithme 1 (système : réservoir-conduite-vanne)

Le présent algorithme est conçu pour simuler le système présenté dans la **figure II.3**.

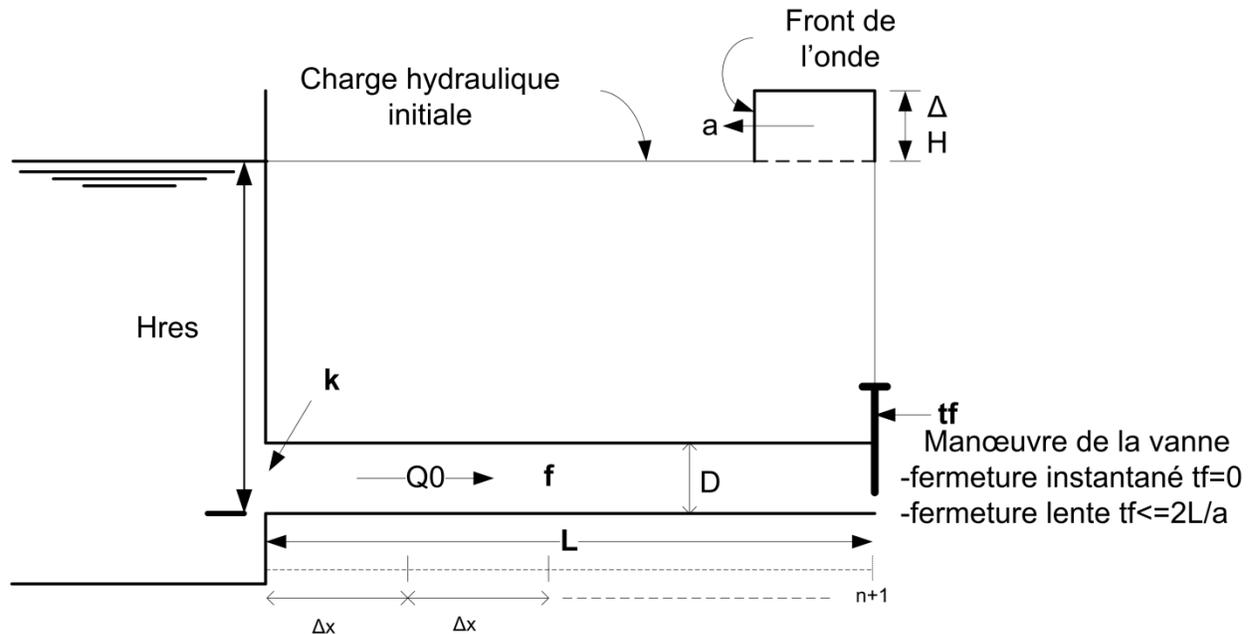


Figure II-3 : Système (réservoir-conduite-vanne)

Tableau II-1 : Les variables utilisées dans la programmation des algorithmes

Nom de variable	Type	Symbole	Unités	Observation
Diamètre des conduites 1 et 2	real	(D1)(D2)	[m]	
Longueur de la conduite.	real	(L)	[m]	
Niveau d'eau dans le réservoir	real	(H _{res})	[m]	
Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite	real	(k)	[-]	suit les normes
Coefficient de frottement de Darcy-Weisbach	real	(f)	[-]	suit les normes
Débit initial d'écoulement	real	(Q0)	[m ³ /s]	
Nombre de segment	entier	(n)	[-]	Mieux d'être diviseur de L
Célérité d'onde de pression.	real	(a)	[m/s]	
Temps de fermeture de la vanne	real	(tf)	[s]	Pour avoir un coup de bélier avec fermeture instantanée tf <= 2*L/a
Temps de simulation	real	(T)	[s]	

Le déroulement des calculs dans ce cas se fait comme suit:

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

- Après avoir lu les données du système, le programme calcule les conditions initiales (régime permanent);
- Le calcul du régime transitoire est lancé au temps $t_0 + \Delta t$ avec Δt incrément de temps égal à $L/N/a$. La détermination des variables du régime commence aux limites du système (réservoir et vanne) par les conditions imposées en ces points ;
- Ceci fait, le calcul s'enchaîne par la détermination des inconnues $H(i,1)$, $Q(i,1)$ aux points intérieurs de la conduite.

Sur la base des résultats ainsi trouvés au temps (itération) précédant un autre réseau des caractéristiques partira de ces points, et les mêmes étapes seront alors répétées au temps $t_0 + \Delta t$ jusqu'à l'achèvement du temps de simulation.

L'algorithme de calcul développé pour le système hydraulique typique #1 réservoir-conduite-vanne est donné dans la **figure II-4**.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

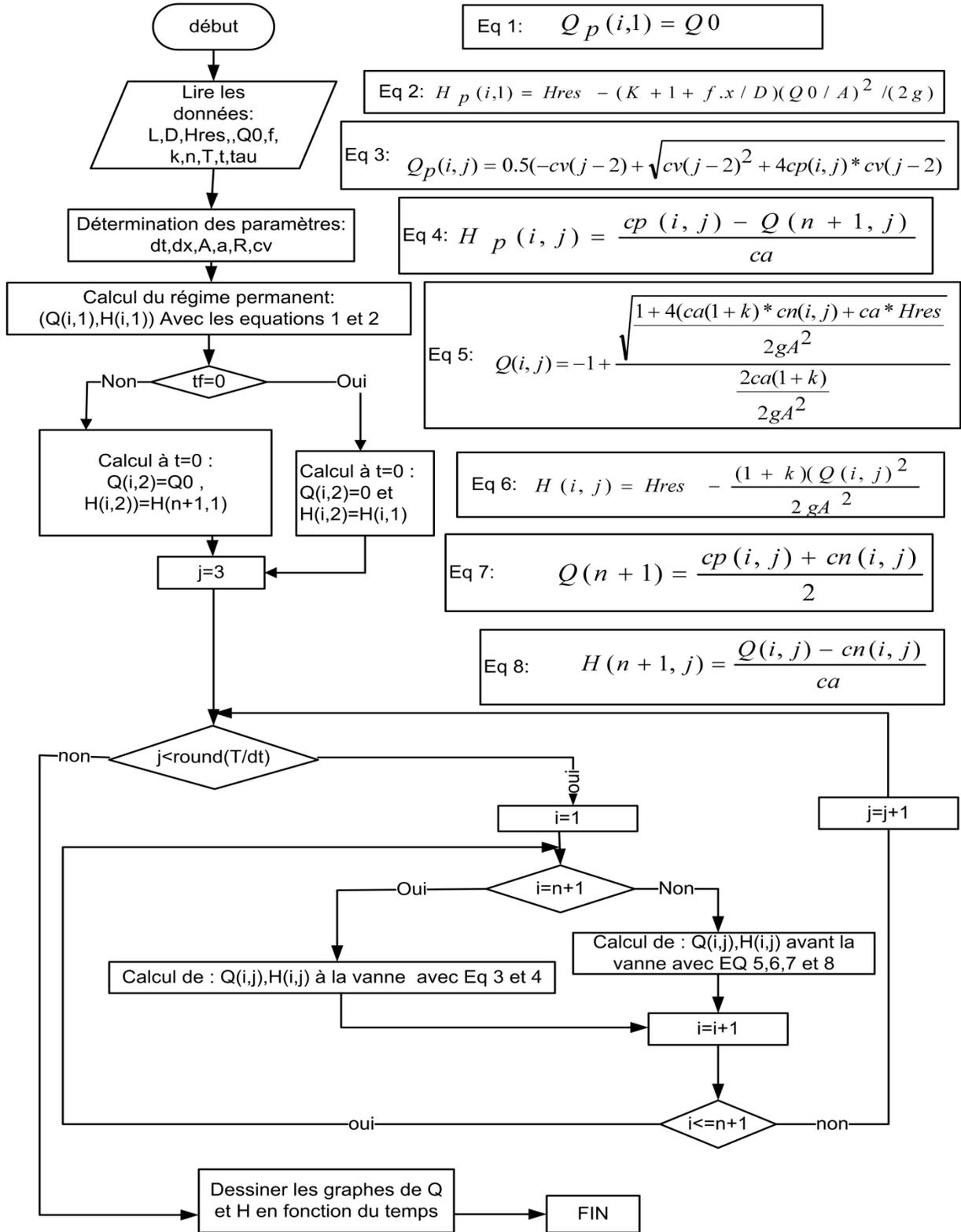


Figure II-4: L'organigramme de calcul de l'algorithme 1

II.3.2 Algorithme 2 (système : réservoir-2 conduite en série « jonction »-vanne)

Le présent algorithme est conçu pour simuler le système présenté dans la **figure II-5**.

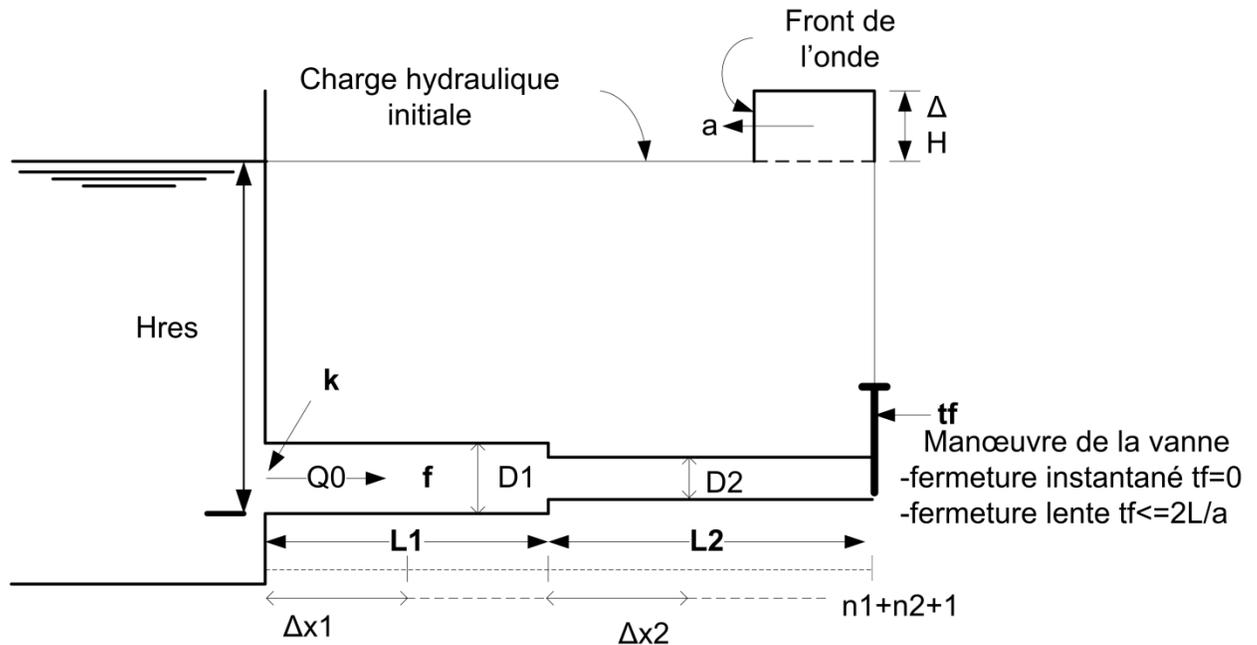


Figure II-5: Système (réservoir-2conduite en série « jonction »-vanne)

Les variables utilisées dans cet algorithme sont synthétisées dans le (**tableau II-2**).

Tableau II-2: Les variables d'entrée de l'algorithme 2

Nom de variable	Type	Symbole	Unités	Observation
Diamètre des conduites 1 et 2	real	(D1)(D2)	[m]	
Longueur des conduites 1 et 2	real	(L1)(L2)	[m]	
Niveau d'eau dans le réservoir	real	(H _{res})	[m]	
Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite	real	(k)	[-]	suit les normes
Coefficient de frottement de Darcy-Weisbach	real	(f)	[-]	suit les normes
Débit initial d'écoulement	real	(Q0)	[m ³ /s]	
Nombre de segment	entier	(n)	[-]	Mieux d'être diviseur de L
Célérité d'onde de pression.	real	(a)	[m/s]	
Temps de fermeture de la vanne	real	(tf)	[s]	Pour avoir un coup de bélier tf ≤ 2*L/a
Temps de simulation	real	(T)	[s]	

Le déroulement des calculs dans ce cas se fait comme suit:

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

- La lecture des données de base de l'installation ainsi que les conditions d'écoulement en régime établi sont spécifiées au départ. Ce qui constitue alors les conditions initiales pour la résolution numérique ;
- Le calcul du régime transitoire est lancé au temps $t_0 + \Delta t$ dont laquelle on détermine les variables du régime le long de la conduite par un pas de $\Delta x = L/n$ commence aux limites du système (réservoir et vanne) par les conditions imposées en ces points, puis le long de la conduite par un pas de Δx égal à L/n , on refaire le calcul pour chaque incrément de temps Δt égal à $L/N/a$ jusqu'à l'achèvement du temps de simulation.

L'algorithme de calcul développé pour le système hydraulique typique #2 réservoir-2 conduites en série (jonction)-vanne est donné dans la **figure II-6**.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

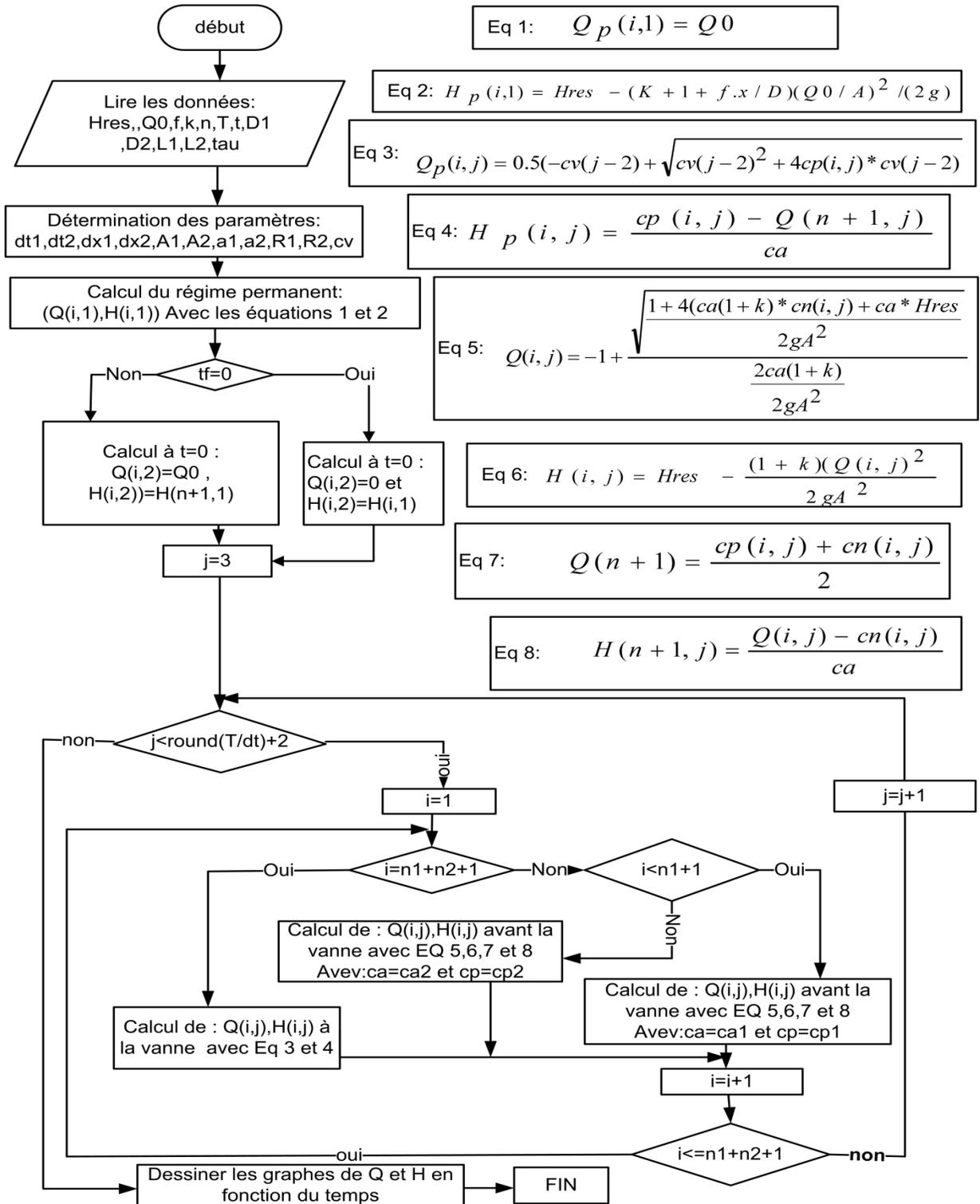


Figure II-6: L'organigramme de calcul de l'algorithme 2

II.3.3 Algorithme 3 (système : réservoir-3 conduites dont 2 sont en parallèle « branchement »-vanne)

Le présent algorithme est conçu pour simuler le système présenté dans la figure II-7.

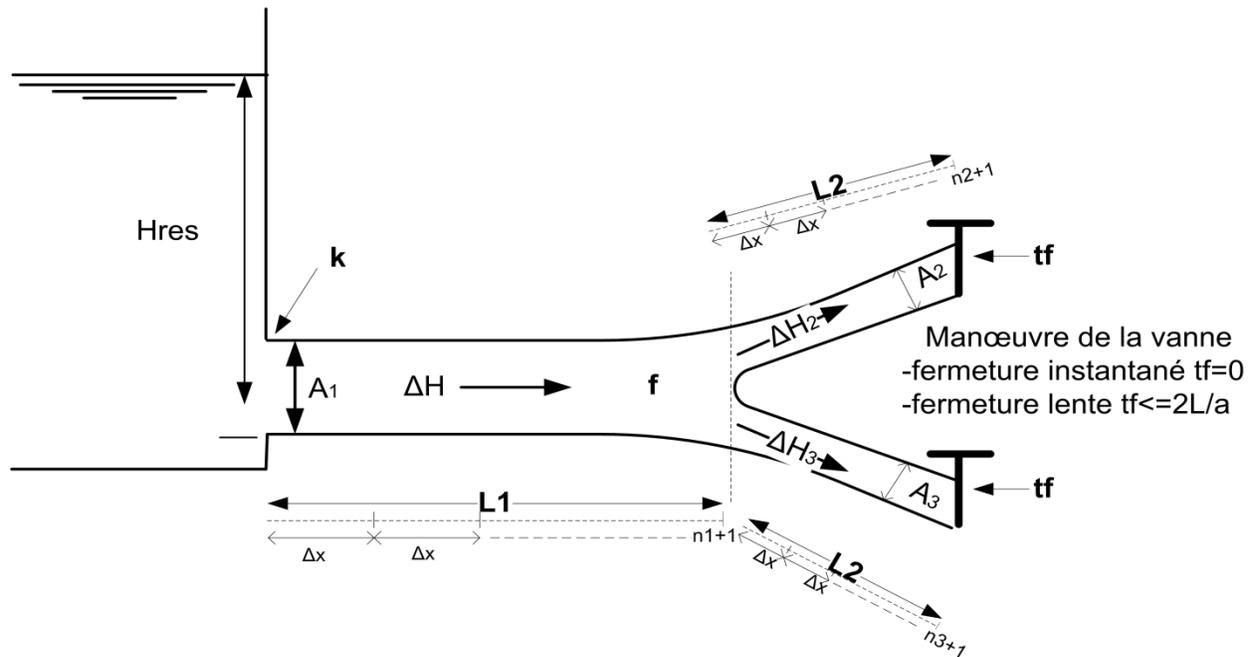


Figure II-7 : Système (réservoir- 3 conduites dont 2 sont en parallèle « branchement »-vanne)

Les variables utilisées dans cet algorithme sont synthétisées dans le **tableau II-3**.

Tableau II-3: Les variables d'entrée de l'algorithme 3

Nom de variable	Type	Symbole	Unités	Observation
Diamètre des conduites 1, 2 et 3	real	(D1)(D2) (D3)	[m]	
Longueur des conduites 1, 2 et 3	real	(L1)(L2) (L3)	[m]	
Niveau d'eau dans le réservoir	real	(H _{res})	[m]	
Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite	real	(k)	[-]	suit les normes
Coefficient de frottement de Darcy-Weisbach	real	(f)	[-]	suit les normes
Débit initial d'écoulement	real	(Q0)	[m ³ /s]	
Nombre de segment	entier	(n)	[-]	Mieux d'être diviseur de L
Célérité d'onde de pression.	real	(a)	[m/s]	
Temps de fermeture de la vanne	real	(tf)	[s]	Pour avoir un coup de bélier tf ≤ 2*L/a
Temps de simulation	real	(T)	[s]	

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

L'algorithme de calcul pour le troisième système hydraulique typique réservoir-3 conduites dont 2 sont en parallèle (branchement) -vannes est donné dans la **figure II-8**.

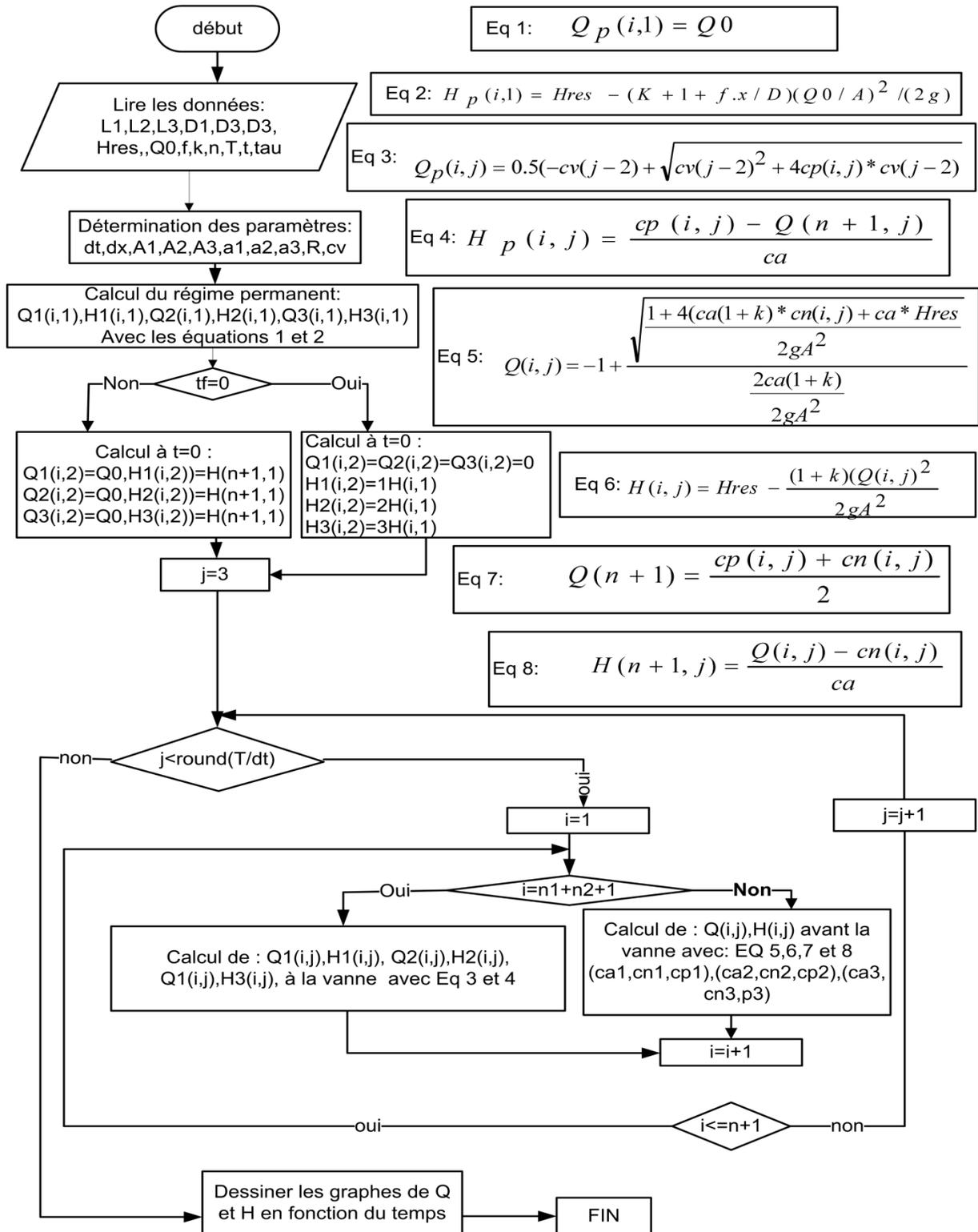


Figure II-8: L'organigramme de calcul de l'algorithme 3

II.3.4 Algorithme 4 (système : réservoir- conduite-cheminée d'équilibre- vanne)

Le présent algorithme est conçu pour simuler le système présenté dans la **figure II-9**.

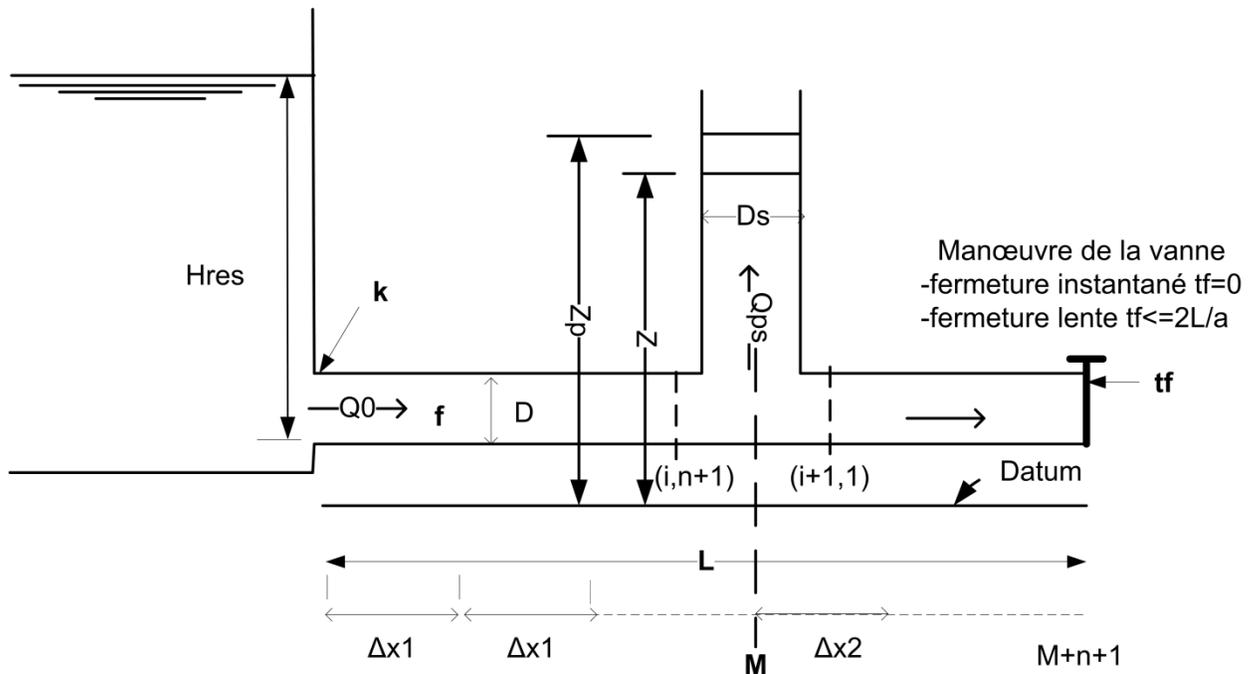


Figure II-9 : algorithme de système : réservoir-conduite-cheminée d'équilibre- vanne

Tableau II-4 : Variables d'entrée de l'algorithme 4

Nom de variable	Type	Symbole	Unités	Observation
Diamètre des conduites 1, 2	réel	(D1)(D2)	[m]	
Diamètre de cheminée d'équilibre	réel	(D _s)	[m]	
Longueur des conduites 1, 2	réel	(L1)(L2)	[m]	
Niveau d'eau dans le réservoir	réel	(H _{res})	[m]	
Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite	réel	(k)	[-]	suit les normes
Coefficient de frottement de Darcy-Weisbach	réel	(f)	[-]	suit les normes
Débit initial d'écoulement	réel	(Q0)	[m ³ /s]	
Nombre de segment	entier	(n)	[-]	Mieux d'être diviseur de L
Célérité d'onde de pression.	réel	(a)	[m/s]	

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

Temps de fermeture de la vanne	réel	(tf)	[s]	Pour avoir un coup de bélier $tf \leq 2*L/a$
Temps de simulation	réel	(T)	[s]	
La position de la cheminée d'équilibre	réel	(M)	[m]	M appartient à la conduite (i.e. $0 < M < L$)
Section de la cheminée d'équilibre	réel	(As)	[m ²]	

Etant donné le volume de calculs itératifs nécessaire et la durée de simulation requise, le calcul du régime transitoire en présence d'une cheminée d'équilibre n'est commode que d'une façon automatique. L'algorithme de calcul développé pour le système hydraulique typique #4 réservoir-conduite-cheminée d'équilibre-vanne est donné dans la **(figure II-10)**.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et algorithme

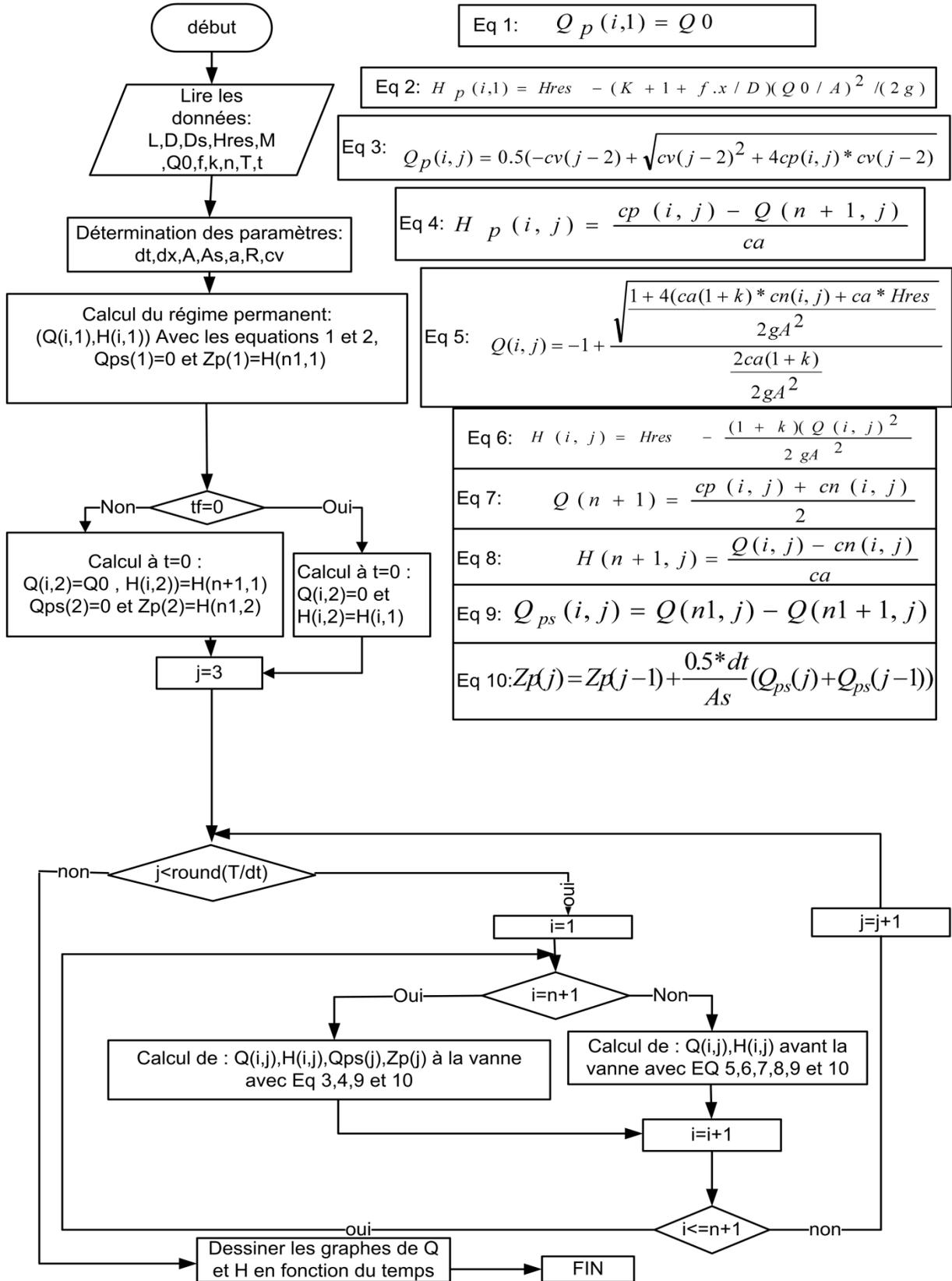


Figure II-10: Organigramme de calcul de l'algorithme 4

Remarque

Notons que dans les 4 algorithmes, en cas où l'utilisateur choisit une valeur de x (le point spatial où l'on veut afficher les résultats) qui ne coïncide pas avec un des nœuds utilisés dans la discrétisation, le code va afficher les résultats du nœud le plus proche de x .

Chapitre 3

Validation et applications

III. Validation et applications

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats d'une série de simulations numériques réalisées en utilisant l'outil informatique développé. Une parties de ces simulation sont utilisées pour (1) valider (tester) les algorithmes écrits (en réalisant des comparaisons entre les résultats du simulateur avec d'autres données/résultats pré-validés) et puis pour (2) démontrer les capacités de l'outil.

La validation des algorithmes est basée sur la quantifications des paramètres statistiques suivants : (1) NSE - Nash-Sutcliffe efficiency (Critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe) ; (2) PBIAS - Percent Bias (Pourcentage de biais) et (3) RSR - RMSE-observations standard deviation ratio (rapport d'écart type d'observations). Le calcul des ces paramètres peut se faire en utilisant les équations données dans tableau III-1.

Tableau III-1 : Les paramètres statistiques utilisés dans la validation (Moriassi et al., 2007)

Paramètres	Formule	Paramètres
NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obs}^{moyen})^2}$ III-1	Y_{obs} : Les résultats observés (dans notre cas sont les résultats pré-validés). Y_{sim} : Les résultats simulés (dans notre cas sont les résultats obtenus de nos simulations). Y_{obs}^{moyen} : c'est la moyenne des résultats observés (dans notre cas c'est la moyenne des résultats pré-validés).
PBIAS	$PBIAS = 100 \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})}{\sum (Y_{obs})}$ III-2	
RSR	$RSR = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obs}^{moyen})^2}}$ III-3	

Les indicateurs de niveau de performance basés sur les paramètres statistiques précédents sont synthétisés dans le tableau III-2.

Tableau III-2: Niveau de performance en terme des paramètres statistiques utilisés (Moriassi et al., 2007)

Niveau de performance	NSE	RSR	PBIAS [%]
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$

III.2 Validation du 1^{er} l'algorithme (Réservoir-conduite-vanne)

Pour l'étude des problèmes du coup de bélier dans les conduites forcées par la méthode des caractéristiques, nous avons choisi de traiter le cas d'une adduction gravitaire entre deux réservoirs servant à l'approvisionnement en eau de la ville de SETIF. Ce cas est tiré d'une étude faite par le bureau d'Ingénieurs-Conseils Français SAFEGE au profit de l'Algérienne des Eaux dans le cadre d'une mission de diagnostic du système d'adduction mixte gravitaire-refoulement de la ville de SETIF à partir de la source de Oued El bared (Amara et al., 2016).

L'examen du régime transitoire se portera sur les cas suivants :

- Fermeture instantanée de la vanne d'obturation ;
- Avec et sans pertes de charge dues frottement.

III.3 Description de l'installation

Le système hydraulique analysé est une liaison gravitaire entre un réservoir tampon (R2) et le réservoir répartiteur (RR) à SETIF. Cette liaison est faite au moyen d'une conduite en acier de 600 mm de diamètre posée sur un linéaire de 15 Km environ. Les données sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau III-3: Données relatives à l'adduction gravitaire (Amara et al., 2016)

Niveau amont (Réservoir R2)	1194.05 m
Niveau aval (Réservoir répartiteur à Sétif)	1141.19 m
Diamètre de la conduite	600 mm
Matériau	acier
Longueur	15242 m
Rugosité	1 mm
Célérité d'onde	1200 m/s

La figure suivante représente le schéma synoptique de l'adduction avec un profil simplifié comportant seulement les points critiques. L'origine des altitudes a été rapportée au point bas (1020 m NGA) pour la commodité des calculs.

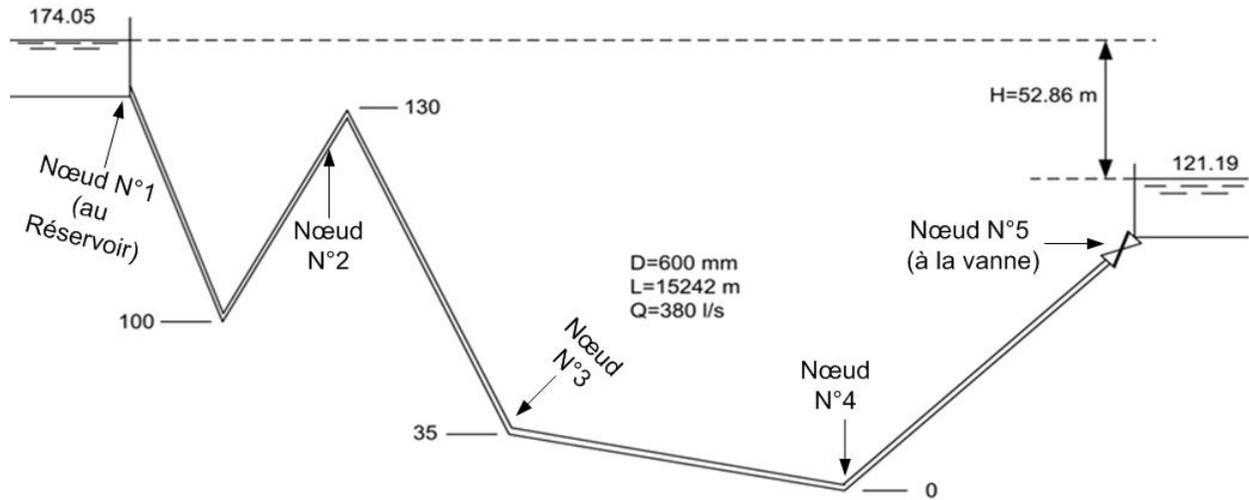


Figure III-1: Schéma explicatif de l'exemple étudié (Amara et al., 2016)

III.4 Calcul préliminaire

L'examen du régime permanent de l'adduction fait ressortir une capacité de transfert Q_0 de 380 L/s. Ce débit véhiculé sous une chute motrice de 52.86 m, qui absorbée par les pertes de charge donne lieu à un coefficient de frottement $f=0.02258$. La conduite est discrétisée en quatre tronçons égaux ($N=4$) dans le but de suivre les variations du régime d'écoulement en voisinage de ces nœuds, d'où le nombre de ces derniers ($NS=N+1$) qui seront en total de 5 nœuds.

III.5 Analyse de la fermeture instantanée de la vanne

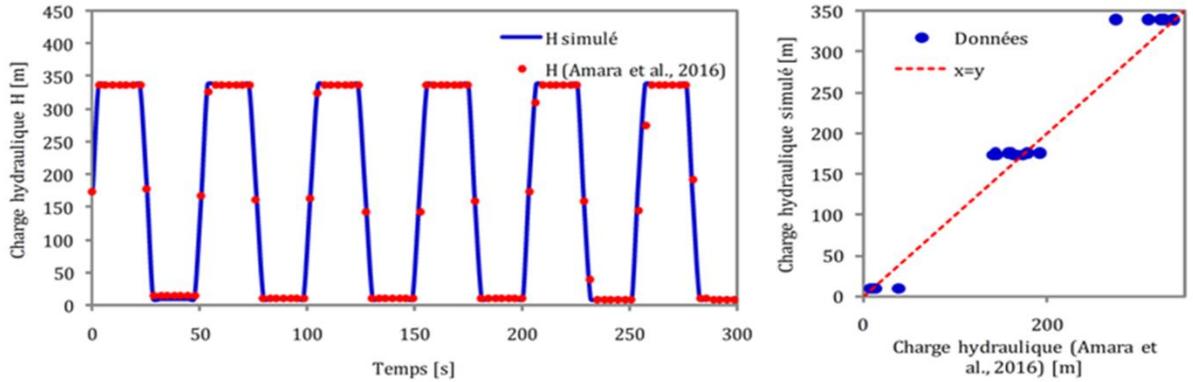
Les paramètres de simulation relatifs à ce cas de figure sont:

- Temps de fermeture de la vanne : $t_f = 0$ s;
- Durée de la période simulée : $T = 300$ s;
- Discrétisation de la conduite : $n = 4$ tronçons;
- Pas de temps de calcul: $dt = L/a/n = 3.175$ s.

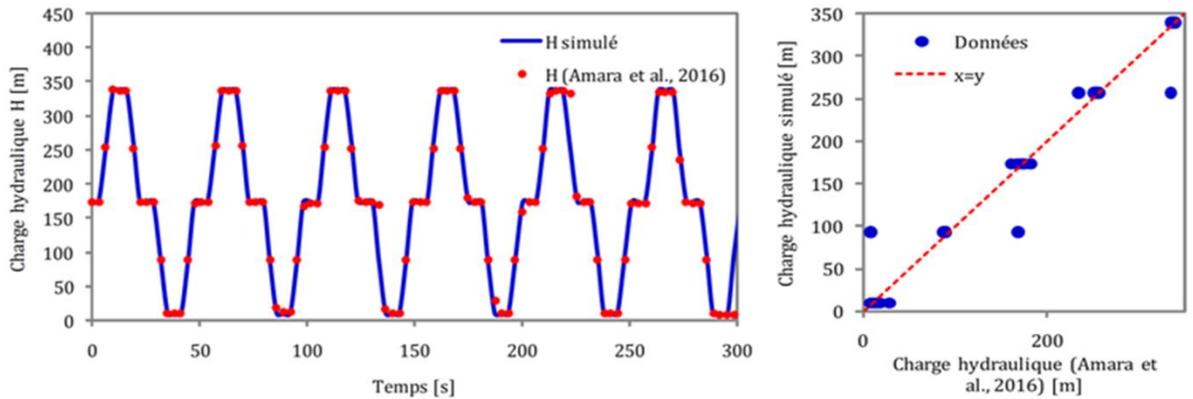
Les résultats de la simulation sont représentés dans la (**figure III-2**) qui illustre la variation temporelle de la charge enregistrée en phase transitoire aux nœuds N°5 (vanne), N°3 (à 7621 m du réservoir) et N°2 (à 3810.5 m du réservoir) respectivement, et ceci pour les deux cas avec et sans perte de charge due au frottement.

III.5.1 Cas d'analyse sans pertes de charge

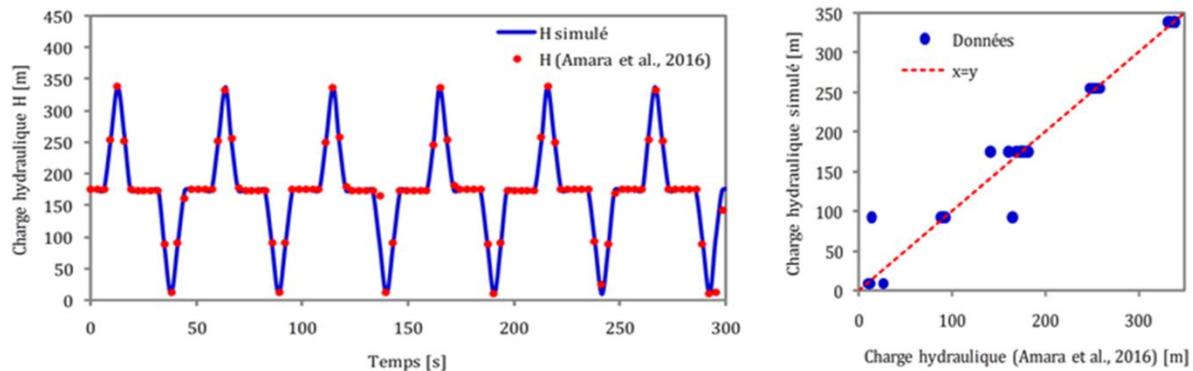
La figure suivante représente les résultats de la comparaison entre nos simulations et les résultats de référence (données issues de Amara et al., 2016).



a) Nœud 5 (vanne)



b) Nœud 3 (à 7621m du réservoir)



c) Nœud 2 (à 3810.5 m du réservoir)

Figure III-2: Comparaison entre des résultats de simulation et les données de référence (Amara et al., 2016) dans trois nœuds de la conduite-cas 1 sans perte de charge.

On voit ainsi dans les figures précédentes le caractère périodique du phénomène avec une durée de $16 \cdot \Delta t = 50.8$ s, qui est la même période obtenue en théorie, à savoir : $4.L/a$.

Validation et applications

Pour ce qui est de l'amplitude de l'onde, les charges maximales et minimales enregistrées aux divers points de la conduite sont de 338,53 m et 9,57m respectivement, ainsi la surpression et dépression par rapport à la charge statique de 174.05m (niveau du plan d'eau) sont : $\Delta h_{\text{surp}}= 164,48$ m et $\Delta h_{\text{dep}}=164,48$ m, donc une amplitude de $\pm 164,48$ m. Cette valeur est exactement celle donnée par la formule de Joukowsky ($a.v_0/g$). Les valeurs des paramètres statistiques obtenues de la comparaison entre les résultats de l'outil informatique développé et les données issues de (Amara et al., 2016) sont données dans le tableau III-4.

Tableau III-4 : Paramètres statistiques calculés pour la validation du 1^{er} algorithme (Réservoir-Conduite-Vanne) sans perte de charge

Indice	NSE	RSR	PBIAS [%]	Niveau de Performance
Nœud 5	0.995	0.067	1.11	Très bien
Nœud 3	0.98	0.13	0.03	Très bien
Nœud 2	0.95	0.21	0.92	Très bien

III.5.2 Cas d'analyse avec pertes de charge

Dans ce cas les pertes de charge dues au frottement sont prises en considération, les résultats obtenus sont représentés dans figure III-5.

Validation et applications

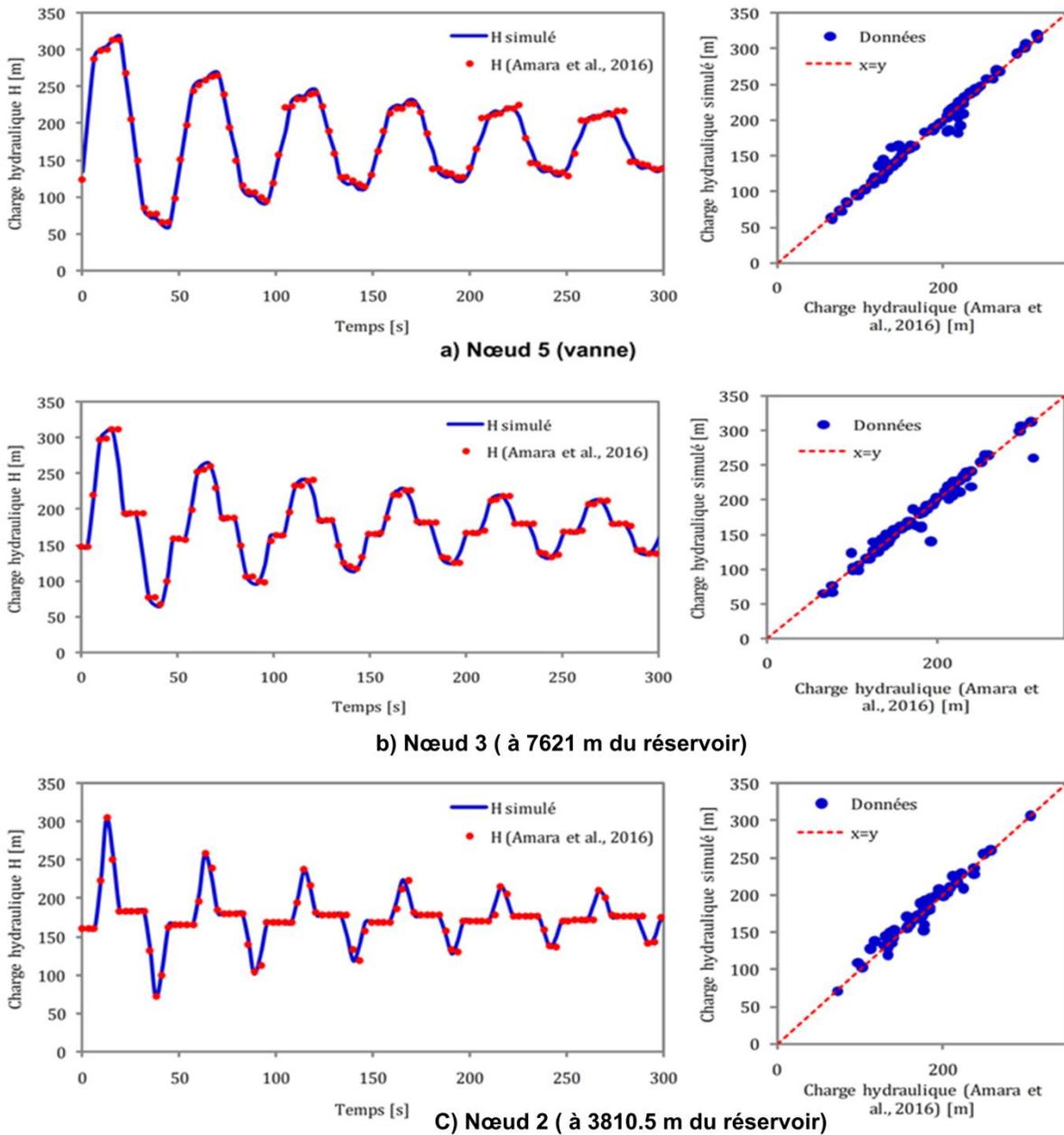


Figure III-3 : Comparaison entre des résultats de simulation et les données de référence (Amara et al., 2016) dans trois nœuds de la conduite-cas 1 avec perte de charge.

Les paramètres statistiques calculés pour valider l'outil développé sous ce cas de figure (cas 1 avec perte de charge) sont donnés dans le tableau III-5.

Validation et applications

Tableau III-5: Paramètres statistiques calculés pour la validation du 1^{er} algorithme (réservoir-conduite-vanne) avec perte de charge

Indice	NSE	RSR	PBIAS [%]	Niveau de Performance
Nœud 5	0.86	0.38	0.60	Très bien
Nœud 3	0.98	0.13	0.03	Très bien
Nœud 2	0.96	0.19	0.23	Très bien

Les résultats de comparaison, nous permettent de valider l'algorithme de calcul pour le 1^{er} cas (système : réservoir-conduite-vanne).

III.6 Validation de l'algorithme 2 : Réservoir- jonction- vanne

La validation du 2^{eme} algorithme (avec un système hydraulique typique composé de : réservoir-2 conduites en série (jonction)-vanne) nous nous sommes servie de l'algorithme déjà validé du 1^{er} cas (système : réservoir-conduite-vanne). Et pour ce faire, il suffit de réaliser une simulation du 2^{eme} cas avec deux conduites de même diamètre.

Tableau III-6 : Données utilisées pour la validation du code jonction

Paramètre	L [m]	Hres [m]	Q0 [m ³ /s]	f [-]	K [-]	T [s]	n [-]	a [m/s]	D ₁ [m]	D ₂ [m]
Simulation 1	6000	100	0.75	0.05	0.5	100	100	1000	1	1
Simulation 2	6000	100	0.75	0.05	0.5	100	100	1000	2	2

Validation et applications

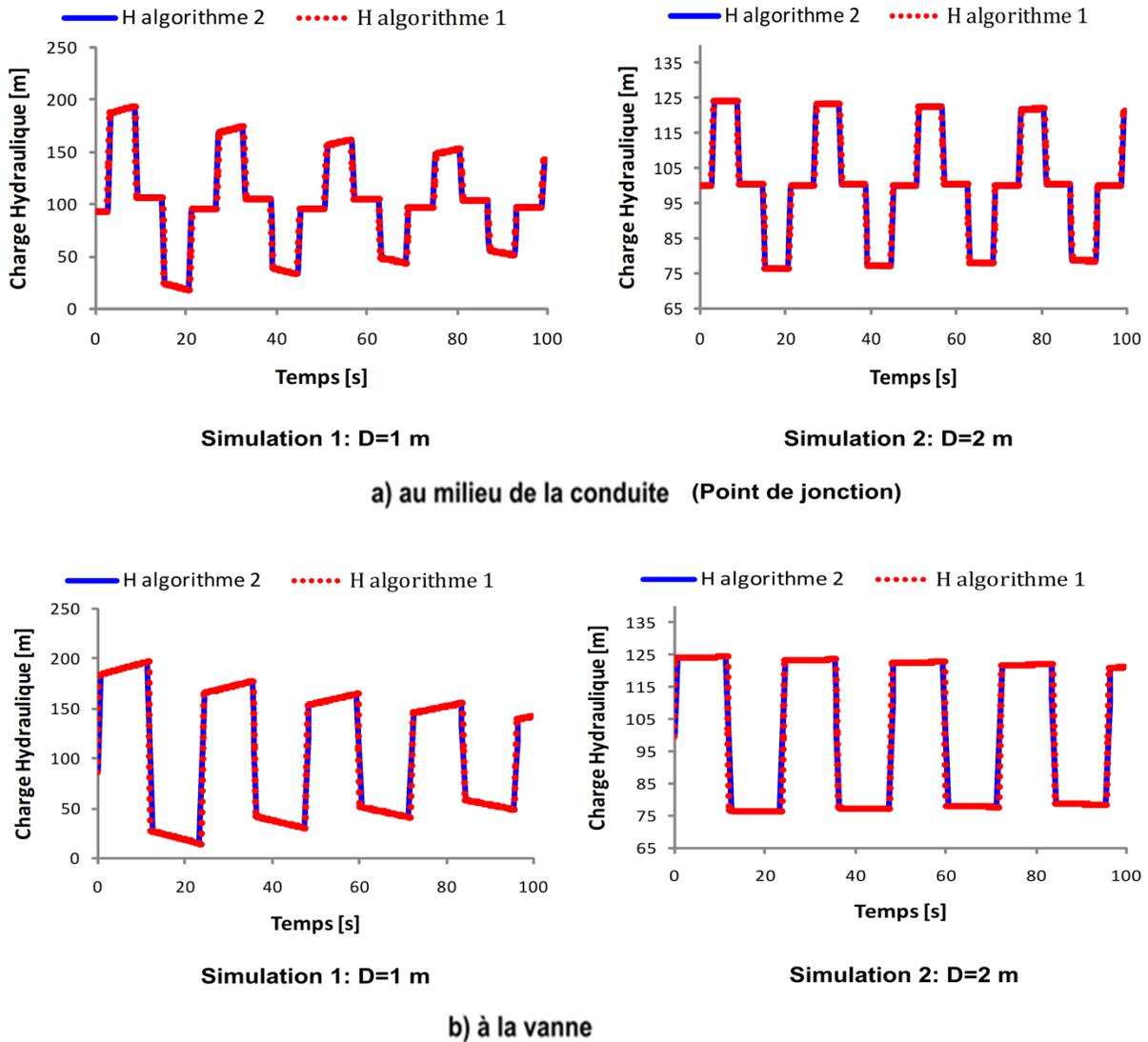


Figure III-4 : Comparaison de la charge hydraulique obtenue au réservoir et au milieu de la conduite par les deux algorithmes 1 et 2 « avec et sans jonction »

Les paramètres statistiques indiquant le niveau de performance de l'algorithme 2 en comparaisons avec l'algorithme déjà validé 1 sont représentés dans le tableau III-7.

Tableau III-7 : Paramètres statistiques calculés pour la validation du 2^{em} algorithme (réservoir-2 conduites en série (jonction)-vanne)

Indice	NSE	RSR	PBIAS [%]	Niveau de Performance
Au milieu de la conduite avec D=1 m	1	$4,7 \cdot 10^{-5}$	0.003	Très bien
A la vanne avec D=1 m	0.96	0.21	0.0016	Très bien
Au milieu de la conduite avec D=2 m	1	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$	Très bien
A la vanne avec D=2 m	1	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	Très bien

Comme le montre tableau III-7, le niveau de performance de l'algorithme 2 est qualifié de "très bien", ce qui nous permet de valider notre outil pour ce cas d'étude.

III.7 Validation de l'algorithme 3: réservoir- 3 conduites dont 2 sont en parallèle (branchement)-vannes

Dans la validation du 3^{ème} algorithme (pour un système hydraulique typique composé de: réservoir-3 conduites dont 2 sont en parallèle (branchement)-vannes) nous nous sommes servis de l'algorithme déjà validé du 1^{er} cas (système : réservoir-conduite-vanne). Et pour ce faire, il suffit d'avoir le diamètre de l'une des conduites en parallèle de prendre le même diamètre pour les deux autres conduites.

Tableau III-8 : Données utilisées pour la validation du 3^{ème} algorithme

Paramètre	L [m]	Hres [m]	Q ₀ [m ³ /s]	f [-]	K [-]	T [s]	n [-]	a [m/s]	D ₁ [m]	D ₂ [m]	D ₃ [m]
Simulation1	6000	100	0.75	0.05	0.5	100	100	1000	1	1	0
Simulation1	6000	100	0.75	0.05	0.5	100	100	1000	2	2	0

Les résultats de la comparaison sont représentés dans la figure suivante.

Validation et applications

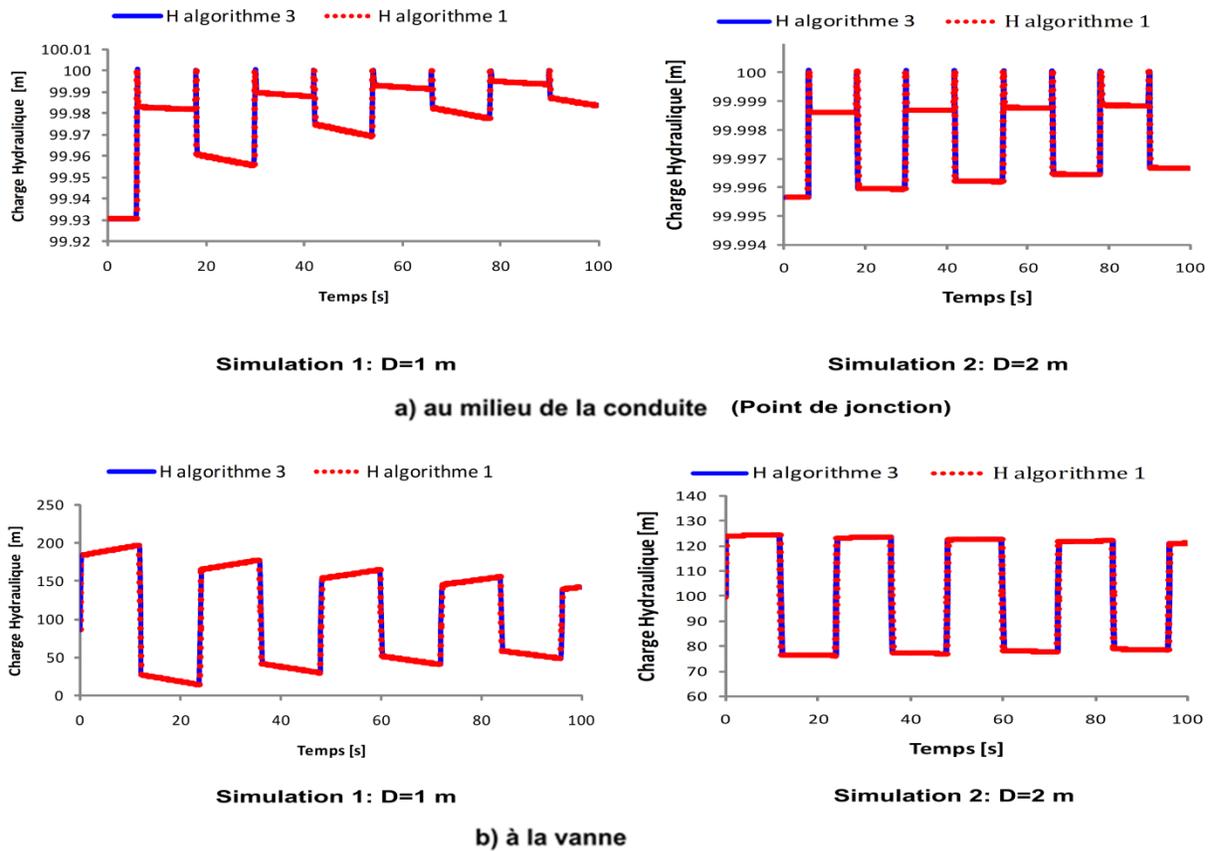


Figure III-5 : Comparaison de la charge hydraulique obtenue au réservoir et au milieu de la conduite simulées par l'algorithme 3 et l'algorithme 1 (déjà validé)

Les paramètres statistiques indiquant le niveau de performance de l'algorithme 3 en comparaisons avec l'algorithme déjà validé 1 sont représentés dans le tableau III-9.

Tableau III-9 : Paramètres statistiques calculés pour la validation du 3^{eme}algorithme

Indice	NSE	RSR	PBIAS [%]	Niveau de Performance
Au milieu de la conduite avec D=1 m	1	$7,8.10^{-5}$	0.002	Très bien
A la vanne avec D=1 m	0.96	0.21	0.0016	Très bien
Au milieu de la conduite avec D=2 m	1	$4,5.10^{-5}$	$4,6.10^{-9}$	Très bien
A la vanne avec D=2 m	1	$2,45.10^{-5}$	$5,6.10^{-7}$	Très bien

Comme le montre tableau III-9, le niveau de performance de l'algorithme 3 est qualifié de "très bien", ce qui nous permet de valider notre outil pour ce cas d'étude.

III.8 Simulations

III.8.1 Exemple de calcul algorithme 1: Influence de la variation du coefficient de frottement « f » de Darcy-Weisbach

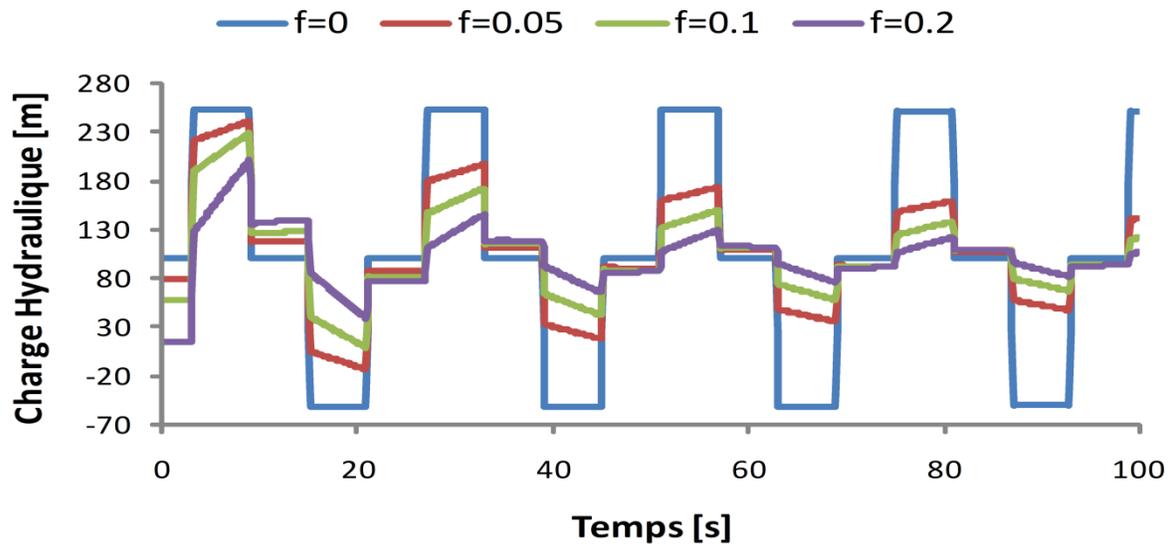
Pour étudier l'influence du coefficient « f » on va le varier en fixant les autres paramètres comme suivant :

Tableau III-10 : Données utilisées pour la simulation de la variation du coefficient « f »

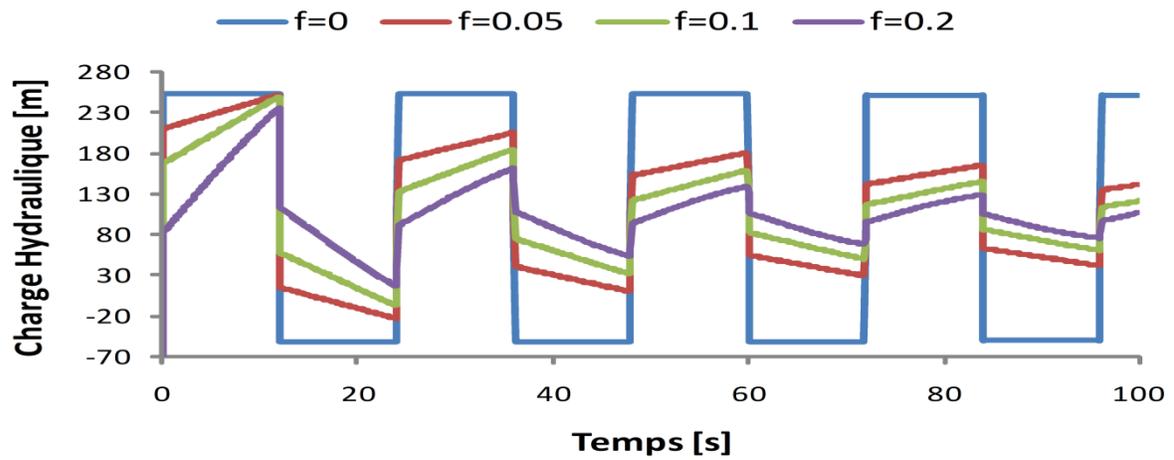
Paramètre	Diamètre de la conduite	Longueur de la conduite	Charge hydraulique initiale au réservoir	Débit initiale	Coefficient de perte de charge singulière	Durée de la période simulée	Nombre de segments	Célérité de l'onde de pression
Symbole	D	L	H_{res}	Q_0	k	T	n	a
Unité	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[-]	[s]	[-]	[m/s]
Valeur	0.8	6000	100	0.75	0.5	100	50	1000

Avec $f[-]=0, 0.05, 0.1, 0.2$.

Validation et applications



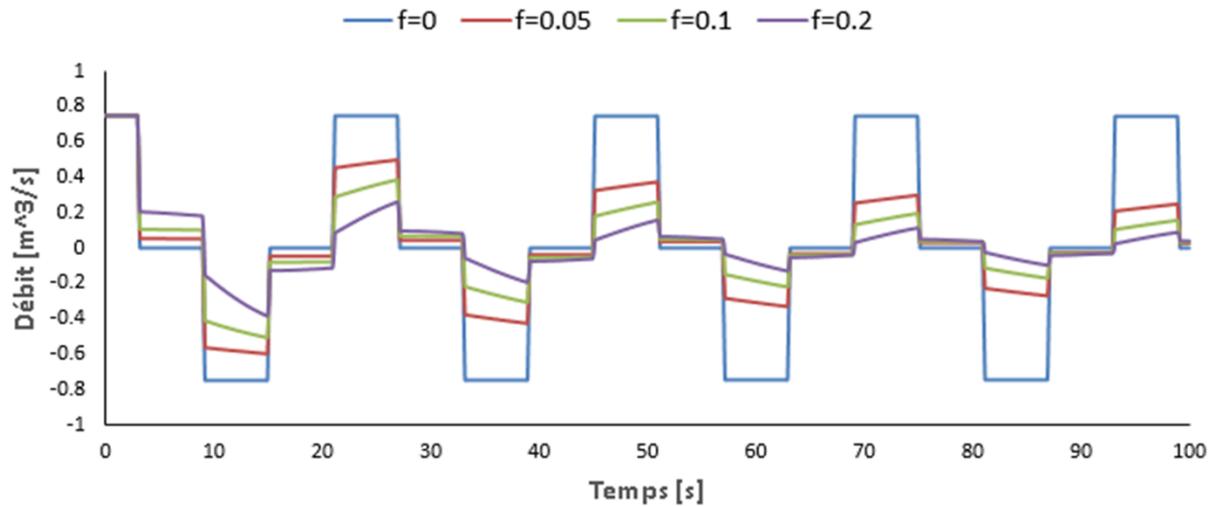
a) au milieu de la conduite



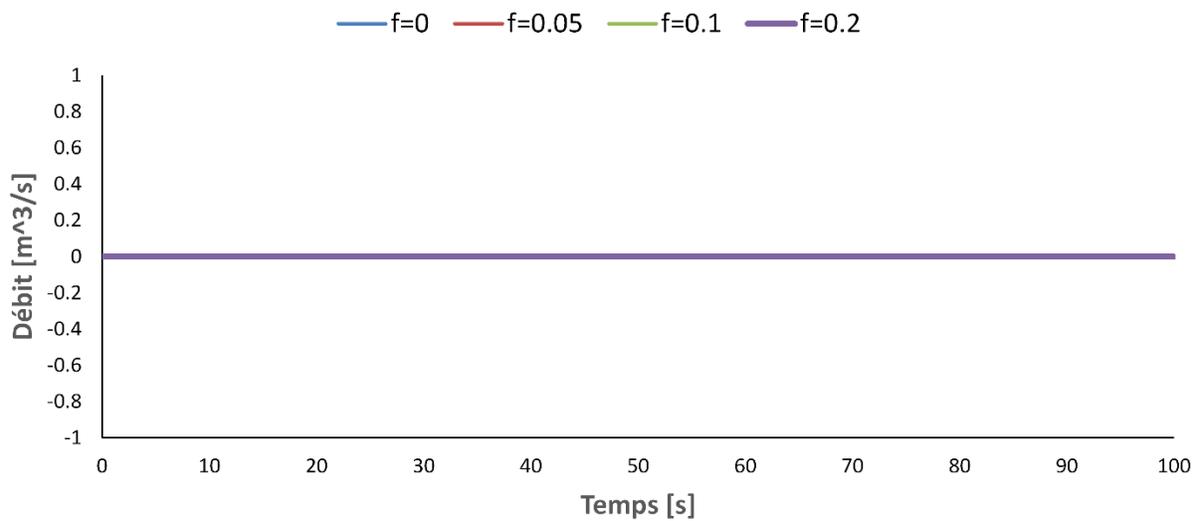
b) à la vanne

Figure III-6 : Charge hydraulique au milieu de la conduite et à la vanne pour différentes valeurs du coefficient de pertes de charge « f ».

Validation et applications



a) au milieu de la conduite



b) à la vanne

Figure III-7 : Débit au milieu de la conduite et à la vanne pour différentes valeurs du coefficient de pertes de charge « f ».

Les figures III-6 et III-7 indiquent que la magnitude de la charge hydraulique $H(t)$ est inversement proportionnelle à f (aspect tout à fait attendu), il est de même pour $Q(t)$, sauf qu'il est nul à la vanne (extrémité bloquée). La variation de f n'a pas d'influence sur la période d'oscillation.

III.8.2 Exemple de calcul algorithme 1: Influence de la variation du coefficient de pertes de charge singulières

Pour étudier l'influence de ce coefficient « k » on va le varier en fixant les autres paramètres comme suit :

Tableau III-11: Données utilisées pour la simulation de la variation du coefficient « k »

Paramètre	Diamètre de la conduite	Longueur de la conduite	Charge hydraulique initiale au réservoir	Débit initiale	Coefficient de perte de charge linéaire	Durée de la période simulée	Nombre de segments	Célérité de l'onde de pression
Symbole	D	L	H_{res}	Q_0	F	T	n	a
Unité	[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[-]	[s]	[-]	[m/s]
Valeur	0.8	6000	200	0.75	0.05	300	100	1000

Avec $k [-]=0, 0.1, 0.5$ et 0.7 .

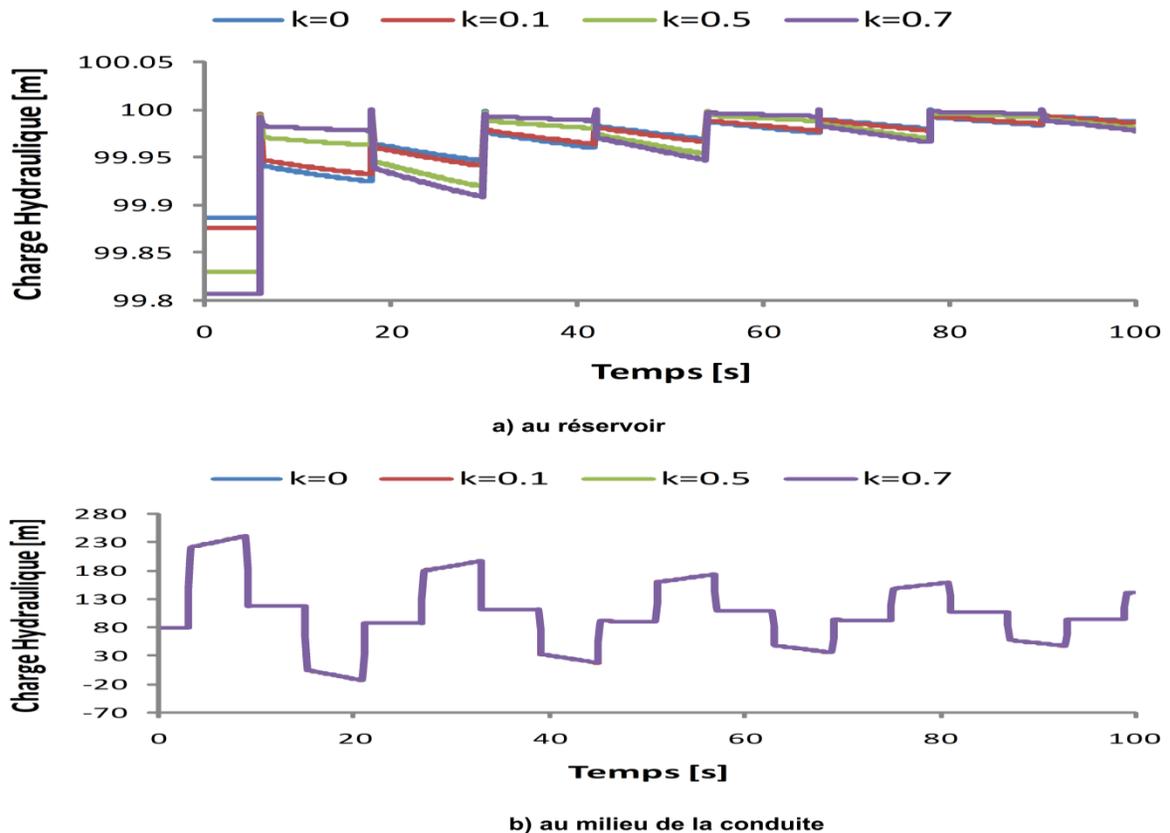
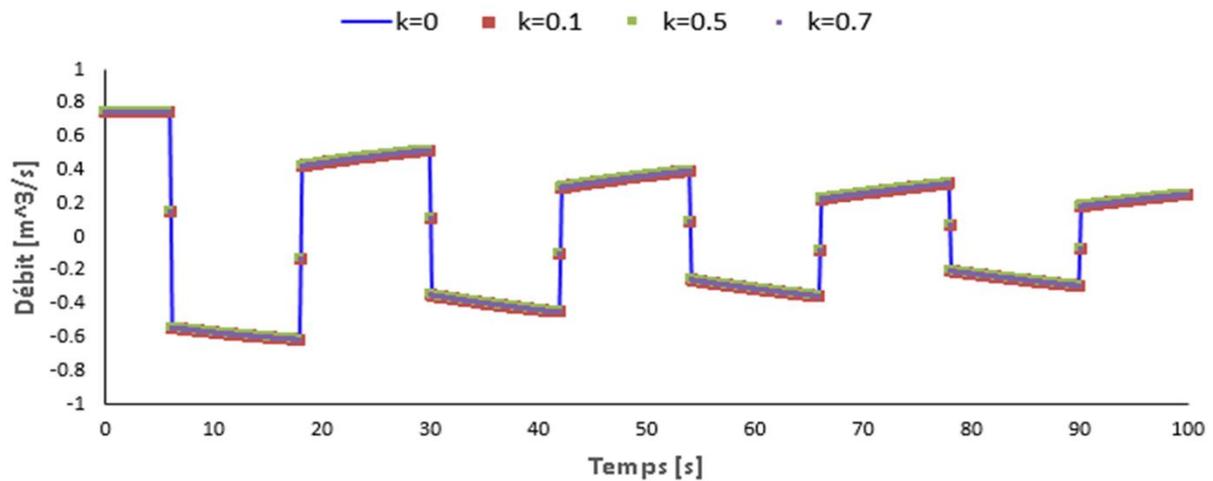
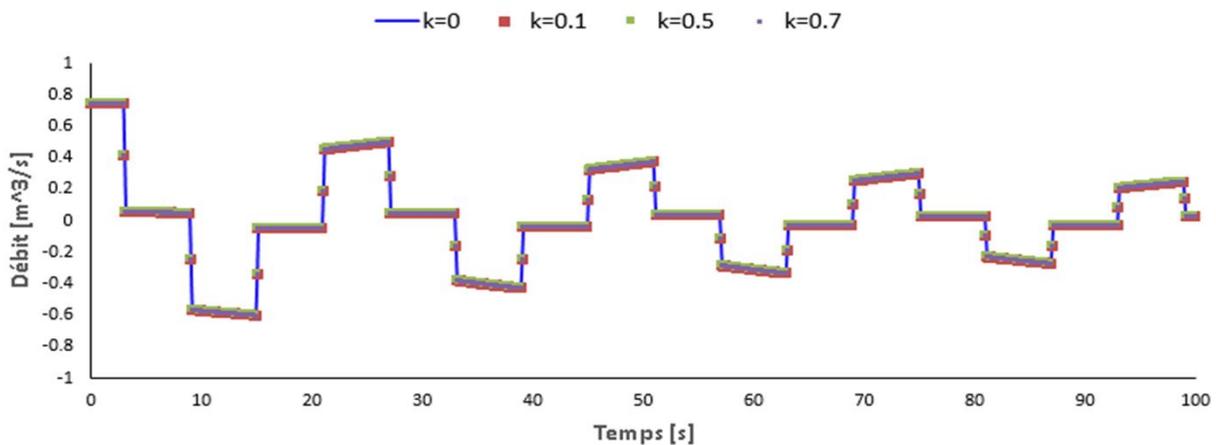


Figure III-8 : Charge hydraulique au réservoir et au milieu de la conduite pour différentes valeurs de « k ».

Validation et applications



a) au Réservoir



b) au milieu de la conduite

Figure III-9 : Débit au réservoir et au milieu de la conduite pour différentes valeurs de « k ».

Les figures III-8 et III-9 indiquent que le coefficient de pertes de charge singulières k a une influence négligeable sur la charge hydraulique $H(t)$ et le débit $Q(t)$ le long de la conduite. On voit que l'influence de k diminue en s'éloignant du réservoir. Et que la variation de k n'a pas d'influence sur la période d'oscillation.

III.8.3 Exemple de calcul algorithme 1: Influence de la variation du temps de fermeture

Pour voir l'influence du temps de fermeture on va le varier en fixant les autres paramètres comme suit :

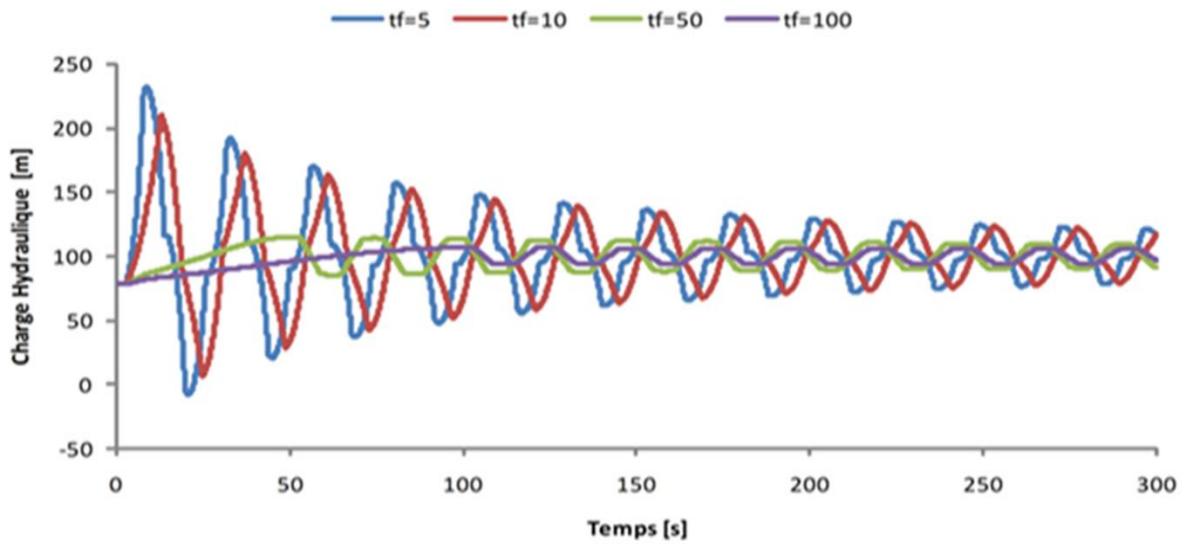
Validation et applications

Tableau III-12 : Données utilisées pour la simulation de la variation du temps de fermeture

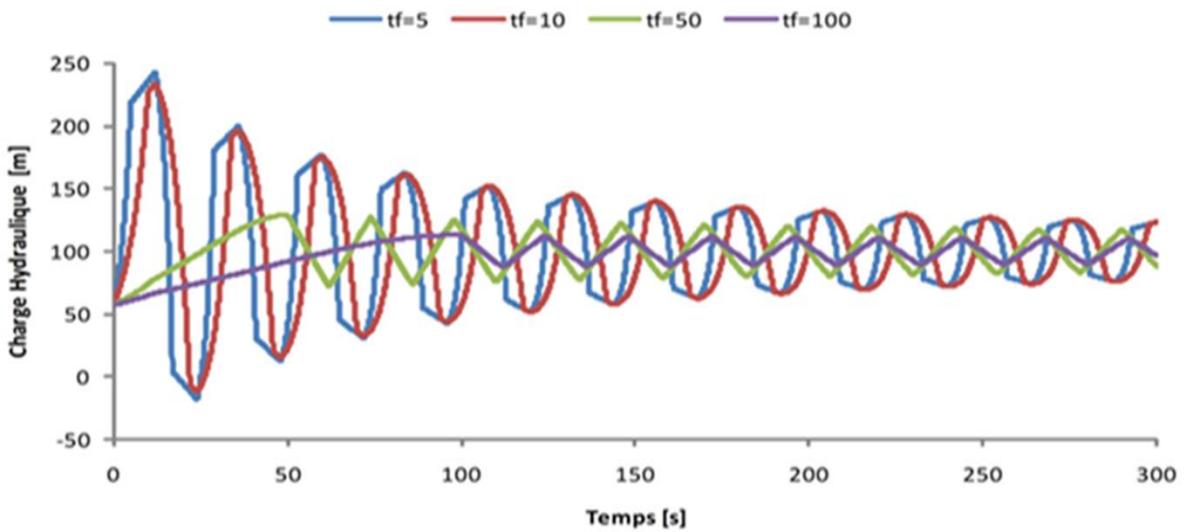
Diamètre de la conduite	Longueur de la conduite	Charge hydraulique initiale au réservoir	Débit initiale	Coefficient de perte de charge linéaire	Coefficient de perte de charge singulière	Durée de la période simulée	Nombre de segments	Célérité de l'onde de pression
D	L	H_{res}	Q_0	f	k	T	n	A
[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[s]	[-]	[m/s]
0.8	6000	200	0.75	0.05	0.5	300	100	1000

Avec t_f [s]= 5, 10, 50 et 100.

Validation et applications



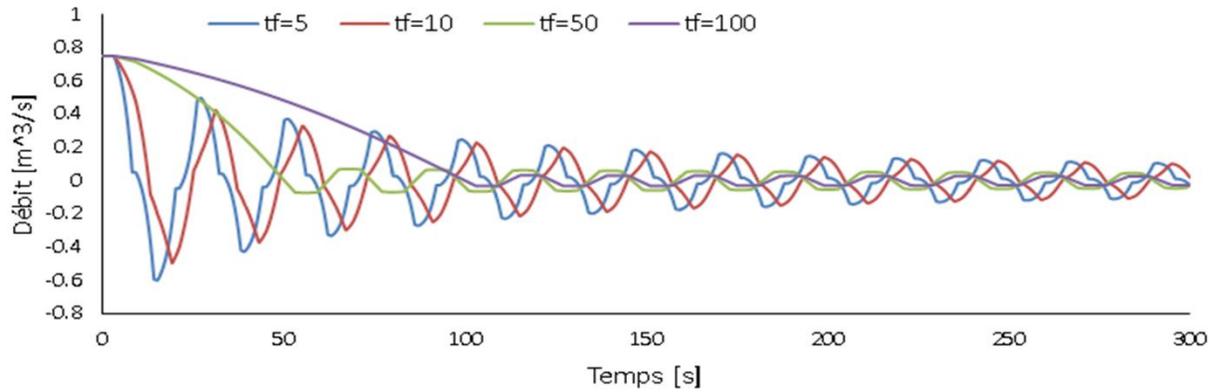
a) au milieu de la conduite



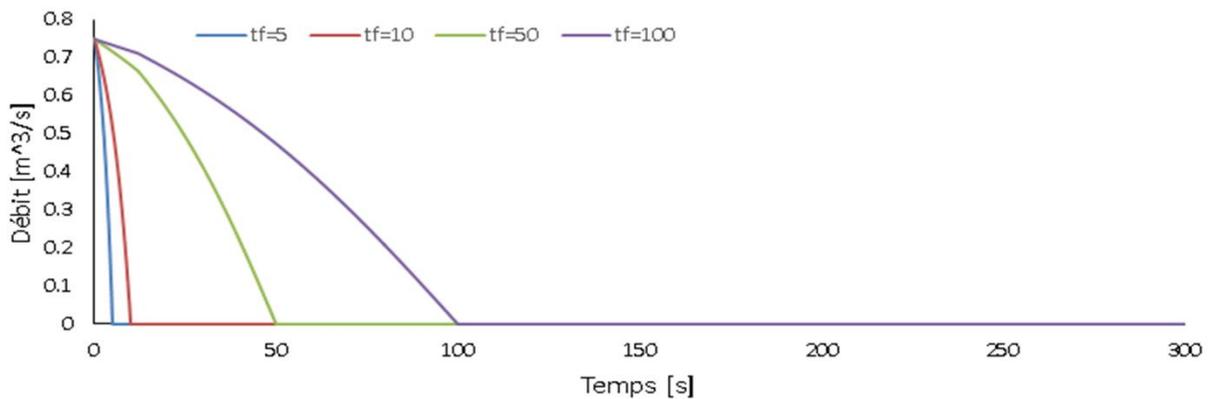
b) à la vanne

Figure III-10 : Charge hydraulique au milieu de la conduite et à la vanne pour différentes valeurs de temps de fermeture « t_f »

Validation et applications



a) au milieu de la conduite



b) à la vanne

Figure III-11 : Débit au milieu de la conduite et à la vanne pour différentes valeurs de temps de fermeture « t_f »

La figure III-10 indique que la magnitude de la charge hydraulique $H(t)$ est inversement proportionnelle à t_f le long de la conduite (aspect tout à fait attendu). La figure III-11 indique que la magnitude du débit $Q(t)$ est également inversement proportionnelle à t_f le long de la conduite, mais au niveau de la vanne le débit est nul à partir d'un temps supérieur au temps de fermeture. En plus, la variation de t_f n'a pas d'influence sur la période d'oscillation dans le système à partir d'un temps supérieur au temps de fermeture.

III.8.4 Exemple de calcul algorithme 4: Influence de la variation du diamètre de la cheminée d'équilibre

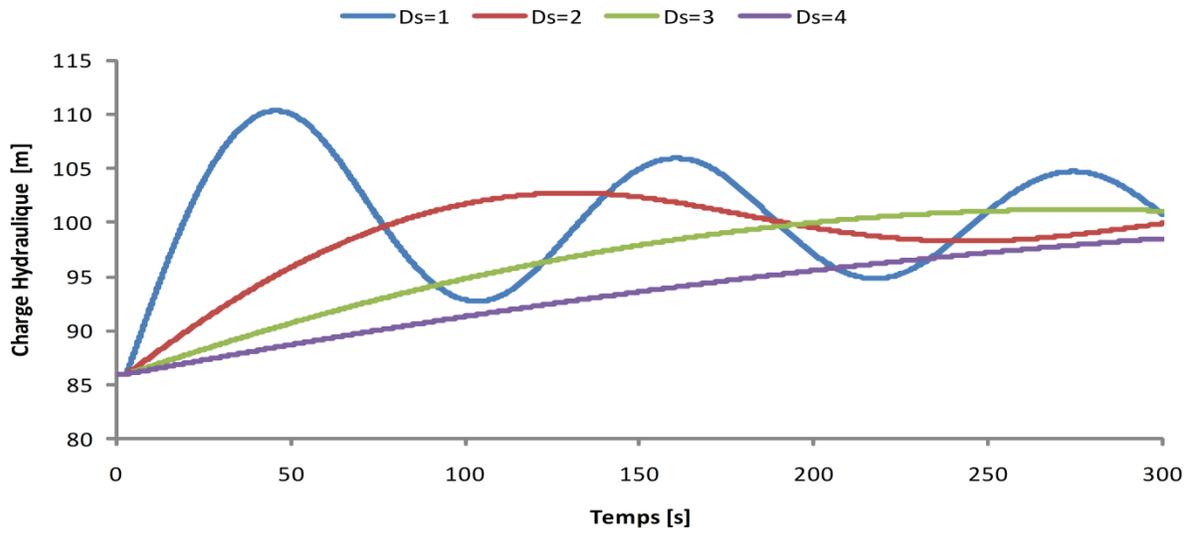
Pour voir l'influence de la variation du diamètre de la cheminée d'équilibre on va calculer la variation de la charge hydraulique et du débit avec plusieurs diamètres de cheminée « D_s ».

Tableau III-13 : Données utilisées pour la simulation de la variation de « D_s »

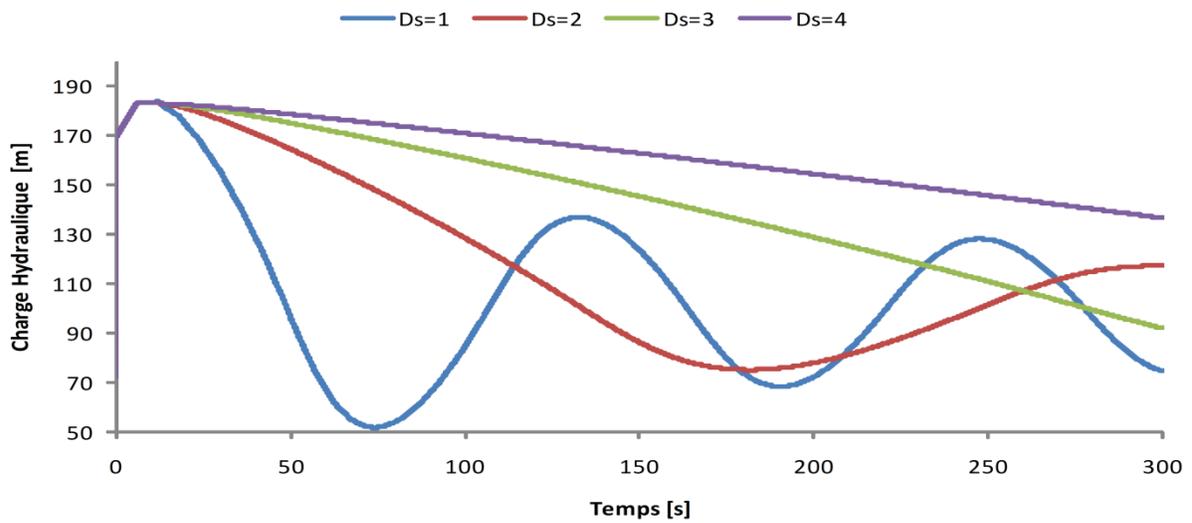
Diamètre de la conduite	Longueur de la conduite	Charge hydraulique initiale au réservoir	Débit initiale	Coefficient de perte de charge linéaire	Coefficient de perte de charge singulière	Durée de la période simulée	Nombre de segments	Célérité de l'onde de pression
D	L	H_{res}	Q_0	f	k	T	n	a
[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[s]	[-]	[m/s]
0.8	6000	200	0.75	0.05	0.5	300	100	1000

Avec D_s [m]= 1, 2, 3 et 4.

Validation et applications



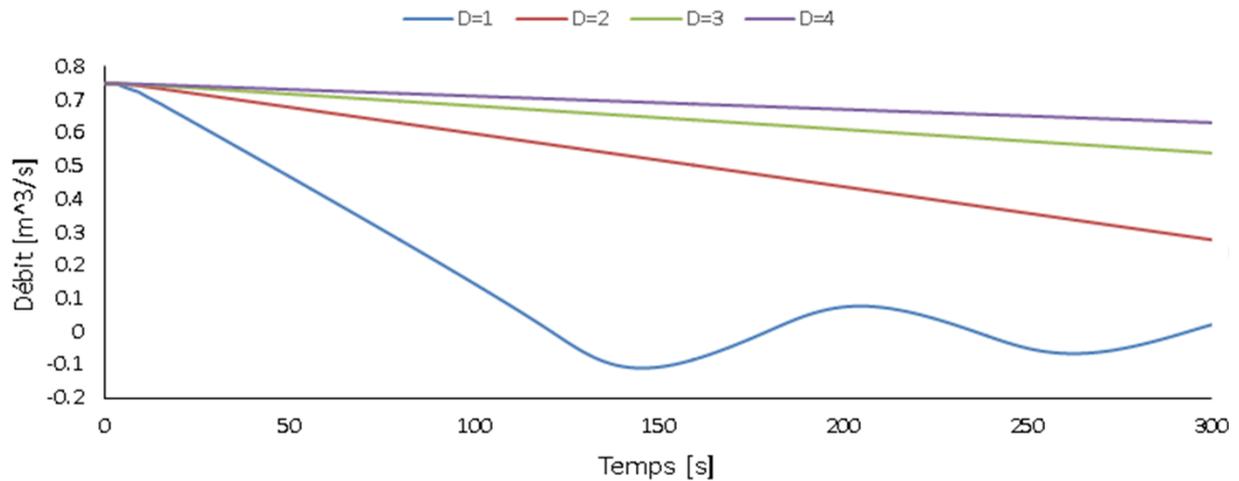
a) au milieu de la conduite



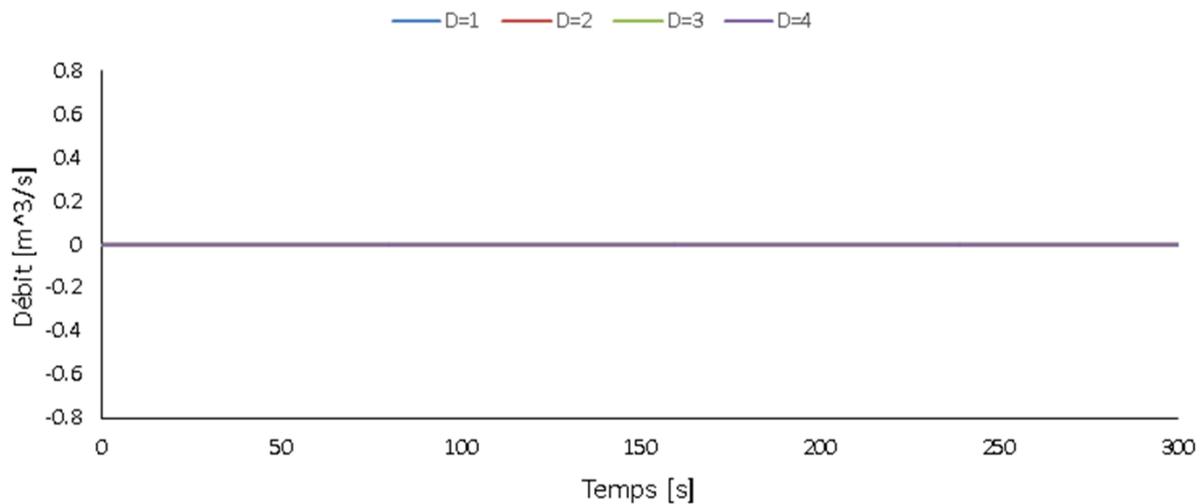
b) à la vanne

Figure III-12 : Charge hydraulique à la vanne et au milieu de la conduite en fonction du diamètre de la cheminée d'équilibre

Validation et applications



a) au milieu de la conduite



b) à la vanne

Figure III-13 : Débit à la vanne et au milieu de la conduite en fonction du diamètre de la cheminée d'équilibre

La figure III-12 indique que la magnitude de la charge hydraulique $H(t)$ est inversement proportionnelle à Ds (aspect tout à fait attendu), il est de même pour la magnitude $Q(t)$, sauf que le débit devient nul au niveau de la vanne (extrémité bloquée). D'autre part, il est facile d'observer que la variation de Ds a un effet évident sur la période d'oscillation. Enfin, on peut voir que l'amortissement de l'onde de pression et de débit causée par le coup de bélier se fait plus rapidement plus grand est le diamètre de la cheminée d'équilibre.

III.8.5 Exemple de calcul algorithme 4: Influence de la variation de la position de la cheminée d'équilibre

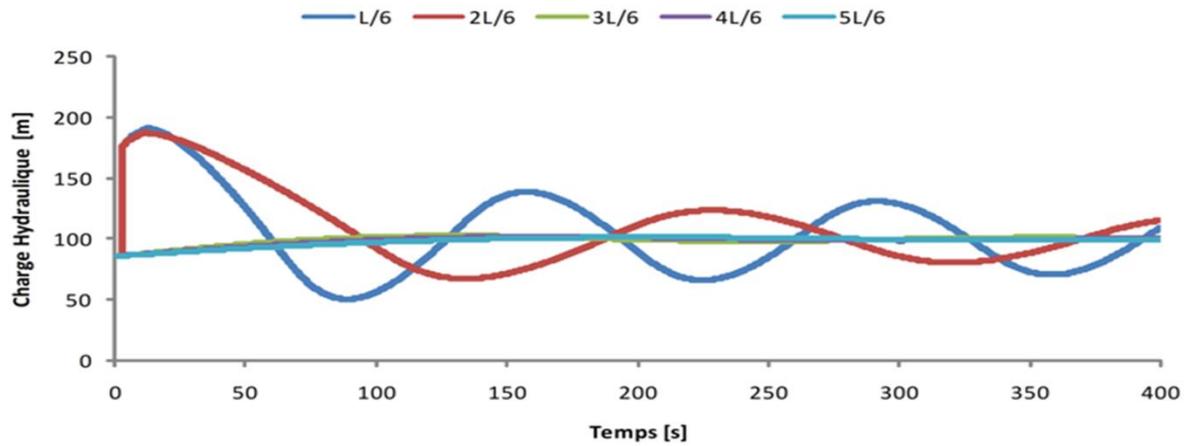
Pour voir l'influence de la variation de la position de la cheminée, on calcule la variation de la charge hydraulique et du débit après avoir installée la même cheminée d'équilibre dans différentes positions de la conduite. .

Tableau III-14 : Données utilisées pour la simulation de la variation de la position de la cheminée d'équilibre

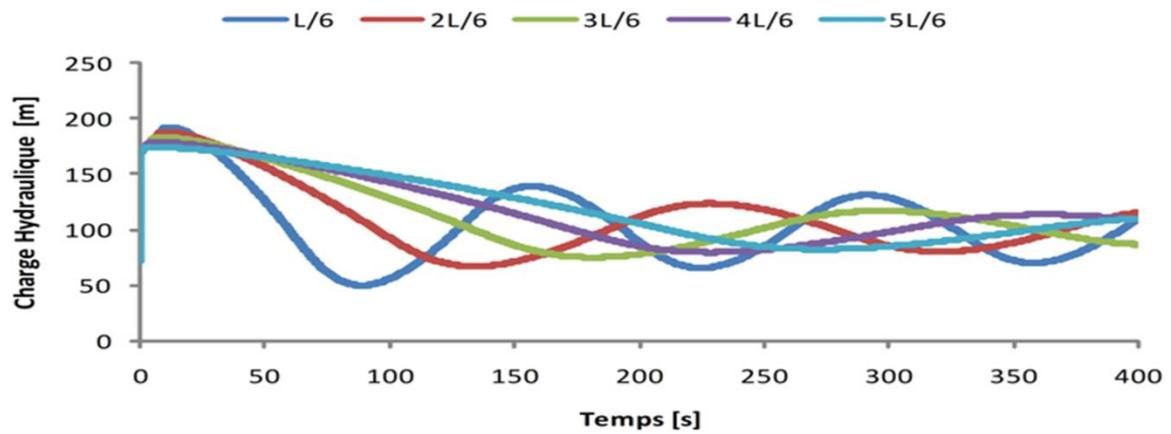
Diamètre de la conduite	Longueur de la conduite	Charge hydraulique initiale au réservoir	Débit initiale	Coefficient de perte de charge linéaires	Coefficient de perte de charge singulière	Durée de la période simulée	Nombre de segments	Célérité de l'onde de pression
D	L	Hres	Q0	F	K	T	N	a
[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[s]	[-]	[m/s]
0.8	6000	200	0.75	0.05	0.5	400	100	1000

Position de la cheminée par rapport au réservoir : à L/6, à 2L/6, à 3L/6, à 5L/6

Validation et applications



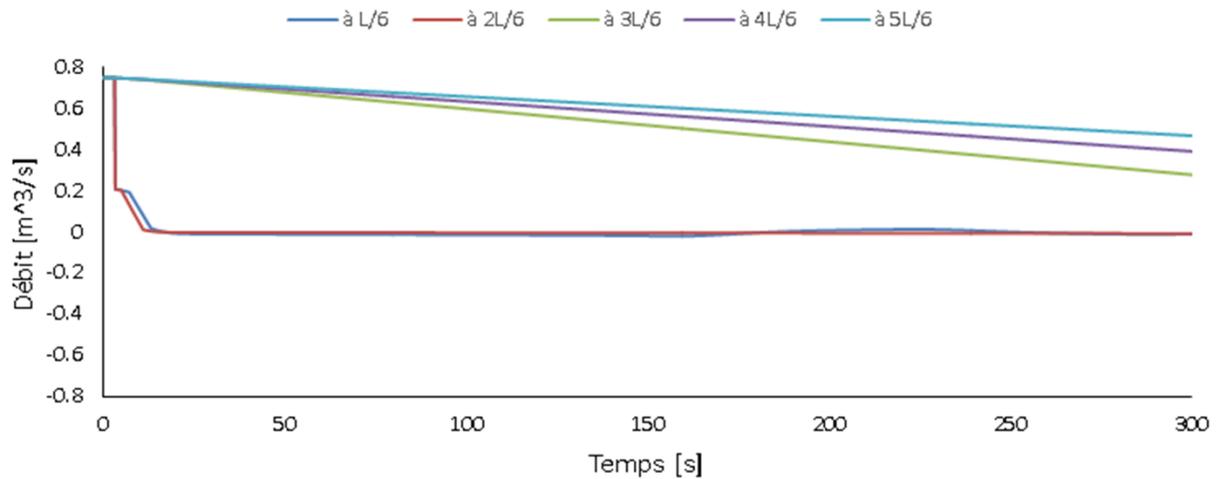
a) au milieu de la conduite



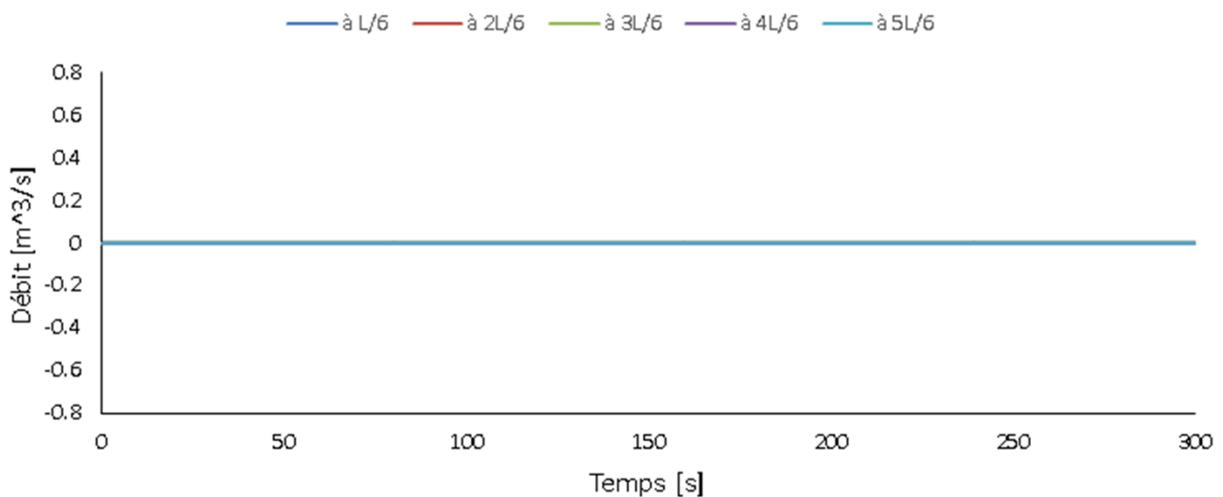
b) à la vanne

Figure III-14 : Charge hydraulique à la vanne et au milieu de la conduite en fonction du temps pour chaque position du cheminée d'équilibre.

Validation et applications



a) au milieu de la conduite



b) à la vanne

Figure III-15 : Débit à la vanne réservoir et au milieu de la conduite en fonction du temps pour chaque position du cheminée d'équilibre.

Les figures III-14 et III-15 indiquent que la magnitude de la charge hydraulique $H(t)$ est directement proportionnelle à la diminution de la distance entre la cheminée et la vanne (aspect tout à fait attendu), il est de même pour $Q(t)$ sauf à la vanne le débit est nul à la vanne (extrémité bloquée). D'autre part, il est facile d'observer que la variation de la position de la cheminée a un effet évident sur la période d'oscillation. Enfin, on peut voir que l'amortissement de l'onde de pression causée par le coup de bélier se fait plus rapidement plus petit est la distance entre la cheminée d'équilibre et la vanne.

III.8.6 Exemple de calcul algorithme 2: Influence de la variation du rapport des diamètres avant et après la jonction

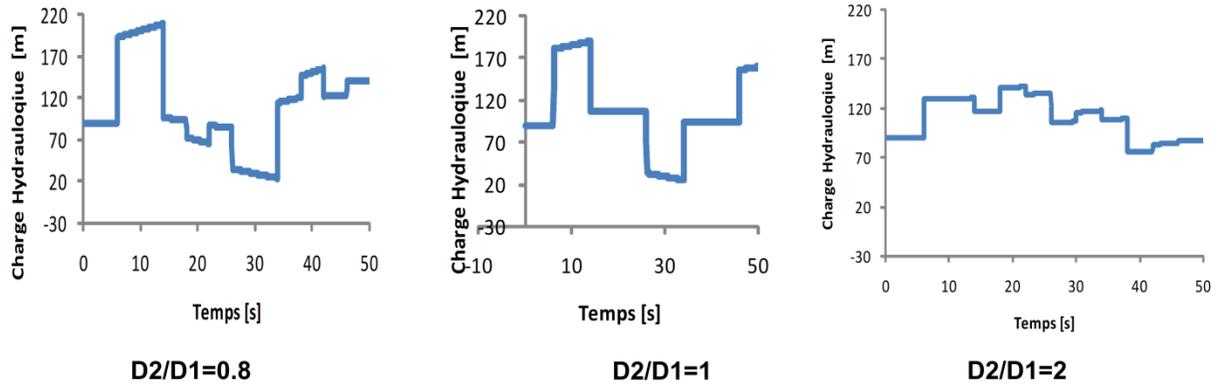
Pour voir l'influence de la variation du rapport des diamètres sur le phénomène on va calculer la variation de la charge hydraulique et du débit en fonction du temps pour différentes valeurs du rapport entre les diamètres des deux conduites en jonction..

Tableau III-15 : Données utilisées pour la simulation de la variation du rapport « D_2/D_1 »

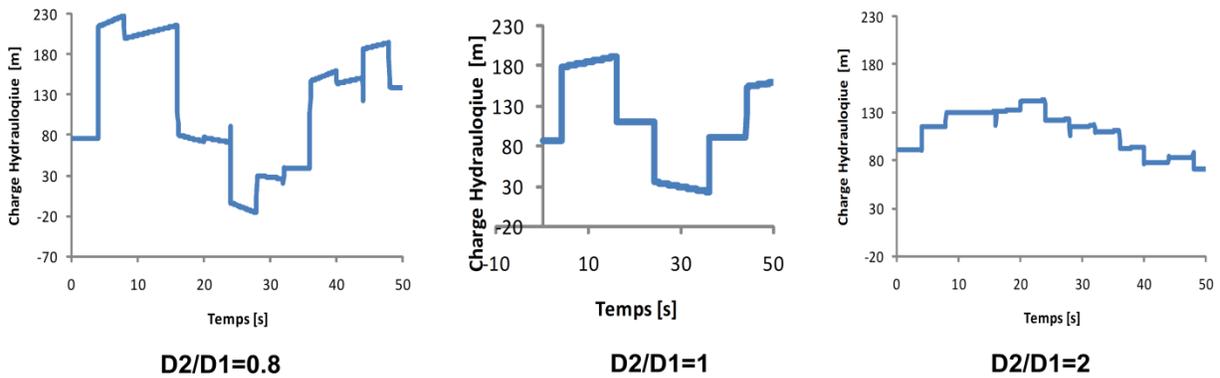
Diamètre de la conduite	Longueur de la conduite	Charge hydraulique initiale au réservoir	Débit initiale	Coefficient de perte de charge linéaires	Coefficient de perte de charge singulière	Temps de la période simulée	Nombre de segments	Célérité de l'onde de pression
D	L	Hres	Q0	F	k	T	n	a
[m]	[m]	[m]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[s]	[-]	[m/s]
0.8	6000	200	0.75	0.05	0.5	50	100	1000

Les valeurs du rapport D_2/D_1 sont : 0.8, 1.0 et 2.0.

Validation et applications



a) au milieu de la conduite (position de la jonction)



b) à la vanne

Figure III-16 : Charge hydraulique à la vanne et au milieu de la conduite en fonction du rapport des diamètres avant et après la jonction.

Validation et applications

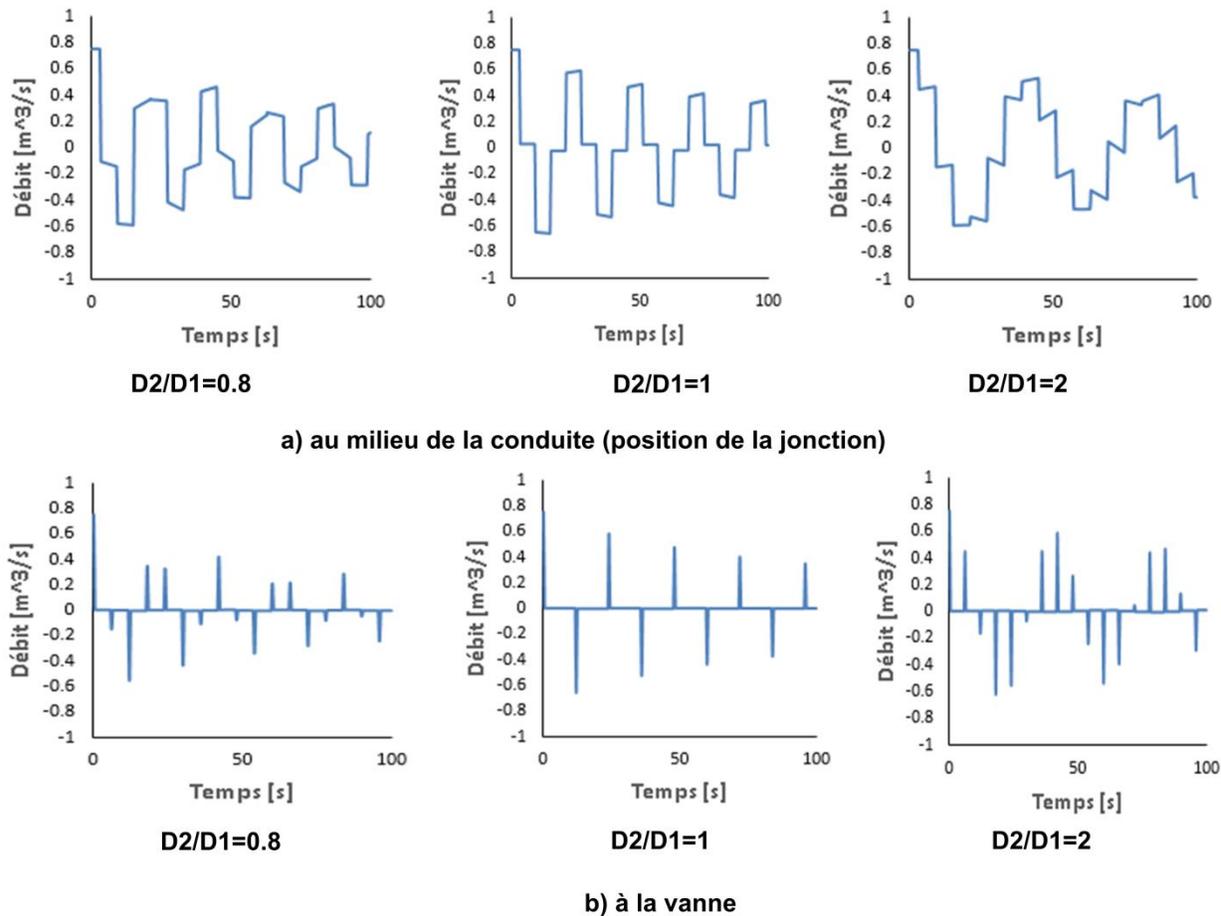


Figure III-17 : Débit à la vanne et au milieu de la conduite en fonction du rapport des diamètres avant et après la jonction.

La figure III-16 indique que la magnitude de la charge hydraulique $H(t)$ est inversement proportionnelle avec le rapport $D2/D1$.

Dans la figure III-17 on observe que la stabilisation du débit est inversement proportionnelle avec le rapport $D2/D1$.

Il est facile d'observer que la variation du débit et de la charge hydraulique ont un effet évident sur la période d'oscillation.

III.8.7 Exemple de calcul- algorithme 2: Influence de la variation de la position de jonction

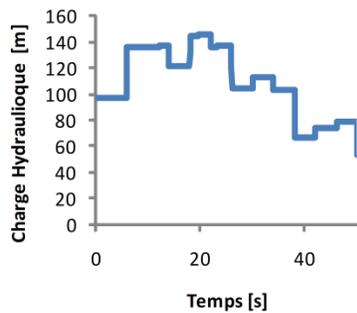
Pour voir l'influence de la variation de la position de la jonction sur le phénomène on va calculer la variation de la charge hydraulique et du débit en fonction du temps pour chaque position de la jonction.

Validation et applications

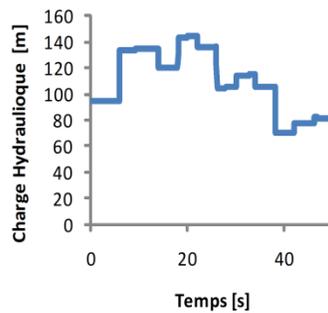
Tableau III-16: Données pour la simulation de la variation de la position de jonction

Diamètre de la conduite	Charge hydraulique initiale au réservoir	Débit initial	Coefficient de perte de charge linéaire	Coefficient de perte de charge singulière	Durée de la période simulée	Nombre de segments	Célérité de l'onde de pression
D	H_{res}	Q_0	f	k	T	n	a
[m]	[m]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[s]	[-]	[m/s]
0.8	200	0.75	0.05	0.5	50	100	1000
Valeurs de L1/L2	1/6	2/6	3/6				

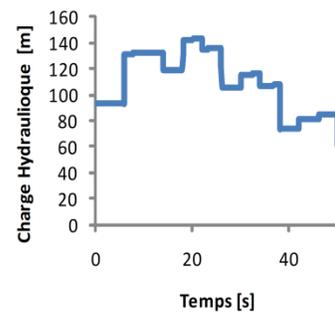
Valeurs du rapport L1/L2=1/6, 1/3, 1/2.



L1/L2=1/6

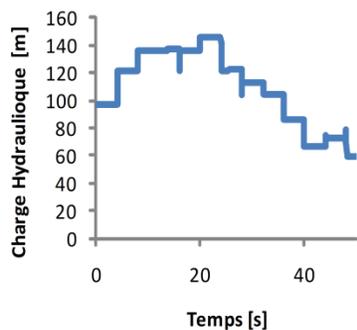


L1/L2=2/6

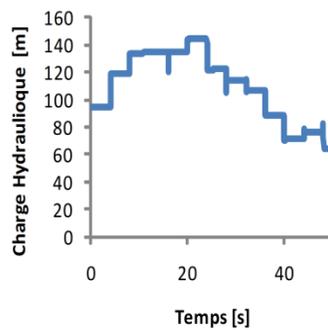


L1/L2=3/6

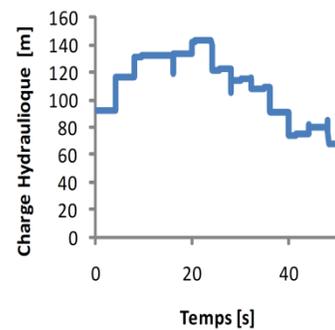
a) au milieu de la conduite



L1/L2=1/6



L1/L2=2/6



L1/L2=3/6

a) à la vanne

Validation et applications

Figure III-18 : Charge hydraulique au milieu de la conduite et à la vanne en fonction du temps pour différentes valeurs du rapport entre longueurs des conduites en jonction.

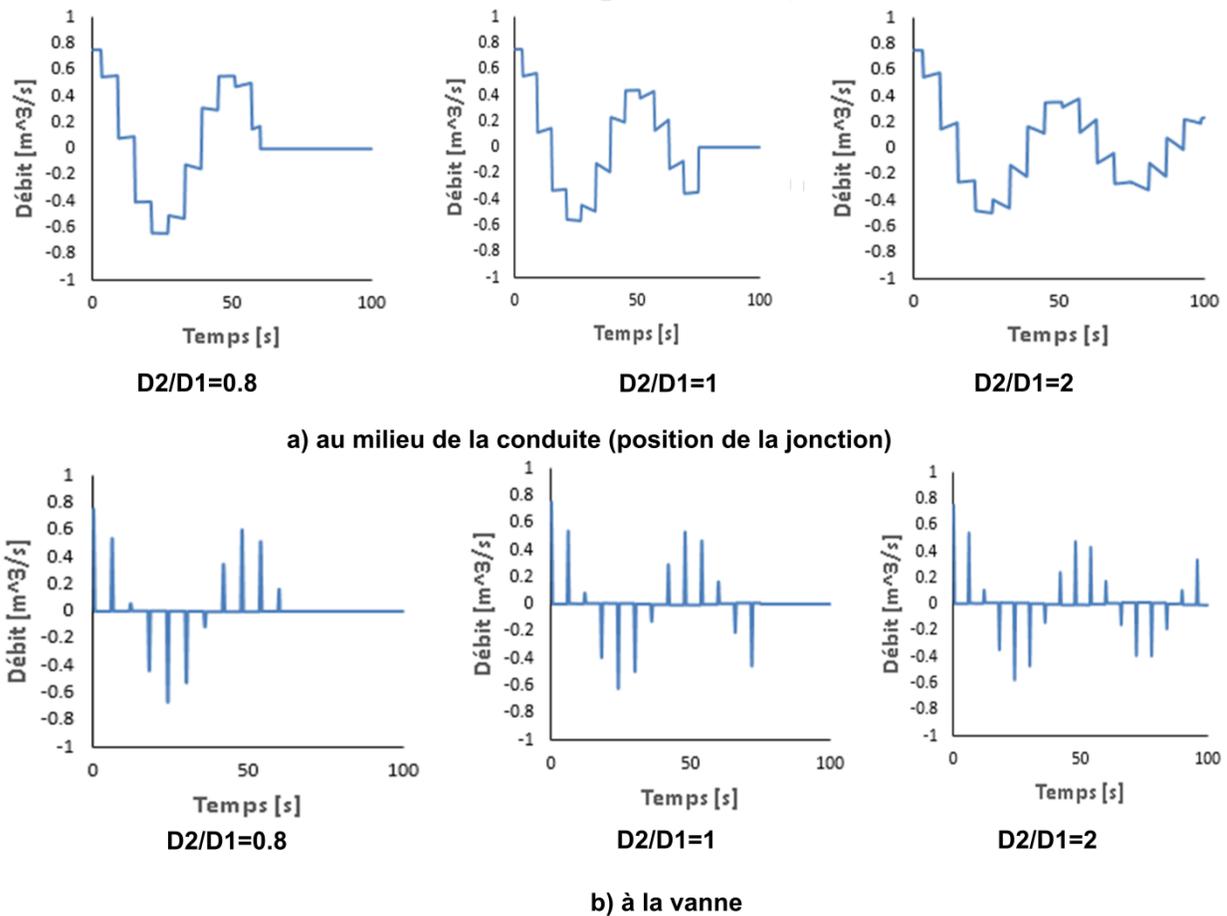


Figure III-19 : Débit au milieu de la conduite et à la vanne en fonction du temps pour différentes valeurs du rapport entre longueurs des conduites en jonction.

La figure III-18 indique que la charge hydraulique $H(t)$ est faiblement influencée par le rapport $L1/L2$, il est de même pour $Q(t)$.

III.9 Conclusion

Les simulations numériques réalisées dans ce chapitre constituent en premier lieu un moyen de validation pour les différents algorithmes de l'outil informatique développé. D'autre part, les études paramétriques présentées nous ont permis de mettre en évidence la capacité, puissance et flexibilité de notre simulateur.

Conclusion et recommandations

L'étude du coup de bélier fait l'objet de beaucoup de recherches dues à l'importance des effets de ce phénomène sur les installations hydrauliques.

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 (4 systèmes : réservoir-conduite-vanne, réservoir-2 conduites en série (jonction)-vanne, réservoir-3 conduites dont 2 sont en parallèle (branchement)-vannes, réservoir-conduite équipée par une cheminée d'équilibre-vanne). Pour ce faire, un simulateur du coup de bélier basé sur la méthode des caractéristiques est établi. Les différents algorithmes sont validés avec des données/résultats pré-validées.

En perspective, pour l'amélioration du simulateur on suggère d'ajouter d'autres cas ainsi que l'utilisation d'autres approches (méthode des volumes finis, différences finies, etc.).

Bibliographie

Abbott, M.B., 1966. *An introduction to the method of characteristics*. London.

Allievi, L., 1913. Teoria del colpo d'ariete. *Atti del Collegio degli Ingegneri e degli Architetti italiani*.

Amara, L., Berreksi, A. & Amireche, M., 2016. *Simulation numérique du phénomène transitoire du coup de bélier Lyes Amara*. Editions universitaires européennes.

Carlsson, J., 2016. *Water Hammer Phenomenon Analysis using the Method of Characteristics and Direct Measurements using a "stripped" Electromagnetic Flow Meter*. Master of science thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute Of Technologie.

Chaudhry, M.H., 2014. *Applied Hydraulic Transients*. Third Edition ed. new york: springer.

Escande, L., 1971. *Hydraulique générale*. Tome II, Institut National Polytechnique de Toulouse, Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique d'Electronique d'Informatique et d'Hydraulique Edition.

Evangelisti, G., 1969. Teoria generale del colpo d'ariete col metodo delle caratteristiche. In *L'Energia Elettrica*. Milano.

Ghidaoui, M.S., Ming, Z., Duncan A, M. & David H, A., 2005. A review of water hammer theory and practice. 58(1), pp.49-76.

Halliwell, A.R., 1963. Velocity of Water-Hammer wave in an Elastic pipe. 89, pp.1-21.

Lister, M., 1960. The numerical solution of hyperbolic partial differential equations. In *A. Ralston and H.S. Wilf*. Numerical methods for digital computers, Wiley ed. New York.

Mambretti, S., 2014. Numerical solution of the governing equations: The method of characteristics. In Mambretti, S. *Water Hammer simulations*. Southampton, UK: WIT Press. pp.41-54.

Meunier, M., 1980. *Les coups de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression*. Paris: Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.

Moriasi, D.N. et al., 2007. Model evaluation guide lines for systematic. 50(3), pp.885-900.

Pearsall, I.S., 1965. The Velocity of Water Hammer Waves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, 180(5), pp.12 - 20.

Streeter, V., 1972. Unsteady Flow Calculations by Numerical Methods. 94(2), pp.457-65.

Tijsseling, A.S. & Anderson, A., 2006. The Joukowsky equation for fluids and solids. 608.

Manuel d'utilisation (Annexe)

1. Introduction

Ce manuel d'utilisation conçu après avoir sélectionné tous les paramètres variables dans nos cas de simulation tel que les diamètres des conduites utilisées, la célérité de l'onde, la hauteur du réservoir, la longueur de la conduite, le débit...

2. Les étapes de la manipulation

Pour l'utilisation de ce code de calcul, ce manuel d'utilisation donne les étapes détaillées pour aboutir aux résultats simulés. Elles sont énumérées ci-dessous :

Ouverture du programme : pour avoir la première fenêtre de l'interface du code on effectue un double clic sur l'icône du logiciel.

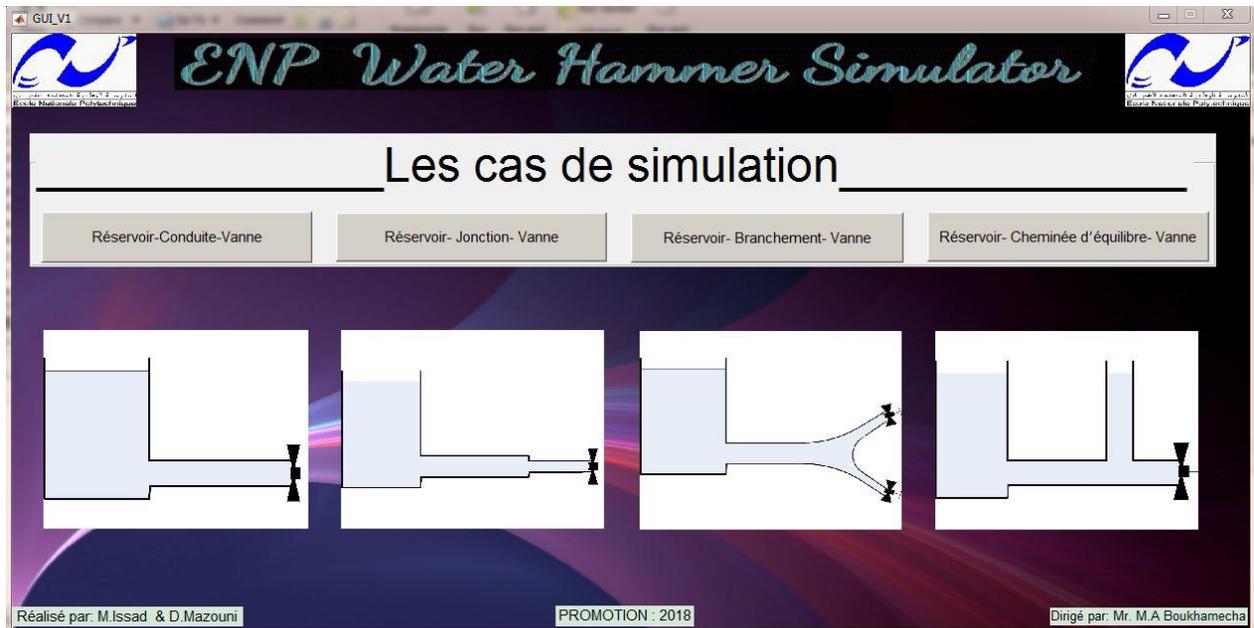


Figure 0-1 : La première fenêtre du logiciel

Cette fenêtre nous permet de choisir un des quatre algorithmes développés correspondant aux différents cas considérés par le logiciel :

- A. **Réservoir-conduite-Vanne** : Ce cas traite les systèmes hydrauliques typiques où l'installation comprend une conduite alimentée par un réservoir en amont et équipée d'une vanne en aval (figure 0-2).

Manuel d'utilisation

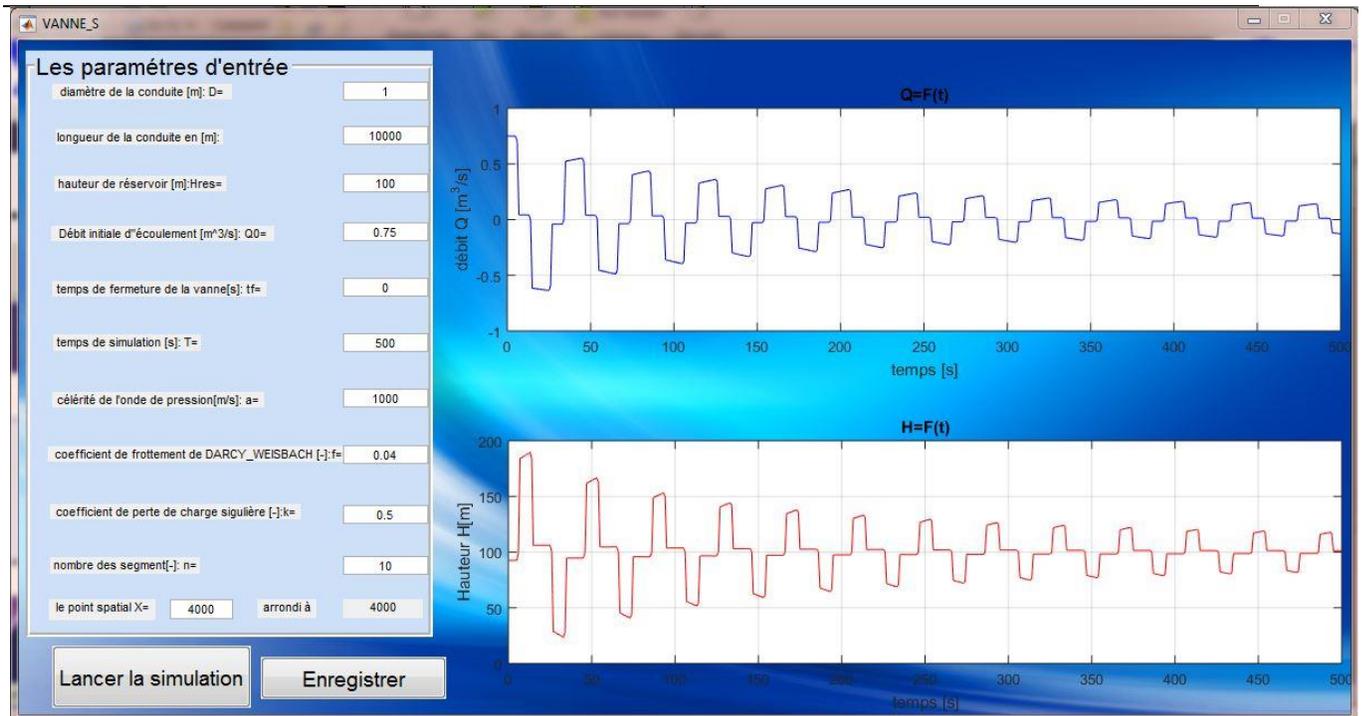


Figure 0-2 : Fenêtre du logiciel pour le cas Vanne

Après avoir introduit les paramètres d'entrée du système et avoir spécifié le point de la conduite dans lequel on veut visualiser les fonctions $H(t)$ et $Q(t)$, on clique sur le bouton "Lancer la simulation" pour exécuter le code et sur le bouton "Enregistrer" pour générer un fichier ".txt" avec les fonctions obtenues ($H(t)$ et $Q(t)$).

Réservoir-jonction-Vanne : Ce cas traite les systèmes hydrauliques typiques où l'installation comprend deux conduites en série (jonction) alimentées par un réservoir en amont et équipées d'une vanne en aval.

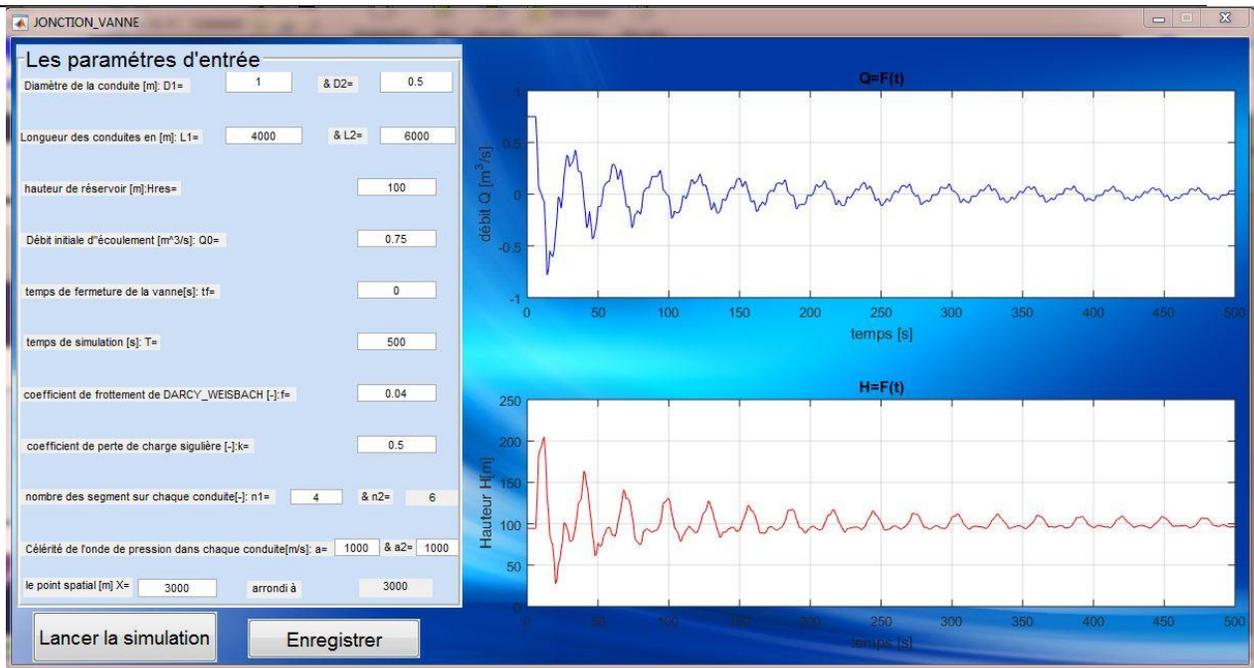


Figure 0-3 : Fenêtre du logiciel pour le cas Jonction-Vanne

Dans ce cas la spécification du nombre de segments dans la première conduite « n1 » va conditionner le nombre de segments « n2 ». Et d'une façon similaire, après avoir introduit les paramètres d'entrée du système et avoir spécifié le point de la conduite dans lequel on veut visualiser les fonctions $H(t)$ et $Q(t)$, on clique sur le bouton "Lancer la simulation" pour exécuter le code et sur le bouton "Enregistrer" pour générer un fichier ".txt" avec les fonctions obtenues ($H(t)$ et $Q(t)$).

Branchement-Vanne : Ce cas traite les systèmes hydrauliques typiques où l'installation comprend trois conduites dont deux sont en parallèle (branchement) alimentées par un réservoir en amont et équipées de vannes en aval.

Manuel d'utilisation

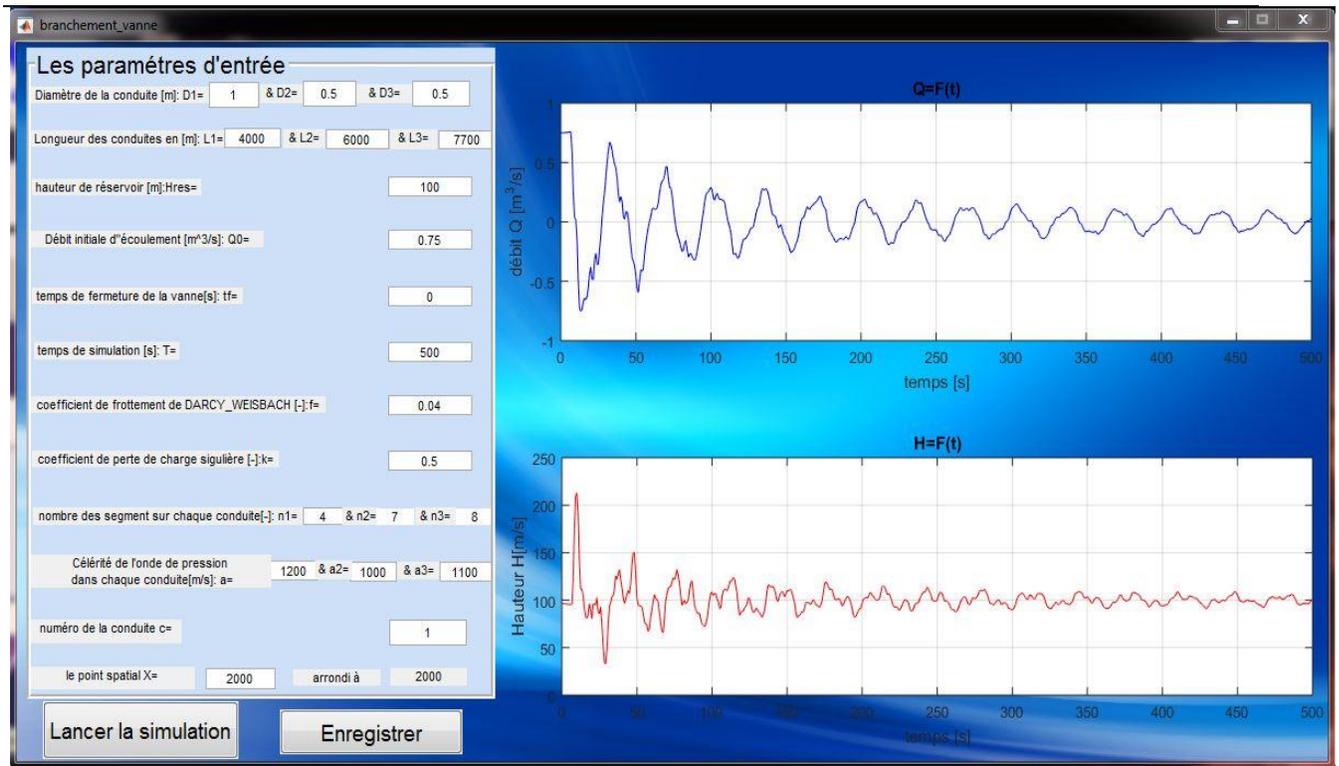


Figure 0-4 : Fenêtre du logiciel pour le cas Branchement-Vanne

Les paramètres de simulation doivent être introduits dans la fenêtre Réservoir-branchement-Vanne pour chacune des trois conduites avant de lancer la simulation. La spécification du nombre de segments de la première conduite « n1 » va également conditionner les valeurs des nombres de segments à utiliser pour discrétiser les deux autres conduites (c.-à-d. n2 et n3). Et d'une façon similaire, après avoir introduit les paramètres d'entrée du système et avoir spécifié le point de la conduite dans lequel on veut visualiser les fonctions H(t) et Q(t), on clique sur le bouton "Lancer la simulation" pour exécuter le code et sur le bouton "Enregistrer" pour générer un fichier ".txt" avec les fonctions obtenues (H(t) et Q(t)).

Réservoir-cheminée d'équilibre-vanne : Ce cas traite les systèmes hydrauliques typiques où l'installation comprend une conduite alimentée par un réservoir en amont et équipée d'une cheminée d'équilibre et d'une vanne en aval.

Manuel d'utilisation

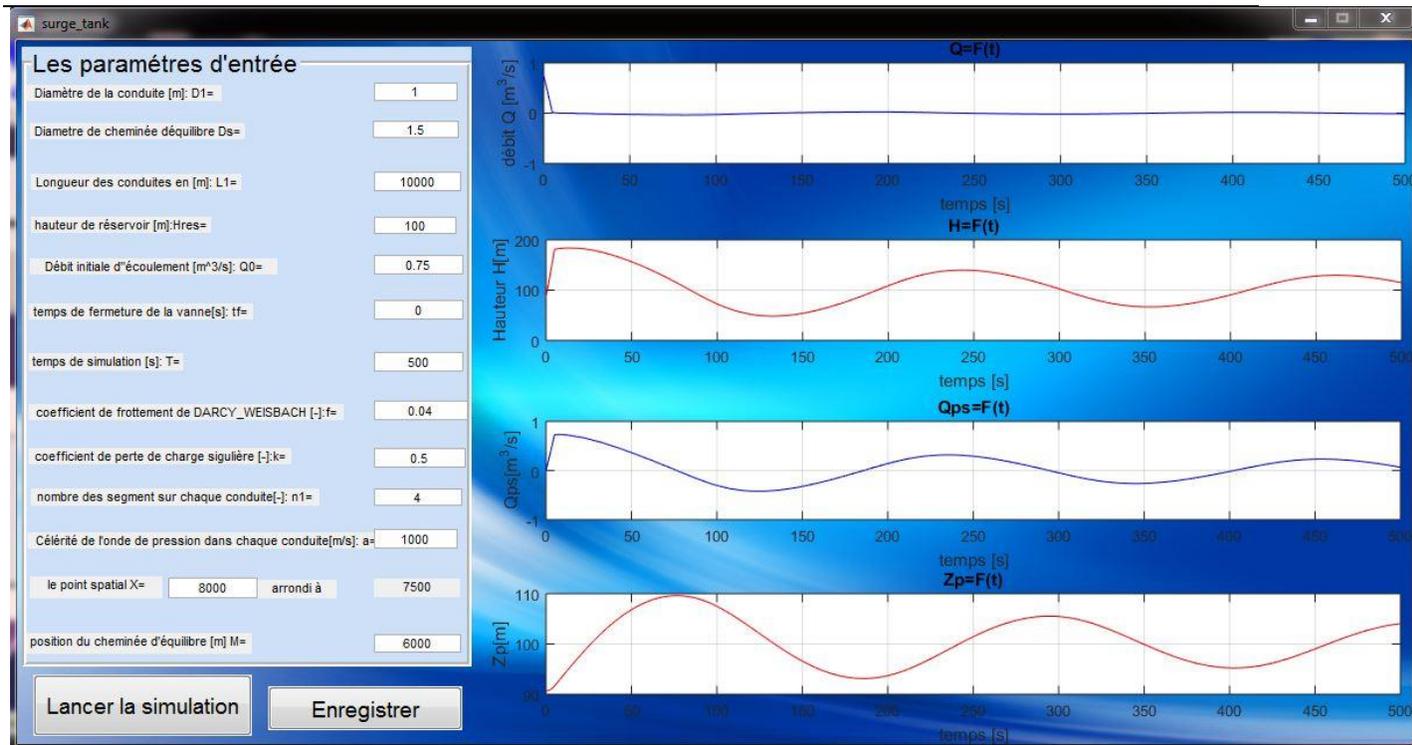


Figure 0-5 : Fenêtre du logiciel pour le cas de cheminée d'équilibre

En plus des paramètres de simulation utilisés par le premier code, ce cas nécessite l'introduction du diamètre de la cheminée d'équilibre et sa position dans la conduite (figure 0-5). Et d'une façon similaire, après avoir introduit les paramètres d'entrée du système et avoir spécifié le point de la conduite dans lequel on veut visualiser les fonctions $H(t)$ et $Q(t)$, en plus des fonction $Qs(t)$ et $Z(t)$ (représentant respectivement la variation du débit échangé entre la conduit et la cheminée d'équilibre ainsi que le niveau d'eau dans la cheminée) on clique sur le bouton "Lancer la simulation" pour exécuter le code et sur le bouton "Enregistrer" pour générer un fichier ".txt" avec les fonctions obtenues ($H(t)$, $Q(t)$, $Qs(t)$ et $Z(t)$).

3. Remarque

Si la position spécifiée « X » pour visualiser les résultats de la simulation n'est pas identique à celle de la discrétisation, elle va être automatiquement arrondie à la plus proche position de discrétisation. Par exemple, si le pas de discrétisation est de 100 m et on veut afficher les graphes dans la position 280 m, les résultats seront automatiquement affichés

pour la position 300m. Afin de pouvoir afficher les résultats dans la position désirée il est nécessaire de jouer sur le nombre de segments "n" (c.-à-d. sur la discrétisation de la conduite).

4. Conclusion

Ce manuel d'utilisation donne les grandes lignes d'utilisation de l'outil informatique développé pour chacun des cas simulés. Les erreurs et les résultats aberrants ne sont pas signalés comme erreur. Donc, pour la réussite de la simulation il est nécessaire de spécifier des paramètres d'entrée cohérents.