

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

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

**Développement d'outils informatiques pour le génie
Hydraulique : Simulateur du coup de bélier -
implémentation de nouvelles commandes
(Pack d'extension 2020)**

Madene Sawab

Arab Sanaa Rym

Sous la direction de Mr. Boukhemacha Mohamed Amine à l'ENP

Présenté et soutenu Publiquement le (13/10/2020)

Composition du Jury :

Président	Mr. Bali A.	Prof	ENP Alger
Encadreur	Mr. Boukhemacha M.A.	MCA	ENP Alger
Examineur	Mr. Belhadj O.	MAA	ENP Alger

ENP 2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études

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

**Développement d'outils informatiques pour le génie
Hydraulique : Simulateur du coup de bélier -
implémentation de nouvelles commandes
(Pack d'extension 2020)**

Madene Sawab

Arab Sanaa Rym

Sous la direction de Mr. Boukhemacha Mohamed Amine à l'ENP

Présenté et soutenu Publiquement le (13/10/2020)

Composition du Jury :

Président	Mr. Bali A.	Prof	ENP Alger
Encadreur	Mr. Boukhemacha M.A.	MCA	ENP Alger
Examineur	Mr. Belhadj O.	MAA	ENP Alger

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement :

A mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A tous les membres de ma promotion. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

Egalement à tous ceux qui m'ont aidé.

MADENE SAWAB

Je dédie ce modeste travail :

A mes parents pour leur soutien leurs sacrifices, leur amour et confiance ultime.

A tous mes frères ma sœur et toute ma famille

A tous les amis qui ont contribué à créer les mémoires de cette expérience.

ARAB SANAA RYM

Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant d'avoir nous donner le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent travail.

*Nous voudrions dans un premier temps remercier notre encadreur de mémoire **Mr. Boukhemacha M.A.** pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.*

Nos remerciements également au :

- Président de jury : M. Bali A.*
- Examineurs : M. Belhadj O.*

D'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous remercions l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation ainsi qu'à l'ensemble du personnel administratif de l'École.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

ملخص

هذا العمل ، الذي يتم تمثيله في شكل جهاز محاكاة ، هو نتيجة دراسة رقمية لظاهرة التدفقات غير الدائمة المضغوطة. يتمحور عملنا في تطوير الخوارزميات التي تسمح بحساب التغيرات في التدفق والضغط لأنظمة هيدروليكية مختلفة محمية بواسطة خزان الهواء. يركز الموضوع على برمجة أوامر جديدة في محاكي المطرقة المائية الذي تم تطويره بمخبر LRMGCE بمدرسة الوطنية متعددة التقنيات (الإصدارين 2018 و 2019) تم تصميم حزمة التوسعة الثانية بناءً على الطريقة المميزة وتم تطويره في بيئة مفتوحة المصدر (Python 3.7) وتم التحقق من صحته بواسطة برنامج آخر.

الكلمات المفتاحية: الجريان الانتقالي المضغوط، مطرقة مائية، طريقة الميزة، خزان الهواء.

ABSTRACT

This work, which takes the form of a simulator, is the result of a numerical study of the unsteady flow in pressurized pipe. Our work consists of developing algorithms that allow us to calculate the flow and pressure variations of different hydraulic configurations protected by an air chamber. The projection hand focuses on the implementation of new commands in the water hammer simulator developed within the laboratory LRMGCE of the ENP as part of two PFEs (in 2018 and 2019). This second expansion pack (based on method of characteristics) is designed and developed in the open source environment (Python 3.7) and validated by a third party software.

Key words: Transient pressurized pipe flow, water hammer, method of characteristics, air chamber.

RESUME

Ce travail, qui se représente sous la forme d'un simulateur, est le résultat d'une étude numérique du phénomène des écoulements non permanent en charge. Notre travail consiste à développer des algorithmes pour le calcul des variations de débits et de pression pour différentes configurations d'installations hydrauliques protégées par un réservoir d'air. Le projet en main porte sur l'implémentation de nouvelles commandes dans le simulateur de coup de bélier développé au sein du laboratoire LRMGCE de l'ENP dans le cadre de deux PFE (en 2018 et 2019). Ce deuxième pack

d'extension (basé sur la méthode caractéristique)est conçu et développée dans l'environnement open source (Python 3.7) et validée avec un logiciel tiers.

Mots clés : Ecoulement transitoire en charge, coup de bélier, méthode des caractéristiques, réservoir d'air.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction	18
I.1 Coup de bélier	21
I.1.1 Définition du coup de bélier	21
I.1.2 Causes du coup de bélier	21
I.1.3 Conséquences du coup de bélier	21
I.1.4 Eléments de protection contre le coup de bélier	22
I.1.4.1 Réservoir d'air	22
I.1.4.2 Cheminée d'équilibre	23
I.1.4.3 Autres éléments et techniques de protection du coup de bélier	24
I.1.5 Equation de base du coup de bélier	24
I.1.6 Vitesse de propagation de l'onde de pression	25
I.1.6.1 Conduite en béton armé	27
I.2 Equations des écoulements transitoires	27
I.3 Méthode des caractéristiques	28
I.3.1 Introduction	28
I.3.2 Conditions aux limites	30
I.3.2.1 Vanne en Aval	30
I.3.2.2 Réservoir en amont	31
I.3.2.3 Jonction en série	32
I.3.2.4 Branchement	33
I.3.2.5 Extrémité bloqué	33
I.3.2.6 Eléments de protection	34
a. Cheminée d'équilibre	34
b. Réservoir d'air	35
II Modèle conceptuel et algorithmes	38
II.1 Introduction	38
II.2 Modèle Conceptuel	38

II.2.1	Nouveautés dans l'interface graphique	39
II.3	Algorithmes.....	42
II.3.1	Résolution du système d'équations des conditions aux limites du réservoir d'air	42
II.3.2	Algorithme 1 -Système : réservoir-conduite-réservoir d'air-vanne	43
II.3.3	Algorithme 2 - Système : réservoir-multi conduite en série-Réservoir d'air-vanne	46
II.3.4	Algorithme 3 - Système : réservoir-multi conduite en parallèle -Réservoir d'air-vanne	48
III	Validation et Applications.....	51
III.1	Introduction	51
III.2	Exemple de modélisation du coup de bélier sur Bentley Hammer	52
III.3	Validation des algorithmes	54
III.3.1	Validation de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-réservoir d'air-vanne)	54
III.3.1.1	Variation de la position du réservoir d'air	56
a.	Position du réservoir d'air M=200.....	57
b.	Position du réservoir d'air M=500.....	58
c.	Position du réservoir d'air M=800.....	60
III.3.1.2	Variation du volume du réservoir d'air	61
a.	Volume du réservoir d'air =3.....	62
b.	Volume du réservoir d'air = 4.....	63
c.	Volume du réservoir d'air = 6.....	65
III.3.1.3	Variation du volume d'air.....	66
a.	Volume initiale d'air =0.5	67
b.	Volume initiale de l'air = 1	69
c.	Volume initiale de l'air =2.....	70
d.	Volume initiale de l'air=3.5	72
III.3.2	Validation de l'algorithme 2 (réservoir- multi conduites en série - réservoir d'air-vanne).....	74
III.3.2.1	Variation de la position du réservoir d'air	75
a.	La position du réservoir d'air M=200.....	75
b.	La position du réservoir d'air M=500.....	77
c.	La Position du réservoir d'air M=800	78

III.3.2.2	Variation du volume du réservoir d'air	80
a.	Volume du réservoir d'air = 3	80
b.	Volume du réservoir d'air = 4	82
c.	Volume du réservoir d'air = 6	83
III.3.2.3	Variation du volume initial de l'air	85
a.	Volume initiale de l'air = 0.5	85
b.	Volume initiale de l'air $V_{\text{air}}=1$	87
c.	Volume initiale de l'air $V_{\text{air}}=2$	88
d.	Volume initiale de l'air $V_{\text{air}}=3.5$	90
III.3.3	Validation de l'algorithme 3 (réservoir- multi conduites en parallèle - réservoir d'air-vanne).....	92
III.3.3.1	Variation de la position du réservoir d'air	93
a.	Position du réservoir d'air $M=200$	94
b.	Position du réservoir d'air $M=500$	96
c.	Position du réservoir d'air $M=200$ /conduite principale	97
III.3.3.2	Variation du volume du réservoir d'air	99
a.	Volume du réservoir d'air $V_{\text{airch}}=3$	99
b.	Volume du réservoir d'air $V_{\text{airch}}=4$	101
c.	Volume du réservoir d'air $V_{\text{airch}}=6$	102
III.3.3.3	Variation du volume initiale du réservoir d'air	104
a.	Volume initiale de l'air $V_{\text{air}}=0.5$	104
b.	Volume initiale de l'air $V_{\text{air}}=1$	106
c.	Volume initiale de l'air $V_{\text{air}}=2$	108
d.	Volume initiale de l'air $V_{\text{air}}=3.5$	109
III.4	Applications	111
III.4.1	Influence de la position du réservoir d'air	111
III.4.2	Influence du volume total du réservoir d'air	113
III.4.3	Influence du volume d'air initiale	115
III.5	Conclusion.....	117
Conclusion et Perspectives.....		118
Bibliographie.....		119
Manuel d'utilisation(Annexe).....		121

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Expressions du paramètre ψ de la vitesse de propagation d'ondes de pression.	26
Tableau I-2 : Equations Caractéristiques d'écoulement transitoire près d'une vanne à l'aval	30
Tableau I-3 : Equations d'écoulement transitoire près d'un réservoir.....	31
Tableau I-4 : Equations Caractéristiques d'écoulement transitoire dans les limites d'une jonction.....	32
Tableau I-5 : Equations caractéristiques d'écoulement transitoire dans les branchements.....	33
Tableau I-6 : Equations Caractéristiques d'écoulement transitoire dans les limites d'une extrémité bloquée	33
Tableau I-7 : Equations caractéristiques d'écoulement transitoire dans les limites d'une cheminée d'air.....	34
Tableau I-8 : Equations caractéristiques d'écoulement transitoire dans les limites d'un réservoir d'air.....	35
Tableau II-1 : Comparaison entre les deux versions d'interface graphique.....	40
Tableau II-2 : Variables utilisées de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-Réservoir d'air-vanne).....	43
Tableau II-3 : Variables d'entrée de l'algorithme 2 (réservoir-multi conduite en série-Réservoir d'air-vanne).....	46
Tableau III-1 : Paramètres statistiques utilisés dans la validation (Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, 2007).....	51
Tableau III-2 : Niveau de performance selon des paramètres statistiques (Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, 2007)	52
Tableau III-3: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir-conduite -vanne) en variant la position du réservoir d'air	57
Tableau III-4 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et de l'algorithme 1 (système : réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) - nœud au niveau de la vanne (M=200 m).....	57

Tableau III-5 : Paramètres statistiques calculés pour la validation du l’algorithme 1 (Réservoir-Conduite-Réservoir d’air-Vanne) (M=200)	58
Tableau III-6 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l’algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d’air-vanne) au niveau de la vanne (M=500 m).....	59
Tableau III-7 : Paramètres statistiques calculés pour la validation du l’algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d’air-Vanne) (M=500)	59
Tableau III-8 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l’algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d’air-vanne) au niveau de la vanne (M=800 m)	60
Tableau III-9 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l’algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d’air-Vanne) (M=800)	61
Tableau III-10 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l’algorithme (réservoir-conduite -vanne) (Volume de réservoir d’air =3m ³) en variant le volume du réservoir d’air	62
Tableau III-11 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l’algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d’air-vanne) au niveau de la vanne(Volume de réservoir d’air=3 m ³).....	62
Tableau III-12 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l’algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d’air-Vanne) (Volume de réservoir d’air=3 m ³)	63
Tableau III-13 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l’algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d’air-vanne) au niveau de la vanne (Volume de réservoir d’air=4 m ³)	64
Tableau III-14 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l’algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d’air-Vanne) (Volume de réservoir d’air=4 m ³)	64
Tableau III-15 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l’algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d’air-vanne) au niveau de la vanne (Volume de réservoir d’air=6 m ³	65
Tableau III-16 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l’algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d’air-Vanne) (Volume de réservoir d’air=6 m ³)	66
Tableau III-17 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l’algorithme (réservoir-conduite -vanne) en variant le volume d’air initial.....	67

Tableau III-18 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial =0.5 m ³).	68
Tableau III-19 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial =0.5 m ³).....	68
Tableau III-20 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial =1 m ³)	69
Tableau III-21 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial =1 m ³).....	70
Tableau III-22 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial =2 m ³).....	71
Tableau III-23 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial =2 m ³)	71
Tableau III-24 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations au (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) niveau de la vanne d'air (Volume d'air initial =3.5 m ³)	72
Tableau III-25 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial =3.5 m ³)	73
Tableau III-26 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir- multi conduites en série –réservoir d'air-vanne) en variant la position du réservoir d'air	75
Tableau III-27 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M =200 m).....	76
Tableau III-28 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (M=200)	76
Tableau III-29 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M =500 m)	77
Tableau III-30 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (M=500)	78

Tableau III-31 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M =800 m)	79
Tableau III-32 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (M=800).....	79
Tableau III-33 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir- multi conduites en série –réservoir d'air-vanne) en variant le volume du réservoir d'air	80
Tableau III-34 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 3 m ³	81
Tableau III-35 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 3 m ³).....	81
Tableau III-36 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 4 m ³)....	82
Tableau III-37 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 4 m ³)	83
Tableau III-38 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 6 m ³)....	84
Tableau III-39 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air= 6 m ³)	84
Tableau III-40 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir- multi conduites en série –réservoir d'air-vanne) en variant le volume initiale d'air	85
Tableau III-41 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume initiale de l'air = 0.5 m ³).....	86

Tableau III-42 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume initiale de l'air = 0.5 m ³)	86
Tableau III-43 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir-conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume initiale de l'air = 1 m ³)	87
Tableau III-44 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume initiale de l'air = 1m ³)	88
Tableau III-45 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir-conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume initiale de l'air = 2 m ³).....	89
Tableau III-46 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume initiale de l'air = 2 m ³).....	89
Tableau III-47 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume initiale de l'air = 3.5 m ³)	91
Tableau III-48 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume initiale de l'air = 3.5 m ³)	91
Tableau III-49 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) en variant la position du réservoir d'air.....	94
Tableau III-50 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir-conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M = 200 m).....	95
Tableau III-51 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (M=200)	95
Tableau III-52 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir-conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M = 500 m).....	96
Tableau III-53 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (M=500).....	97

Tableau III-54 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M = 200 m/conduite principale)	98
Tableau III-55 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (M=200/conduite principale)	98
Tableau III-56 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) en variant le volume du réservoir d'air.....	99
Tableau III-57 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle - réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 3 m ³) ..	100
Tableau III-58 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 3 m ³).....	100
Tableau III-59 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 4 m ³).....	101
Tableau III-60 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 4 m ³)	102
Tableau III-61 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle - réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 6 m ³) ..	103
Tableau III-62 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 6 m ³).	103
Tableau III-63 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) en variant le volume d'air initiale	104
Tableau III-64 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en	

parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial= 0.5 m ³).	105
Tableau III-65 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial= 0.5 m ³)	105
Tableau III-66 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir-conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial= 1 m ³)	106
Tableau III-67 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial= 1 m ³)	107
Tableau III-68 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir-conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial= 2 m ³)	108
Tableau III-69 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial= 2 m ³).....	108
Tableau III-70 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir-conduites -réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial= 3.5 m ³)	109
Tableau III-71 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial= 3.5 m ³).....	110
Tableau III-72 : Paramètres utilisés pour la simulation d'effet de la variation la position du réservoir d'air.....	111
Tableau III-73 : Paramètres utilisés pour la simulation de la variation du volume du réservoir d'air	113
Tableau III-74 : Paramètres utilisés pour la simulation de la variation du volume d'air initiale.....	115

Liste des figures

Figure I-1: Un Réservoir d'air (Mambretti, 2013).....	23
Figure I-2:Une cheminée d'équilibre (Fox, 1977)	23
Figure I-3: Phénomène de propagation de l'onde de pression une fois la vanne est fermée (Chaudhry, 2014)	25
Figure I-4 : Section transversale d'une conduite	27
Figure I-5 : conduite –Vanne (Chaudhry, 2014).....	30
Figure I-6 : Réservoir-Conduite (Chaudhry, 2014).....	31
Figure I-7 : illustrations d'une jonction de 2 conduites différentes (Chaudhry, 2014)	32
Figure I-8:illustrations d'un branchement de conduites différentes (Chaudhry, 2014)	33
Figure I-9:Extrémité bloquée (Chaudhry, 2014)	33
Figure I-10 : Illustration d'une cheminée d'air (Chaudhry, 2014).....	34
Figure I-11: Illustration d'un réservoir d'air (Chaudhry, 2014)	35
Figure II-1: Architecture générale du simulateur	38
Figure II-2 : Représentation de modèle conceptuel	39
Figure II-3 : option de zoomer les graphes.....	40
Figure II-4 : La <i>fenêtre</i> de messages d'erreur <i>v.2020</i>	40
Figure II-5 : Comparaison entre les fenêtres d'interface graphique <i>v.2019</i> et <i>v.2020</i>	41
Figure II-6 : Système réservoir-conduite-Réservoir d'air-vanne.....	43
Figure II-7 : Les équations utilisées dans les algorithmes	44
Figure II-8: L'organigramme de calcul de l'algorithme 1(réservoir-conduite-Réservoir d'air-vanne).....	45
Figure II-9 : Système réservoir-multi conduite en série-Réservoir d'air-vanne	46
Figure II-10:L'organigramme de calcul de l'algorithme 2 (réservoir-multi conduite en serie-Réservoir d'air-vanne)	47
Figure II-11 : Système réservoir-multi conduite en parallèle-Réservoir d'air-vanne.	48
Figure II-12 : L'organigramme de calcul de l'algorithme 3 (réservoir-multi conduite en parallèle -Réservoir d'air-vanne).....	49
Figure III-1 : La création du modèle hydraulique avec Bentley Hammer.....	52
Figure III-2 : La création de profil sur Bentley Hammer	53

Figure III-3 : Le profil sur Bentley Hammer	53
Figure III-4 : Les graphes de simulation sur Bentley Hammer	54
Figure III-6 : Illustration d'une installation (Réservoir -Conduite-Réservoir d'air-Vanne).....	54
Figure III-5 : Le tableau des résultats de simulation sur Bentley Hammer	54
Figure III-7 :Synthèse des différentes configurations et conditions utilisées dans la validation.....	56
Figure III-8 : Figure d'une installation (Réservoir - multi conduites en série - Réservoir d'air-Vanne).....	74
Figure III-9 : Illustration d'une installation Réservoir-Conduite en parallèle – Réservoir d'air-Vanne.....	92
Figure III-10 : Charge hydraulique à la vanne en fonction du temps pour différente position du réservoir d'air.....	112
Figure III-11 : Charge hydraulique au milieu de la conduite en fonction du temps pour différente position du réservoir d'air	112
Figure III-12 : Charge hydraulique à la vanne en fonction du temps pour différent volume du réservoir d'air	114
Figure III-13 : Charge hydraulique au milieu de la conduite en fonction du temps pour différent volume du réservoir d'air.....	114
Figure III-14 : Charge hydraulique à la vanne en fonction du temps pour différent volume d'air.....	116
Figure III-15 : Charge hydraulique au milieu de la conduite en fonction du temps pour différent volume d'air	116

Introduction

Les changements du régime d'écoulement d'un fluide contenu à l'intérieur d'une conduite entraînent souvent de brusques variations de pression. Ces écarts seront plus importants si le fluide est un liquide et si la modification du débit a été brutale. Par rapport au régime permanent, les pressions peuvent atteindre des valeurs excessives induisant souvent un phénomène qui peut détruire les conduites ou même les pompes qu'on appelle le Coup de Bélier dans le domaine hydraulique.

L'étude du phénomène des coups de bélier est devenue très importante non seulement en termes de sécurité mais aussi du point de vue économique, car tout incident peut entraîner une faible performance des outils hydraulique. Diverses tentatives comme la modélisation analytique, la modélisation numérique et expérimentale ont eu place afin de trouver des solutions qui permettront d'éliminer ou réduire les conséquences de ce phénomène.

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.

Dans ce qui suit nous allons présenter les nouvelles mises à jour apportées à la dernière version (Benakcha,Y. & Benmansour,Y., 2019) du simulateur du coup de bélier développé au laboratoire LRMGCE de l'ENP. La nouvelle version (2020) a repris toutes les configurations précédentes (Issad,M. & Mazouni,D.E., 2018) (Benakcha,Y. & Benmansour,Y., 2019) traitées par le simulateur et offre un nouvel élément de protection anti-bélier qui est le réservoir et comprend également une nouvelle interface graphique plus performante et plus facile à utiliser.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente les concepts de base du phénomène de coup de bélier, les équations qui le régissent et les moyens de protection d'une installation hydraulique. Le deuxième chapitre introduit,

le modèle conceptuel et les nouveaux algorithmes implémentés dans le simulateur du coup de bélier. Le troisième chapitre présente les résultats de validation des algorithmes et quelques applications du code pour différents cas traités par le simulateur. Et au final la conclusion générale suivie d'un bref manuel d'utilisation du simulateur est fourni en annexe.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique

I. Etude bibliographique

I.1 Coup de bélier

I.1.1 Définition du coup de bélier

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

I.1.2 Causes du coup de bélier

Le coup de bélier est un phénomène oscillatoire dont les causes les plus fréquentes sont les suivantes (Meunier, M., 1980) :

- L'ouverture ou la fermeture 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 ;
- Le remplissage ou la vidange d'un système d'AEP ;
- Modification de la vitesse d'une pompe ;
- Une variation du niveau d'un réservoir à une extrémité du réseau ;
- La disparition de l'alimentation électrique dans une station de pompage qui est la cause la plus répandue du coup de bélier ;
- La mise en marche ou la modification de l'opération d'une turbine.

I.1.3 Conséquences du coup de bélier

Les conséquences du coup de bélier sont plus qu'une simple gêne. Comme ils peuvent endommager gravement les canalisations, les joints de tuyaux et tous les

Chapitre 1 : Etude bibliographique

autres composants du système tels que les débitmètres et les manomètres. Au contact, ces pointes de pression peuvent facilement dépasser de cinq à dix fois la pression de travail du système, ce qui exerce une énorme pression sur le système.

Les coups de bélier peuvent également provoquer des fuites au niveau des joints du système, fissurer les parois des tuyaux et déformer les systèmes de support des tuyaux. Il peut être assez coûteux de réparer ou de remplacer les composants et l'équipement de pipeline endommagés. Pire encore, le coût peut augmenter de façon exponentielle si le déversement entraîne un problème environnemental.

1.1.4 Eléments de protection contre le coup de bélier

Les moyens de diminuer l'ampleur de coup de bélier sont nombreux et leur choix dépend des caractéristiques hydrauliques de l'installation. Dans la majorité des cas le choix se réduit aux solutions qui suivent (Water hammer control in centrifugal pump systems, 1968) :

1.1.4.1 Réservoir d'air

Le réservoir **Figure I-1** renferme certaines quantités d'eau et d'air dont la pression équilibre la pression de fonctionnement normale à l'endroit où il est installé. Lors d'un arrêt brusque (d'une pompe par exemple) il y aurait une dépression dans la conduite, donc le réservoir qui a une pression plus élevée va se vider pour alimenter la conduite et limiter cette dépression. Et si le phénomène inverse se produit, l'eau s'infiltrera vers le réservoir ce qui permettra de réduire les surpressions. Le réservoir et la conduite sont séparés par un orifice qui assure une perte de charge dissymétrique donnant lieu à une perte de charge plus élevée à l'entrée qu'à la sortie. Les réservoirs d'air sont particulièrement indiqués pour les installations à faible débit (moins de 1 m³/s).

Chapitre 1 : Etude bibliographique

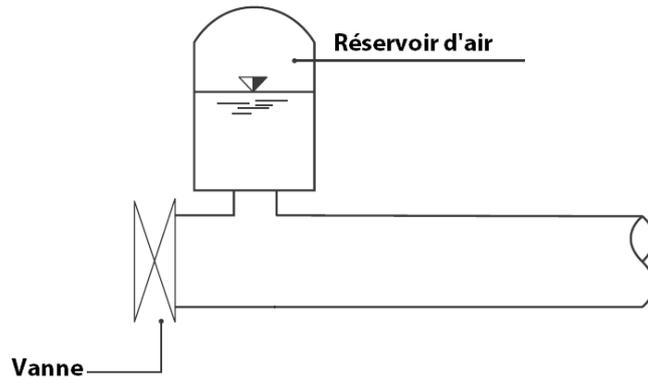


Figure I-1: Un Réservoir d'air (Mambretti, 2013)

I.1.4.2 Cheminée d'équilibre

Le principe de cheminée d'équilibre Figure I-2 est le même que celui du réservoir d'air, avec une seule différence que celle-là est ouverte à l'atmosphère. Lors de la conception on doit déterminer la surface et la hauteur de la cheminée. Celles-ci sont calculées de telle sorte que l'eau ne déborde pas lorsqu'il y a une surpression et ne se vide pas dans le cas de dépression.

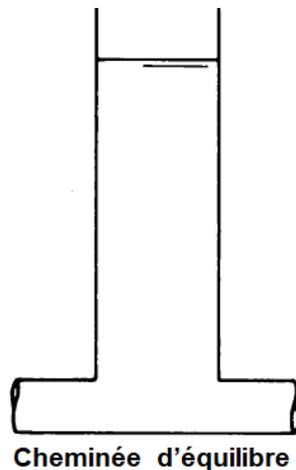


Figure I-2: Une cheminée d'équilibre (Fox, 1977)

La cheminée d'équilibre ne convient pas généralement pour les stations de pompages, surtout en milieu urbain, elle est principalement utilisée dans les centrales hydroélectriques.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

I.1.4.3 Autres éléments et techniques de protection du coup de bélier

Il est également possible de protéger un système hydraulique ou de réduire l'effet du coup de bélier en adoptant les mesures suivantes :

- Réduire la pression de l'alimentation en eau, par l'installation d'un régulateur de pression ;
- Réduire la vitesse du fluide dans la tuyauterie. Afin de réduire l'importance du coup de bélier, certains guides de dimensionnement recommandent une vitesse égale ou inférieure à 1,5 m/s ;
- Installer des robinets avec une vitesse de fermeture lente ;
- Utiliser des procédures d'ouverture et de fermeture sur une installation ;
- Installer une bouteille anti-coup de bélier, également appelée bouteille anti-pulsatoire ou anti bélier ;
- Employer des éléments de tuyauterie conçus pour des pressions élevées (solution coûteuse) ;
- Installer un volant d'inertie sur la pompe ;
- Utiliser une vanne automatique de pompage pour les pompes.

I.1.5 Equation de base du coup de bélier

Considérons un écoulement dans une conduite horizontale sans perte de charge **Figure I-3** 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

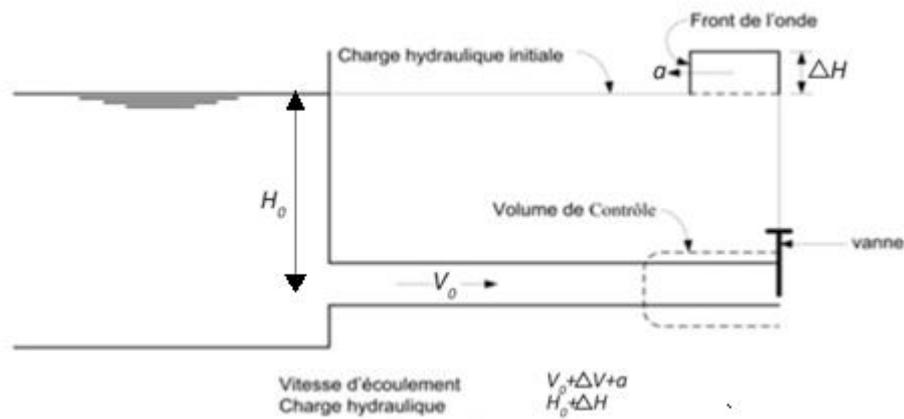


Figure I-3: Phénomène de propagation de l'onde de pression une fois la vanne est fermée
(Chaudhry, 2014)

L'équation de Joukowsky (The Joukowsky equation for fluids and solids, 2006) donnée par équation I-1 peut être utilisée pour calculer le changement de pression dans la conduite due à la variation de la vitesse d'écoulement.

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

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-2 a été dérivée pour des ondes inverses. Pour les ondes directes, elle est donnée par :

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

I.1.6 Vitesse de propagation de l'onde de pression

(Velocity of a water-hammer wave in an elastic pipe., 1963) a présenté l'expression générale suivante I-3 pour la célérité de l'onde de pression:

$$a = \sqrt{\frac{k}{\rho[1 + (k/E)\psi]}} \quad \text{I-3}$$

ψ : Paramètre adimensionnel qui dépend des propriétés élastiques de la conduite et de son système de fixation; E : Module d'élasticité de Young du matériau de la

Chapitre 1 : Etude bibliographique

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

Tableau I-1 : Expressions du paramètre ψ de la vitesse de propagation d'ondes de pression.

Types de Conduite		ψ	
Paroi rigide		$\psi = 0$	I-4
Conduite élastique à paroi Epaisse.	Encastrée sur toute sa longueur	$\psi = 2(1 + \nu) \left(\frac{R_0^2 + R_i^2 - 2\nu R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \right)$	I-5
	Encastrée contre les Déplacements longitudinaux dans la paroi supérieure	$\psi = 2 \left(\frac{R_0^2 + 1.5R_i^2 + \nu(R_0^2 - 3R_i^2)}{R_0^2 - R_i^2} \right)$	I-6
	Avec des joints de dilatations	$\psi = 2 \left(\frac{R_0^2 + R_i^2}{R_0^2 - R_0^2} + \nu \right)$	I-7
Conduite élastique à paroi mince	Encastrée sur toute sa longueur	$\psi = \frac{D}{e} (1 - \nu^2)$	I-8
	Encastrée contre les déplacements longitudinaux dans la paroi supérieure	$\psi = \frac{D}{e} (1 - 0.5\nu)$	I-9
	Avec joints de dilatation	$\psi = \frac{D}{e}$	I-10
	Tunnel en roche sans revêtement	$\psi = 1 \ \& \ E = G$	I-11

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Tunnel en roche	Tunnel en roche avec revêtement en acier	$\psi = \frac{DE}{GD + Ee}$
I-12		
<p>D : diamètre de la conduite ; e : Epaisseur de la conduite ; ν : Coefficient de <i>Poisson</i> ; R_i : Rayon intérieur de la conduite ; R_o : Rayon extérieur de la conduite</p>		

I.1.6.1 Conduite en béton armé

Dans ce cas, la conduite en béton armé est remplacée par une conduite en acier équivalente.

$$e_c = E_r e_e + \frac{A_s}{l_s} \quad \text{I-13}$$

$$E_r = \frac{E_{\text{béton}}}{E_{\text{acier}}} \quad \text{I-14}$$

e_e : Epaisseur de la conduite en béton armé ;

e_c : Epaisseur de la conduite équivalente en acier;

A_s : Section d'armatures ;

l_s : Espacement entre armatures ;

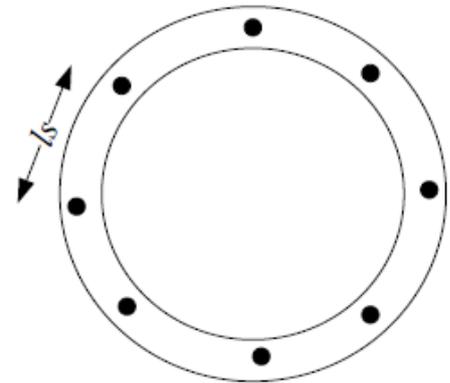


Figure I-4 : Section transversale d'une conduite en béton armé (Chaudhry, 2014)

$$A_s = \pi \cdot N \frac{\phi^2}{4} \quad \text{I-15}$$

N : Nombre de barres ;

ϕ : Diamètre d'une armature.

I.2 Equations des écoulements transitoires

Le coup de bélier est régi par les équations aux dérivées partielles décrivant les écoulements non permanents en charge. Sous les hypothèses ci-dessous, ces

Chapitre 1 : Etude bibliographique

équations (équation de dynamique et de continuité) s'écrivent comme donné dans équations **I-16** et **I-17**:

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \sin \theta + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad \text{I-16}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{I-17}$$

V : Vitesse longitudinale d'écoulement [m/s]; f : Coefficient de frottement de Darcy-Weisbach [-]; x : Variable spatiale représentant la position [m]; t : Variable temporelle représentant le temps [s]; ρ : Masse volumique du fluide [kg/m³]; D : Diamètre de la conduite [m]; a : Célérité de l'onde de pression [m/s].

I.3 Méthode des caractéristiques

I.3.1 Introduction

La méthode des caractéristiques est une technique qui permet de résoudre les équations aux dérivées partielles hyperboliques. Dans certains cas particuliers, la méthode des caractéristiques peut permettre la résolution purement analytique des EDP. Dans les cas les plus complexes rencontrés par exemple en modélisation des systèmes hydrauliques, la méthode des caractéristiques peut être utilisée comme une méthode de résolution numérique du problème de propagation des ondes dans les conduites en charge.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Dans ce mémoire, les nouveaux algorithmes implémentés dans le simulateur du coup de bélier vont permettre d'enrichir la bibliothèque des éléments l'outil informatique avec un nouvel organe de protection du type réservoir d'air. En autre termes, il s'agit de coder de nouvelles conditions aux limites et de résoudre le système d'équations obtenues par la méthode des caractéristiques.

Chapitre 1 : Etude bibliographique

I.3.2 Conditions aux limites

I.3.2.1 Vanne en Aval

Tableau I-2 : Equations Caractéristiques d'écoulement transitoire près d'une vanne à l'aval

Equations	Illustrations
<p>Les équations que nous allons utiliser sont résumées par la suite :</p> $C_v = \frac{(\tau Q_{o_{i,n+1}})^2}{(C_a H_{o_{i,n+1}})} \quad \text{I-18}$ $Q_{p_{i,n+1}} = 0.5(-C_v + \sqrt{C_v^2 + 4C_p C_v}) \quad \text{I-19}$ <p>Avec :</p> $C_a = \frac{gA}{a} \quad \text{I-20}$ $C_p = Q_{i-1,j-1} + C_a H_{i-1,j-1} - R\Delta t Q_{i-1,j-1} Q_{i-1,j-1} \quad \text{I-21}$	<p style="text-align: center;">Figure I-5 : conduite –Vanne (Chaudhry, 2014)</p>
<p>$\tau [-]$: Degré d'ouverture de la vanne; $C_v [-]$: Coefficient de débit en fonction de degré d'ouverture de la vanne;</p> <p>C_a : Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide ; O : Indice qui se réfère aux conditions initiales ; Q_p : Débit d'écoulement [m³/s].</p>	

Chapitre 1 : Etude bibliographique

I.3.2.2 Réservoir en amont

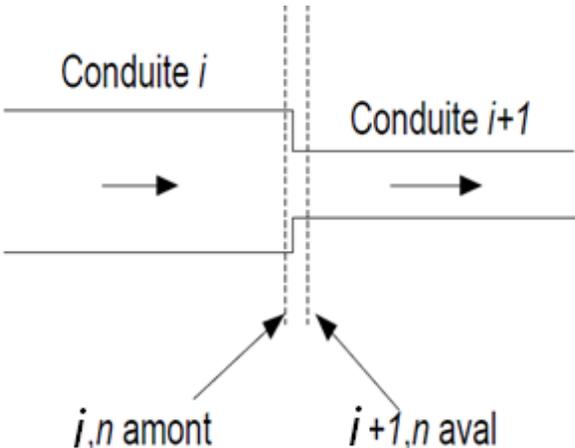
Tableau I-3 : Equations d'écoulement transitoire près d'un réservoir

Equations	Illustrations
<p>Les équations que nous allons utiliser sont résumées par la suite :</p> $H_{p_{i,1}} = H_{res} - (1+k) \frac{Q_{i,1}^2}{2gA_i^2} \quad \text{I-22}$ <p>Nous allons résoudre cette équation en la remplaçant dans l'équation caractéristique négative :</p> $Q_{p_{i,1}} = C_{ni} + C_{ai} H_{p_{i,1}} \quad \text{I-23}$ <p>Et on obtient :</p> $Q_{p_{i,1}} = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4K_1(C_{ni} + C_{ai}H_{res})}}{2K_1} \quad \text{I-24}$ <p>Telle que :</p> $K_1 = \frac{C_a(1+k)}{2gA_i^2} \quad \text{I-25}$ <p>Avec :</p> $C_n = Q_{i-1,j+1} + C_a H_{i-1,j+1} - R\Delta t Q_{i-1,j+1} \left Q_{i-1,j+1} \right \quad \text{I-26}$	<p style="text-align: center;">Figure I-6 : Réservoir-Conduite (Chaudhry, 2014)</p>
<p>H_{res} [m] : La hauteur de la surface de l'eau du réservoir au-dessus de la référence ; k [-] : Le coefficient de perte d'entrée; Q_p [m³/s] : Débit d'écoulement; H_p : charge hydraulique; C_a [m²/s]: Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide ; A [m²] : La section de la conduite ; g [m/s²] : l'accélération de la pesanteur .</p>	

Chapitre 1 : Etude bibliographique

I.3.2.3 Jonction en série

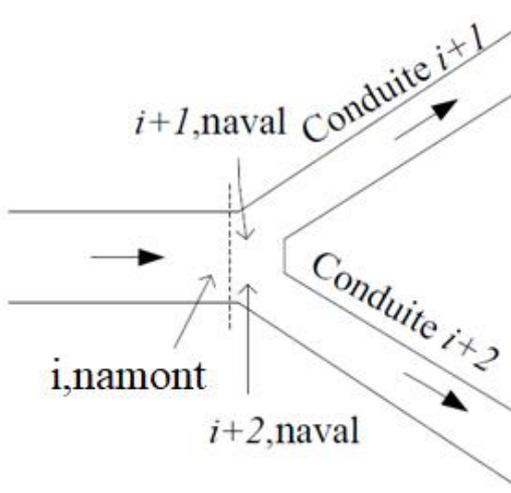
Tableau I-4 : Equations Caractéristiques d'écoulement transitoire dans les limites d'une jonction

Équations	Illustrations
$Hp_{i,n,amont} = Hp_{i+1,n,aval} \quad \text{I-27}$ <p>Equation Caractéristiques :</p> $Qp_{i,n,amont} = C_{p_i} - C_{a_i} Hp_{i,n,amont} \quad \text{I-28}$ $Qp_{i+1,naval} = C_{n_{i+1}} + C_{a_{i+1}} Hp_{i+1,naval} \quad \text{I-29}$ <p>Les équations que nous allons utiliser sont résumées par la suite :</p> $Qp_{i,n,amont} = Qp_{i+1,n,aval} \quad \text{I-30}$ $Hp_{i,n,amont} = \frac{C_{p_i} - C_{a_{i+1}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}}} \quad \text{I-31}$	 <p>Figure I-7 : illustrations d'une jonction de 2 conduites différentes (Chaudhry, 2014)</p>
<p>Qp [m³/s] : Débit d'écoulement; H_p [m] : charge hydraulique; C_a [m²/s] : Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide.</p>	

Chapitre 1 : Etude bibliographique

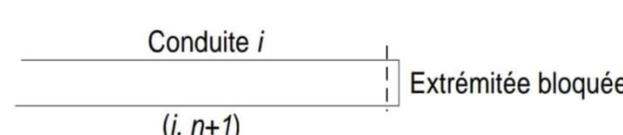
I.3.2.4 Branchement

Tableau I-5 : Equations caractéristiques d'écoulement transitoire dans les branchements

Equations	Illustrations
<p>Equation de continuité :</p> $Qp_{i,namont} = Qp_{i+1,naval} + Qp_{i+2,naval} \quad \text{I-32}$ <p>Equation Caractéristiques :</p> $Qp_{i,namont} = C_{p_i} - C_{a_i} Hp_{i,namont} \quad \text{I-33}$ $Qp_{i+1,naval} = C_{n_{i+1}} - C_{a_{i+1}} Hp_{i+1,naval} \quad \text{I-34}$ $Qp_{i+2,naval} = C_{n_{i+2}} - C_{a_{i+2}} Hp_{i+2,naval} \quad \text{I-35}$ <p>Equation énergétique :</p> $Hp_{i,namont} = Hp_{i+1,naval} + Hp_{i+2,naval} \quad \text{I-36}$ <p>A partir des cinq dernières Equations</p> $Hp_{i,n,amont} = \frac{C_{p_i} - C_{n_{i+1}} - C_{n_{i+2}}}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}} + C_{a_{i+2}}} \quad \text{I-37}$	 <p>Figure I-8 illustrations d'un branchement de conduites différentes (Chaudhry, 2014)</p>
<p>Qp [m³/s] : Débit d'écoulement; H_p [m] : charge hydraulique; C_a [m²/s] : Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide.</p>	

I.3.2.5 Extrémité bloqué

Tableau I-6 : Equations Caractéristiques d'écoulement transitoire dans les limites d'une extrémité bloquée

Equations	Illustrations
$Qp_{i,n+1} = 0 \quad \text{I-38}$ <p>Il résulte donc l'équation caractéristique positive Telle que :</p>	 <p>Figure I-9: Extrémité bloquée (Chaudhry, 2014)</p>

Chapitre 1 : Etude bibliographique

$$Hp_{i,n+1} = \frac{Cp_i}{C_{a_i}} \quad \text{I-39}$$

Qp [m³/s] : Débit d'écoulement; H_p [m] : charge hydraulique; C_a [m²/s] : Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide.

I.3.2.6 Éléments de protection

a. Cheminée d'équilibre

Tableau I-7 : Equations caractéristiques d'écoulement transitoire dans les limites d'une cheminée d'air

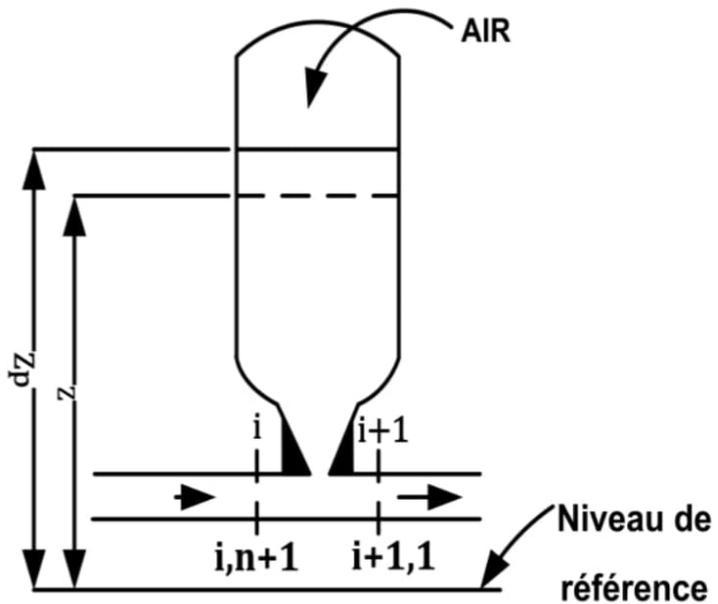
Equations	Illustrations
<p>Les équations caractéristiques (positives et négatives) de la section (i, n+1) (i+1,1) sont respectivement :</p> $Qp_{i,n+1} = C_{p_i} - C_{a_i} Hp_{i,n+1} \quad \text{I-40}$ $Qp_{i+1,1} = C_{n_i} + C_{a_{i+1}} Hp_{i+1,1} \quad \text{I-41}$ <p>Equation de continuité :</p> $Qp_{i,n+1} = Qp_{i+1,1} + Qps \quad \text{I-42}$ <p>Niveau d'eau de la cheminée d'équilibre :</p> $Zp = Z + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{A_s} (Qps + Qs) \quad \text{I-43}$ <p>En résolvant les équations précédentes on obtient :</p> $Hp_{i,n+1} = \frac{C_p - C_n + Q_s + 2\left(\frac{A_s Z}{\Delta t}\right)}{C_{a_i} + C_{a_{i+1}} + 2\left(\frac{A_s Z}{\Delta t}\right)} \quad \text{I-44}$	<p>Figure I-10 : Illustration d'une cheminée d'air (Chaudhry, 2014)</p>
<p>Qs [m³/s] et Qps [m³/s] : Le débit dans le réservoir au début et à la fin du pas de temps ; Z [m] et Zp [m] : Les hauteurs d'eau dans le réservoir au-dessus du niveau de référence au début et à la fin du pas de temps ; A_s</p>	

Chapitre 1 : Etude bibliographique

[m²]: Section transversale horizontale du réservoir ; Q_p [m³/s]: Débit d'écoulement; H_p [m]: charge hydraulique ; C_a [m²/s] : Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide .

b. Réservoir d'air

Tableau I-8 : Equations caractéristiques d'écoulement transitoire dans les limites d'un réservoir d'air

Equations	Illustrations
<p>Les équations caractéristiques (positive et négative) de la section (i, n+1) et la section (i+1,1) sont respectivement :</p> $Qp_{i,n+1} = C_p - C_{a_i} Hp_{i,n+1} \quad \text{I-45}$ $Qp_{i+1,1} = C_n + C_{a_{i+1}} Hp_{i+1,1} \quad \text{I-46}$ <p>Equation de continuité :</p> $Qp_{i,n+1} = Qp_{i+1,1} + Q_{orf} \quad \text{I-47}$ <p>Le débit d'orifice :</p> $Qp_{orf} = (Z_p - Z) \cdot \frac{A_c}{dt} \quad \text{I-48}$ <p>Les pertes de charges :</p> $h_{orf} = C_{orf} \cdot Q_{orf} Q_{orf} \quad \text{I-49}$ <p>Le volume d'air :</p> $\forall_{p,air} = \forall_{air} - A_c \cdot (Z_p - Z) \quad \text{I-50}$ <p>Les équations I-45 et I-47 donne :</p> $H_p = \frac{C_p - C_n - Qp_{orf}}{C_{a,i} + C_{a,i+1}} \quad \text{I-51}$ <p>Pour un gaz parfait :</p>	 <p style="text-align: center;">Figure I-11: Illustration d'un réservoir d'air (Chaudhry, 2014)</p>

Chapitre 1 : Etude bibliographique

$H_{p,air} \nabla_{p,air}^m = C \quad \text{avec} \quad m=1.2 \quad \text{I-52}$ <p>On détermine C à partir de l'état initial :</p> $C = H_{o,air} \nabla_{o,air}^m \quad \text{I-53}$ <p>La pression d'air :</p> $H_{p,air} = \frac{C}{\nabla_{p,air}^m} \quad \text{I-54}$ <p>A la fin l'équation I-55 est résolue par la méthode de Newton-Raphson :</p> $H_p - H_{p_{air}} + H_b - Z_p - h_{orf} = 0 \quad \text{I-55}$	
<p>Q_{orf} et $Q_{p_{orf}}$ [m³/s]: Le débit s'écoule à travers l'orifice ; h_{orf} [m]: Perte de charge à l'orifice ; C_{orf} [-] : Coefficient de perte de charge à l'orifice ; A_c [m²]: La section transversale horizontale du réservoir d'air ; Z et Z_p [m]: 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 ; ∇_{air} et $\nabla_{p,air}$ [m³] : Le volume d'air au début et à la fin du pas de temps ; $H_{p,air}$ [m] : La pression d'air à la fin du pas de temps ; H_b [m] : La charge de pression barométrique ; o : Indice qui se réfère aux conditions initiales ; Q_p [m³/s]: Débit d'écoulement ; H_p [m] : Charge hydraulique ; C_a [m²/s] : Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide.</p>	

CHAPITRE 2 : Modèle Conceptuel et Algorithmes

II Modèle conceptuel et algorithmes

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, on donne une présentation détaillée du modèle conceptuel de la nouvelle version (2020) du simulateur du coup de bélier et les nouveaux algorithmes implémentés. Cette version a repris toutes les configurations précédentes (Benakcha,Y. & Benmansour,Y., 2019) traitées par le simulateur et offre un nouvel élément de protection anti-bélier qui est le réservoir et comprend également une nouvelle interface graphique plus performante et plus facile à utiliser.

II.2 Modèle Conceptuel

Figure II-1 et Figure II-2 représentent le mode d'interaction entre l'interface graphique de l'outil et les 3 composantes (prétraitement, traitement, post traitement) et les étapes de résolution du modèle.

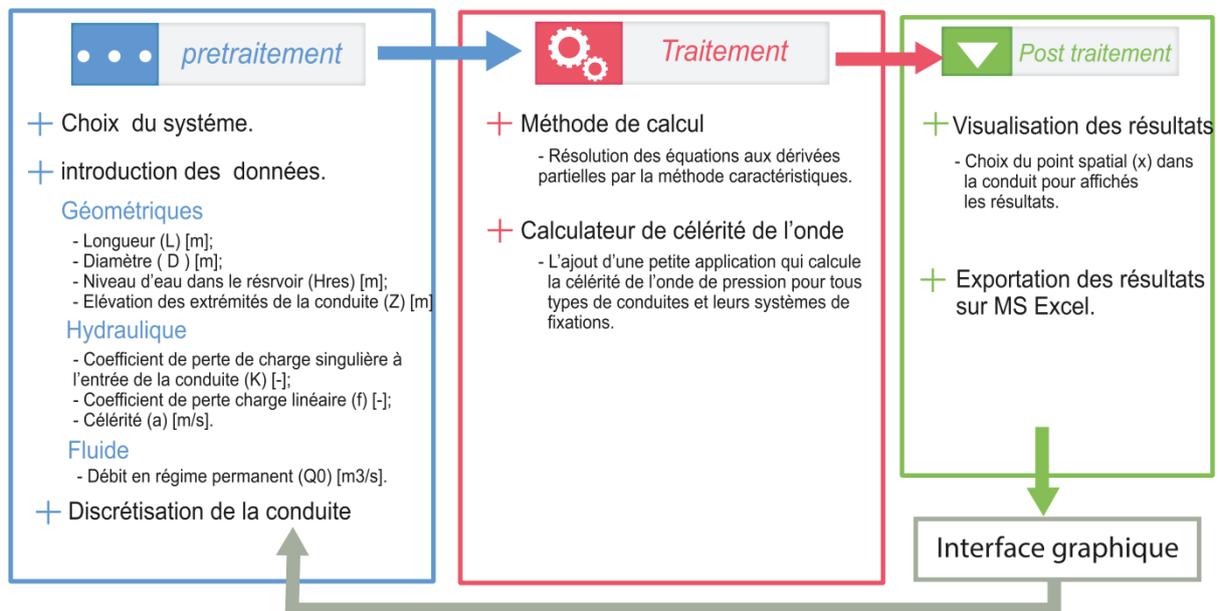


Figure II-1: Architecture générale du simulateur

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et Algorithmes

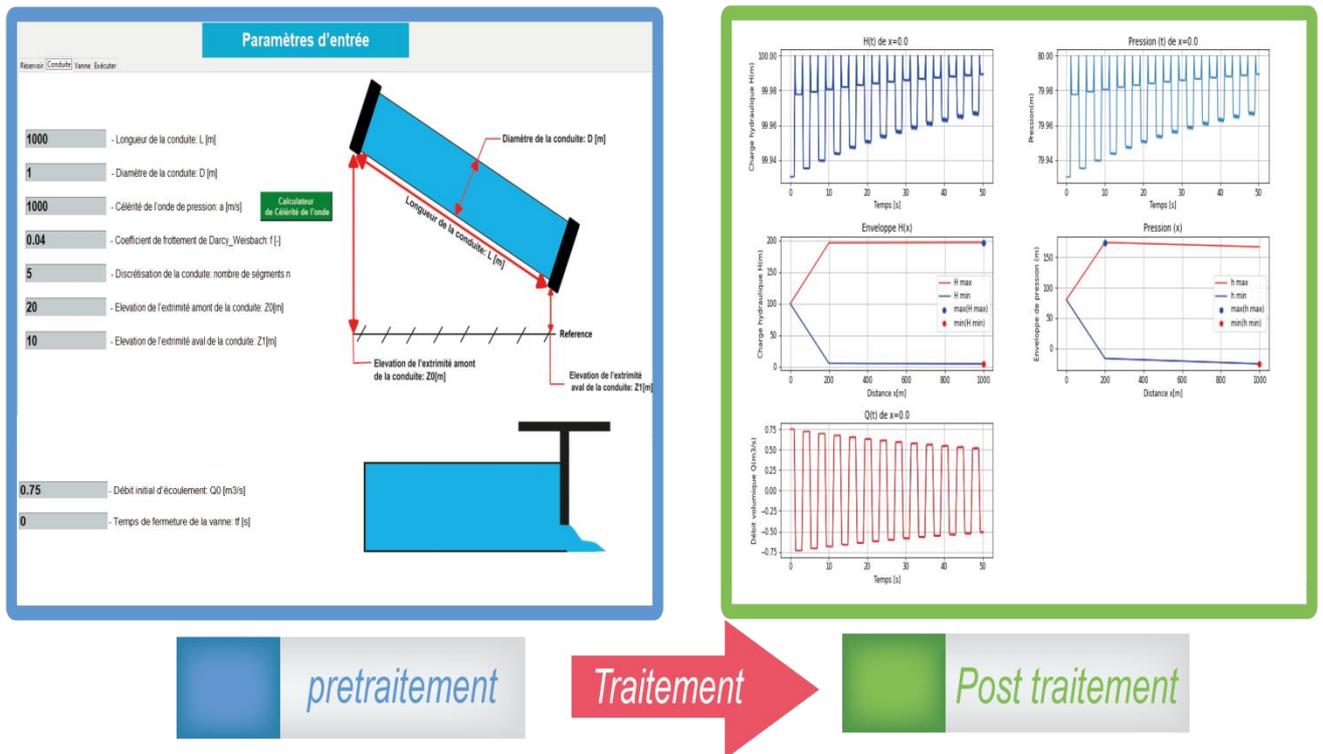


Figure II-2 : Représentation de modèle conceptuel

II.2.1 Nouveautés dans l'interface graphique

Tableau **II-1** représente une comparaison entre les capacités de l'interface graphique de cette nouvelle version (2020) en contraste avec les capacités de la version (2019).

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et Algorithmes

Tableau II-1 : Comparaison entre les deux versions d'interface graphique

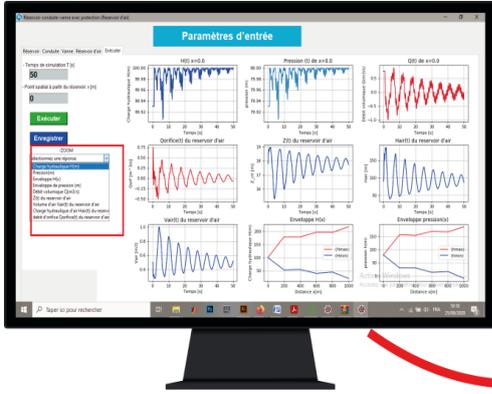
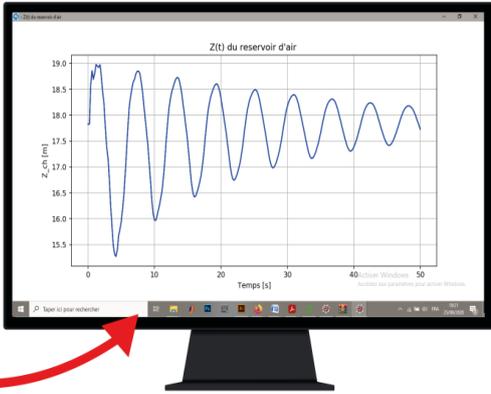
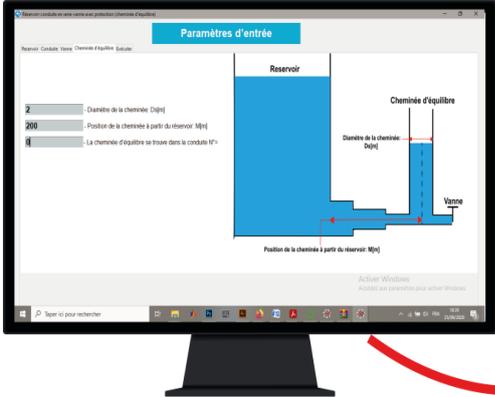
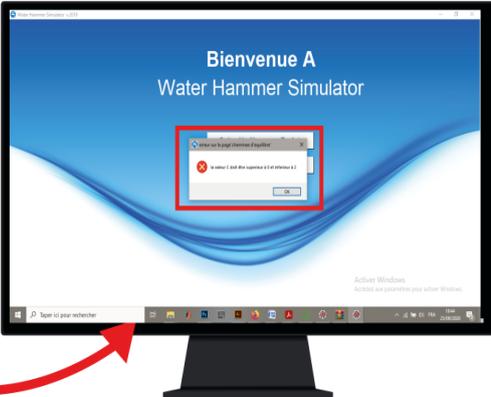
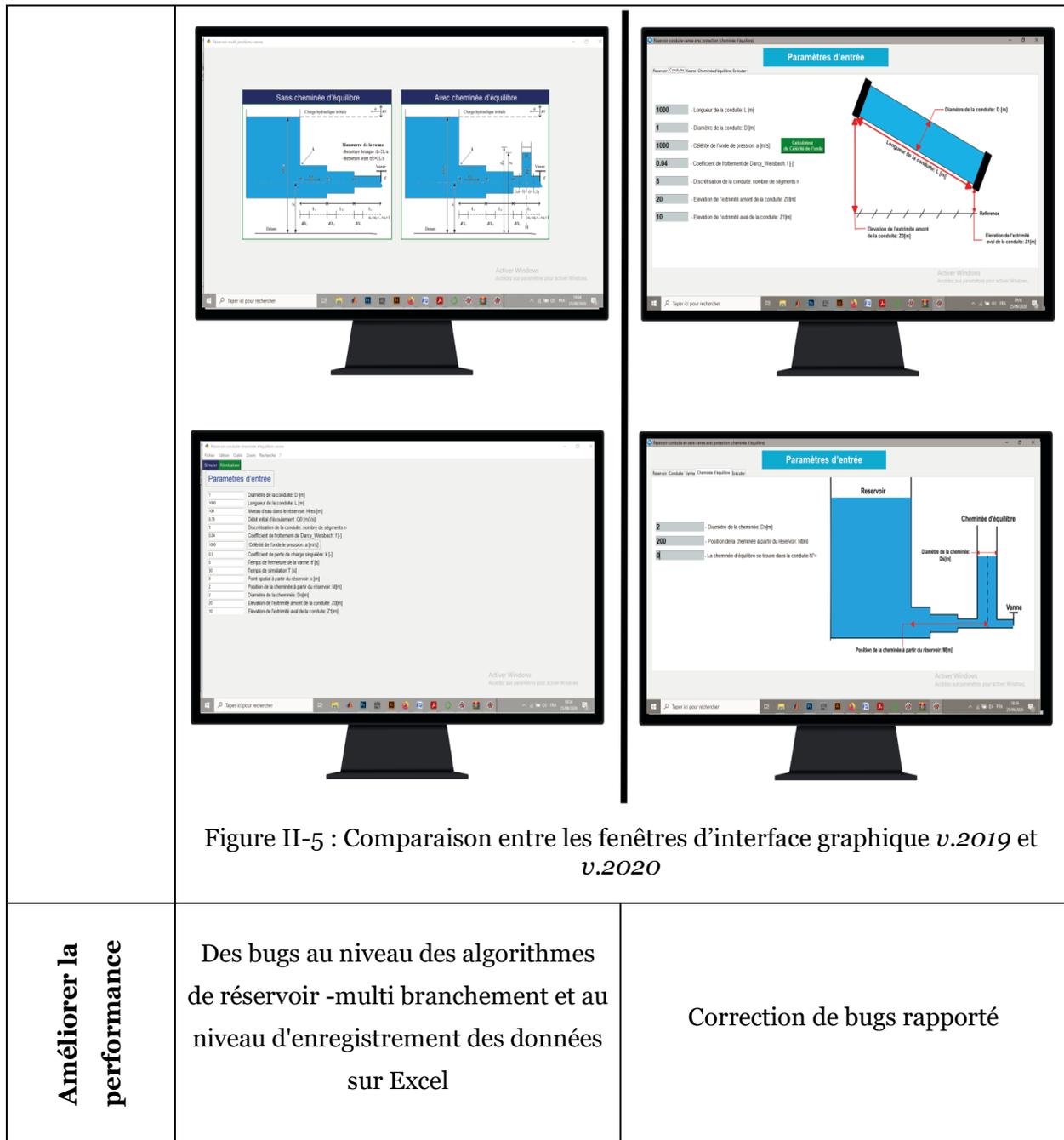
Option	Version 2019	Version 2020
Possibilité de zoomer les graphes	<p style="text-align: center;">Non disponible</p> 	<p style="text-align: center;">Disponible</p> 
Gestion des erreurs	<p style="text-align: center;">Non disponible</p> 	<p style="text-align: center;">Disponible (notification d'erreurs et de leur nature)</p> 
Améliorer les illustrations	<p style="text-align: center;">Fenêtre input avec un seul onglet (Agglomération de tous les paramètres dans un seul schéma)</p>	<p style="text-align: center;">Fenêtre input multi-onglets (Séparation des schémas de chaque élément hydraulique pour faciliter la définition des paramètres d'entrés)</p>

Figure II-3 : option de zoomer les graphes

Figure II-4 : La *fenêtre* de messages d'erreur v.2020

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et Algorithmes



Améliorer la performance

Des bugs au niveau des algorithmes de réservoir -multi branchement et au niveau d'enregistrement des données sur Excel

Correction de bugs rapporté

II.3 Algorithmes

II.3.1 Résolution du système d'équations des conditions aux limites du réservoir d'air

Les trois nouveaux algorithmes implémentés dans le simulateur du coupe de bélier sont basés sur la résolution numérique par la méthode de Newton Raphson du système d'équations définissant les conditions aux limites propres au réservoir d'air (avec organe d'étranglement) présentées dans le chapitre I (exprimées par les équations **I-48, I-48**, **I-51, I-53, I-54** et **I-55**).

Dans l'équation **I-55**, on remplace h_{orf} , $H_{p,air}$ et H_p Par les équations **I-49, I-51** et **I-54** respectivement ce qui donne une équation non linéaire où l'inconnue est Z_p qui peut être résolu par une technique itérative, telle que la méthode Newton-Raphson.

La valeur Z_p au début du pas de temps peut être utilisée comme première estimation pour démarrer les itérations.

La solution sera obtenue par la méthode Newton-Raphson et les variables $Q_{p,orf}$, h_{porf} , $\forall_{p,air}$, H_p et $H_{p,air}$ Seront calculées par les équations **I-48, I-49**, **I-50, I-51** et **I-54** respectivement.

Les calculs d'une manière générale sont menés comme suit :

- Introduction des données de base de l'installation et spécification des conditions d'écoulement en régime permanent ;
- Calcul des conditions initiales (régime permanent) ;
- Calcul de la première itération du régime transitoire en commençant du temps $t_0 + \Delta t$ le long de la conduite pour un pas de $\Delta x = \frac{L}{n}$ en utilisant les conditions aux limites du système (réservoir, vanne, chemine d'équilibre, réservoir d'air, jonction en série, jonction en parallèle, point intermédiaires)
- Calcul itératif du régime transitoire avec un pas de temps $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$ jusqu'à la fin du temps de simulation.

II.3.2 Algorithme 1 -Système : réservoir-conduite-réservoir d'air-vanne

Ce premier nouveau algorithme implémenté dans le simulateur (schématisé dans Figure II-8) est conçu pour simulé un système réservoir-conduite-vanne protéger par un anti-bélier de type réservoir d'air (système présenté dans la Figure II-6). Les variables utilisées dans cet algorithme et leurs codages sont synthétisés dans Tableau II-2.

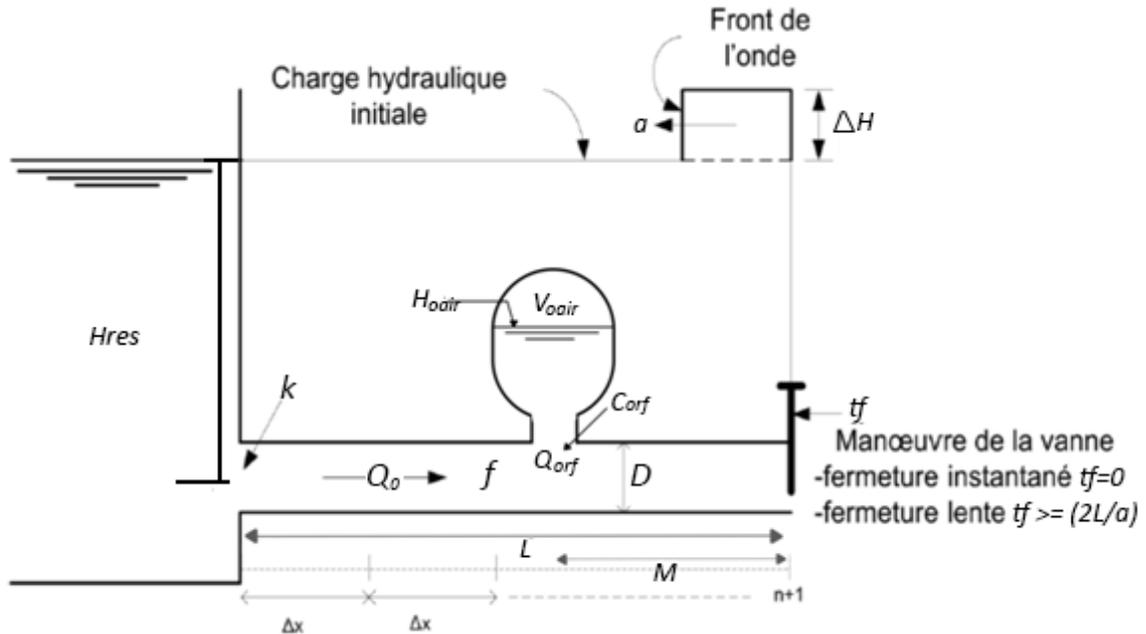


Figure II-6 : Système réservoir-conduite-Réservoir d'air-vanne

Tableau II-2 : Variables utilisées de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-Réservoir d'air-vanne)

Variable	Unité	Description
H_{res}	[m]	Niveau d'eau dans le réservoir
k	[-]	Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de la conduite
L	[m]	Longueur de la conduite
D	[m]	Diamètre de la conduite
A	[m ²]	Section de conduite
a	[m/s]	Célérité d'onde de pression.
n	[-]	Nombre de segments
f	[-]	Coefficient de frottement de <i>Darcy-Weisbach</i>
Z_i	[m]	Élévation des nœuds par rapport au plan de référence
Q_0	[m ³ /s]	Débit initial d'écoulement
t_f	[s]	Durée de fermeture de la vanne
D_c	[m]	Diamètre de réservoir d'air
A_c	[m ²]	Section du réservoir d'air

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et Algorithmes

V_{airch}	[m ³]	Le volume total du réservoir d'air
V_{air}	[m ³]	Le volume d'air dans le réservoir d'air
H_{air}	[m]	La pression d'air dans le réservoir d'air
$Corf$	[-]	Coefficient de perte de charge singulière à l'entrée de réservoir d'air
Q_{orf}	[m ³ /s]	Débit d'orifice
M	[m]	Position du réservoir d'air à partir de vanne
T	[s]	Période de temps simulée (durée de la simulation)
dx	[m]	Pas de discrétisation spatiale
dx	[s]	Pas du temps
R	[-]	$R = \frac{f}{2DA}$
C_a	[m ² /s]	Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide.
Z_{ch}	[m]	Elévation d'eau dans le réservoir d'air par rapport au niveau de référence
n_{ch}	[-]	Le nœud du réservoir d'air
$horf$	[-]	Les pertes de charges d'orifice

Eq 01 : $Q(1,j) = Q_0$

Eq 02 : $H(1,j) = H_{res} - \left((1 + k + \frac{f_{jx}}{D}) \cdot \frac{Q_0^2}{2gA^2} \right)$

Eq 03 : $V_{air}(1) = V_{airch} - ((H(1,n_1) - H_{oair} + H_b) \cdot A_c)$
Ou
 $H_{air}(1) = H(1,n_1) - ((V_{airch} - V_{oair})/A_c) + H_b$

Eq 04 : $Z_{ch}(1) = H(1,n_1) - H_{air}(1) + H_b$

Eq 05 : $Q(i,j) = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4k_1 \cdot (Cn(i,j) + Ca \cdot H_{res})}}{2k_1}$ avec $k_1 = \frac{Ca \cdot (1+k)}{2gA^2}$

Eq 06 : $H(i,j) = H_{res} - (1 \pm k) \frac{Q(i,j)^2}{2gA^2}$

Eq 07 : $Q(i,j) = 0.5 * (-Cv + \sqrt{(Cv^2 + 4 \cdot Cp(i,j) \cdot Cv)})$ avec : $Cv = \frac{(\tau \cdot Q(1)[j]^2)}{Ca \cdot H(1)[j]}$

Eq 08 : $H(i,j) = \frac{Cp(i,j) - Q(i,j)}{Ca}$

Eq 09 : $Q_{orf}(i) = (Z_{ch(i)} - Z_{ch(i-1)}) * \left(\frac{Ac}{dt} \right)$

Eq 10 : $horf(i) = Corf * Q_{orf}(i) * |Q_{orf}(i)|$

Eq 11 : $V_{air}(i) = V_{air}(i-1) - Ac * (Z_{ch(i)} - Z_{ch(i-1)})$

Eq 12 : $H_{air}(i) = \frac{Cst}{V_{air(i)}^{m_{gas}}}$

Eq 13 : $H(i,j) = \frac{Cp(i,j) - Cn(i,j) - Q_{orf}(i)}{Ca + Ca}$

Eq 14 : $Q(i,j) = \frac{Cp(i,j) - Ca * H(i,j)}{2 \cdot Ca}$

Eq 15 : $H(i,j) = \frac{Cp(i,j) - Cn(i,j)}{2 \cdot Ca}$

Eq 16 : $Q(i,j) = \frac{Cp(i,j) + Cn(i,j)}{2}$

Figure II-7 : Les équations utilisées dans les algorithmes

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et Algorithmes

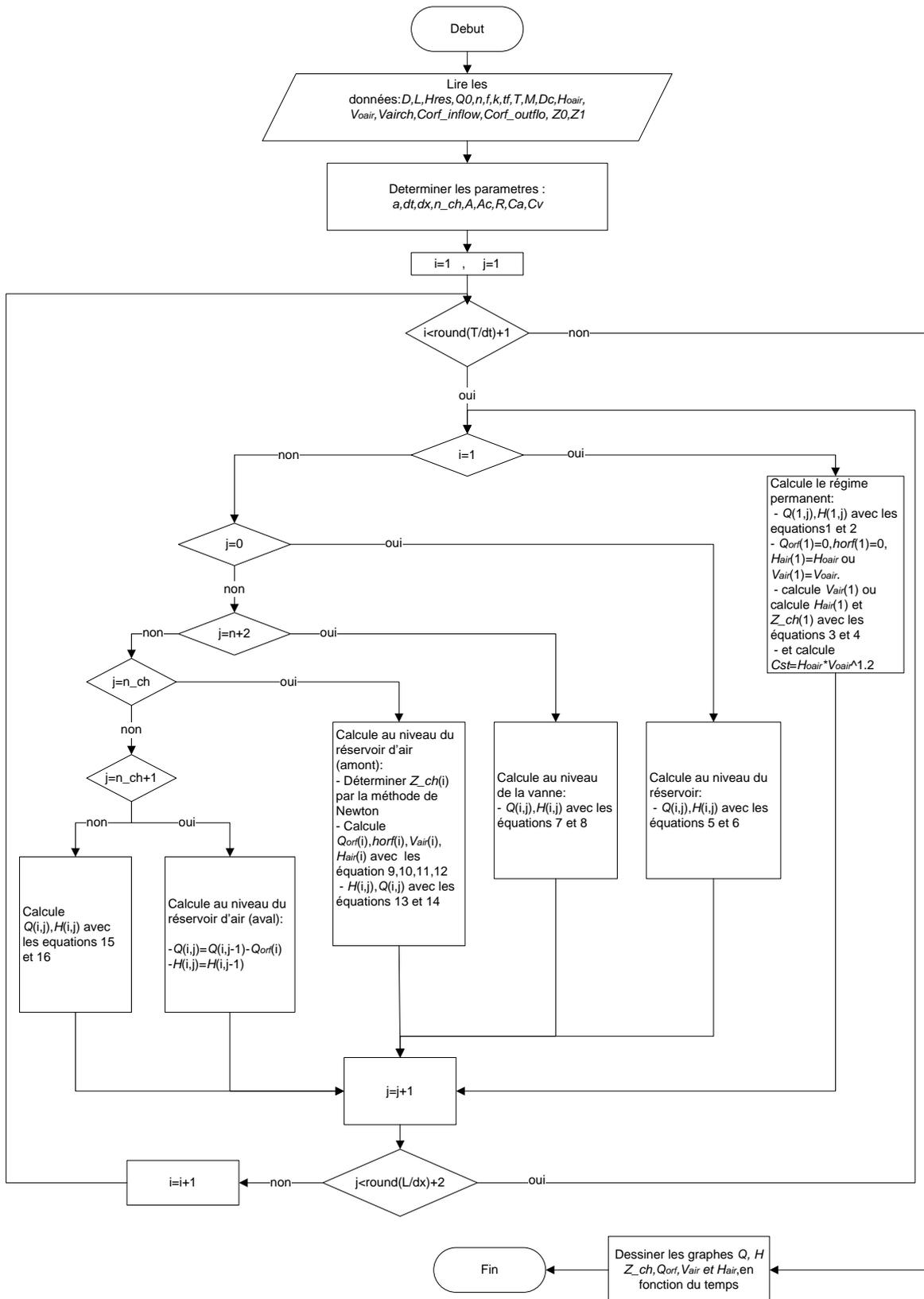


Figure II-8: L'organigramme de calcul de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-Réservoir d'air-vanne)

II.3.3 Algorithme 2 - Système : réservoir-multi conduite en série-Réservoir d'air-vanne

Ce deuxième nouveau algorithme implémenté dans le simulateur (schématisé dans Figure II-10) est conçu pour simulé un système réservoir- multi conduite en série -vanne protégé par un anti-bélier de type réservoir d'air (système présenté dans la Figure II-9). Les variables utilisées dans cet algorithme et leurs codages sont synthétisés dans **Tableau II-2** et **Tableau II-3**.

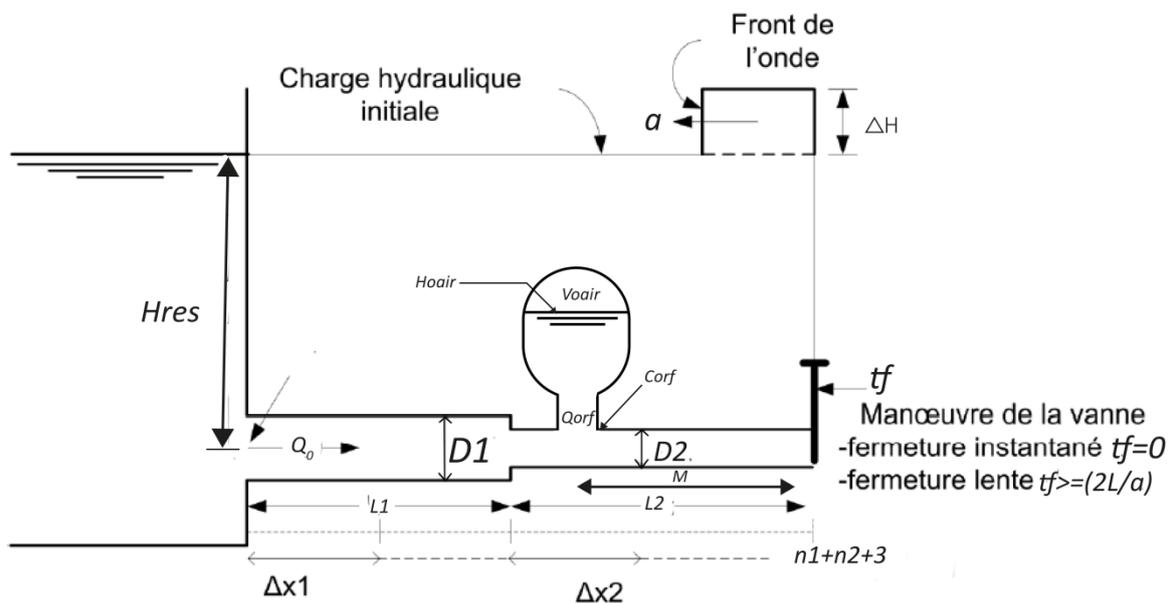


Figure II-9 : Système réservoir-multi conduite en série-Réservoir d'air-vanne

Tableau II-3: Variables d'entrée de l'algorithme 2 (réservoir-multi conduite en série-Réservoir d'air-vanne)

Variable	Unité	Description
nc	[-]	Nombre de conduites
$L(h)$	[m]	Longueur de la conduite h
$D(h)$	[m]	Diamètre de la conduite h
$A(h)$	[m ²]	Section de conduite h
$a(h)$	[m/s]	Célérité d'onde de pression correspond à la conduite h
$dx(h)$	[m]	Pas de discrétisation spatiale
$C_a(h)$	[m ² /s]	Une constante qui dépend des propriétés de la conduite et du fluide.

Chapitre 2 : Modèle conceptuel et Algorithmes

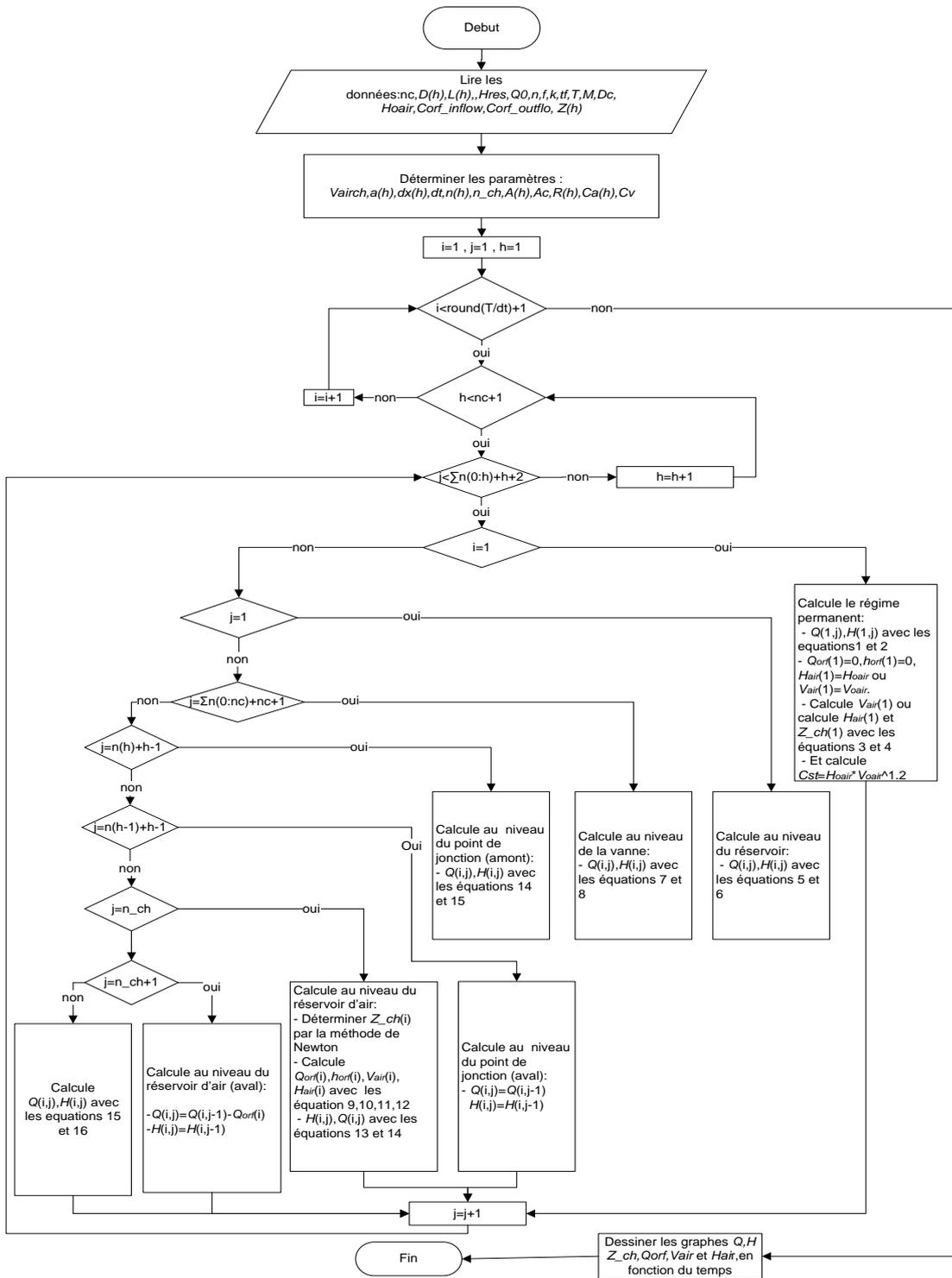


Figure II-10: L'organigramme de calcul de l'algorithme 2 (réservoir-multi conduite en serie- Réservoir d'air-vanne)

II.3.4 Algorithme 3 - Système : réservoir-multi conduite en parallèle -Réservoir d'air-vanne

Ce troisième nouveau algorithme implémenté dans le simulateur (schématisé dans **Figure II-12**) est conçu pour simulé un système réservoir- multi conduite en parallèle -vanne protégé par un anti-bélier de type réservoir d'air (système présenté dans la **Figure II-11**). Les variables utilisées dans cet algorithme et leurs codages sont synthétisés dans **Tableau II-2** et **Tableau II-3**.

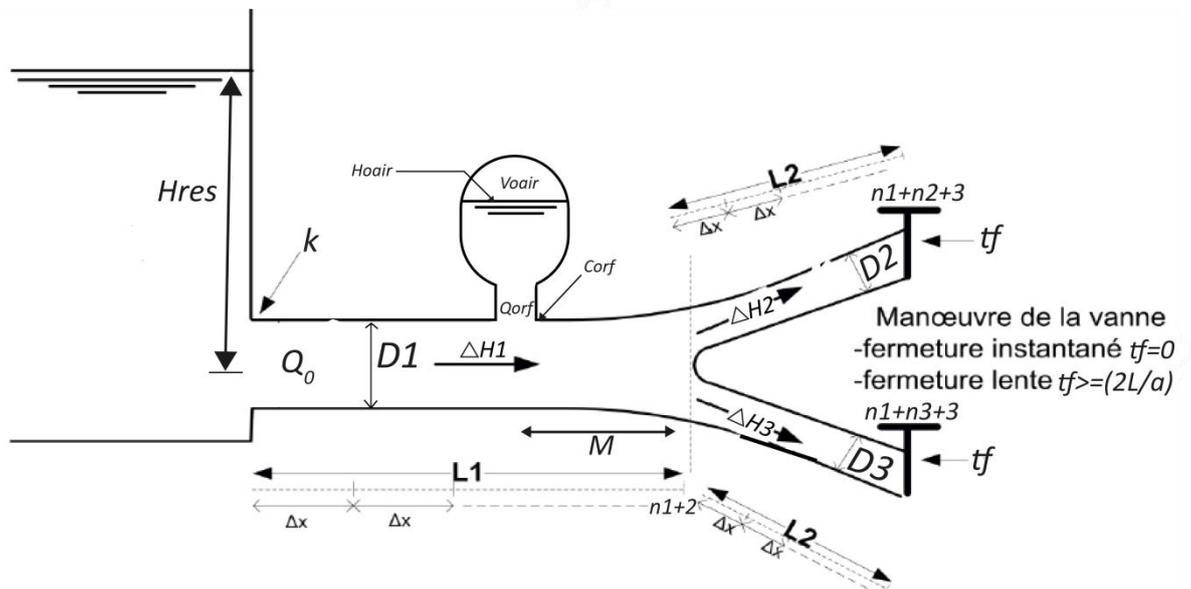


Figure II-11 : Système réservoir-multi conduite en parallèle-Réservoir d'air-vanne

CHAPITRE 3 :

Validation et Applications

III Validation et Applications

III.1 Introduction

Le présent chapitre porte sur la validation des nouveaux algorithmes (présentés dans chapitre II) implémentés dans le simulateur de coup de bélier, enrichissant sa bibliothèque d'éléments anti-bélier avec le réservoir d'air. La validation se base sur une étude comparative menée avec le logiciel (version d'évaluation) Bentley HammerV8i (SELECT series 6) (**Quick Start Lessons Bentley HAMMER**)

L'évaluation de la performance des nouveaux algorithmes sera basée sur 3 paramètres statistiques, la performance est ainsi déduite en calculant les paramètres suivant (dont les expressions et les indicateurs de performances sont donnés dans Tableau III-1 et Tableau III-2 respectivement) :

- i. Critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe-efficiency-NSE).
- ii. Pourcentage de biais (Percent Bias-P bias).
- iii. Observation standard déviation ratio (rapport d'écart type d'observations).

Tableau III-1 : Paramètres statistiques utilisés dans la validation (**Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, 2007**)

Paramètre	Expression
NSE (Critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe)	$NSE = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obs}^{moyenne})^2}$ III-1
PBIAS (Pourcentage de biais)	$PBIAS = 100 \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})}{\sum (Y_{obs})}$ III-2
RSR (rapport d'écart type d'observations)	$RSR = \sqrt{\frac{\sum (Y_{obs} - Y_{sim})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{obs}^{moyenne})^2}}$ III-3
Y_{obs} : Résultats observés (obtenues par le logiciel Bentley Hammer)	

Chapitre 3 : Validation et applications

Y_{sim} : Résultats simulées (obtenues par la manipulation de notre code)

$Y_{obs}^{moyenne}$: moyenne arithmétique des résultats observés.

Tableau III-2 : Niveau de performance selon des paramètres statistiques (**Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, 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 \leq 25$

III.2 Exemple de modélisation du coup de bélier sur Bentley Hammer

Considérant comme exemple la première configuration : système : réservoir-conduite-vanne avec organe de protection anti-bélier de type réservoir d'air. La modélisation de ce système sur Bentley Hammer passe par les étapes suivantes :

- i. Construction du réseau à modéliser : en introduisant les éléments et les composants qui le constituent (voire Figure III-1).

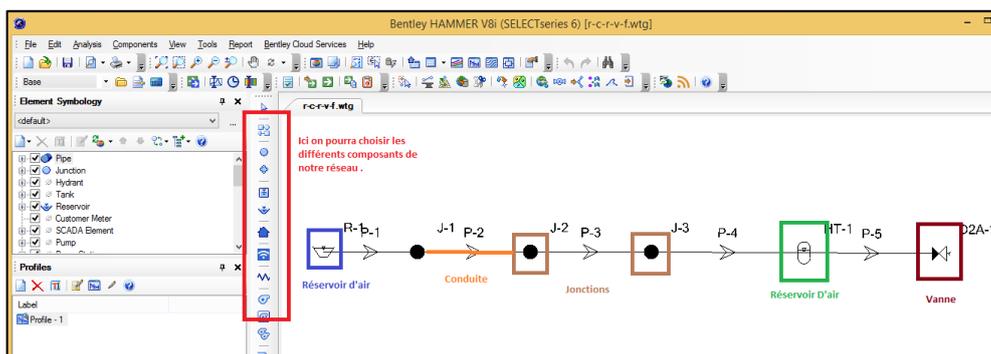


Figure III-1 : La création du modèle hydraulique avec Bentley Hammer

- ii. Définition des paramètres nécessaires pour décrire le comportement de chaque élément (accessible dans la fenêtre propriétés de chaque élément).
- iii. Discrétisation et définition du profil topographie du réseau (Figure III-2 et Figure III-3).

Chapitre 3 : Validation et applications

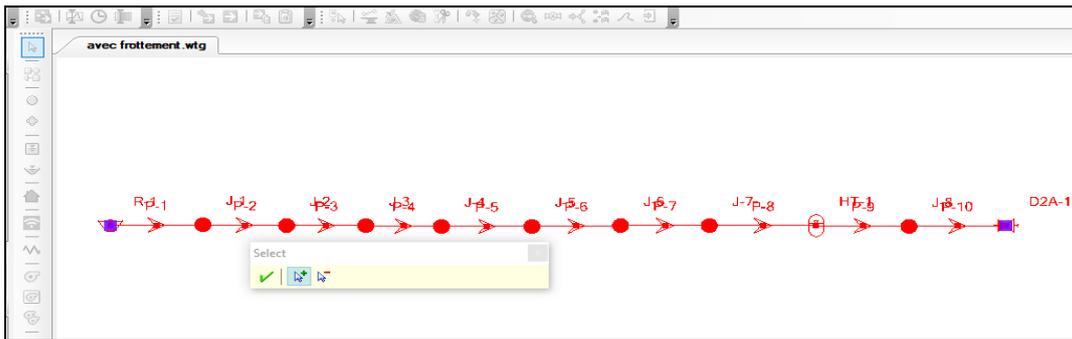


Figure III-2 : La création de profil sur Bentley Hammer

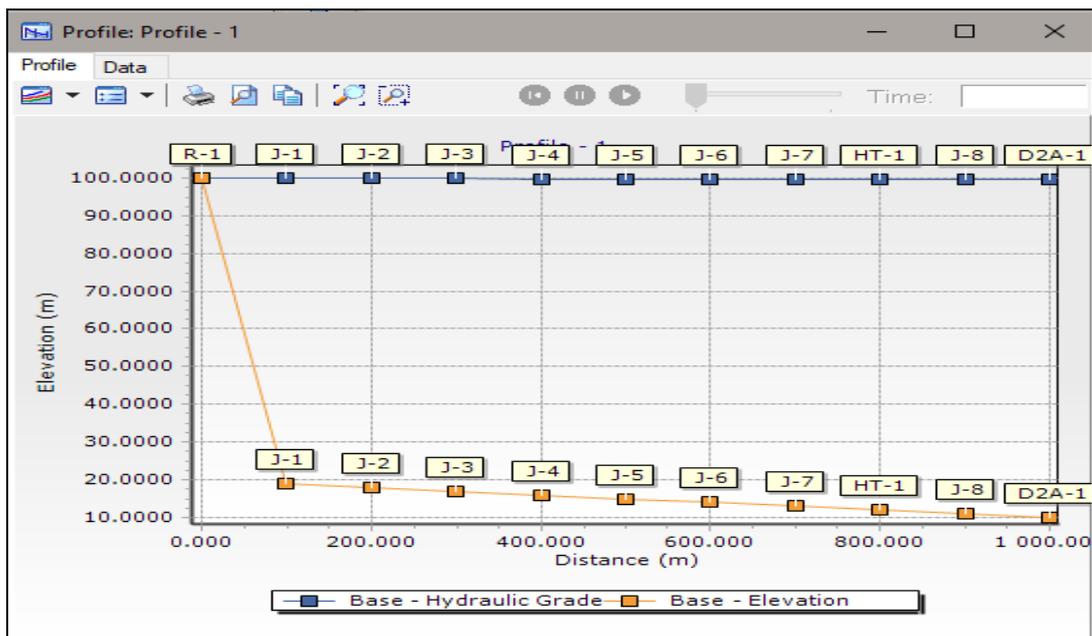


Figure III-3 : Le profil sur Bentley Hammer

- iv. Calcul (simulation), génération des outputs et visualisation des résultats (Figure III-4 et Figure III-5). Les résultats de simulation sur Bentley Hammer seront utilisés dans la validation des nouveaux algorithmes développés.

Chapitre 3 : Validation et applications

Time (sec)	Base - Hydraulic Grade (m)	Base - Flow (m ³ /s)	Base - Air/Vapor Volume (m ³)
0	99.4546	0.7115	0.000
1	100.5889	0.7016	0.000
2	101.7405	0.6917	0.000
3	102.9094	0.6816	0.000
4	104.0958	0.6713	0.000
5	103.7348	0.6555	0.000
6	103.4416	0.6399	0.000
7	103.2125	0.6246	0.000
8	103.0449	0.6095	0.000
9	103.5927	0.5967	0.000
10	104.1663	0.5840	0.000
11	104.7661	0.5712	0.000
12	105.3923	0.5584	0.000
13	105.7470	0.5447	0.000
14	106.1486	0.5311	0.000
15	106.5959	0.5175	0.000
16	107.0881	0.5040	0.000
17	107.7723	0.4909	0.000
18	108.4870	0.4778	0.000
19	109.2324	0.4646	0.000
20	110.0090	0.4514	0.000
21	110.7351	0.4379	0.000
22	111.4927	0.4244	0.000
23	112.2752	0.4108	0.000
24	113.0756	0.3971	0.000
25	113.9366	0.3834	0.000
26	114.8061	0.3696	0.000
27	115.6852	0.3557	0.000
28	116.5753	0.3417	0.000
29	117.4457	0.3275	0.000
30	118.3259	0.3132	0.000

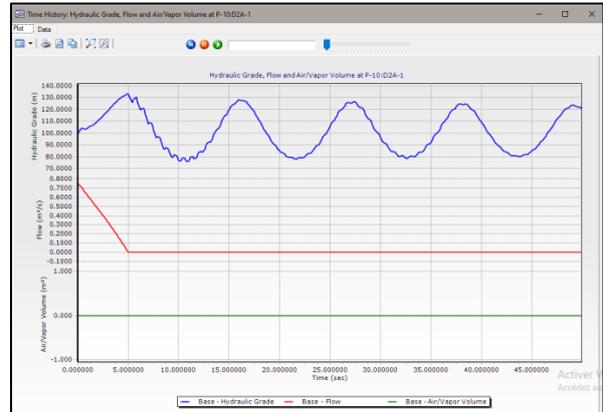


Figure III-4 : Les graphes de simulation sur Bentley Hammer

Figure III-5 : Le tableau des résultats de simulation sur Bentley Hammer

III.3 Validation des algorithmes

III.3.1 Validation de l'algorithme 1 (réservoir-conduite-réservoir d'air-vanne)

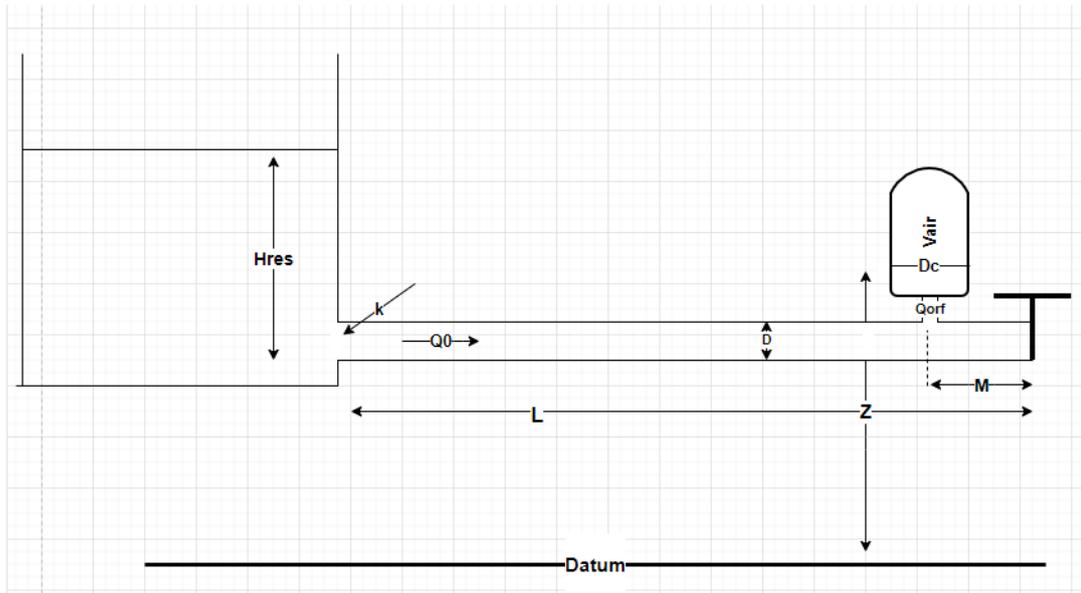


Figure III-6 : Illustration d'une installation (Réservoir -Conduite-Réservoir d'air-Vanne)

Chapitre 3 : Validation et applications

La validation de ce premier algorithme se base sur la comparaison de ses résultats avec les résultats de modélisation du même système hydraulique sur Bentley Hammer. La validation est réalisée comme une étude paramétrique ; en variant les paramètres suivant un à la fois (la position, le volume total et le volume d'air initial du réservoir d'air) et en fixant les autres. En plus de ces paramètres, pour chaque configuration plusieurs conditions (en terme du mode de fermeture de la vanne et aux pertes de charge dues au frottement) ont été analysées :

(a) Fermeture instantanée de la vanne :

- Avec pertes de charge (frottement) ;
- Sans perte de charge ;

(b) Fermeture lente de la vanne $t > (2L/a)$:

- Avec pertes de charge (frottement) ;
- Sans perte de charge.

La comparaison des résultats est faite au niveau de quatre nœuds différents : (1) a la vanne, (2) au réservoir d'air, (3) un nœud en amont du réservoir d'air et (4) un nœud en aval de ce dernier. Le diagramme donné Figure III-7 synthétise l'ensemble des configurations et conditions utilisées dans cette étude paramétrique (de validation).

Chapitre 3 : Validation et applications



Figure III-7 :Synthèse des différentes configurations et conditions utilisées dans la validation de l'algorithme 1.

III.3.1.1 Variation de la position du réservoir d'air

Pour cette première configuration, nous allons varier le position du réservoir d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans Tableau III-3.

Chapitre 3 : Validation et applications

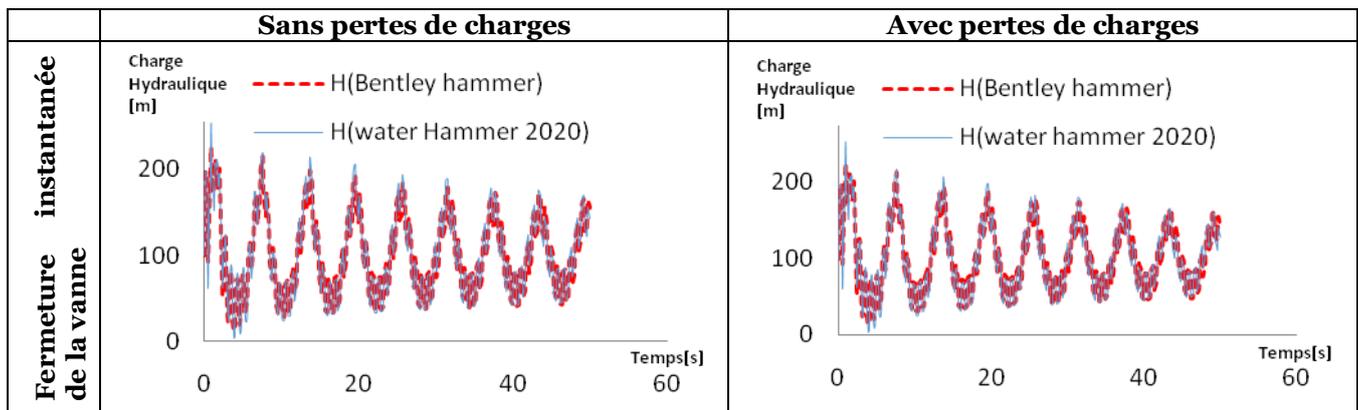
Tableau III-3: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir-conduite -vanne) en variant la position du réservoir d'air

Paramètres	D [m]	L [m]	H_{res} [m]	Q_0 [m ³ /s]	a [m/s]	f [-]	k [-]
Valeur	1	1000	100	0.75	1000	0 ou 0.015	0 ou 0.5
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	V_{oair} [m ³]	D_c [m]	$Corf$ [-] (inflow/ outflow)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200 500 800	4	0.5	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. Position du réservoir d'air M=200

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-4**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-5** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Tableau III-4 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et de l'algorithme 1 (système : réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) - nœud au niveau de la vanne (M=200 m)



Chapitre 3 : Validation et applications

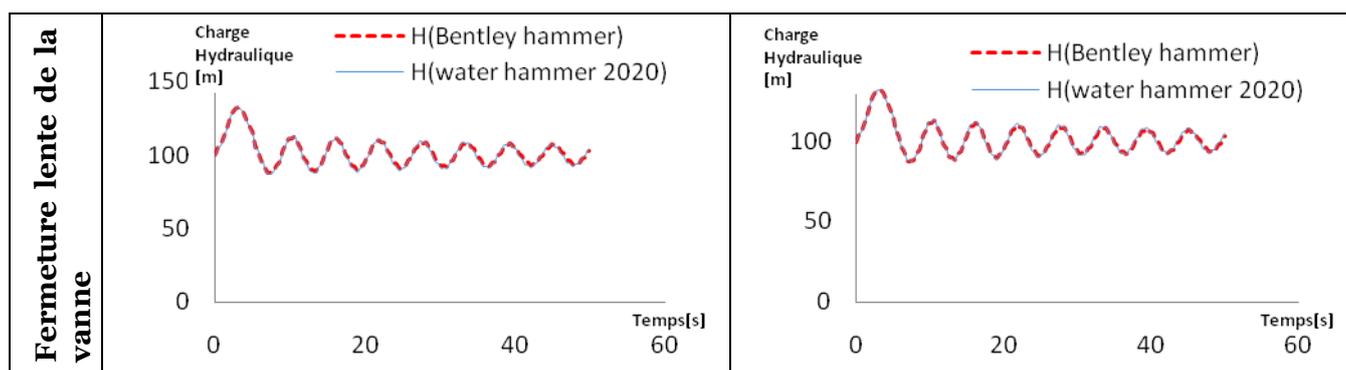


Tableau III-5 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme 1 (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (M=200)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.98	0.09	0.13	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.03	0.13	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.05	0.08	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.04	0.08	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.10	0.10	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.04	0.11	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.05	0.09	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.05	0.09	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.09	0.10	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.04	0.10	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.05	0.09	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.05	0.09	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.09	0.12	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.03	0.12	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.05	0.09	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.05	0.09	Très bien

b. Position du réservoir d'air M=500

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-6**. Les indicateurs de performance

Chapitre 3 : Validation et applications

(issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-7** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Tableau III-6 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M=500 m)

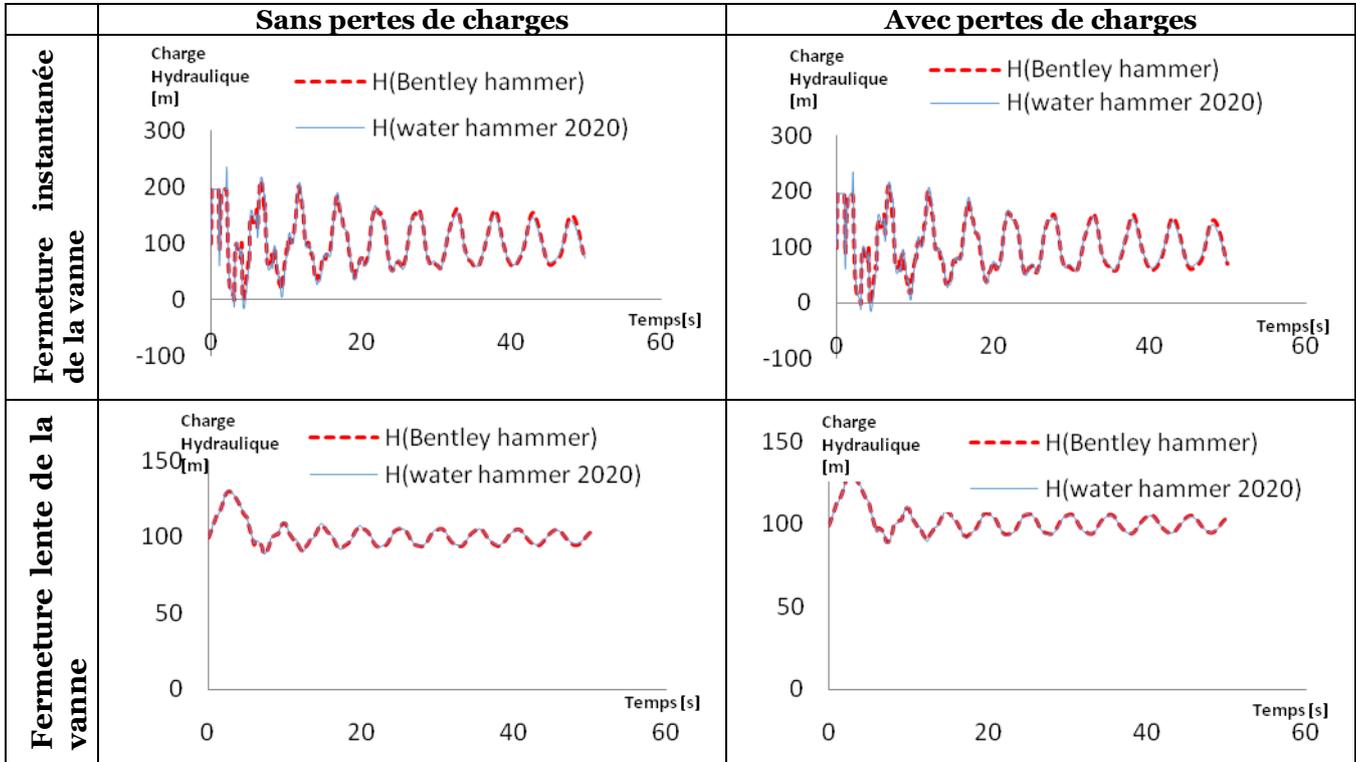


Tableau III-7 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (M=500)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.97	0.05	0.15	Très bien
	Sans	Lente	0.97	0.05	0.15	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.08	0.05	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.08	0.05	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.05	0.09	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.06	0.10	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.06	0.04	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.06	0.04	Très bien
En amont du	Sans	Instantanée	0.98	0.04	0.11	Très bien

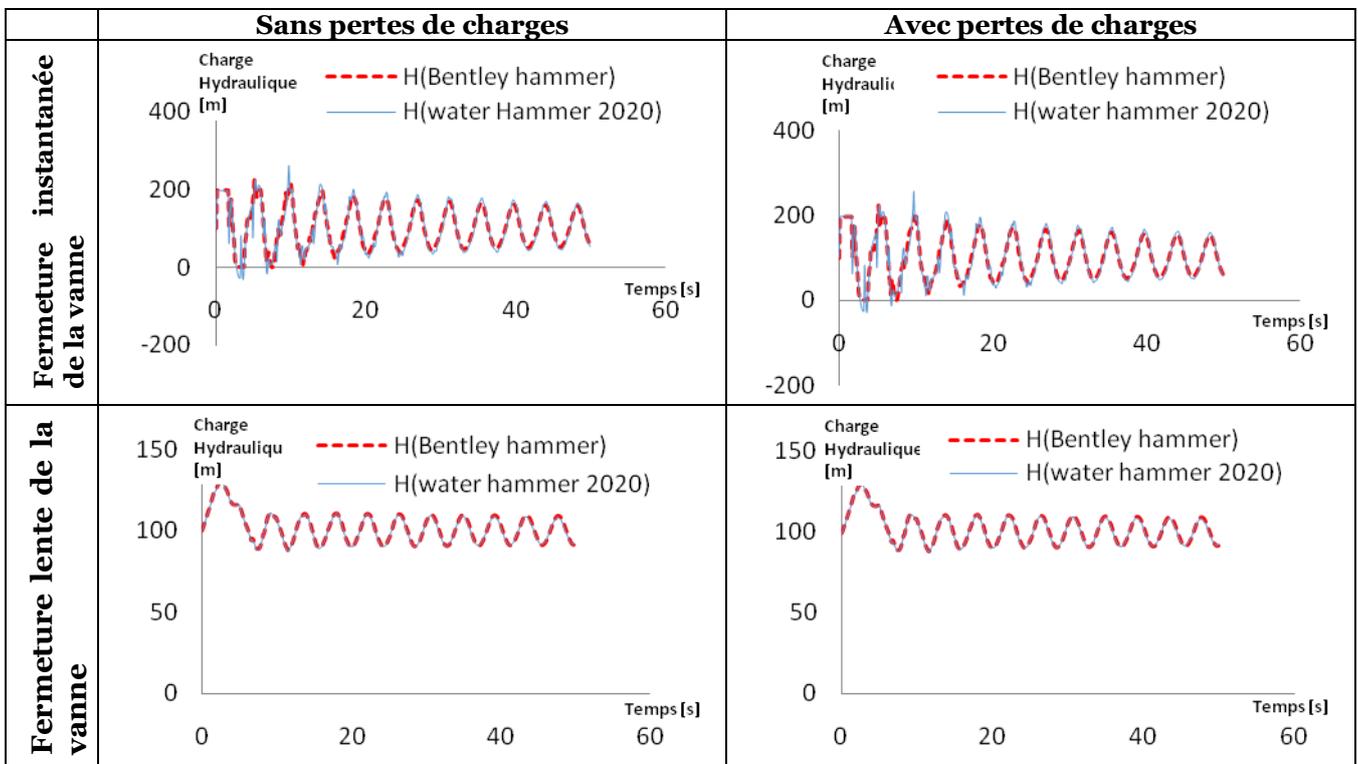
Chapitre 3 : Validation et applications

réservoir d'air	Sans	Lente	0.98	0.04	0.11	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.06	0.05	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.06	0.05	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.06	0.09	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.06	0.10	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.07	0.04	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.06	0.04	Très bien

c. Position du réservoir d'air M=800

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-8**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-9** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Tableau III-8 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M=800 m)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-9 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (M=800)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.92	0.07	0.27	Très bien
	Sans	Lente	0.97	0.04	0.27	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.03	0.05	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.03	0.05	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.94	0.05	0.27	Très bien
	Sans	Lente	0.93	0.04	0.25	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.04	0.06	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.04	0.06	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.85	0.03	0.38	Très bien
	Sans	Lente	0.84	0.02	0.39	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.04	0.07	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.04	0.07	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.88	0.06	0.33	Très bien
	Sans	Lente	0.88	0.04	0.34	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.03	0.06	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.03	0.05	Très bien

III.3.1.2 Variation du volume du réservoir d'air

Pour cette première configuration, nous allons varier le volume du réservoir d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans Tableau III-10.

Chapitre 3 : Validation et applications

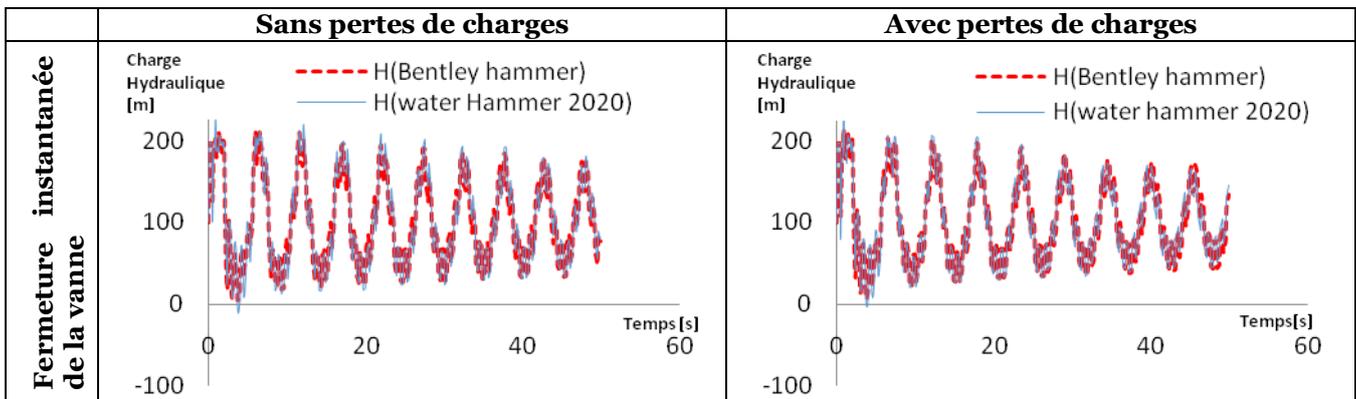
Tableau III-10 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir-conduite -vanne) (Volume de réservoir d'air =3m³) en variant le volume du réservoir d'air

Paramètres	D [m]	L [m]	H_{res} [m]	Q_0 [m ³ /s]	a [m/s]	f [-]	k [-]
Valeur	1	1000	100	0.75	1000	0 ou 0.015	0 ou 0.5
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	H_{oair} [m]	D_c [m]	$Corf$ [-] (inflow/ outflow)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200	3 4 6	96	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. Volume du réservoir d'air =3

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-11**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-12** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Tableau III-11 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne(Volume de réservoir d'air=3 m³)



Chapitre 3 : Validation et applications

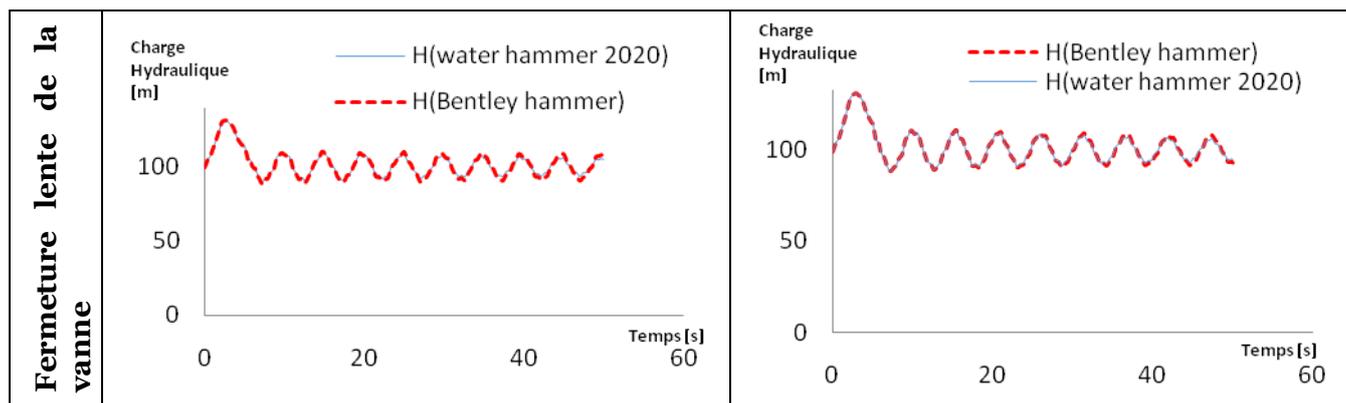


Tableau III-12 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume de réservoir d'air=3 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.97	0.11	0.16	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.22	0.13	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.032	0.12	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.03	0.085	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.10	0.14	Très bien
	Sans	Lente	0.99	0.22	0.11	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.03	0.14	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.03	0.092	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.09	0.13	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.20	0.11	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.03	0.13	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.03	0.09	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.97	0.11	0.15	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.22	0.12	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.03	0.13	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.032	0.08	Très bien

b. Volume du réservoir d'air = 4

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et

Chapitre 3 : Validation et applications

L'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-13**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-14** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Tableau III-13 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume de réservoir d'air=4 m³)

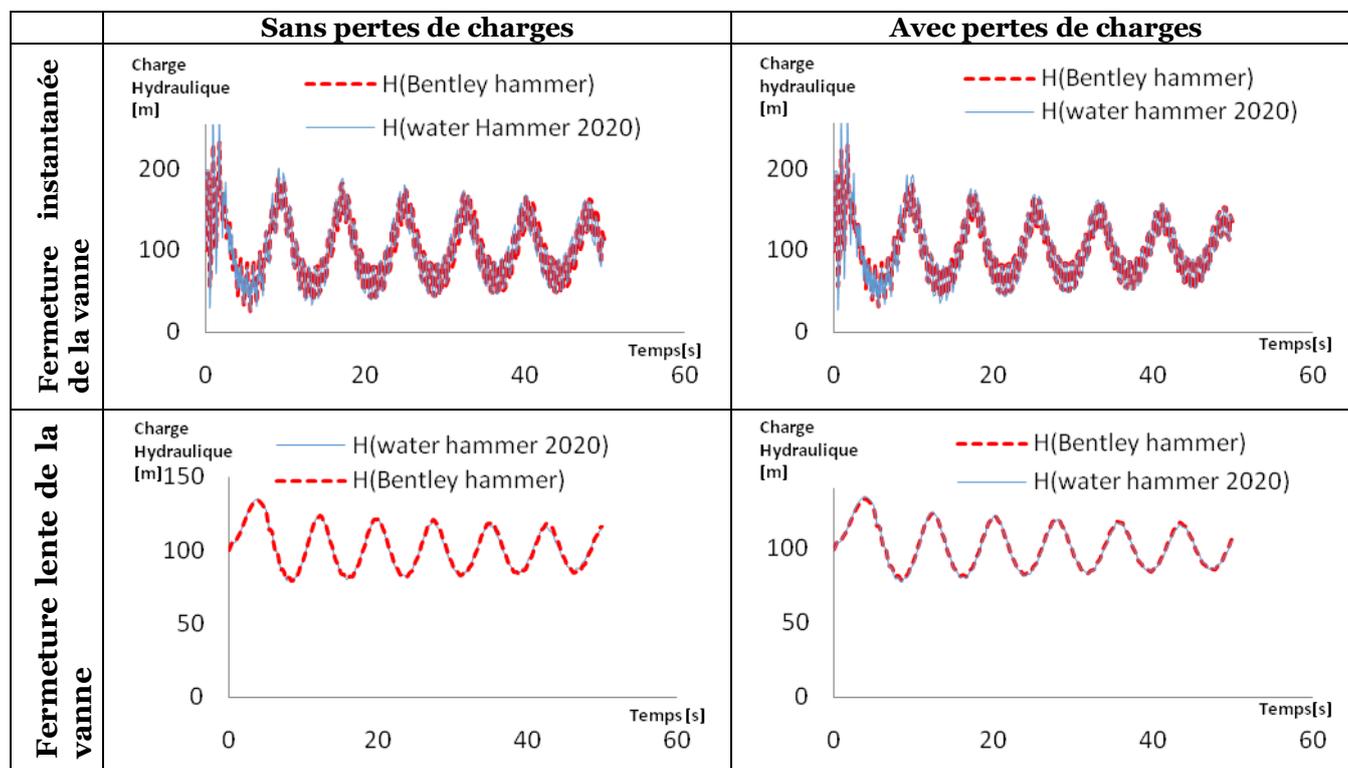


Tableau III-14 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume de réservoir d'air=4 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.97	0.007	0.16	Très bien
	Sans	Lente	0.97	0.007	0.16	Très bien
	Avec	Instantanée	0.97	0.100	0.16	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.17	0.05	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.008	0.12	Très bien
	Sans	Lente	0.99	0.07	0.08	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.0.17	0.09	Très bien

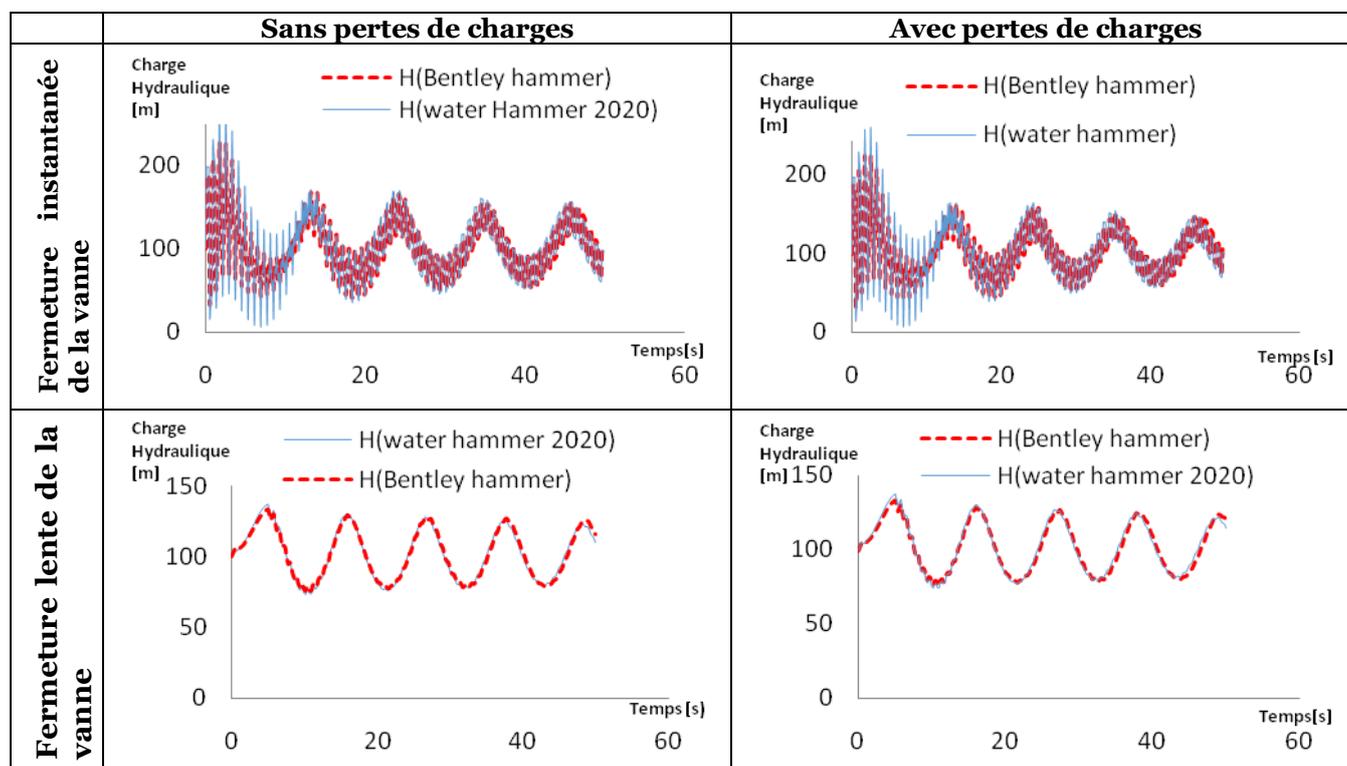
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Lente	0.99	0.14	0.054	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.007	0.11	Très bien
	Sans	Lente	0.99	0.06	0.09	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.15	0.09	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.13	0.054	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.97	0.0007	0.14	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.088	0.13	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.17	0.095	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.16	0.05	Très bien

c. Volume du réservoir d'air = 6

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-15**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-16** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Tableau III-15 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume de réservoir d'air=6 m³)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-16 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume de réservoir d'air=6 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.91	0.08	0.29	Très bien
	Sans	Lente	0.90	0.08	0.30	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.25	0.12	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.31	0.14	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.97	0.03	0.15	Très bien
	Sans	Lente	0.97	0.04	0.17	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.21	0.12	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.27	0.13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.97	0.02	0.15	Très bien
	Sans	Lente	0.97	0.03	0.16	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.18	0.12	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.09	0.14	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.93	0.05	0.25	Très bien
	Sans	Lente	0.92	0.06	0.26	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.23	0.12	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.29	0.14	Très bien

III.3.1.3 Variation du volume d'air

Pour cette première configuration, nous allons varier le volume initial d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans Tableau III-17.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-17: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir-conduite -vanne) en variant le volume d'air initial

Paramètres	D [m]	L [m]	$Hres$ [m]	Q_0 [m ³ /s]	a [m/s]	f [-]	k [-]
Valeur	1	1000	100	0.75	1000	0 ou 0.015	0 ou 0.5
Paramètres	M [m]	$Vairch$ [m ³]	V_{air} [m ³]	D_c [m]	$Corf$ [-] (inflow/ outflow)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200	4	0.5 1 2 3.5	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. Volume initiale d'air =0.5

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-18**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-19** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-18 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial =0.5 m³).

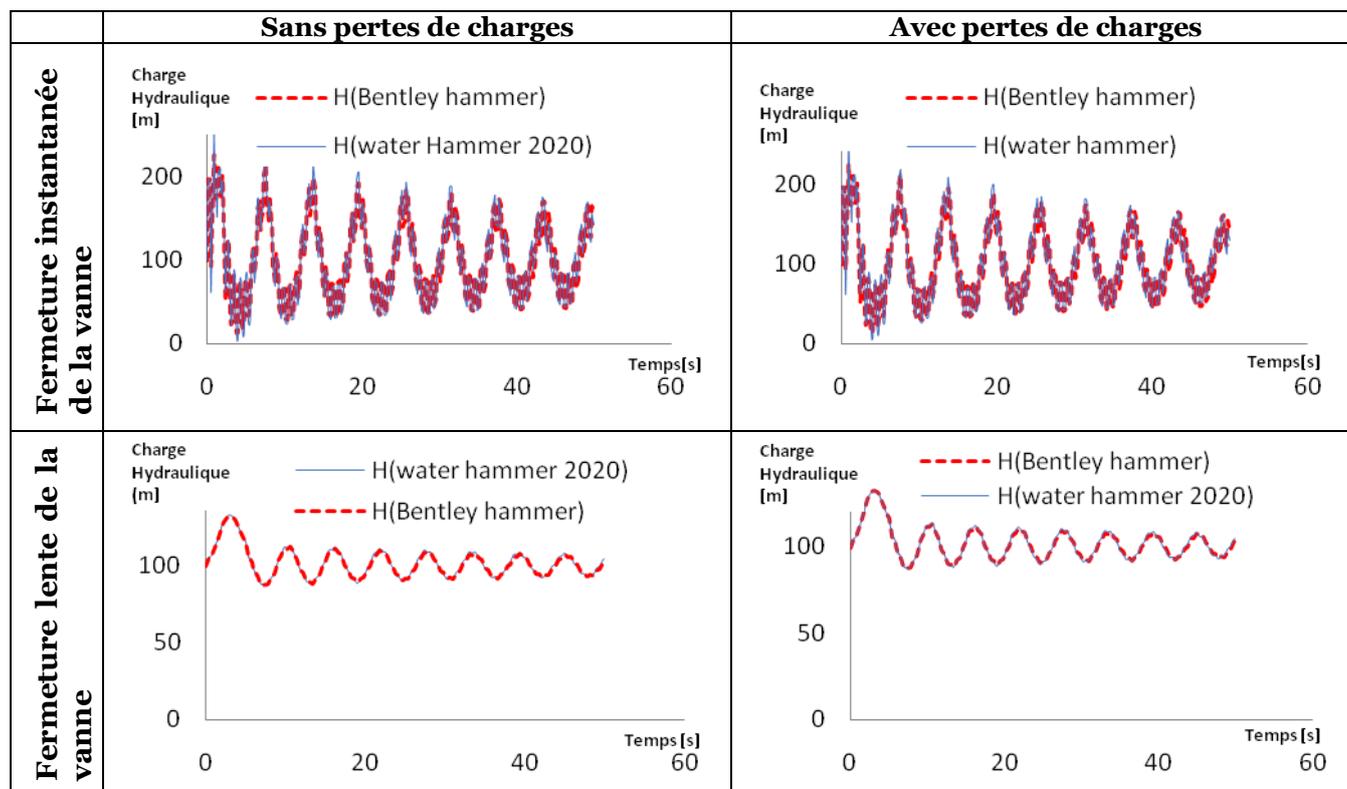


Tableau III-19 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial =0.5 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.98	0.09	0.13	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.03	0.13	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.05	0.08	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.04	0.08	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.10	0.10	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.04	0.11	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.05	0.09	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.05	0.09	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.09	0.10	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.04	0.10	Très bien

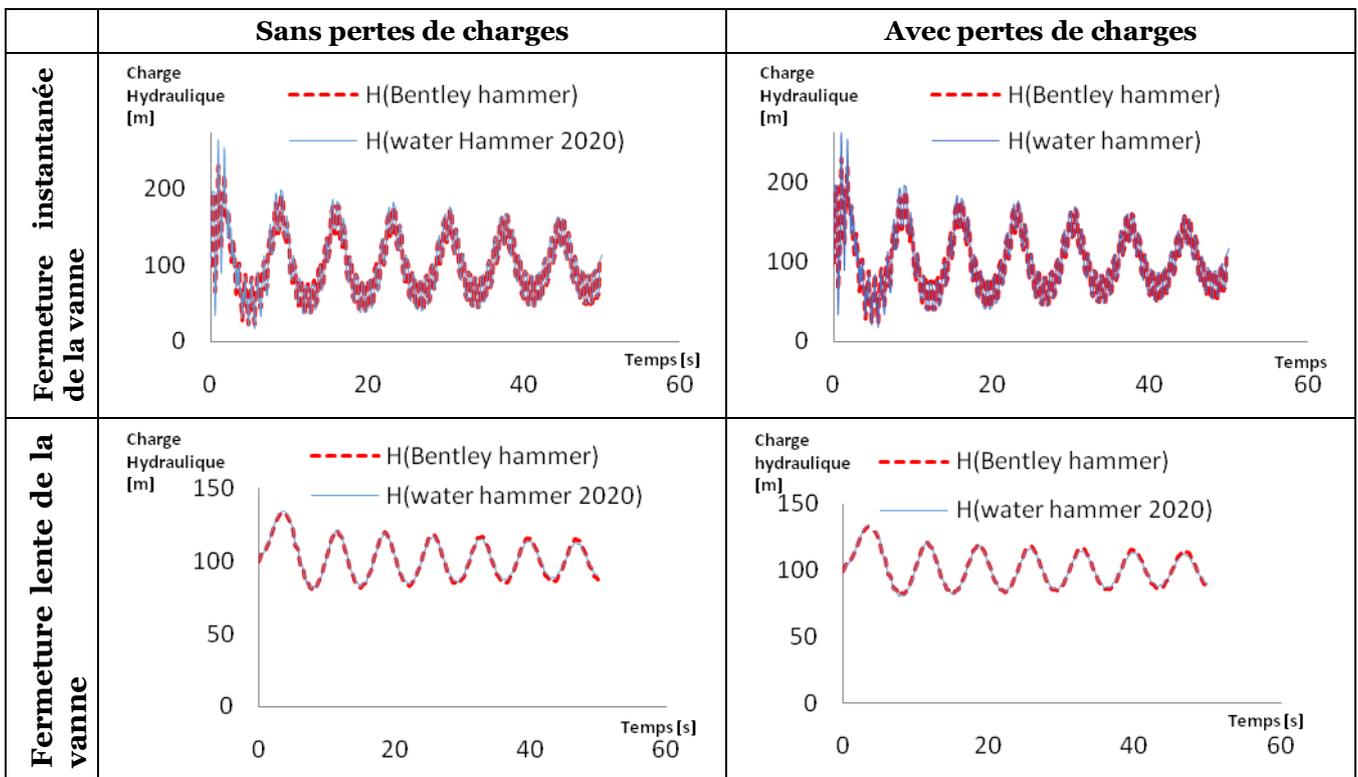
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Instantanée	0.99	0.05	0.09	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.05	0.09	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.09	0.12	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.03	0.12	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.05	0.09	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.05	0.09	Très bien

b. Volume initiale de l'air = 1

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-20**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-21** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Tableau III-20 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial =1 m³)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-21 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial =1 m³).

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.98	0.11	0.12	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.14	0.13	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.10	0.07	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.09	0.07	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.10	0.07	Très bien
	Sans	Lente	0.99	0.12	0.07	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.08	0.07	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.08	0.07	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.09	0.08	Très bien
	Sans	Lente	0.99	0.11	0.07	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.08	0.07	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.07	0.07	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.11	0.10	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.13	0.10	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.09	0.07	Très bien
	Avec	Lente	0.99	0.09	0.07	Très bien

c. Volume initiale de l'air =2

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-23**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-23** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-22 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial =2 m³)

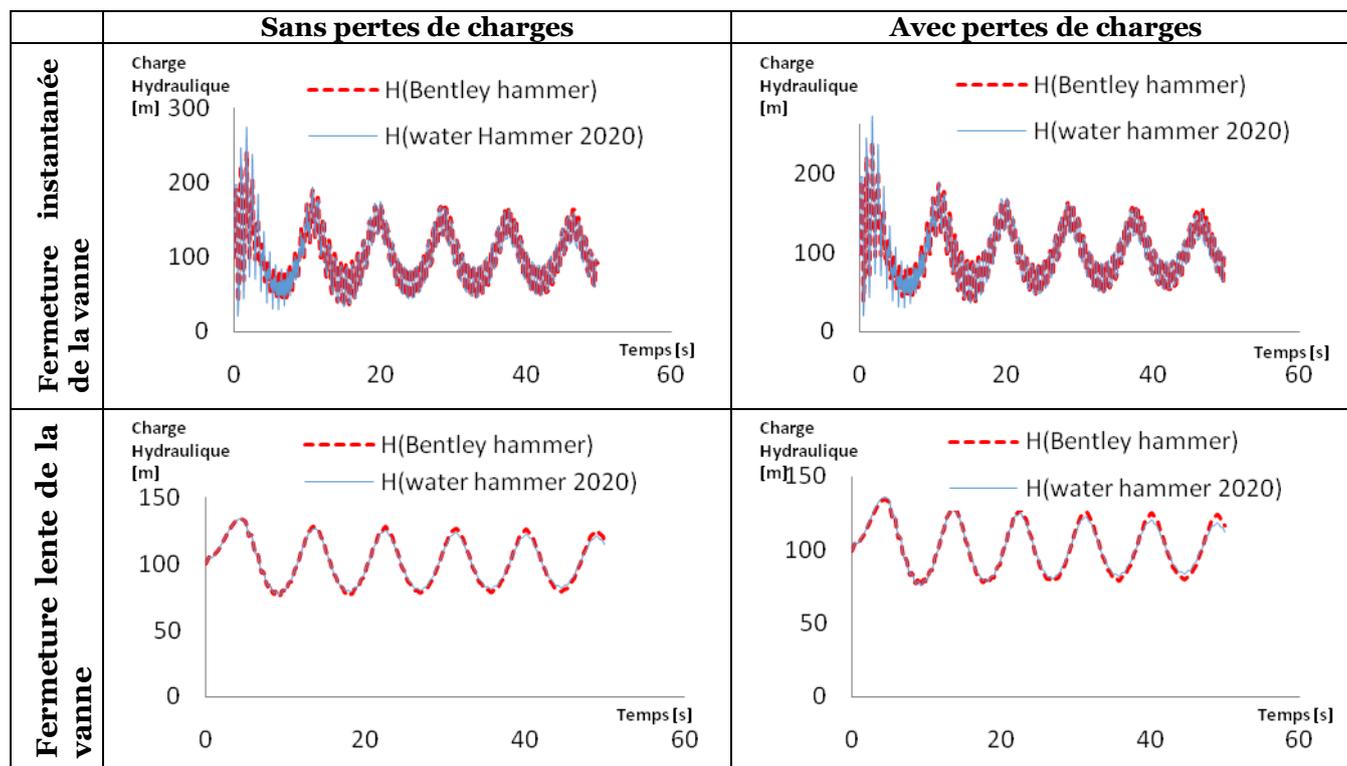


Tableau III-23 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial =2 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.95	0.08	0.21	Très bien
	Sans	Lente	0.95	0.08	0.1	Très bien
	Avec	Instantanée	0.99	0.07	0.21	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.07	0.12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.04	0.07	Très bien
	Sans	Lente	0.99	0.05	0.12	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.05	0.07	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.05	0.11	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.04	0.09	Très bien
	Sans	Lente	0.99	0.04	0.12	Très bien

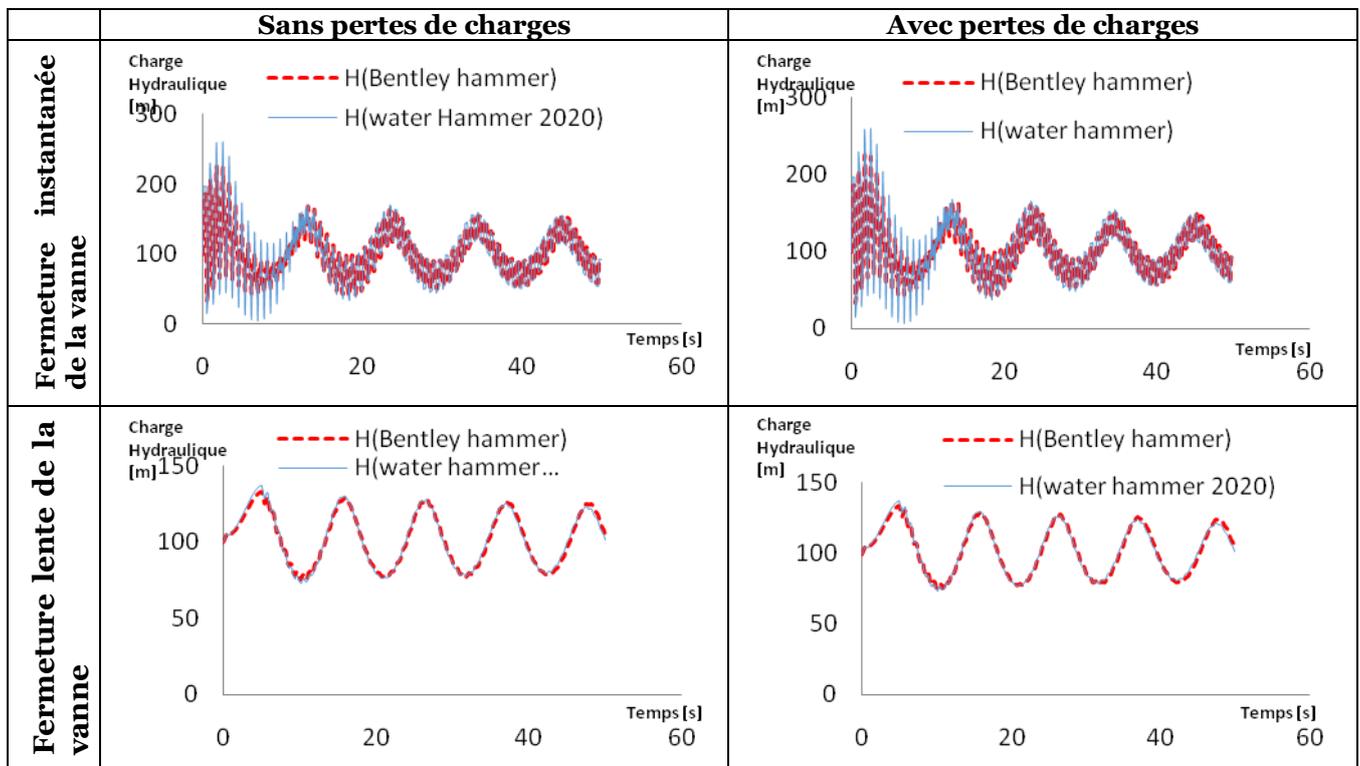
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Instantanée	0.98	0.05	0.1	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.04	0.12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.97	0.06	0.17	Très bien
	Sans	Lente	0.97	0.06	0.12	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.06	0.17	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.06	0.12	Très bien

d. Volume initiale de l'air=3.5

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par Bentley Hammer et l'Algorithme 1 sont données dans **Tableau III-24**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et le l'algorithme 1) données dans **Tableau III-25** confirment que l'algorithme 1 fonctionne correctement.

Tableau III-24 : Comparaison entre les résultats de Bentley Hammer et nos simulations au (l'algorithme : Réservoir- conduites -réservoir d'air-vanne) niveau de la vanne d'air (Volume d'air initial =3.5 m³)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-25 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-Conduite-Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial =3.5 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	0.92	0.08	0.28	Très bien
	Sans	Lente	0.91	0.09	0.28	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.17	0.10	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.16	0.10	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.03	0.13	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.05	0.12	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.10	0.10	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.12	0.10	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.98	0.02	0.13	Très bien
	Sans	Lente	0.98	0.04	0.13	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.11	0.10	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.11	0.10	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.94	0.05	0.24	Très bien
	Sans	Lente	0.94	0.07	0.24	Très bien
	Avec	Instantanée	0.98	0.15	0.10	Très bien
	Avec	Lente	0.98	0.14	0.10	Très bien

III.3.2 Validation de l'algorithme 2 (réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne)

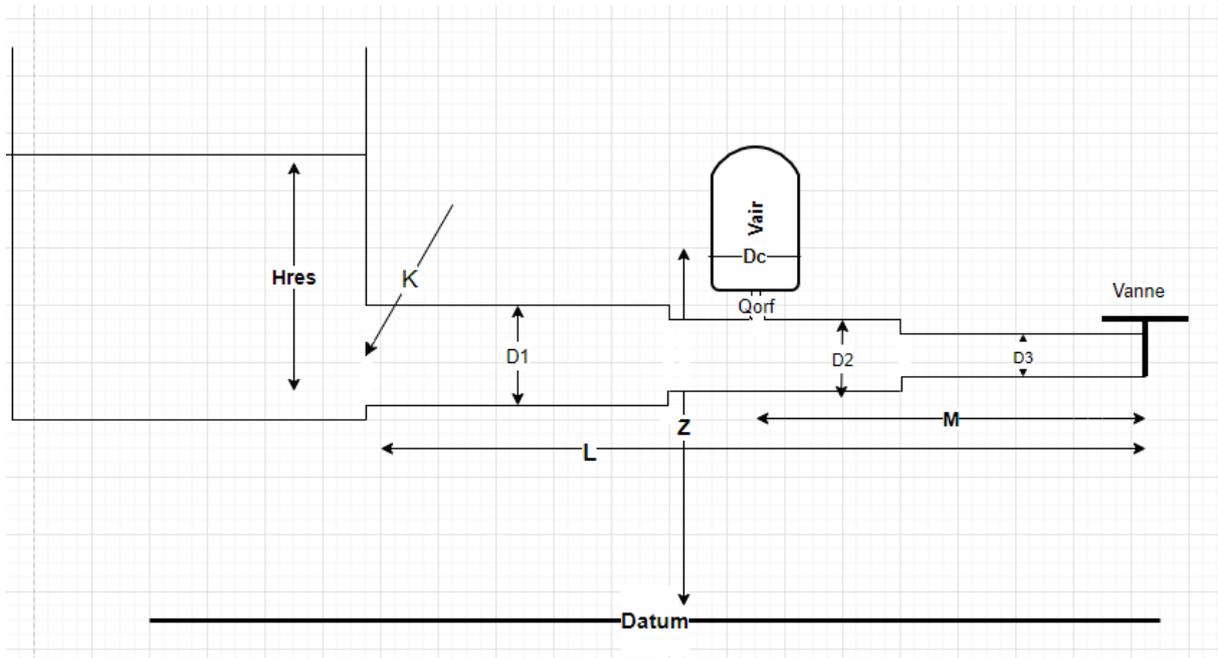


Figure III-8 : Figure d'une installation (Réservoir - multi conduites en série -Réservoir d'air-Vanne)

La validation de ce deuxième algorithme se base sur a comparaison de ses résultats avec les résultats obtenus par le premier algorithme, telle qu'on estime avoir des conduites en série ayant le même diamètre ce qui est l'équivalent de la première figure. La validation est réalisée comme une étude paramétrique ;en variant les paramètres suivant un à la fois (la position, le volume total et le volume d'air initial du réservoir d'air) et en fixant les autres. En plus de ces paramètres, pour chaque configuration plusieurs conditions (en terme du mode de fermeture de la vanne et aux pertes de charge dues au frottement) ont été analysées :

(a) Fermeture instantanée de la vanne :

- Avec pertes de charge (frottement) ;
- Sans perte de charge ;

(b) Fermeture lente de la vanne $t > (2L/a)$:

- Avec pertes de charge (frottement) ;
- Sans perte de charge.

Chapitre 3 : Validation et applications

La comparaison des résultats est faite au niveau de quatre nœuds différents : (1) a la vanne, (2) au réservoir d'air, (3) un nœud en amont du réservoir d'air et (4) un nœud en aval de ce dernier.

III.3.2.1 Variation de la position du réservoir d'air

Pour cette deuxième configuration, nous allons varier la position du réservoir d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans Tableau III-26.

Tableau III-26 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir- multi conduites en série –réservoir d'air-vanne) en variant la position du réservoir d'air

Paramètres	a_i [m/s]	(D_1, D_2, D_3, D_4) [m]	(L_1, L_2, L_3, L_4) [m]	H_{res} [m]	f [-]	k [-]	Q_0 [m ³ /s]
Valeur	1000	(1, 1, 1, 1)	(200, 300, 100, 400)	100	0 ou 0.015	0 ou 0.5	0.75
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	V_{oair} [m ³]	D_c [m]	$Corf$ [-] (in/out)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200 500 800	4	0.5	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. La position du réservoir d'air M=200

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-27**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 2) données dans **Tableau III-28** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-27 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M =200 m).

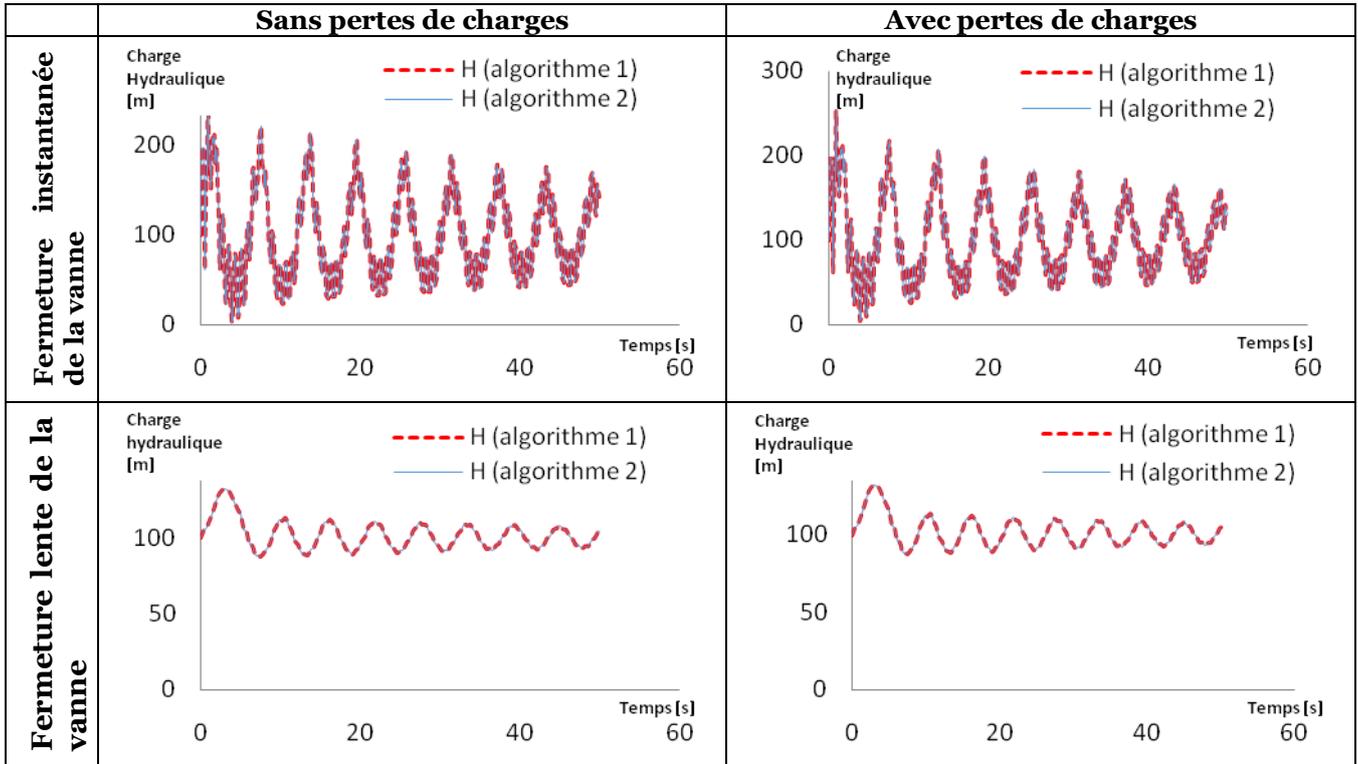


Tableau III-28 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (M=200)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	2.2E-13	2.6E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	2.2E-13	1.09E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.14E-12	-2.6E-14	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	8.9E14	-2.80E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	8.41E-14	1.00E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	4.42E-14	-2.92E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	1.84E-13	-3.02E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	1.62E-13	1.01E-13	Très bien

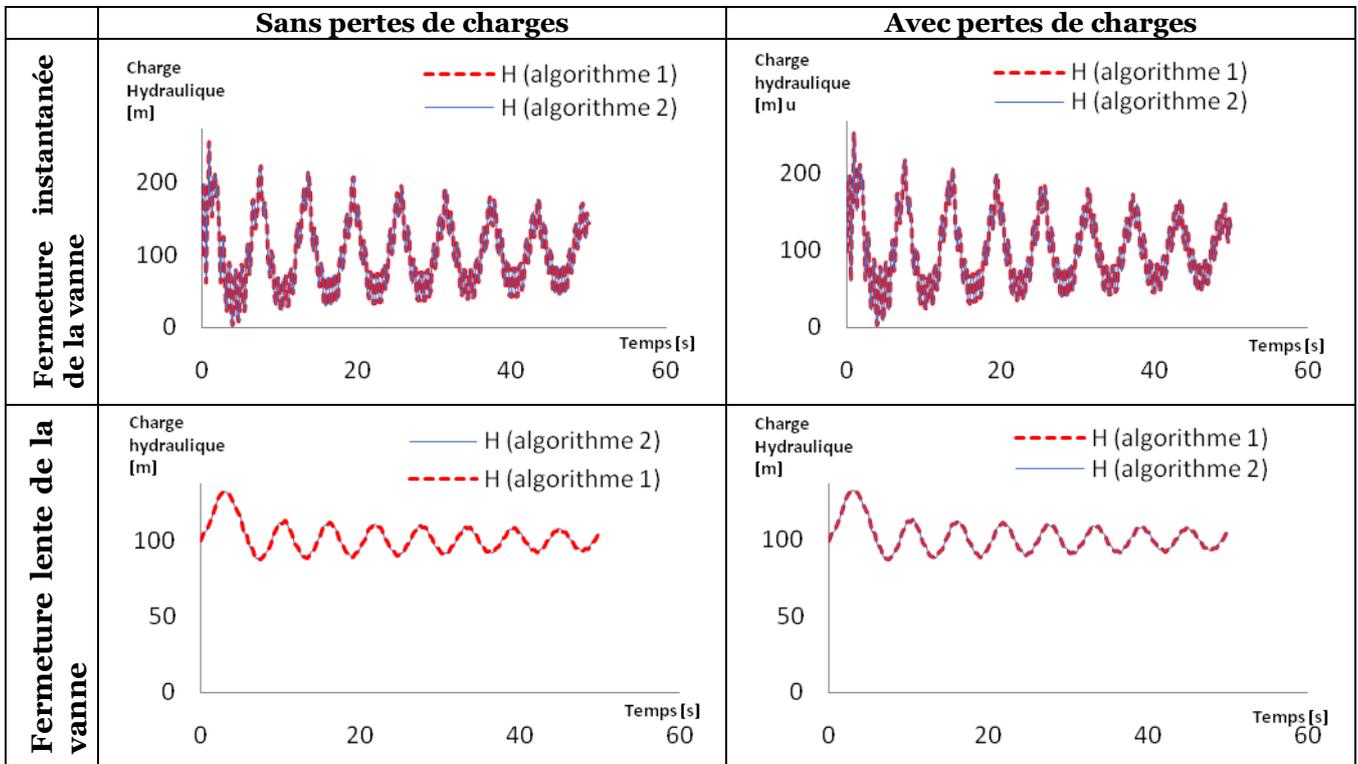
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.11E-13	4.45E-13	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.012	0.0005	Très bien
	Sans	Lente	1	1.73E-13	1.13E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	8.89E-14	3.88E-14	Très bien

b. La position du réservoir d'air M=500

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-29**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 2) données dans **Tableau III-30** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Tableau III-29 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M =500 m)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-30 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (M=500)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	6.23E-17	3.53E-17	Très bien
	Sans	Lente	1	2.23E-16	6.43E-16	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.42E-13	1.32E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	7.21E-14	1.88E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.24E-16	1.42E-16	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	7.82E-14	1.58E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	8.79E-14	8.87E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	7.74E-14	3.63E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.31E-13	2.32E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.23E-16	1.33E-16	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.47E-14	2.69E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	8.71E-14	2.02E-12	Très bien

c. La Position du réservoir d'air M=800

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-31**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 2) données dans **Tableau III-32** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-31 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M =800 m)

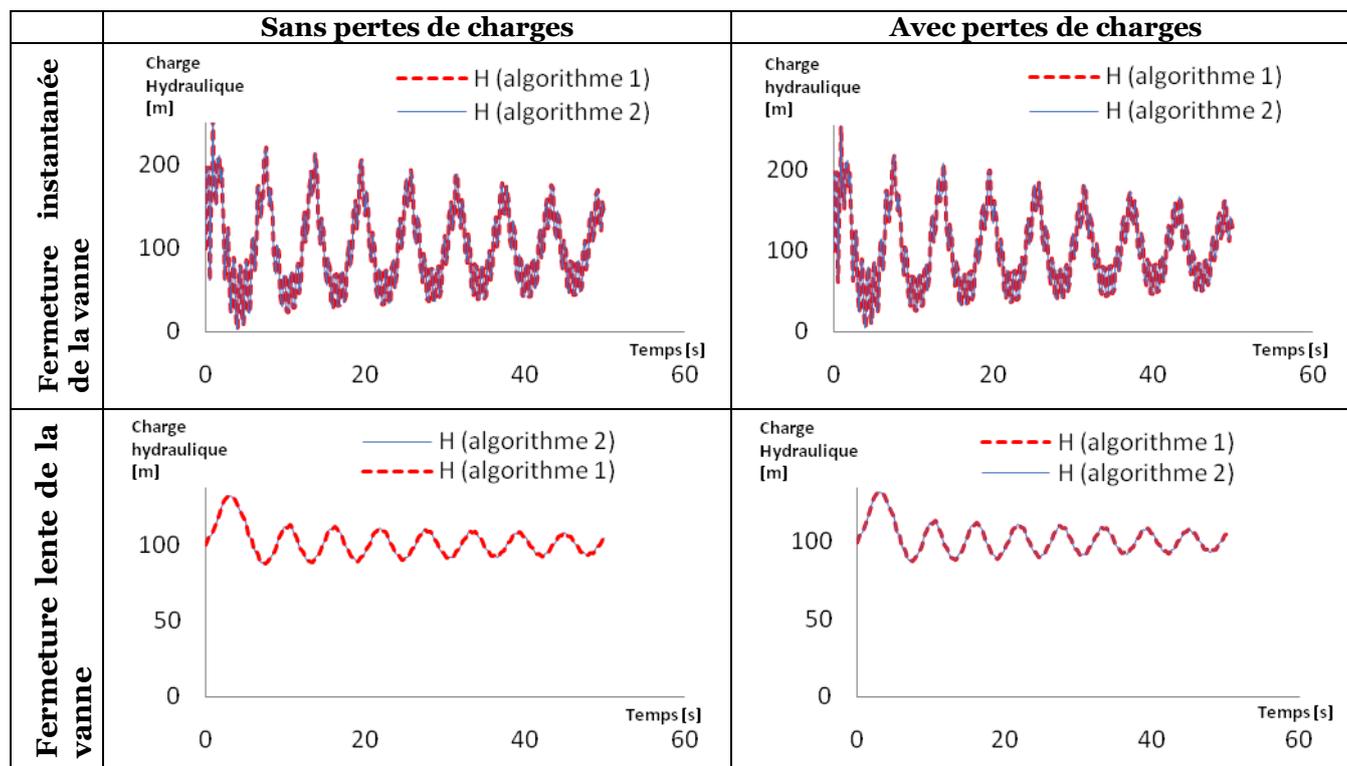


Tableau III-32 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (M=800)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.73E-18	9.13E-17	Très bien
	Avec	Lente	1	1.45E-14	1.31E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.56E-14	1.62E-12	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	-0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien

Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Instantanée	1	2.26E-16	4.33E-16	Très bien
	Avec	Lente	1	2.28E-14	5.54E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	5.63E-17	9.64E-17	Très bien
	Avec	Lente	1	1.61E-15	2.05E-12	Très bien

III.3.2.2 Variation du volume du réservoir d'air

Pour cette deuxième configuration, nous allons varier le volume total du réservoir d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans Tableau III-33.

Tableau III-33 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir- multi conduites en série –réservoir d'air-vanne) en variant le volume du réservoir d'air

Paramètres	a_i [m/s]	(D_1, D_2, D_3, D_4) [m]	(L_1, L_2, L_3, L_4) [m]	H_{res} [m]	f [-]	k [-]	Q_0 [m ³ /s]
Valeur	1000	(1, 1, 1,1)	(200, 300, 100,400)	100	0 ou 0.015	0 ou 0.5	0.75
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	H_{oair} [m]	D_c [m]	$Corf$ [-] (in/out)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200	3 4 6	96	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. Volume du réservoir d'air = 3

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-34**, Les indicateurs de performance

Chapitre 3 : Validation et applications

(issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et le l'algorithme 2) données dans **Tableau III-35** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Tableau III-34 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 3 m³)

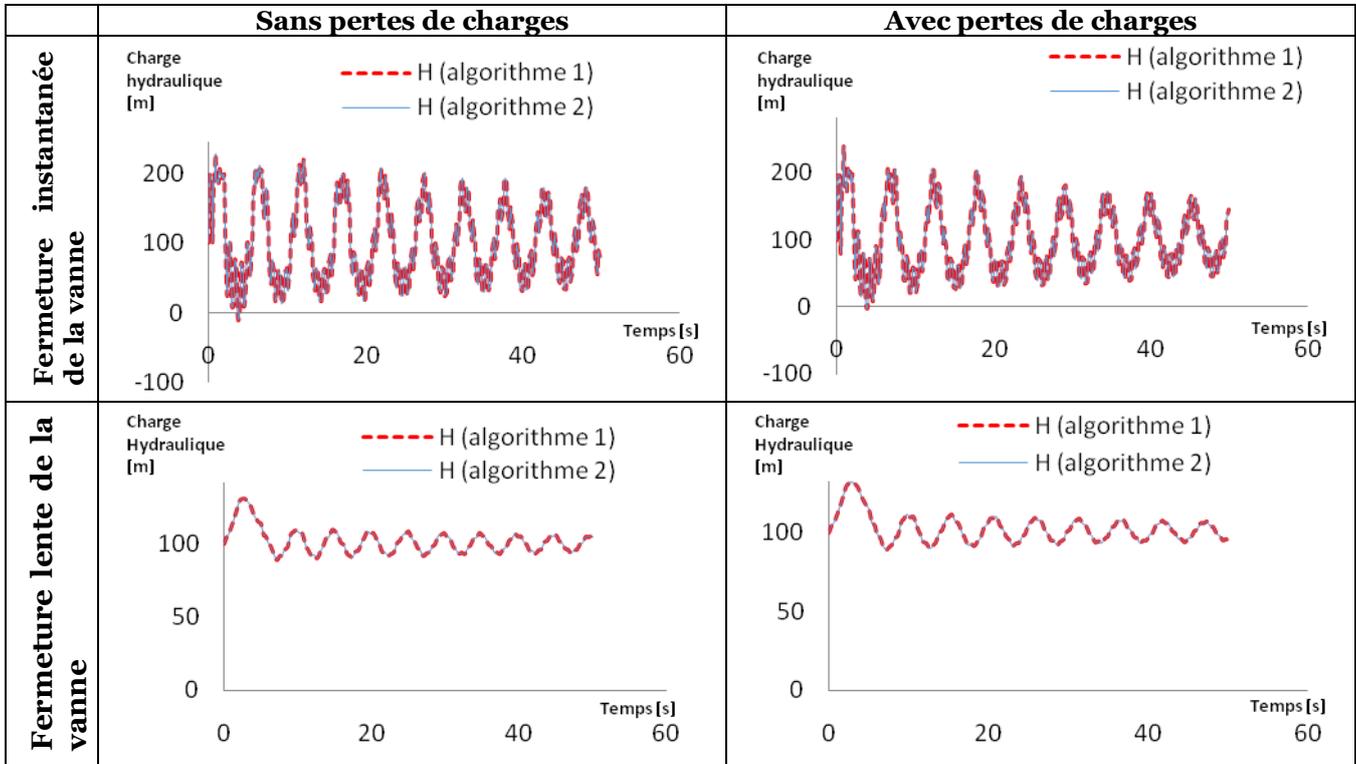


Tableau III-35 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 3 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	1.5E-16	3.6E-17	Très bien
	Sans	Lente	1	5.6E-16	2.09E-16	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	2.5E-13	1.1E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	2.8E-14	9.2E-14	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien

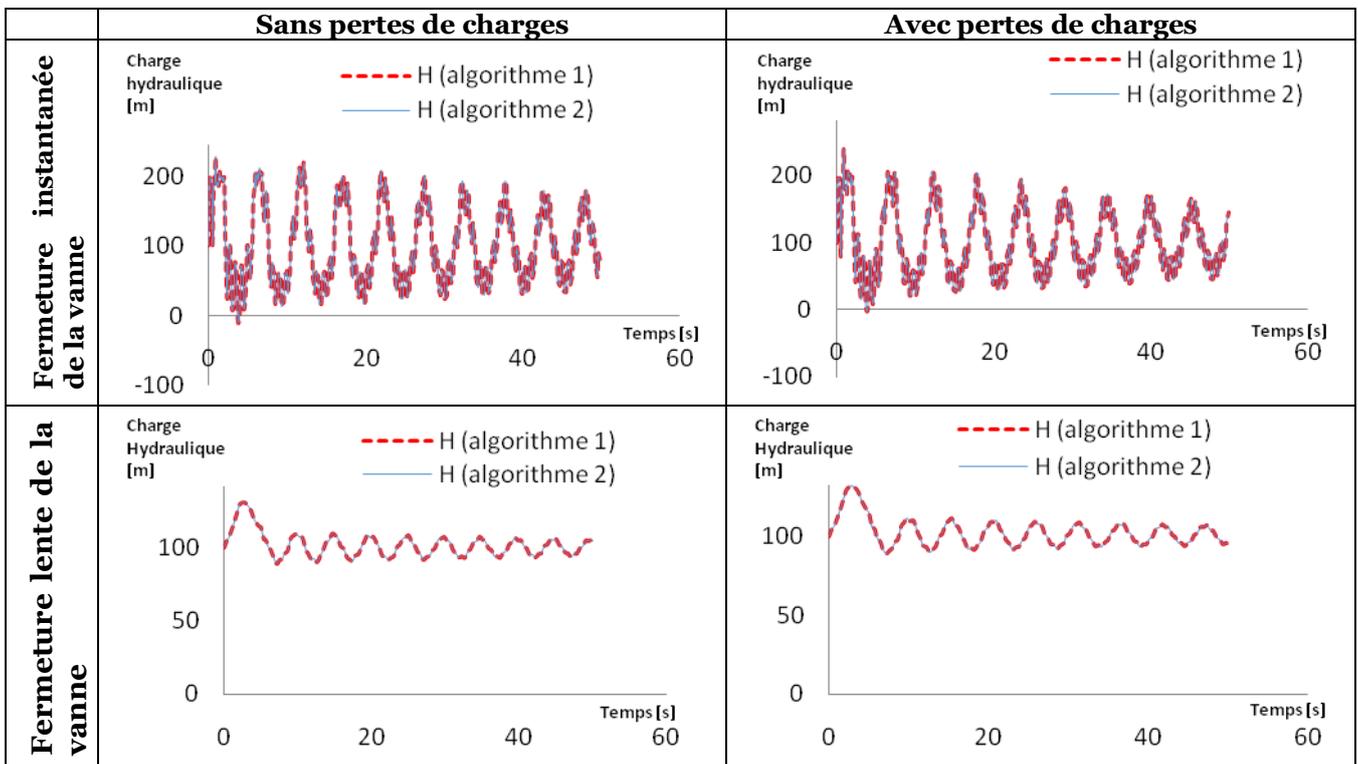
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Lente	1	2.7E-13	5.7E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.2E-16	1.06E-16	Très bien
	Sans	Lente	1	3.4E-14	1.6E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	2.7E-13	1.13E-16	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	4.2E-16	1.34E-16	Très bien
	Sans	Lente	1	4.05E-14	1.54E-16	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	2.5E-13	8.2E-13	Très bien

b. Volume du réservoir d'air = 4

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-36**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 2) données dans **Tableau III-37** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Tableau III-36 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 4 m³)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-37: Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 4 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	2E-13	2.57E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	6.19E-14	4.36E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.85E-14	9.97E-13	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.24E-13	1.17E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.49E-13	1.26E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	4.09E-15	2.92E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.15E-13	2.66E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.17E-13	4.68E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	2.67E-14	8.32E-13	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.05E-13	2.02E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	7.93E-14	3.31E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.86E-14	7.08E-13	Très bien

c. Volume du réservoir d'air = 6

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-38**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 2) données dans **Tableau III-39** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-38 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 6 m³)

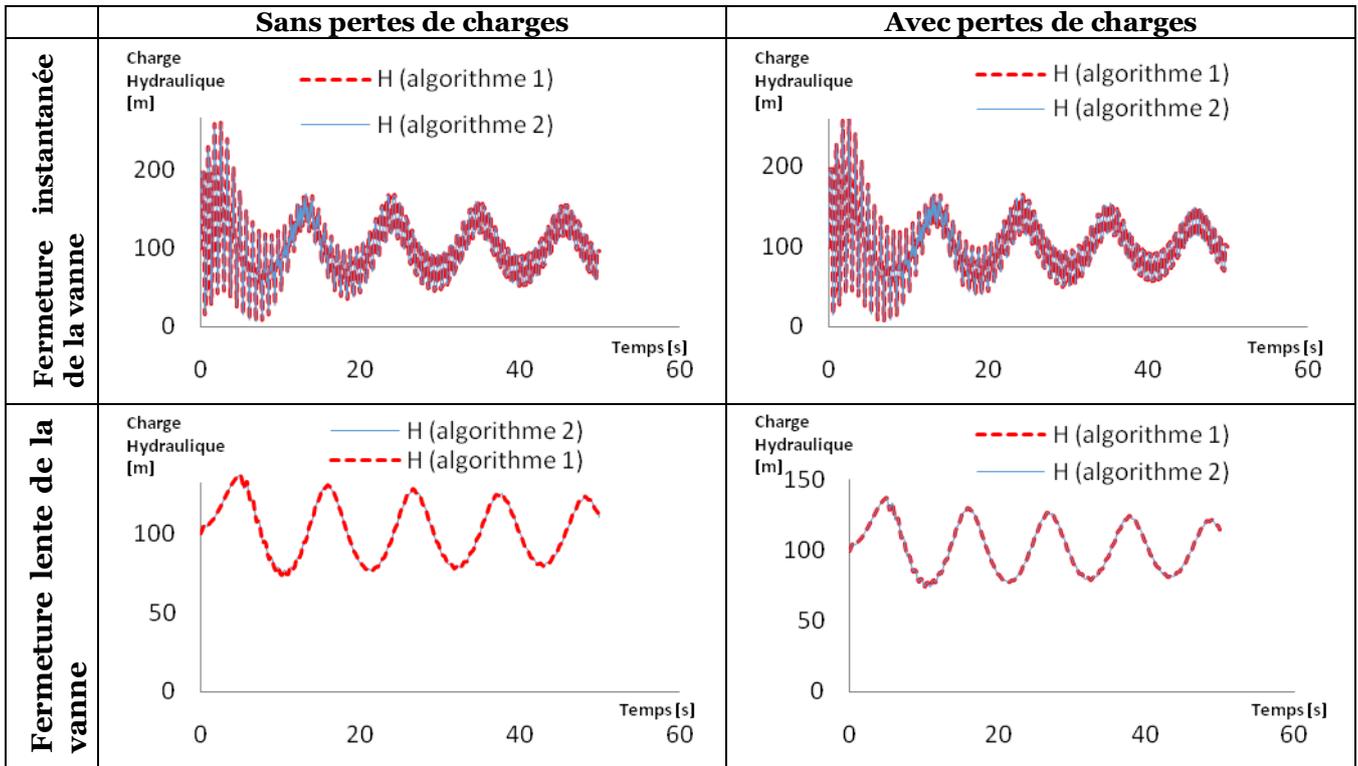


Tableau III-39 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air= 6 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	6.22E-17	3.6E-17	Très bien
	Sans	Lente	1	2.09E-14	5.8E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	4.7E-15	7.6E-15	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	7.4E-14	1.5E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	4.5E-15	6.2E-15	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	0.99	0.0006	0.006	Très bien

Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	4.8E-15	6.8E-15	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	2.5E-14	4.9E-14	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	4.7E-15	6.14E-15	Très bien

III.3.2.3 Variation du volume initial de l'air

Pour cette deuxième configuration, nous allons varier le volume initial d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans

Tableau III-40

Tableau III-40 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir- multi conduites en série –réservoir d'air-vanne) en variant le volume initiale d'air

Paramètres	a_i [m/s]	(D_1, D_2, D_3, D_4) [m]	(L_1, L_2, L_3, L_4) [m]	H_{res} [m]	f [-]	k [-]	Q_0 [m ³ /s]
Valeur	1000	(1, 1, 1,1)	(200, 300, 100,400)	100	0 ou 0.015	0 ou 0.5	0.75
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	V_{oair} [m ³]	D_c [m]	$Corf$ [-] (in/out)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200	4	0.5 1 2 3.5	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. Volume initiale de l'air = 0.5

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-41**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison

Chapitre 3 : Validation et applications

entres les résultats de l'algorithme 1 et le l'algorithme 2), données dans **Tableau III-42** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Tableau III-41 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume initiale de l'air = 0.5 m³)

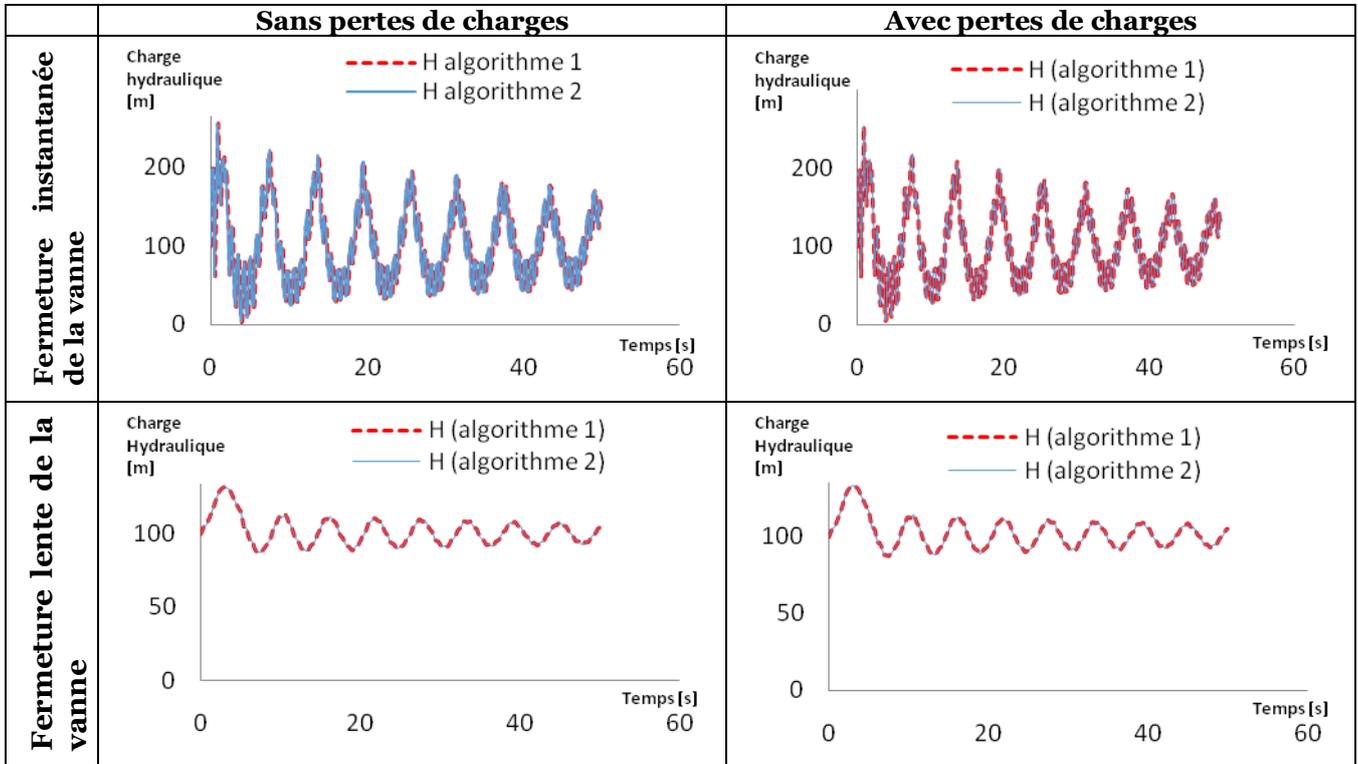


Tableau III-42 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume initiale de l'air = 0.5 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	2.6E-13	2.2E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	1.09E-13	2.3E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	2.6E-14	1.1E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.8E-14	8.9E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	1.01E-13	8.9E-14	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien

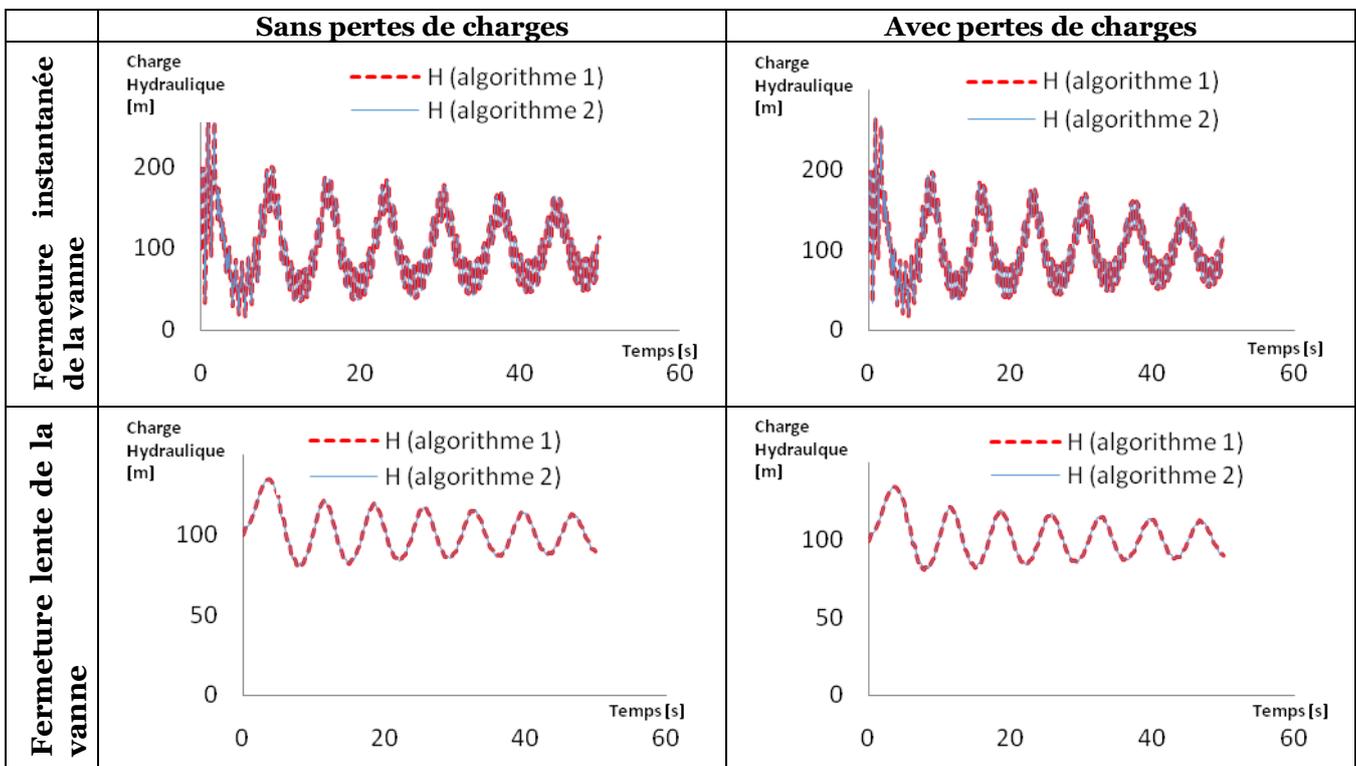
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Lente	1	2.9E-13	4.8E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	3.02E-13	1.8E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	1.02E-13	1.6E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	4.4E-15	1.1E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.005	0.012	Très bien
	Sans	Lente	1	1.13E-13	1.7E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	3.88E-13	8.69E-13	Très bien

b. Volume initiale de l'air $V_{air}=1$

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-43**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 2) données dans **Tableau III-44** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Tableau III-43 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume initiale de l'air = 1 m^3)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-44 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume initiale de l'air = 1m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	1.9E-13	3.25E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	1.3E-13	3.9E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.2E-13	1.29E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	1.9E-13	1.2E-12	Très bien
	Sans	Lente	1	1.8E-13	1.5E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.2E-13	3.8E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	1.3E-13	3.5E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	1.9E-13	4.3E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	8.17E-14	1.07E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	2.3E-13	2.5E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	1.55E-13	3.04E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.2E-13	9.4E-13	Très bien

c. Volume initiale de l'air Voair =2

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-45**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 2) données dans **Tableau III-46** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-45 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume initiale de l'air = 2 m³)

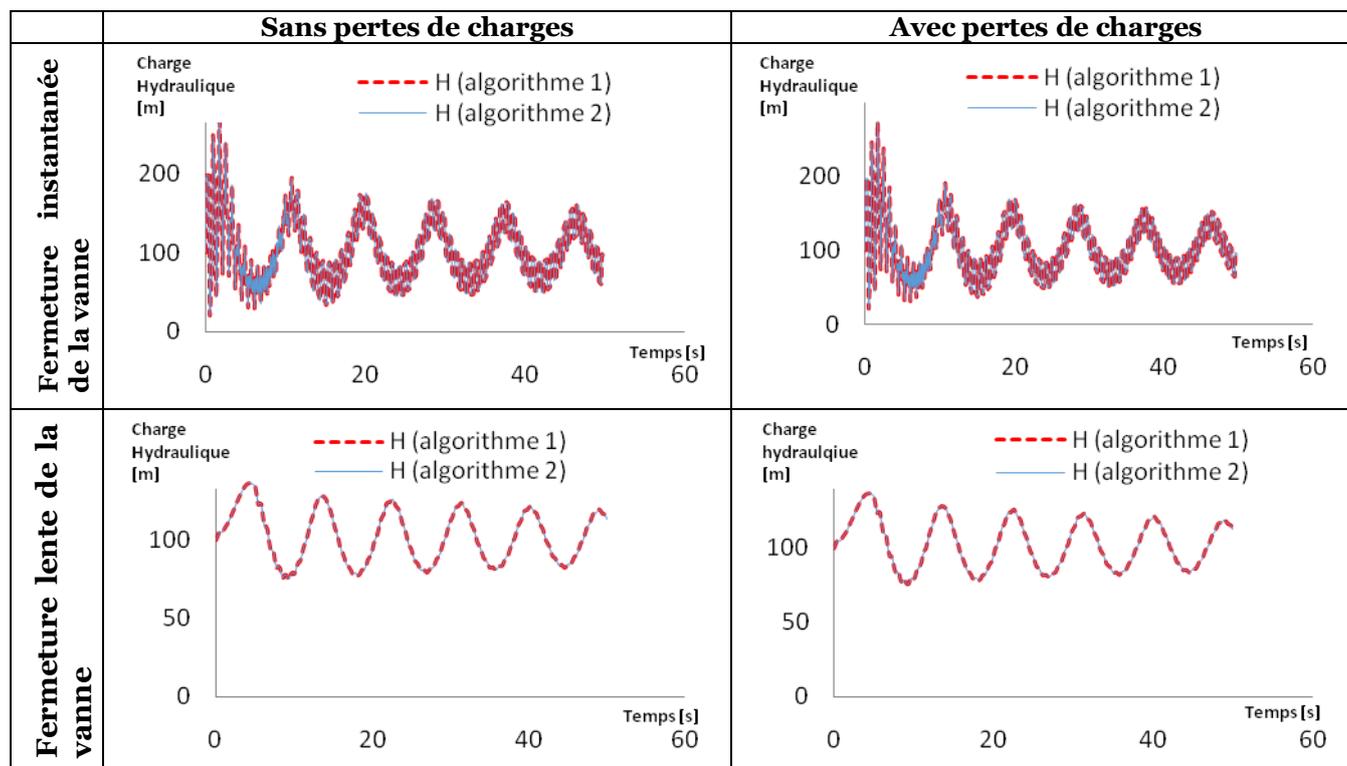


Tableau III-46 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume initiale de l'air = 2 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.58E-14	5.84E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	4.86E-14	1.81E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.58E-14	5.84E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	7.75E-14	2.97E-13	Très bien
En amont du	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien

Chapitre 3 : Validation et applications

réservoir d'air	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.13E-14	4.42E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	7.74E-14	1.08E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.22E-16	1.42E-16	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.72E-14	4.6E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.15E-13	1.28E-12	Très bien

d. Volume initiale de l'air $V_{\text{air}}=3.5$

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 2 sont données dans **Tableau III-47**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 2) données dans **Tableau III-48** confirment que l'algorithme 2 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-47 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en série -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume initiale de l'air = 3.5 m³)

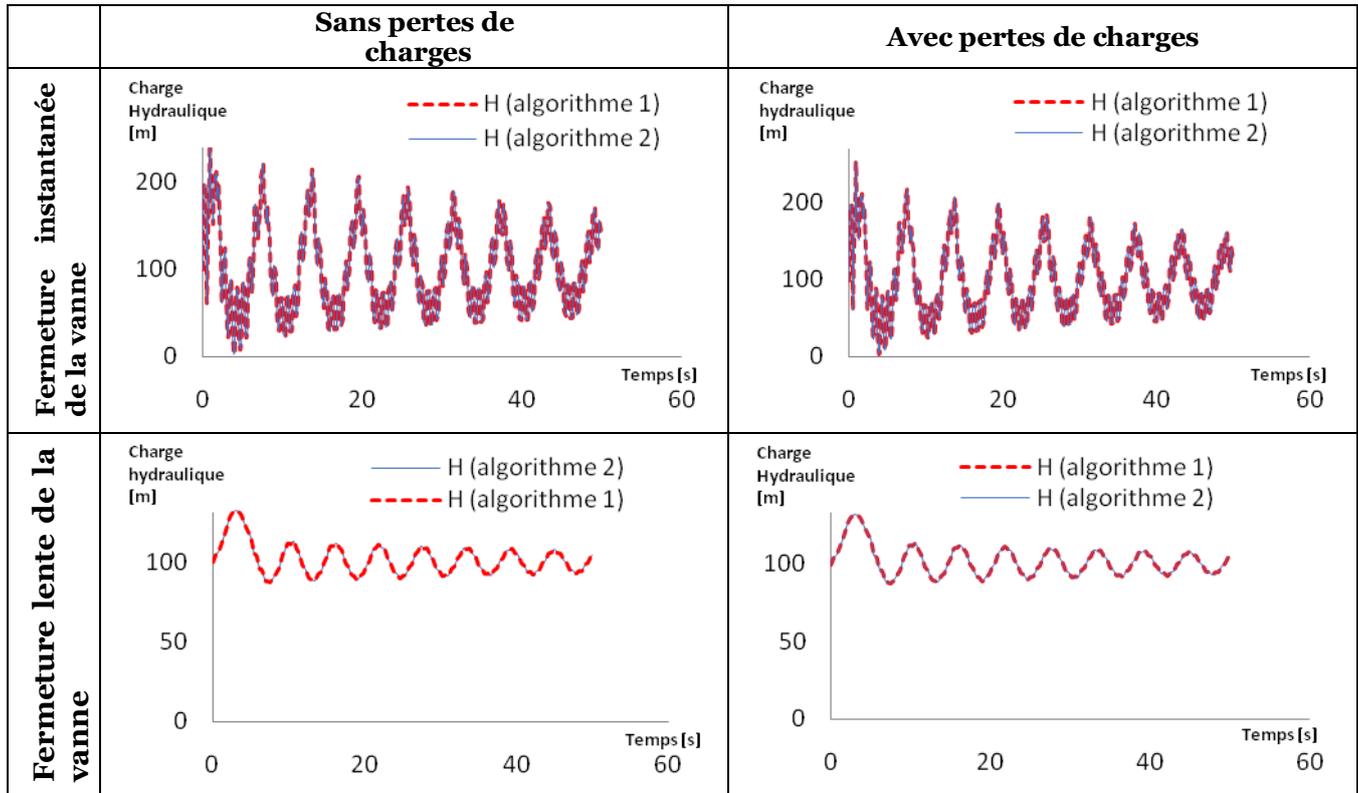


Tableau III-48 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en série -Réservoir d'air-Vanne) (Volume initiale de l'air = 3.5 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	1.08E-14	1.11E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.07E-14	2.19E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.1E-14	2.02E-13	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	3.8E-14	5.89E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	8.9E-15	5.48E-14	Très bien
	Avec	Lente	1	1.25E-13	4.98E-14	Très bien
En amont du	Sans	Instantanée	1	6.28E-14	2.49E-13	Très bien

Chapitre 3 : Validation et applications

réservoir d'air	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	5.46E-15	3.25E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.07E-13	2.83E-13	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.5E-14	9.61E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	4.4E-15	1.83E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.14E-13	1.47E-13	Très bien

III.3.3 Validation de l'algorithme 3 (réservoir- multi conduites en parallèle - réservoir d'air-vanne)

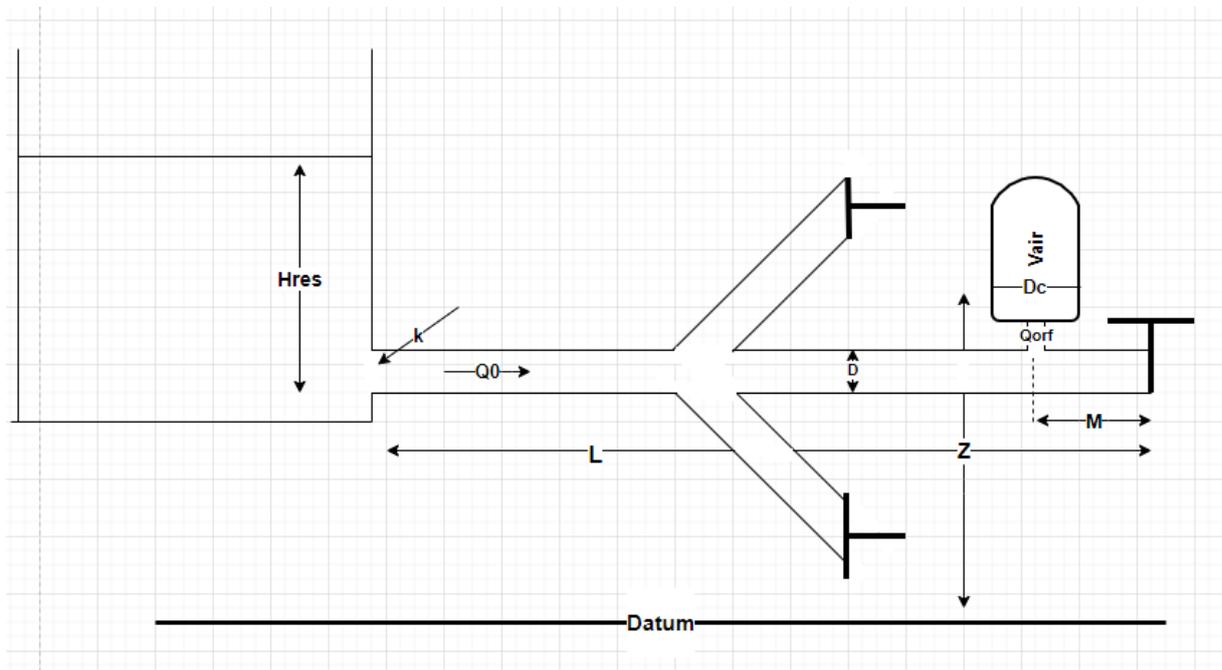


Figure III-9 : Illustration d'une installation Réservoir-Conduite en parallèle – Réservoir d'air-Vanne

La validation de ce troisième algorithme se base sur la comparaison de ses résultats avec les résultats obtenus par le premier algorithme, telle que deux conduites étaient branchées en parallèles à la conduite principale. Le diamètre de la première conduite égal au diamètre de la conduite principale et le diamètre de la deuxième conduite égal à zéro. Ce qui est l'équivalent de la première configuration. La validation est réalisée comme une étude paramétrique ; en variant les paramètres suivant un à la fois (la position, le volume total et le volume d'air initial du réservoir d'air) et en fixant les autres. En plus de ces paramètres, pour chaque configuration

Chapitre 3 : Validation et applications

plusieurs conditions (en terme du mode de fermeture de la vanne et aux pertes de charge dues au frottement) ont été analysées :

(a) Fermeture instantanée de la vanne :

- Avec pertes de charge (frottement) ;
- Sans perte de charge ;

(b) Fermeture lente de la vanne $t > (2L/a)$:

- Avec pertes de charge (frottement) ;
- Sans perte de charge.

La comparaison des résultats est faite au niveau de quatre nœuds différents : (1) a la vanne, (2) au réservoir d'air, (3) un nœud en amont du réservoir d'air et (4) un nœud en aval de ce dernier.

III.3.3.1 Variation de la position du réservoir d'air

Pour cette troisième configuration, nous allons varier la position du réservoir d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans **Tableau III-49**.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-49 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (réservoir- multi conduites en parallèle –réservoir d'air-vanne) en variant la position du réservoir d'air

Paramètres	a_i [m/s]	(D_1, D_2, D_3) [m]	(L_1, L_2, L_3) [m]	H_{res} [m]	f [-]	k [-]	Q_0 [m ³ /s]
Valeur	1000	(1, 1, 0)	(400, 600, 600)	100	0 ou 0.015	0 ou 0.5	0.75
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	V_{air} [m ³]	D_c [m]	$Corf$ [-] (in/out)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200 500 200(2 ^{eme} conduite)	4	0.5	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. Position du réservoir d'air M=200

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-50**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 3) données dans **Tableau III-51** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-50 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M = 200 m)

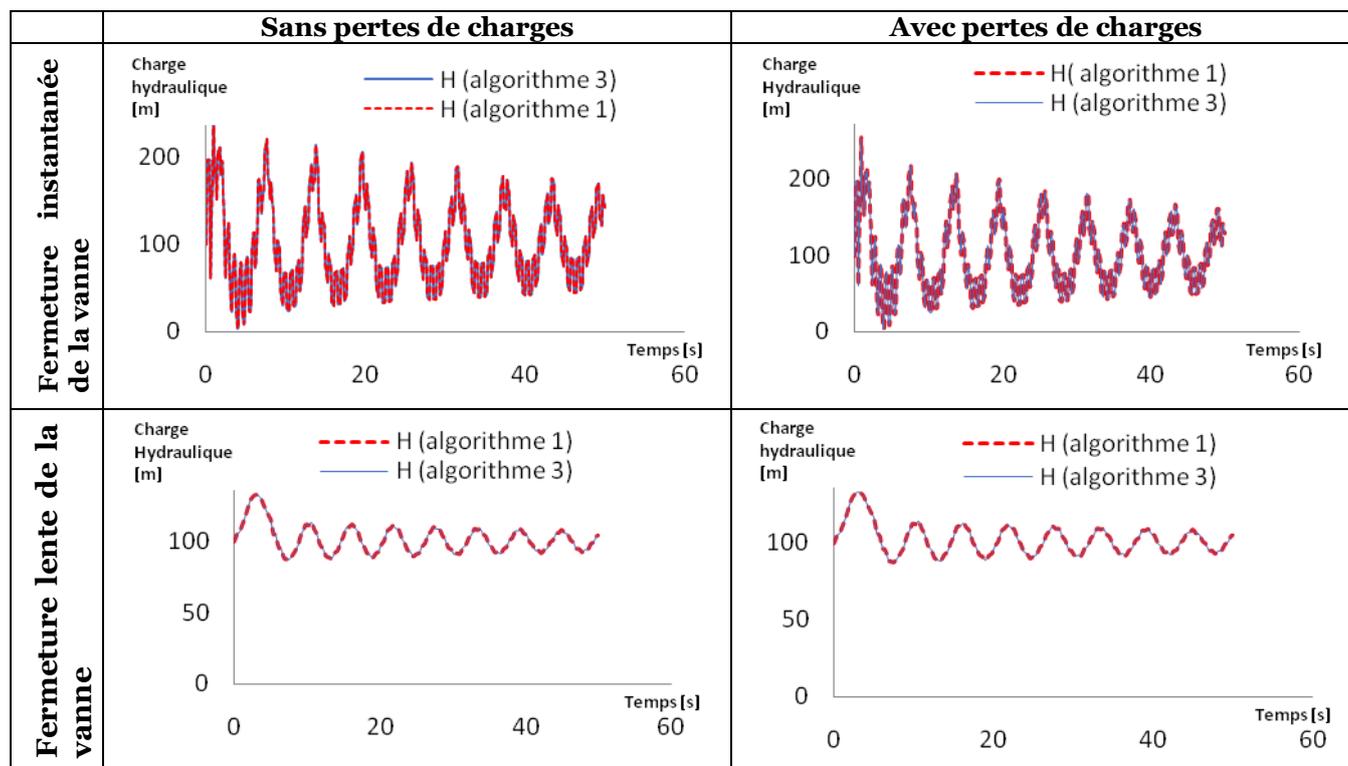


Tableau III-51 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (M=200)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	4.4E-14	5.4E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	1.30E-13	3.4E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.7E-13	1.5E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	3.4E-14	2.6E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	1.05E-13	1.6E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.34E-13	5.83E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	3.03E-13	1.84E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	8.04E-14	2.28E-13	Très bien

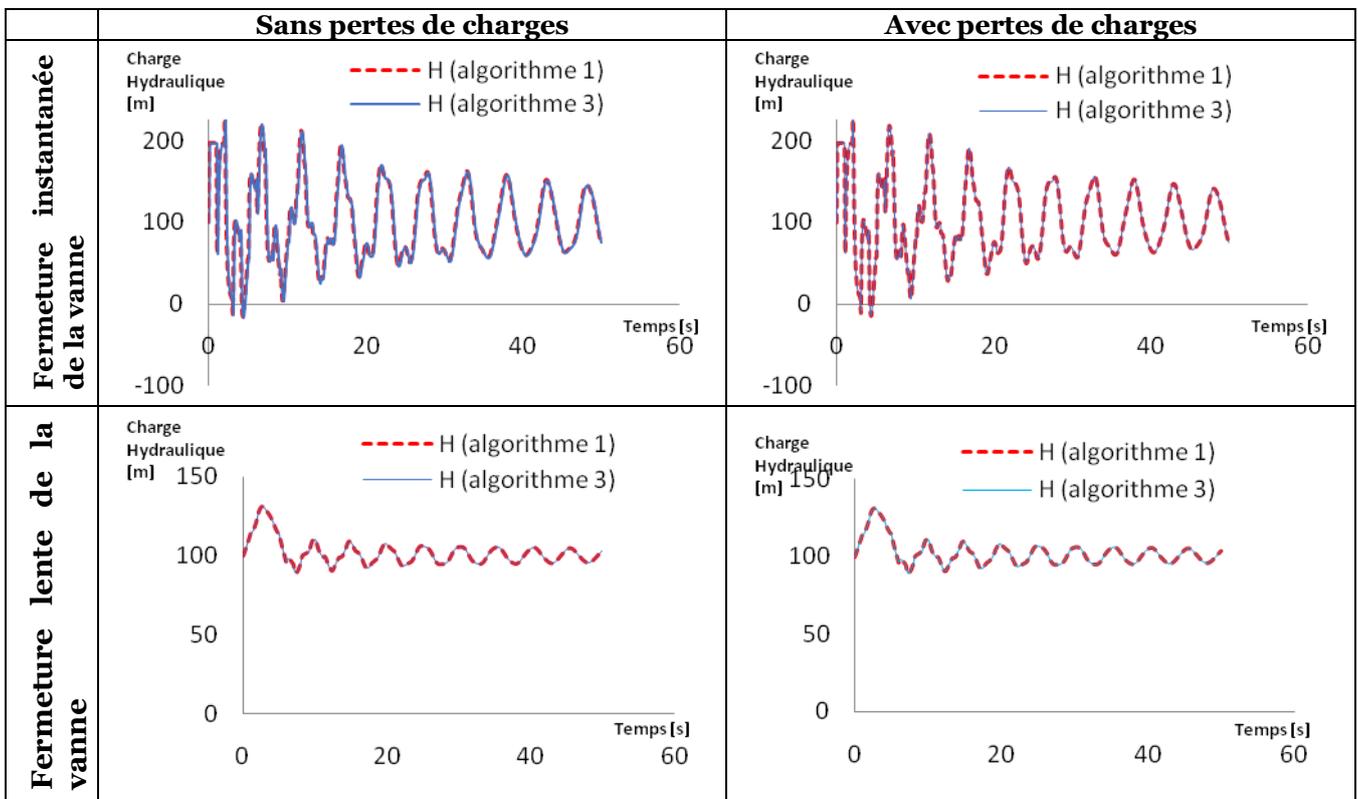
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.4E-13	1.13E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	0.99	0.005	0.01	Très bien
	Sans	Lente	1	1.23E-13	2.7E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.7E-13	1.1E-12	Très bien

b. Position du réservoir d'air M=500

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-52**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et le l'algorithme 3) données dans **Tableau III-53** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Tableau III-52 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M = 500 m)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-53 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (M=500)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	2.8E-13	5.8E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	2.02E-13	2.02E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.00E-13	1.8E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	5.05E-13	2.18E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	1.8E-14	9.8E-14	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	2.8E-14	1.00E-12	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	4.8E-13	3.5E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	4.7E-13	2.2E-12	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	4.4E-14	2.01E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	5.15E-13	2.5E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	3.3E-14	1.9E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	4.4E-14	1.78E-12	Très bien

c. Position du réservoir d'air M=200 /conduite principale

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-54**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 3) données dans **Tableau III-55** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-54 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (M = 200 m/conduite principale)

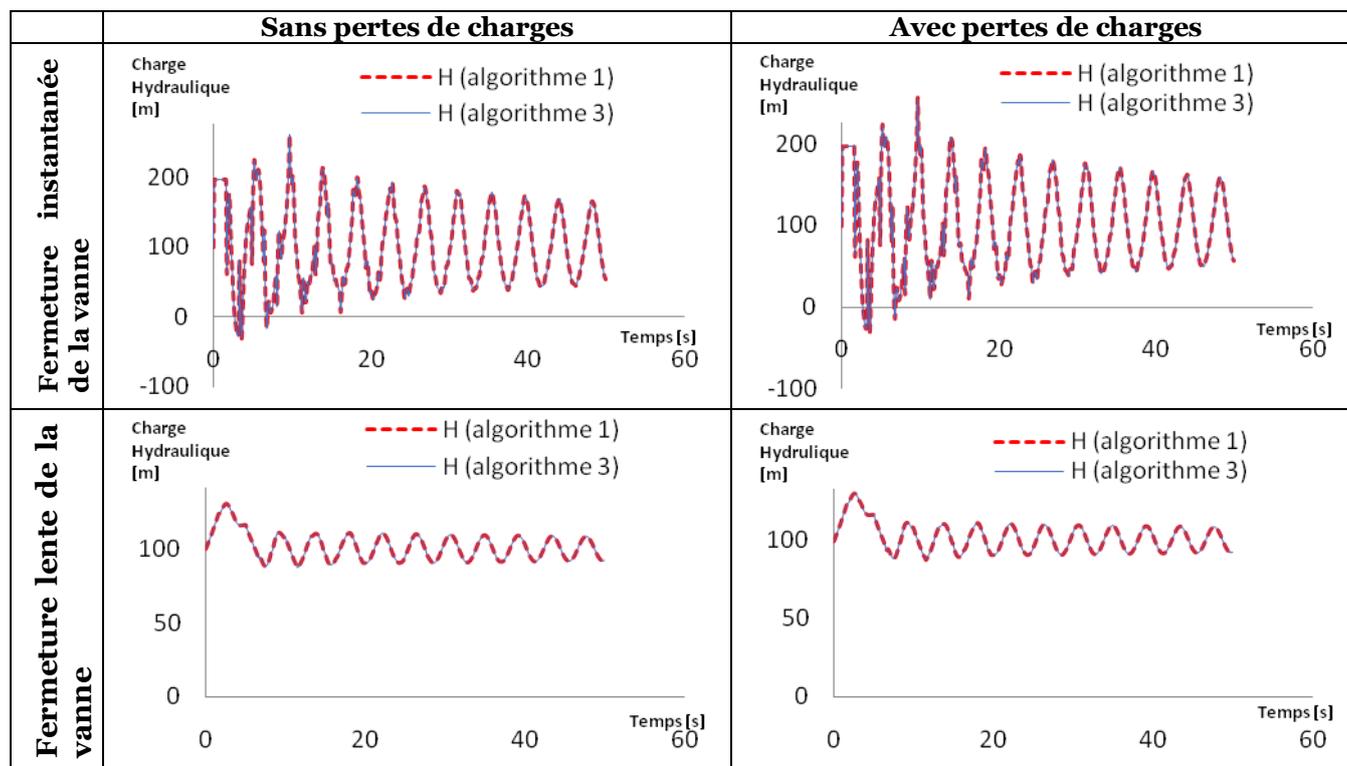


Tableau III-55 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (M=200/conduite principale)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	4.2E-17	5.5E-17	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	3.3E-14	2.4E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	7.41E-14	1.15E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.46E-15	2.12E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	3.04E-14	1.49E-12	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien

Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Instantanée	1	3.34E-14	9.2E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	4.6E-14	7.5E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	8.9E-15	3.07E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	3.2E-14	1.8E-12	Très bien

III.3.3.2 Variation du volume du réservoir d'air

Pour cette troisième configuration, nous allons varier le volume du réservoir d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans Tableau III-56.

Tableau III-56 : Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) en variant le volume du réservoir d'air

Paramètres	a_i [m/s]	(D_1, D_2, D_3) [m]	(L_1, L_2, L_3) [m]	H_{res} [m]	f [-]	k [-]	Q_0 [m ³ /s]
Valeur	1000	(1, 1, 0)	(400, 600, 600)	100	0 ou 0.015	0 ou 0.5	0.75
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	H_{air} [m]	D_c [m]	$Corf$ [-] (in/out)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200	3 4 6	96	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. Volume du réservoir d'air $V_{airch}=3$

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-57**. Les indicateurs de performance

Chapitre 3 : Validation et applications

(issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et le l'algorithme 3) données dans **Tableau III-58** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Tableau III-57 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 3 m³)

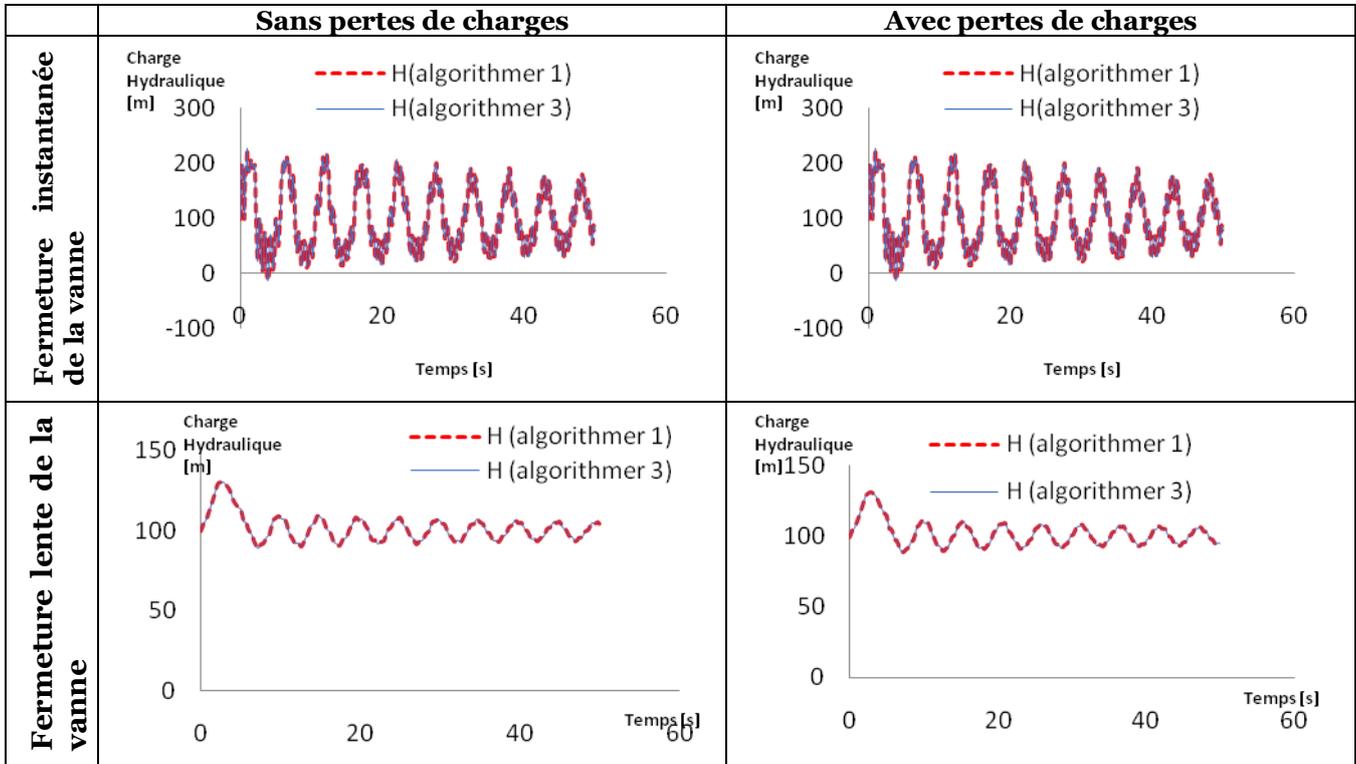


Tableau III-58 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 3 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	1,17E-13	8.83E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	2.2E-14	1.46E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	2.6E-13	1.2E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	1.04E-13	5.08E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	3.8E-15	7.3E-14	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien

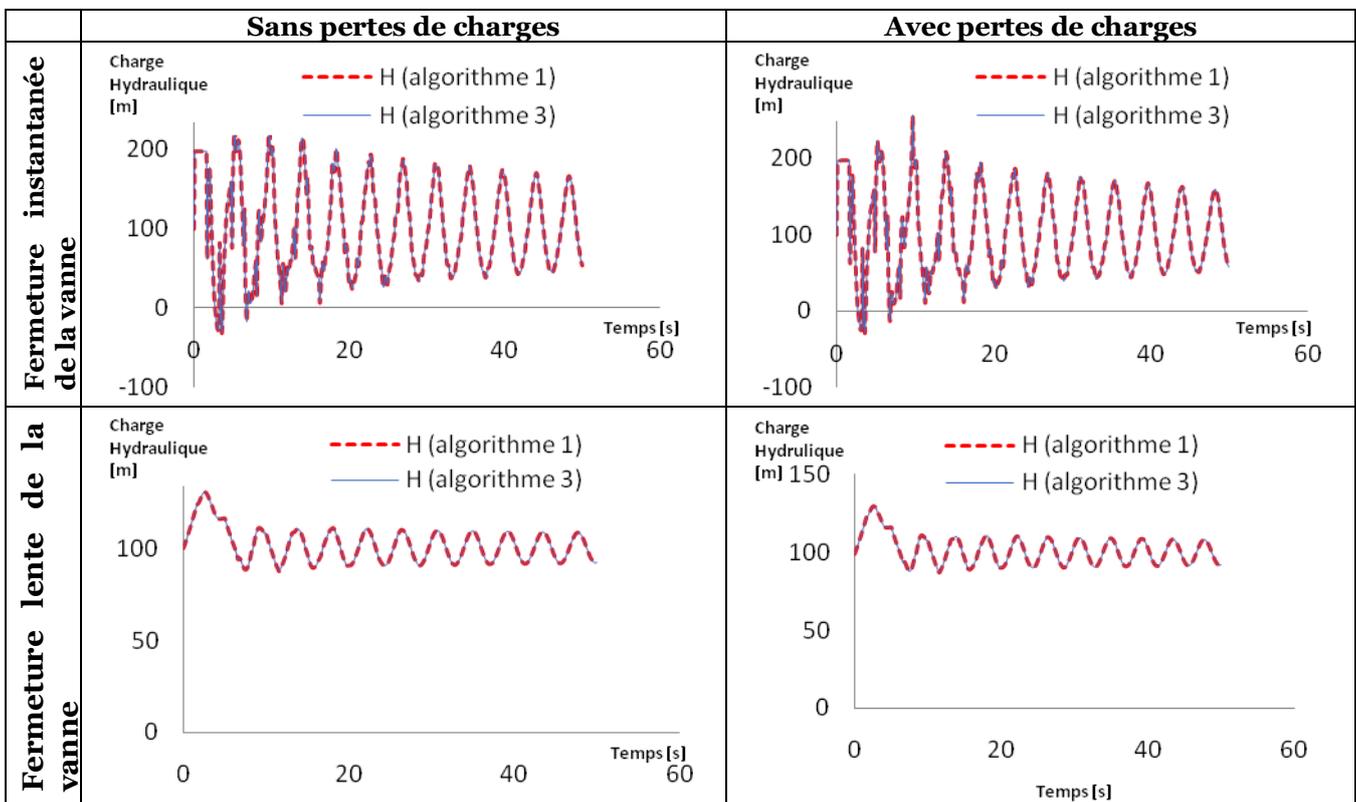
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Lente	1	3.11E-13	5.8E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	9.9E-14	6.4E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	1.9E-14	1.2E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	3.25E-13	1.13E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	1.00E-13	6.7E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	1.19E-13	1.11E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	2.9E-13	8.8E-13	Très bien

b. Volume du réservoir d'air $V_{air} = 4$

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-59**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 3) données dans **Tableau III-60** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Tableau III-59 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 4 m^3)



Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-60 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 4 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.43E-13	4.64E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	8.15E-15	1.35E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.2E-13	1.46E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	4.69E-14	3.46E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1E-13	4.8E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	8.02E-14	1.3E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.09E-13	3.58E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	9.29E-15	9.65E-13	Très bien

c. Volume du réservoir d'air $V_{airch}=6$

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-61**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 3) données dans **Tableau III-62** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Chapitre 3 : Validation et applications

Tableau III-61 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume du réservoir d'air = 6 m³)

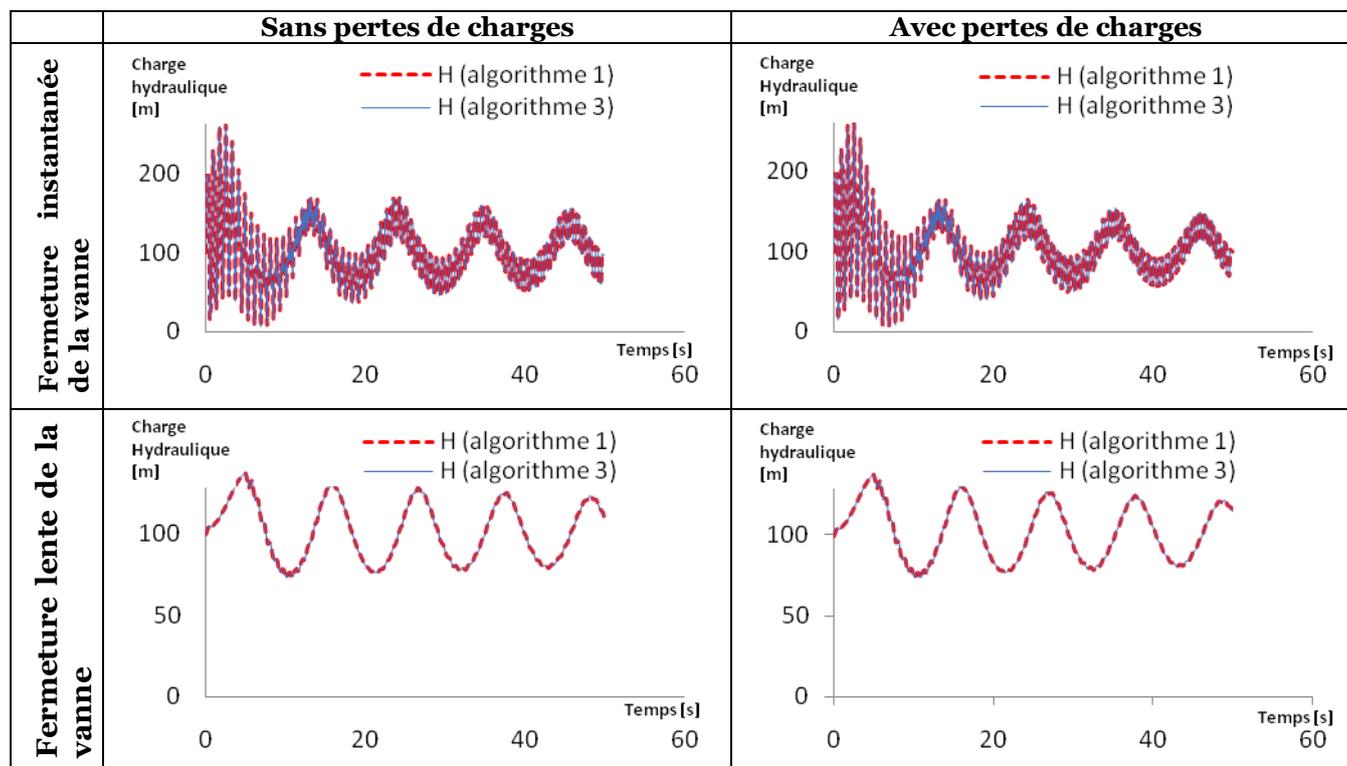


Tableau III-62 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume du réservoir d'air = 6 m³).

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	3.33E-13	5.02E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	5.07E-15	6.64E-15	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	4.66E-15	1.65E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	4.67E-15	5.11E-15	Très bien
En amont du	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien

Chapitre 3 : Validation et applications

réservoir d'air	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.32E-14	3.86E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	4.74E-15	5.82E-15	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.26E-14	4.21E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	4.91E-15	5.02E-15	Très bien

III.3.3.3 Variation du volume initiale du réservoir d'air

Pour cette troisième configuration, nous allons varier le volume initial d'air (en fixant tout autre variable) pour différentes conditions de fermeture de vanne et de frottement dans la conduite. Les paramètres de ces simulations sont donnés dans

Tableau **III-63**.

Tableau III-63: Paramètres de simulation utilisés pour la validation de l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) en variant le volume d'air initiale

Paramètres	a_i [m/s]	(D_1, D_2, D_3) [m]	(L_1, L_2, L_3) [m]	H_{res} [m]	f [-]	k [-]	Q_0 [m ³ /s]
Valeur	1000	(1, 1, 0)	(400, 600, 600)	100	0 ou 0.015	0 ou 0.5	0.75
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	V_{air} [m ³]	D_c [m]	$Corf$ [-] (in/out)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200	4	0.5 1 2 3.5	0.5	0.5/0.3	0 ou 5	50

a. Volume initiale de l'air $V_{air}=0.5$

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et

Chapitre 3 : Validation et applications

l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-64**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et le l'algorithme 3), données dans **Tableau III-65** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Tableau III-64 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial= 0.5 m³).

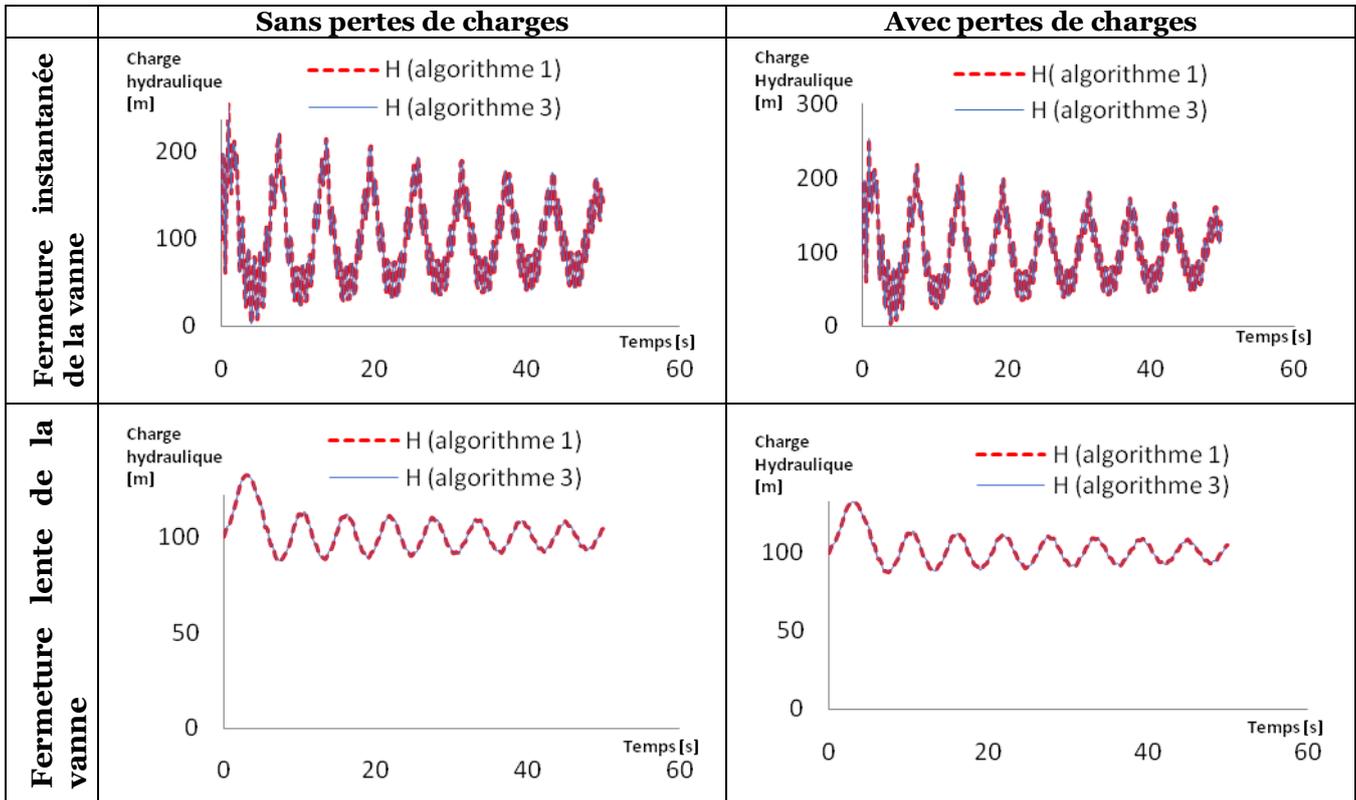


Tableau III-65 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial= 0.5 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	4.46E-14	5.48E-14	Très bien
	Sans	Lente	1	1.3E-13	3.46E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.74E-13	1.5E-12	Très bien
Au réservoir	Sans	Instantanée	1	3.4E-14	2.66E-14	Très bien

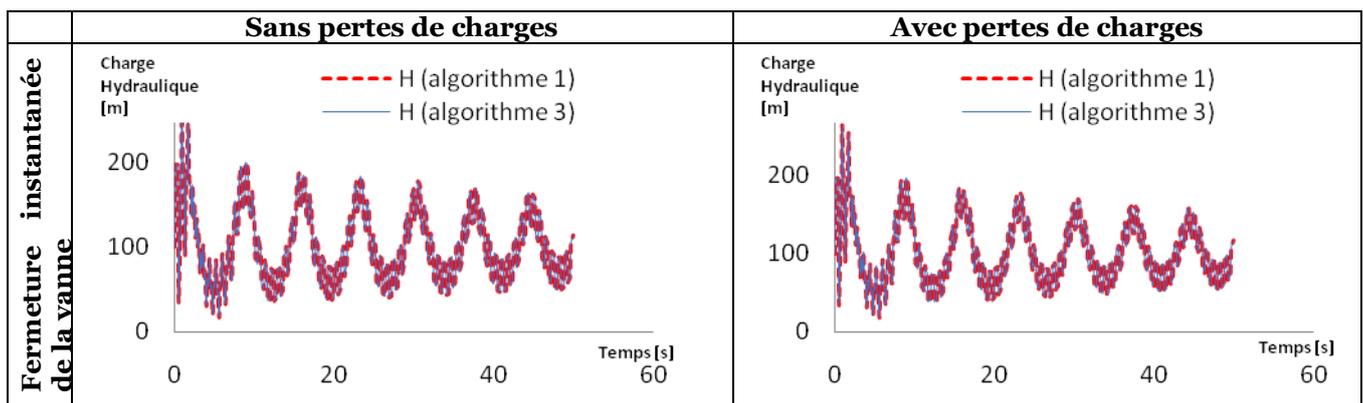
Chapitre 3 : Validation et applications

d'air	Sans	Lente	1	1.05E-13	1.68E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.34E-13	5.83E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	3.02E-13	1.84E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	8.04E-14	2.48E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.48E-13	1.13E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0.005	0.012	Très bien
	Sans	Lente	1	1.2E-13	2.72E-13	Très bien
	Avec	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Avec	Lente	1	1.7E-13	1.11E-12	Très bien

b. Volume initiale de l'air $V_{air}=1$

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-66**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 3) données dans **Tableau III-67** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Tableau III-66 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial= 1 m^3)



Chapitre 3 : Validation et applications

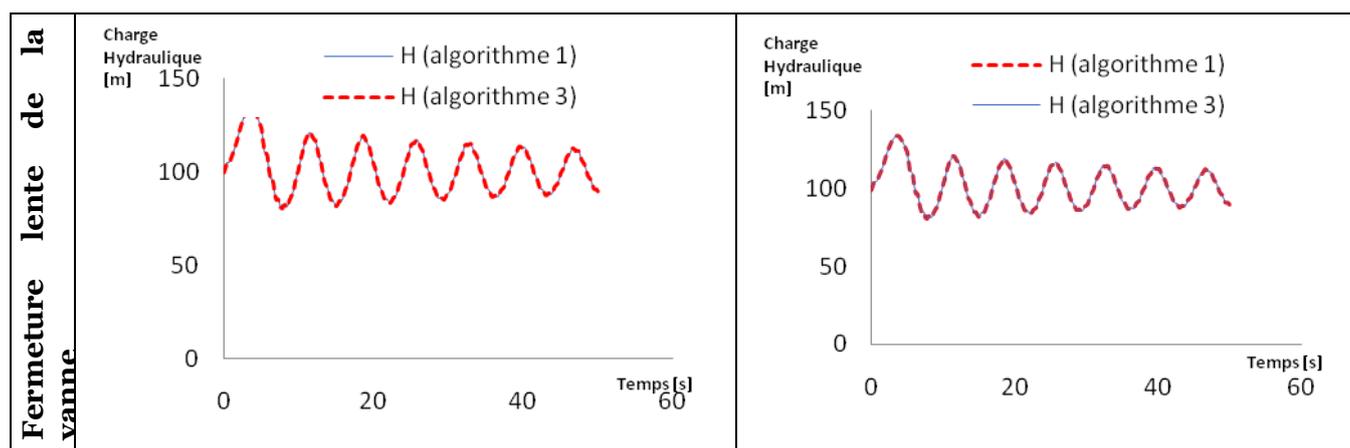


Tableau III-67 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial= 1 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	7.16E-14	3.8E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	5.4E-15	1.7E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	5.7E-14	1.3E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	8.09E-15	3.6E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.7E-14	3.9E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.98E-14	9.7E-13	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.07E-13	2.9E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	7.5E-13	8.3E-13	Très bien

Chapitre 3 : Validation et applications

c. Volume initiale de l'air Voair=2

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-68**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 3) données dans **Tableau III-69** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Tableau III-68 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial= 2 m³)

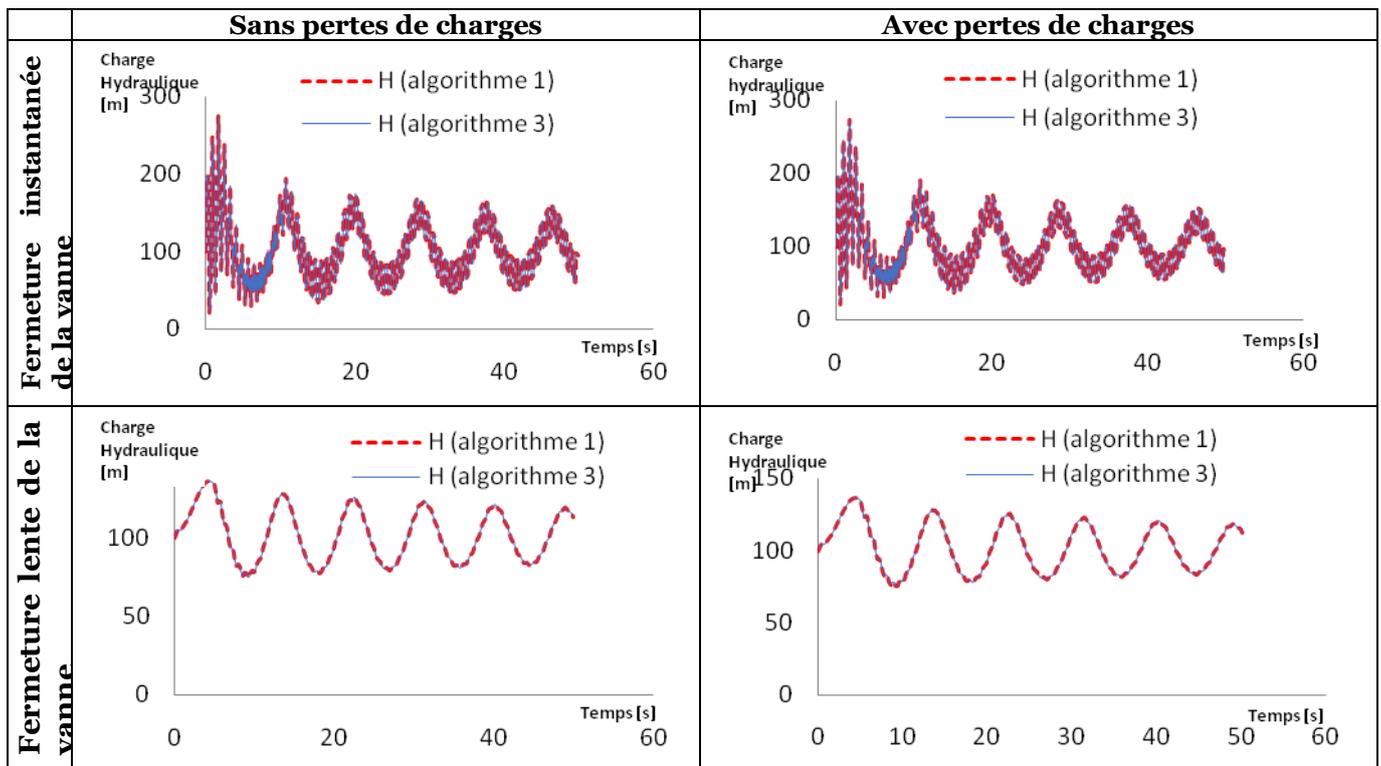


Tableau III-69 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial= 2 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.5E-13	5.2E-13	Très bien

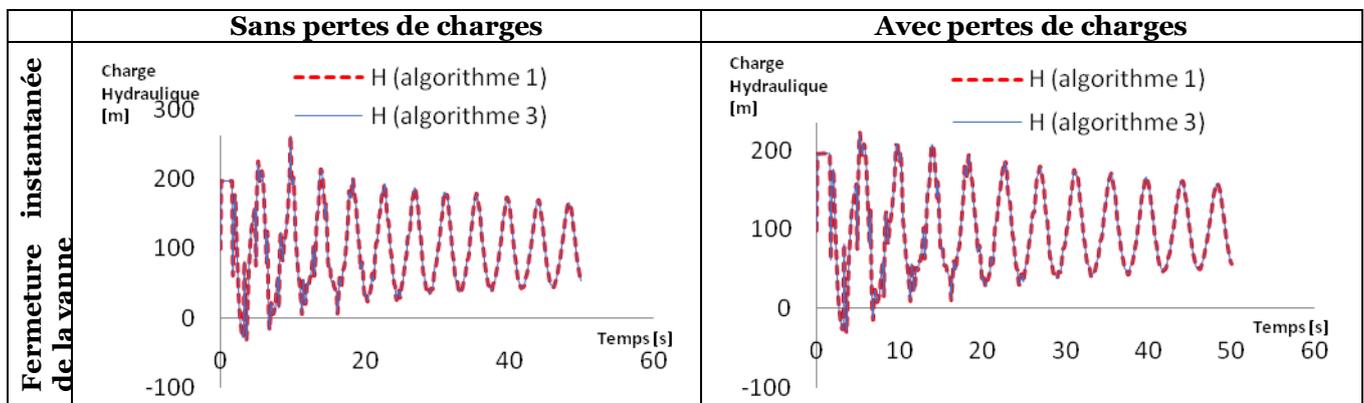
Chapitre 3 : Validation et applications

	Avec	Lente	1	4.6E-14	1.8E-12	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.4E-13	1.2E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	7.7E-14	2.9E-13	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.08E-13	4.23E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	7.83E-14	1.07E-12	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	2.21E-16	1.41E-13	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	2.5E-13	4.41E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.15E-13	1.28E-12	Très bien

d. Volume initiale de l'air $V_{air}=3.5$

Les variations de la charge hydraulique au niveau de la vanne, pour la présente configuration sous les conditions considérées, calculées par l'Algorithme 1 et l'Algorithme 3 sont données dans **Tableau III-70**. Les indicateurs de performance (issus de la comparaison entre les résultats de l'algorithme 1 et l'algorithme 3) données dans **Tableau III-71** confirment que l'algorithme 3 fonctionne correctement.

Tableau III-70 : Comparaison entre les résultats de l'algorithme (Réservoir- conduites - réservoir d'air-vanne) et l'algorithme (Réservoir- multi conduites en parallèle -réservoir d'air-vanne) au niveau de la vanne (Volume d'air initial= 3.5 m^3)



Chapitre 3 : Validation et applications

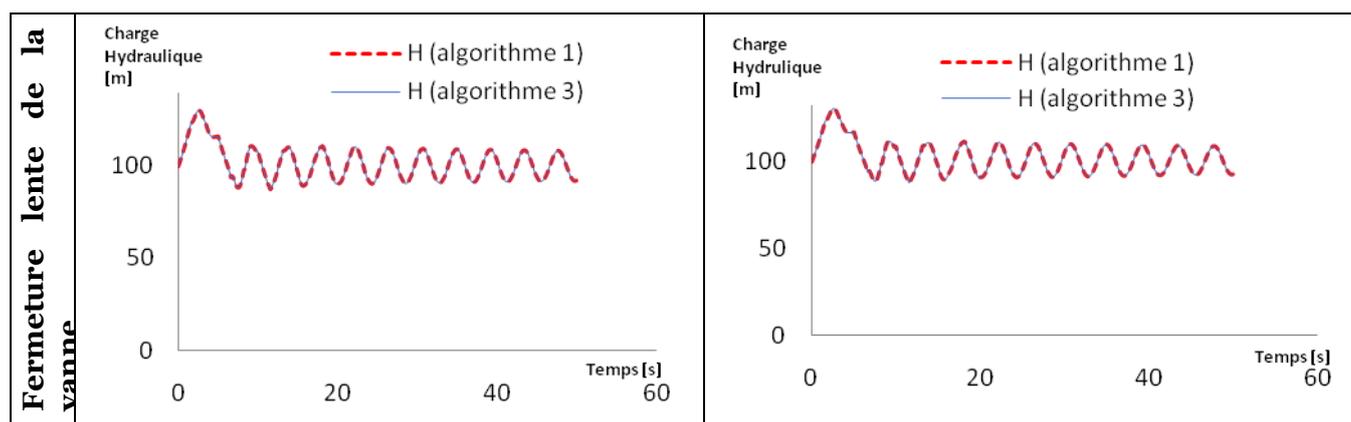


Tableau III-71 : Paramètres statistiques calculés pour la validation de l'algorithme (Réservoir-multi Conduite en parallèle -Réservoir d'air-Vanne) (Volume d'air initial= 3.5 m³)

Position de nœud	Condition		Indicateur de Performance			Niveau de performance
	Perte de charge	Type de fermeture	NSE	PBIAS	RSR	
A la vanne	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.34E-13	2.16E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	1.07E-13	2.02E-13	Très bien
Au réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.33E-13	4.68E-14	Très bien
	Avec	Lente	1	4.53E-14	7.38E-14	Très bien
En amont du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.41E-13	3.54E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	5.9E-14	5.84E-13	Très bien
A l'aval du réservoir d'air	Sans	Instantanée	1	0	0	Très bien
	Sans	Lente	1	0	0	Très bien
	Avec	Instantanée	1	1.46E-13	1.81E-13	Très bien
	Avec	Lente	1	4.00E-14	2.21E-13	Très bien

III.4 Applications

Les résultats de l'étude paramétrique menée en vue de valider les nouveaux algorithmes développés sont exploités dans cette section ; en analysant le mode d'influence de variables liées à la configuration et position du réservoir d'air sur la réponse du système hydraulique réservoir-conduite-vanne avec un réservoir d'air comme organe de protection.

III.4.1 Influence de la position du réservoir d'air

Pour voir l'influence de la position du réservoir d'air sur la réponse du système hydraulique étudié, nous allons faire la position (décrite par M) en fixant les autres paramètres. Cette étude est menée en utilisant l'algorithme 1 avec les paramètres donnés dans **Tableau III-72**. Les résultats de simulations sont présentés ci-dessous.

Tableau III-72 : Paramètres utilisés pour la simulation d'effet de la variation la position du réservoir d'air

Paramètres	D [m]	L [m]	H_{res} [m]	Q_0 [m ³ /s]	a [m/s]	f [-]	k [-]
Valeur	1	1000	100	0.75	1000	0.015	0.5
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	V_{oair} [m ³]	D_c [m]	$Corf$ [-] (inflow/ outflow)	t_f [s]	T [s]
Valeur	100 800 900	4	0.5	0.5	0.5/0.3	0	40

Chapitre 3 : Validation et applications

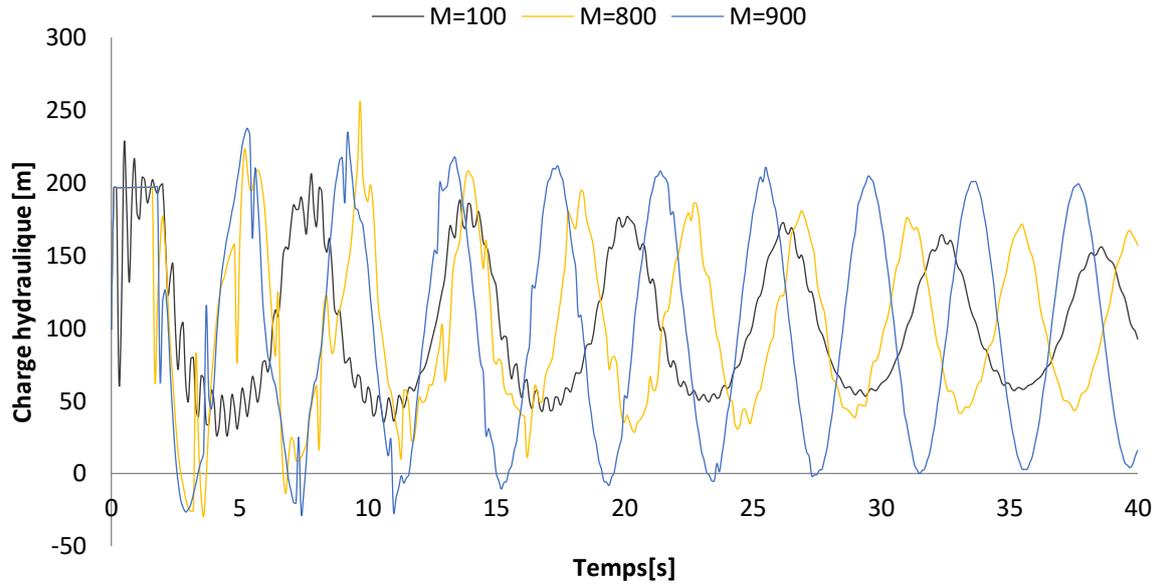


Figure III-10 : Charge hydraulique à la vanne en fonction du temps pour différente position du réservoir d'air

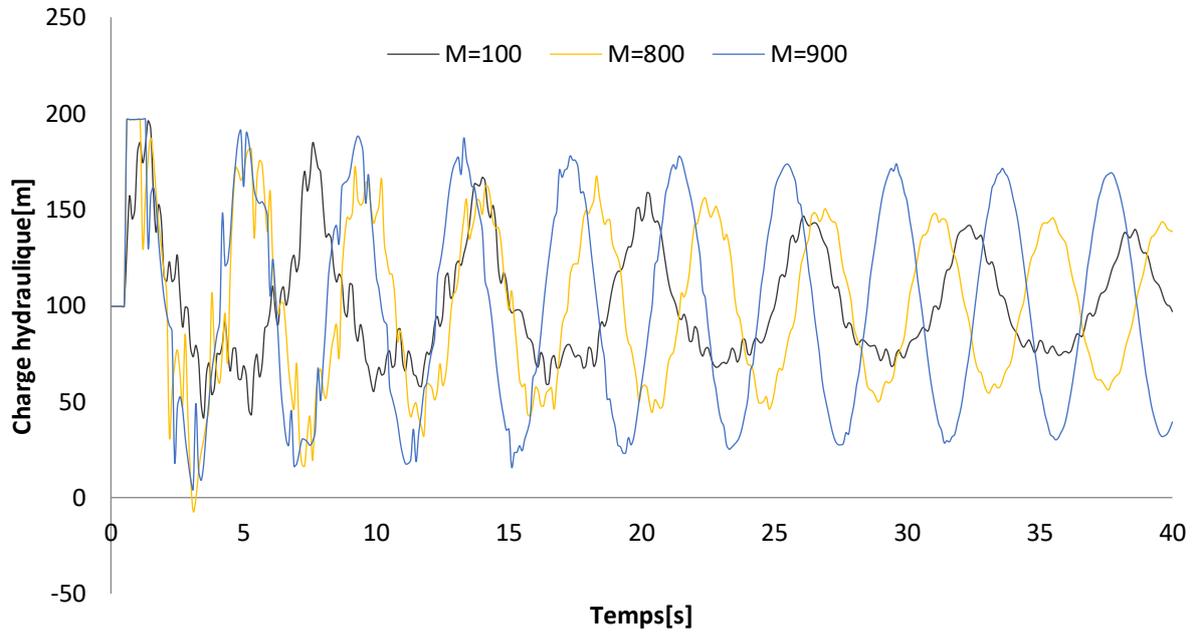


Figure III-11 : Charge hydraulique au milieu de la conduite en fonction du temps pour différente position du réservoir d'air

Chapitre 3 : Validation et applications

La Figure III-10 et Figure III-11 indiquent que la magnitude de la charge hydraulique $H(t)$ est directement proportionnelle à l'augmentation de la distance entre le réservoir d'air et la vanne.

D'autre part, on peut voir que l'amortissement de l'onde de pression causée par le coup de bélier devient plus efficace si la distance entre le réservoir et la vanne est petite. Donc on peut dire que la meilleure position du réservoir d'air pour éviter la surpression ou la dépression causée par le coup de bélier est la plus proche de la vanne.

III.4.2 Influence du volume total du réservoir d'air

Pour voir l'influence du volume total du réservoir d'air sur la réponse du système hydraulique étudié, nous allons faire le volume total du réservoir d'air (décrite par V_{airch}) en fixant les autres paramètres. Cette étude est menée en utilisant l'algorithme 1 avec les paramètres donnés dans **Tableau III-73**. Les résultats de simulations sont présentés ci-dessous.

Tableau III-73 : Paramètres utilisés pour la simulation de la variation du volume du réservoir d'air

Paramètres	D [m]	L [m]	H_{res} [m]	Q_0 [m ³ /s]	a [m/s]	f [-]	k [-]
Valeur	1	1000	100	0.75	1000	0.015	0.5
Paramètres	M [m]	V_{airch} [m ³]	H_{oair} [m]	D_c [m]	$Corf$ [-] (inflow/ outflow)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200	3 4 6	96	0.5	0.5/0.3	0	40

Chapitre 3 : Validation et applications

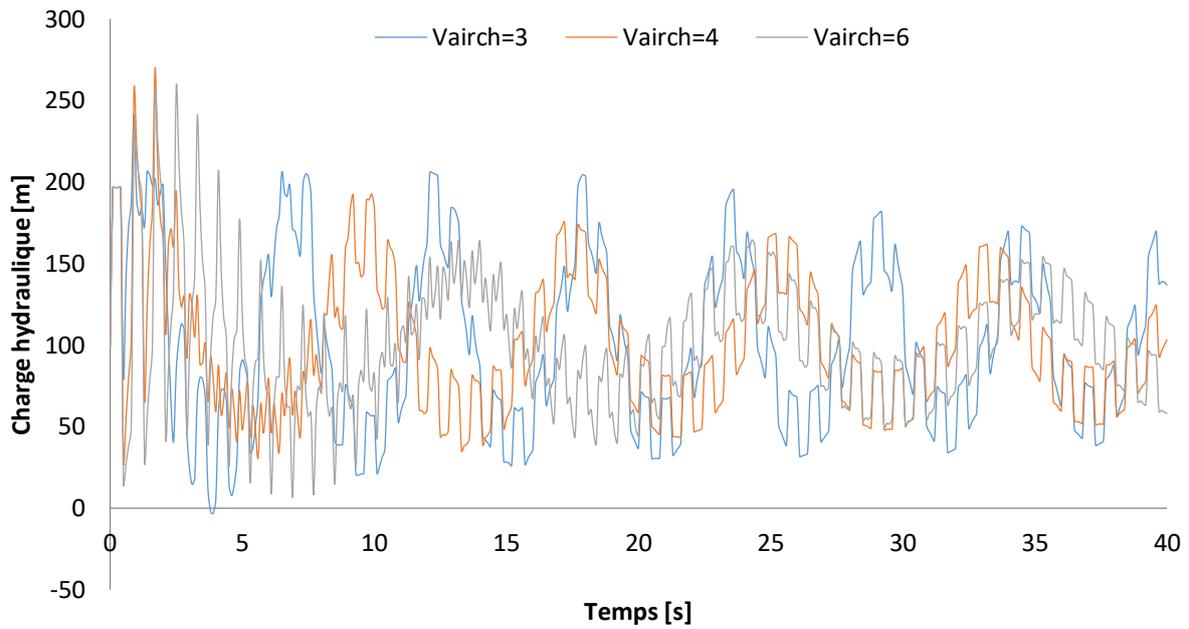


Figure III-12 : Charge hydraulique à la vanne en fonction du temps pour différent volume du réservoir d'air

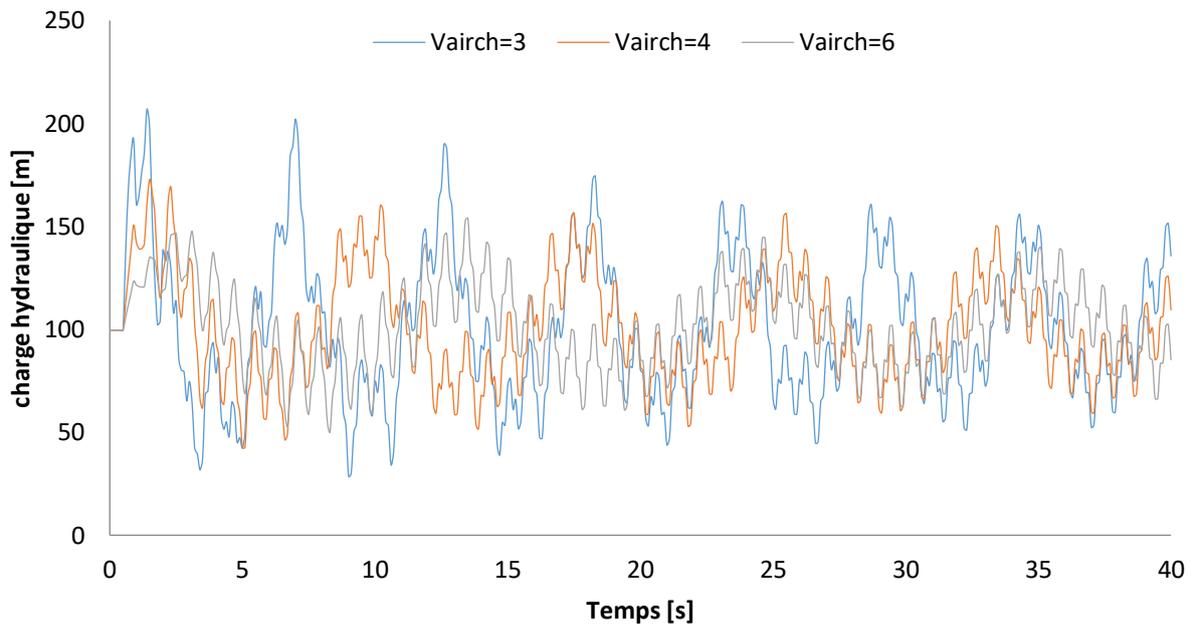


Figure III-13 : Charge hydraulique au milieu de la conduite en fonction du temps pour différent volume du réservoir d'air

Chapitre 3 : Validation et applications

La Figure III-12 et Figure III-13 indiquent que la magnitude de la charge hydraulique $H(t)$ est inversement proportionnelle à l'augmentation de volume du réservoir d'air.

D'autre part, il est facile d'observer que la variation du volume total du réservoir d'air 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 produit plus rapidement à mesure que le volume du réservoir d'air augmente.

III.4.3 Influence du volume d'air initiale

Pour voir l'influence du volume d'air initiale sur la réponse du système hydraulique étudié, nous allons faire le volume d'air initiale (décrite par V_{oair}) en fixant les autres paramètres. Cette étude est menée en utilisant l'algorithme 1 avec les paramètres donnés dans **Tableau III-74**. Les résultats de simulations sont présentés ci-dessous.

Tableau III-74 : Paramètres utilisés pour la simulation de la variation du volume d'air initiale

Paramètres	D [m]	L [m]	$Hres$ [m]	Q_0 [m ³ /s]	a [m/s]	f [-]	k [-]
Valeur	1	1000	100	0.75	1000	0.015	0.5
Paramètres	M [m]	$Vairch$ [m ³]	V_{oair} [m ³]	D_c [m]	$Corf$ [-] (inflow/ outflow)	t_f [s]	T [s]
Valeur	200	4	0.5 1 2 3.5	0.5	0.5/0.3	0	40

Chapitre 3 : Validation et applications

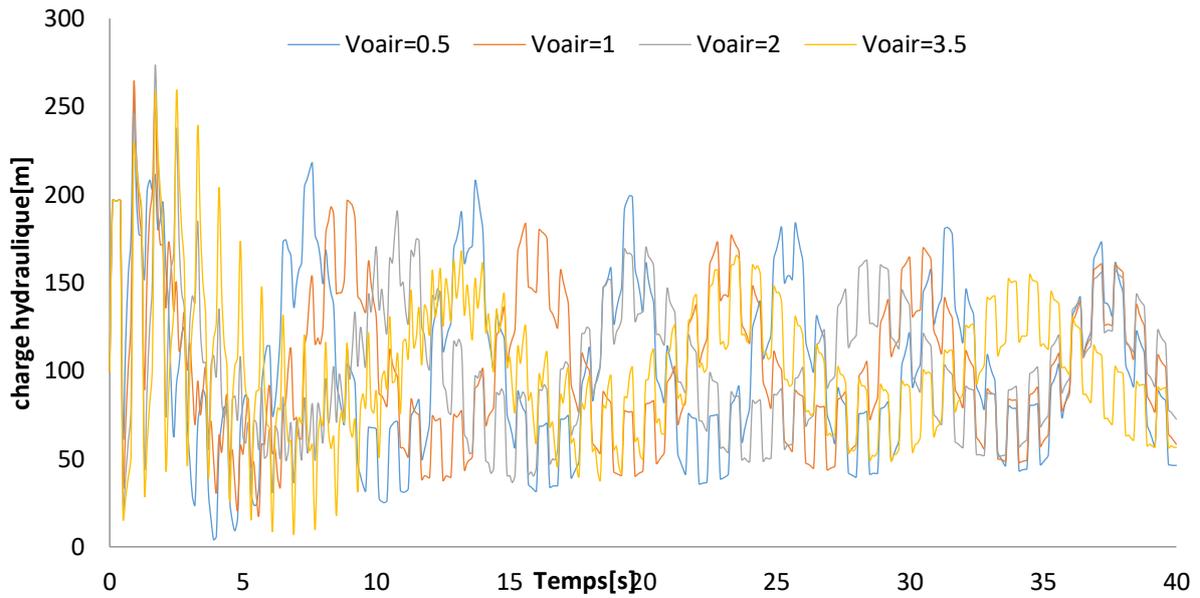


Figure III-14 : Charge hydraulique à la vanne en fonction du temps pour différent volume d'air

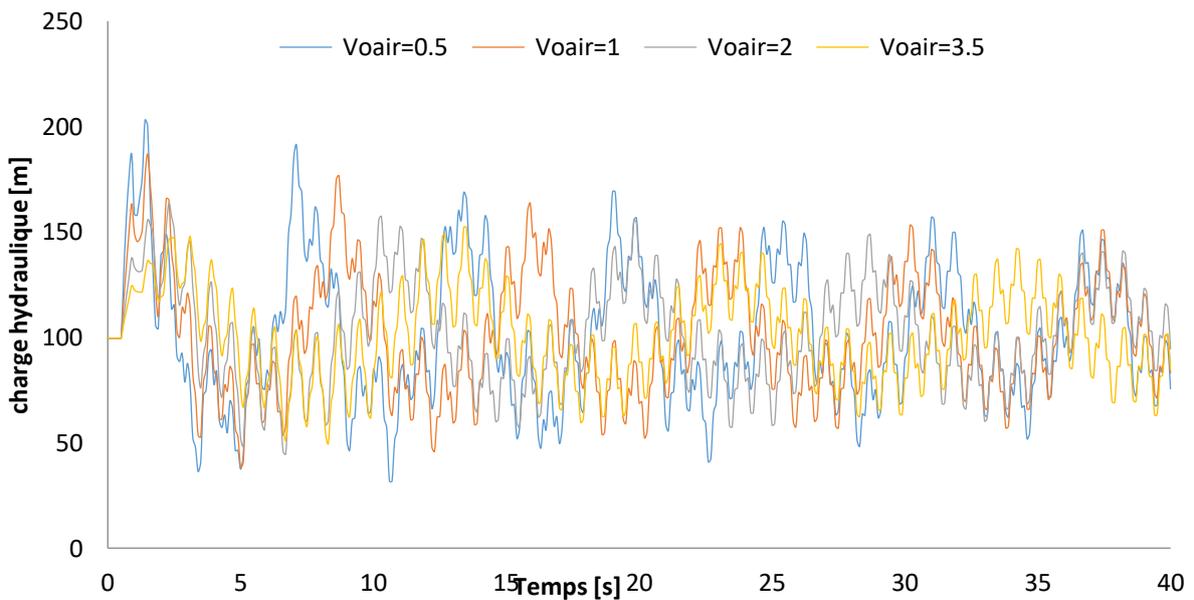


Figure III-15 : Charge hydraulique au milieu de la conduite en fonction du temps pour différent volume d'air

La Figure **III-14** et Figure **III-15** indiquent que la magnitude de la charge hydraulique $H(t)$ est inversement proportionnelle à l'augmentation du volume d'air initial.

D'autre part, il est facile d'observer que la variation du volume d'air initiale a un effet évident sur la période d'oscillation. Enfin, on peut voir que l'amortissement

Chapitre 3 : Validation et applications

de l'onde de pression causée par le coup de bélier se produit plus rapidement à mesure que le volume d'air initial augmente.

III.5 Conclusion

Les résultats de la validation prouvent la fiabilité des mises à jour apportées au simulateur du coup de bélier et de sa capacité de traiter les configurations couvertes par l'outil. Les nouvelles configurations introduites dans cette version. Les études paramétriques augmentent l'utilité et la flexibilité du simulateur.

Conclusion et Perspectives

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 les systèmes hydrauliques typiques suivants :

- Réservoir-conduite-vanne,
- Réservoir-multi conduites en série (jonction)-vanne,
- Réservoir-multi conduites en parallèle (branchement)-vanne.

Avec la possibilité d'intégrer un organe de protection de type réservoir d'air dans chaque configuration.

Pour les besoins de cette étude, de nouveaux algorithmes sont implémentés dans le simulateur du coup de bélier (développé au laboratoire LRMGCE de l'ENP). Ils sont basés sur la méthode des caractéristiques et conçus sous environnement Python 3.7 (open source). Les nouveaux algorithmes ont été testés et validés avec un logiciel tiers.

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

- Intégrer des pompes dans les systèmes de simulations ;
- Intégrer d'autres modèles de vannes (Check valves, Pressure-regulating valves...) ;
- Ajouter des fonctions pour dimensionner la cheminée d'équilibre et réservoir d'air ;
- Traiter d'autres systèmes comme : réservoir-conduites multi jonctions-multi branchements-vanne.

Bibliographie

Alili, S. & Bessaci, K. 1993. Analyse d'un écoulement en charge non stationnaire par la méthode des caractéristiques: Water Hammer. Département Hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique. Alger : s.n., 1993. Mémoire de projet fin d'études.

Benakcha,Y. & Benmansour,Y. 2019. Développement d'outils informatiques pour le génie hydraulique: Simulateur du coup de bélier - implémentation de nouvelles commandes. Département d'hydraulique, Ecole Nationale Polytechnique. Alger : s.n., 2019. p. 99, Mémoire de projet fin d'études.

Boukhemacha,M.A. 2018. Notes de cours hydraulique transitoire. alger : s.n., 2018.

Chaudhry, M. Hanif. 2014. Applied Hydraulics transients. illustrée. New york : Springer, 2014. p. 600.

Fox, J. A. 1977. Hydraulic Analysis of Unsteady Flow in Pipe Networks. London : Palgrave, 1977. pp. 885-900.

Issad,M. & Mazouni,D.E. 2018. Déveleppement d'outils informatiques pour le génie hydraulique :simulateur du coup bélier. Déparetement Hydraulique, Ecole National Polytechnique. Alger : s.n., 2018. p. 92, Mémoire de projet fin d'études.

Mambretti, S. 2013. Water Hammer Simulations. illustrée. southampton : WIT Press, 2013. p. 200 .

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, 1980.

Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Moriasi, D.N. et al. Model. 2007. 2007, the American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 50, pp. 885-900. 3.

Quick Start Lessons Bentley HAMMER User's Guide.

The Joukowski equation for fluids and solids. Tijsseling, A. S., & Anderson, A. 2006. s.l. : Technische Universiteit Eindhoven, 2006, Journal of Scientific Computing.

Velocity of a water-hammer wave in an elastic pipe. Halliwell, A. R. 1963. 4, 1963, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 89, pp. p.1-21. 4.

Manuel d'utilisation

Water hammer control in centrifugal pump systems. Kino, H. 1968. 3, 1968, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 94, pp. 619-640.

Manuel d'utilisation(Annexe)

Annexe

Manuel de l'utilisation de l'application

« Water Hammer Simulator 2020 »

1. Introduction

Water Hammer simulator est une application conçue dans le cadre de projets de fin d'études, codées en Python 3.7, conçu pour réaliser des simulations des variations de pression et de débit dans différents systèmes hydrauliques typiques (sans dispositifs de protection anti-bélier) soumis au phénomène du coup de bélier.

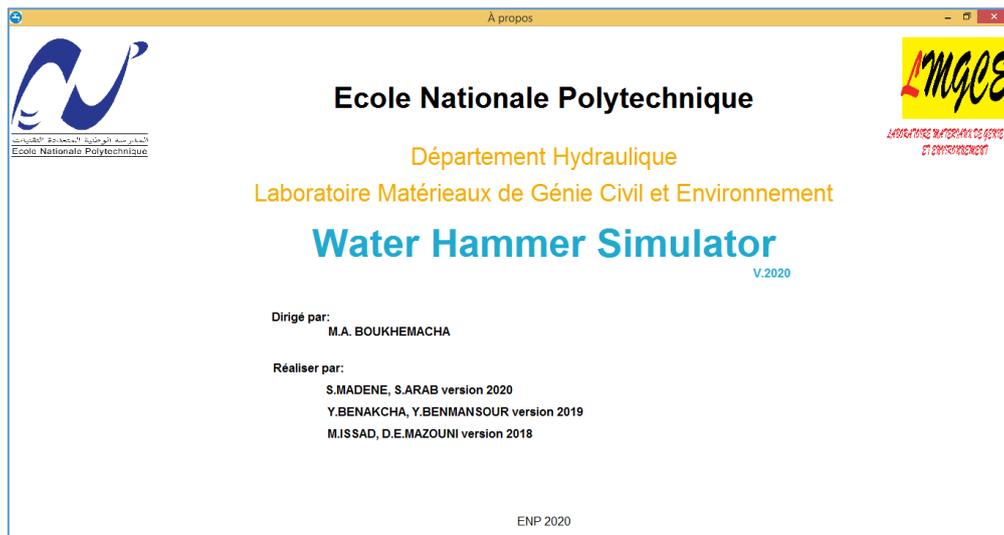


Figure A.1 : Fenêtre informations descriptifs de la version du simulateur

2. Etapes de simulation :

Une fois l'algorithme est lancé vous serez orienté vers la fenêtre principale de simulateur (**Figure A.2**).

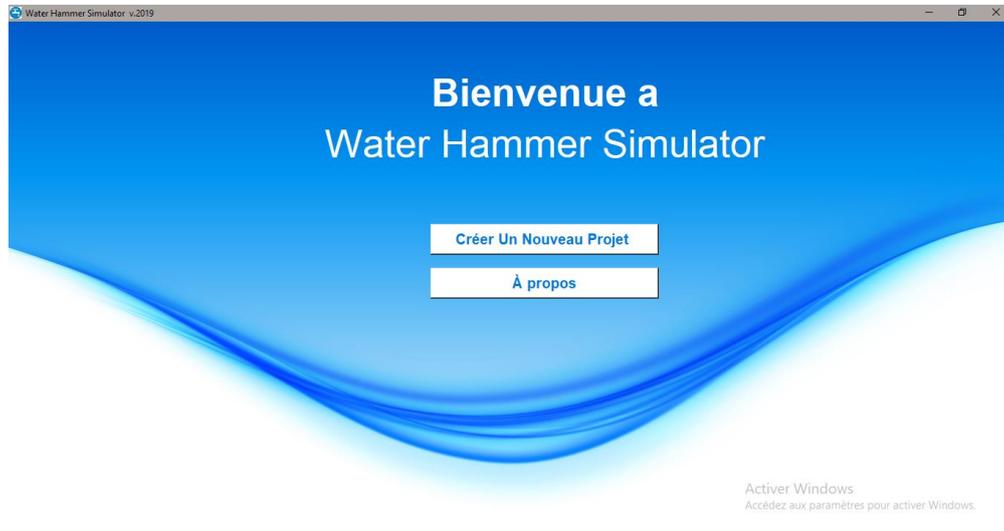


Figure A.2 : Fenêtre principale du simulateur

Cette fenêtre vous dirige vers deux boutons :

- **A propos** : qui vous conduira vers la fenêtre (**Figure A.1**) présentant les informations sur cette version du simulateur.
- **Créer Un Nouveau projet** : vous conduira vers une nouvelle fenêtre (**Figure A.3**) qui vous donnera la possibilité de choisir entre les trois systèmes hydrauliques typiques traités par le simulateur.

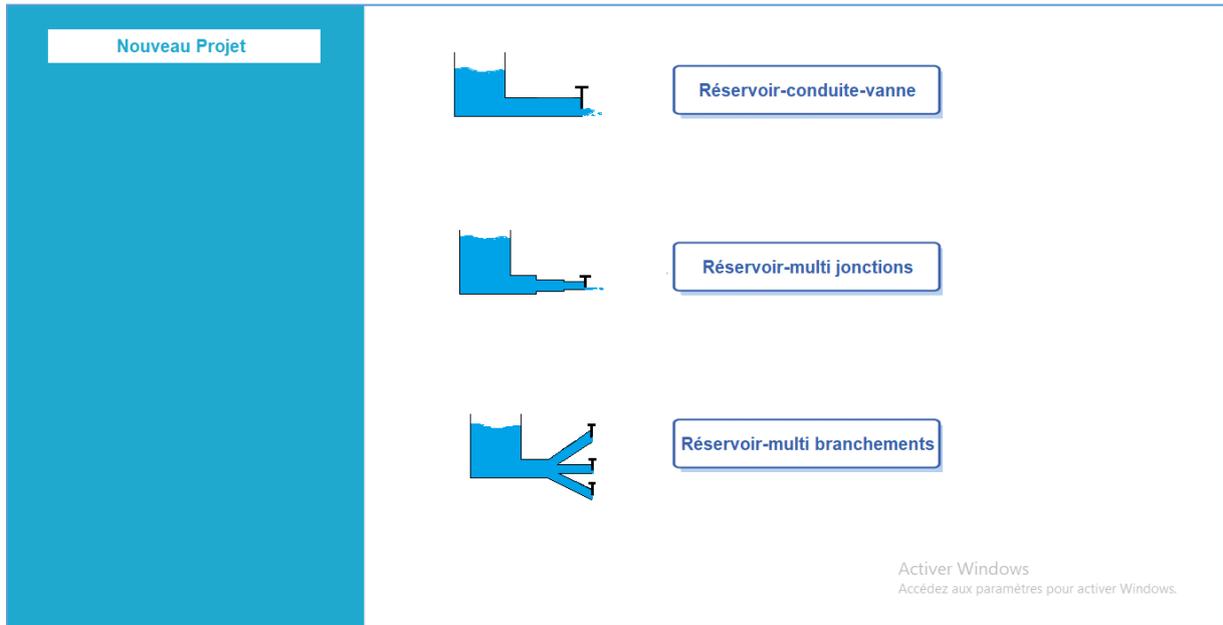


Figure A.3 : Fenêtre "choix de systèmes hydrauliques disponibles"

2.1. Réservoir – conduite -Vanne



Figure A.4 : Système hydraulique : réservoir-conduite-vanne

En choisissant le premier système hydraulique, réservoir-conduite-vanne (**Figure A.4**), bouton le simulateur vous proposera trois configurations (**Figure A.5**) :

- a) Un système sans protection ;
- b) Un système protégé par une cheminée d'équilibre ;
- c) Un système protégé par un réservoir d'air.

Manuel d'utilisation

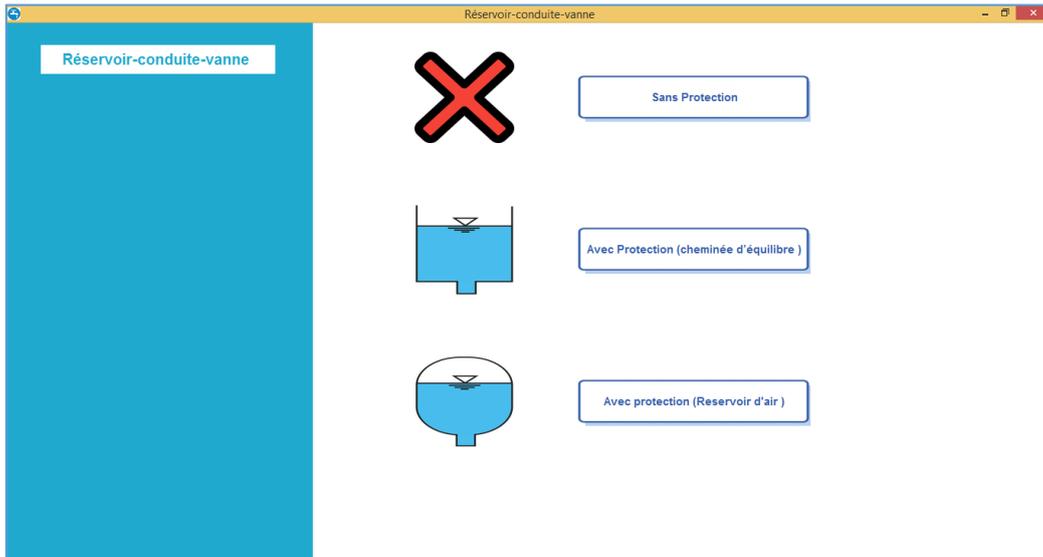


Figure A.5 : Configuration « réservoir - conduite – vanne » avec et sans dispositif de protection

Tableau A.1 : Etapes d'introduction des données d'entrée: Configuration « réservoir - conduite – vanne »

<p>Etape 1: Définition des paramètres du réservoir.</p>	<p>Figure A.6 : Les paramètres d'entrées du réservoir</p>
--	---

Etape 2 : Définition des paramètres de la conduite.

NB. La célérité d'onde peut être spécifiée ou calculée en cliquant sur **le bouton vert**.

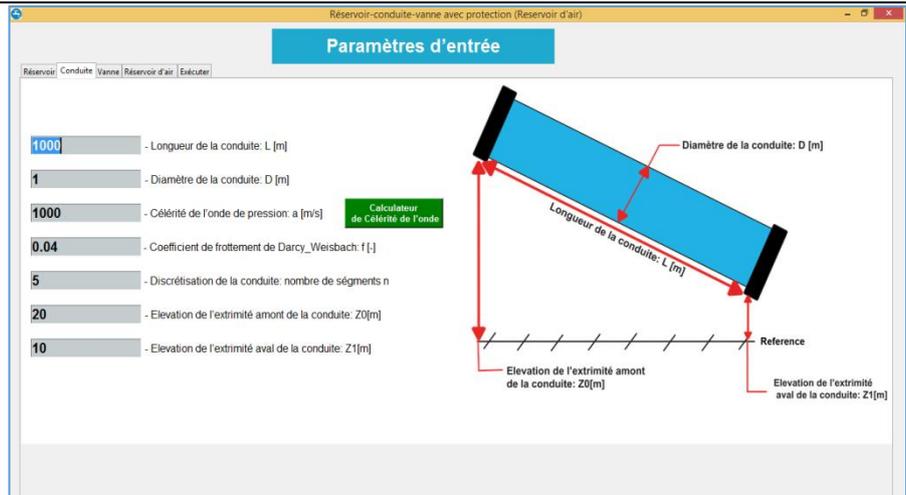


Figure A.7 : Les paramètres d'entrées de la conduite

Etape 3: Définition des paramètres de la vanne.

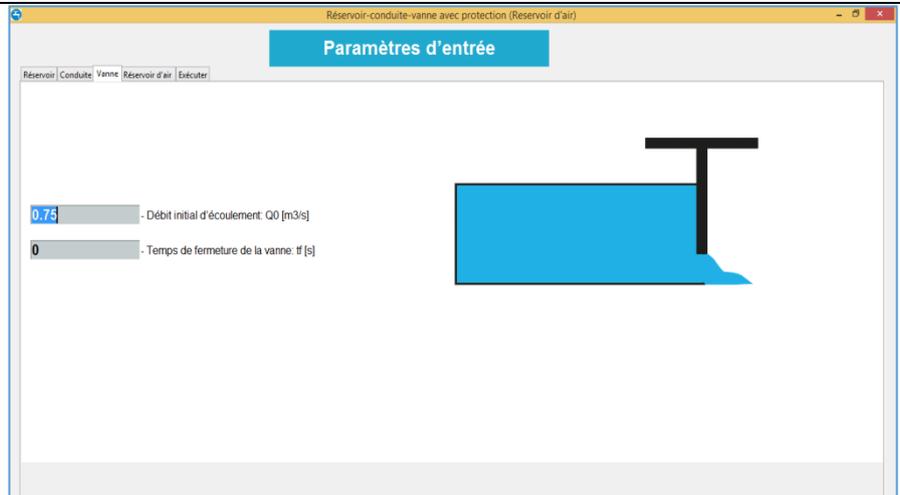


Figure A.8 : Les paramètres d'entrées de la vanne

Etape 4: Définition des paramètres de simulation (durée de simulation) et d'affichage des résultats.



Figure A.9 : Les paramètres d'exécution

Si vous choisissez de protéger le système avec une cheminée d'équilibre.

Etape 5 : Définition des paramètres de la cheminée d'équilibre.

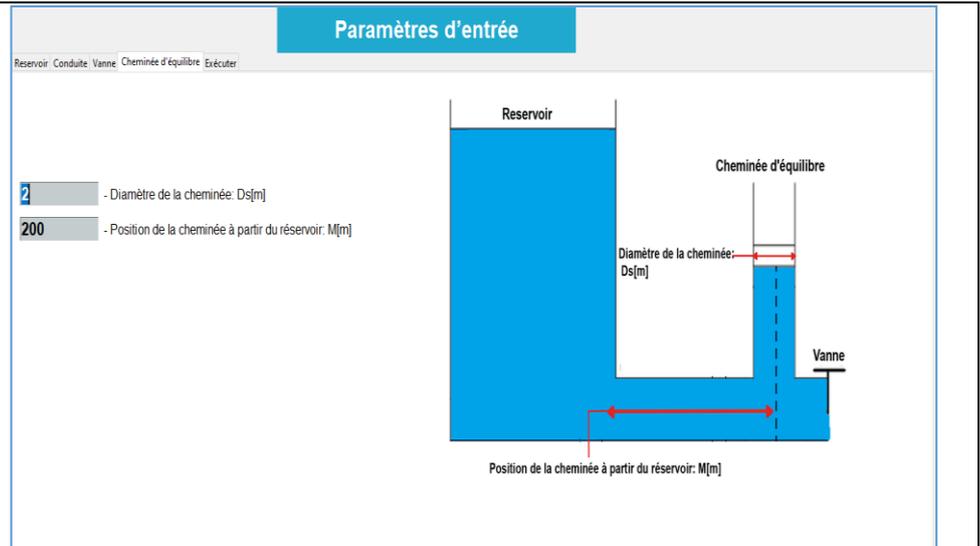


Figure A.10 : Les paramètres d'entrées de la cheminée d'équilibre

Si vous choisissez de protéger le système avec un réservoir d'air.

Etape 6 : Définition des paramètres du réservoir d'air.

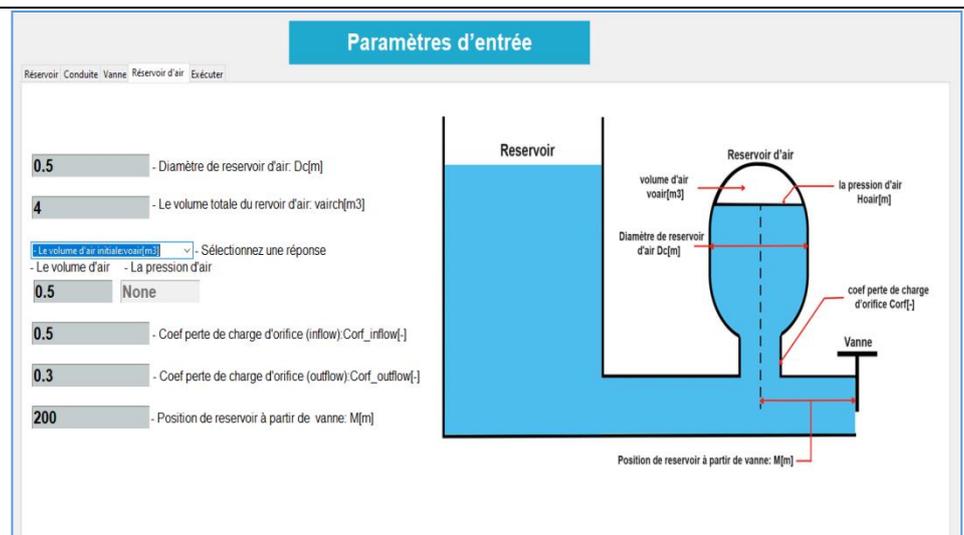


Figure A.11 : Les paramètres d'entrées du réservoir d'air

- Cliquez sur **Exécuter** pour lancer la simulation et accéder à la fenêtre affichant les résultats sous forme graphique.

La série de graphes affichée donne les variations des débits et de pression en fonction du temps et les enveloppes de pression et de charge hydraulique dans la/les conduite(s).

- Cliquez sur **Zoom** pour zoomer le graphe sélectionné.
- Cliquez sur **Enregistrer** pour sauvegarder les résultats sur un fichier Excel.

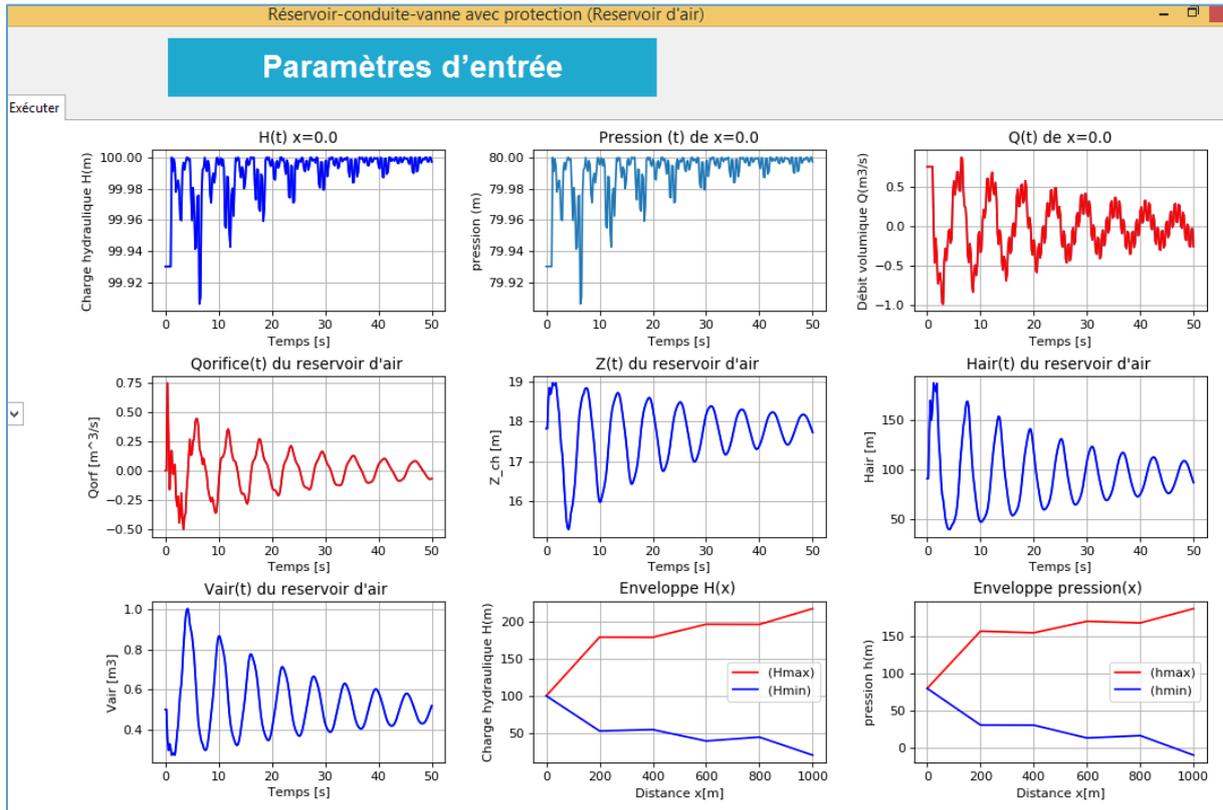


Figure A.12 : Fenêtre d'affichage des résultats sous forme graphique

2.2. Réservoir - conduites en série -vanne

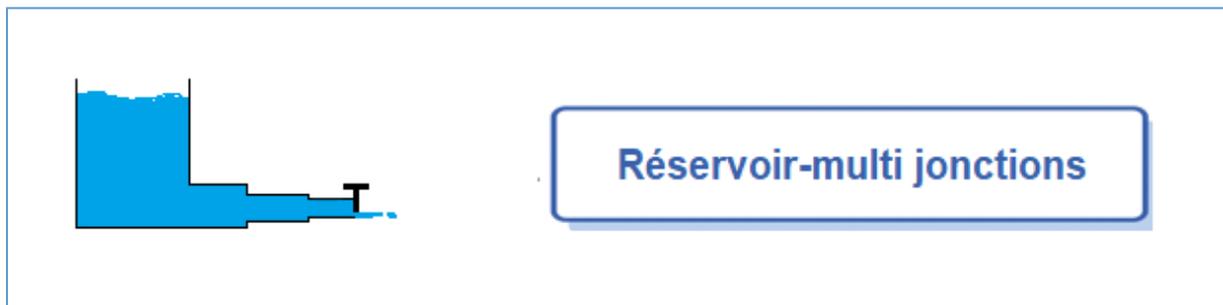


Figure A.13 : Système hydraulique : Réservoir -Multi jonctions en série- vanne

En choisissant le premier système hydraulique, réservoir-multi jonctions (**Figure A.13**), et en optant pour un organe de protection donné, la fenêtre **Figure A.5** s'affiche.

Les paramètres du système sont introduits de la même façon que nous avons fait dans le **Tableau A.1** sauf l'étape 2(paramètres de la conduite) où nous allons introduire le nombre de conduites du système, le diamètre, la célérité d'onde, la longueur les élévations des extrémités de chaque conduite (**Figure A.14**).

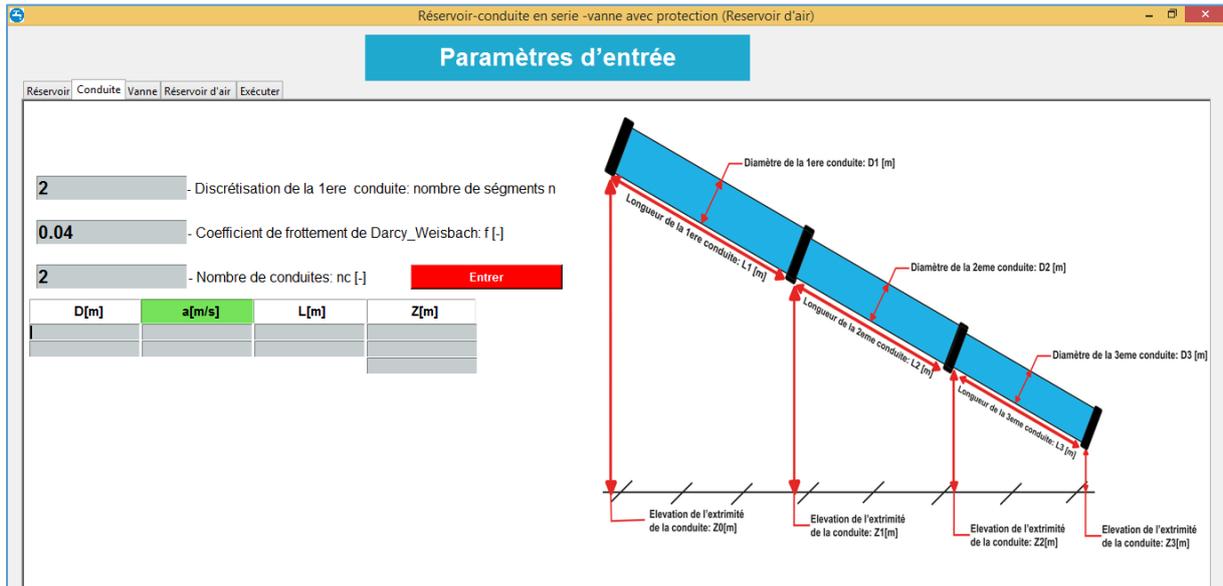


Figure A.14 : Définitions des paramètres des conduites en série

2.3. Réservoir - Multi branchement -réservoir d'air -Vanne :



Figure A.15 : Système hydraulique : Réservoir -Multi branchements– vanne

En choisissant le premier système hydraulique, réservoir-multi branchements (**Figure A.15**), et en optant pour un organe de protection donné, la fenêtre **Figure A.5** s'affiche.

Les paramètres du système sont introduits de la même façon que nous avons fait dans le **Tableau A.1** sauf l'étape 2 (paramètres de la conduite) où nous allons introduire le nombre de conduites du système, le diamètre, la célérité d'onde, la longueur les élévations des extrémités de chaque conduite, le temps de fermeture de chaque vanne (**Figure A.16**).

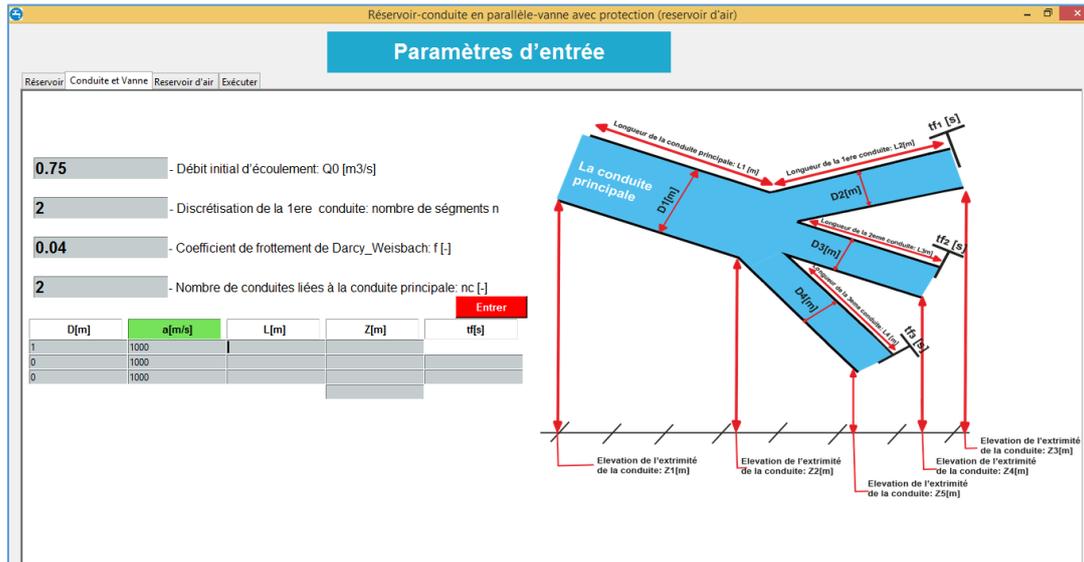


Figure A.16 : Définition des paramètres des conduites en parallèles

3. La célérité d'onde

Afin de s'assurer que le simulateur répondra au besoin de notre utilisateur nous avons choisi de lui donner la possibilité de calculer la célérité d'onde pour les différents types de conduites, en terme de matière, rigidité et fixation comme l'expliquerai les figures qui suivent.

L'interface de la fenêtre principale (**Figure A.17**) propose quatre choix concernant les types de conduite.

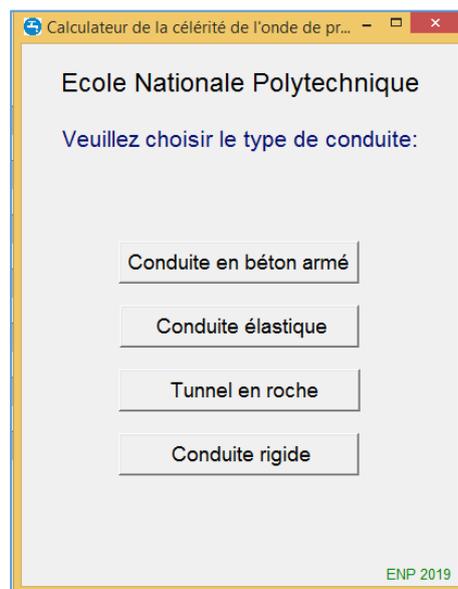


Figure A.17 : interface « choix de type de la conduite »

3.1. Tunnel en roche

Deux choix sont prévus par l'application (**Figure A.18**)

3.1.1. Tunnel sans revêtement

Remplir les champs de paramètres ci-dessous :

- Cliquez sur le bouton **Calculer** vous donne le résultat (la valeur de la célérité d'onde de pression)

3.1.2. Tunnel avec revêtement

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

The screenshot shows a software interface with a green 'Aide' button in the top left. The main title is 'Type de tunnel'. There are two radio button options: 'Tunnel sans revêtement' (selected) and 'Tunnel avec revêtement'. Below these are four input fields: 'K [N/m²]' with value '2270000000', 'E [N/m²]' with value '50000000000', 'ρ [kg/m³]' with value '1025', and 'a [m/s]' with value '1455.4917496665817'. At the bottom are two buttons: 'Calculer' and 'Réinitialiser'.

The list of parameters used in calculations is as follows:

- a: Vitesse de propagation de l'onde de pression en [m/s]
- E: Module de Young du matériau de la conduite en [N/m²]
- K: Module d'élasticité hydrostatique du fluide en [N/m²]
- G: Module de rigidité de la roche en [N/m²]
- e: Epaisseur du revêtement en [m]
- ν: Coefficient de Poisson en [-]
- D: Diamètre de la conduite en [m]
- ρ: Densité du fluide en [kg/m³]

Figure A.19 : Interface « paramètres utilisés »

Figure A.18:Interface « choix du type de tunnel »

Au début, il est recommandé à l'utilisateur de cliquer sur le bouton **Aide** afin de voir la liste des symboles de tous les paramètres utilisés dans le programme (**Figure A.19**).

3.2. Conduite en béton armé

Après avoir choisi ce type de conduite, trois possibilités concernant le type de fixation sont prévus dans la (**Figure A.20**).

The screenshot shows a software interface titled "Type de fixation de la conduite". It features three radio button options for pipe fixation: "Conduite avec joint de dilatation sur toute sa longueur" (selected), "Conduite encastrée sur sa partie supérieure", and "Conduite encastrée sur toute sa longueur". Below these are several input fields with their respective units and values: K [N/m²] (2190000000), E [N/m²] (206000000000), ρ [kg/m³] (999), D [m] (2), ec [m] (0.1), ν [-] (0.125), ø [m] (0.2), N (6), and a [m/s] (1392.2625736230364). At the bottom, there are two buttons: "Calculer" and "Réinitialiser".

Figure A.20 : interface « choix de type de fixation de la conduite en béton »

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

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

3.3. Conduite élastique

L'interface traite toutes les conduites plastiques et offre la possibilité de choisir trois types de fixation (**Figure A.21**).

Manuel d'utilisation

Calculateur de la célérité de l'onde de pression

Type de fixation de la conduite

Conduite avec joint de dilatation sur toute sa longueur

Conduite encastrée sur sa partie supérieure

Conduite encastrée sur toute sa longueur

K [N/m²]
2190000000

E [N/m²]
206000000000

ρ [kg/m³]
999

D [m]
2

e [m]
0.03

ν [-]
0.27

Calculer Réinitialiser

a [m/s]

Figure A.21: interface « choix de type de fixation de la conduite élastique »

Après avoir rempli les champs de paramètres d'entrée :

- Cliquez sur **Calculer** donne la valeur de la célérité de l'onde de pression et le type de parois (mince ou épaisse).
- Cliquez sur **Réinitialiser** pour changer le type de fixation.

3.4. Conduite rigide

Ce cas est simple seulement deux champs de paramètres à remplir sont nécessaires (**Figure A.22**).

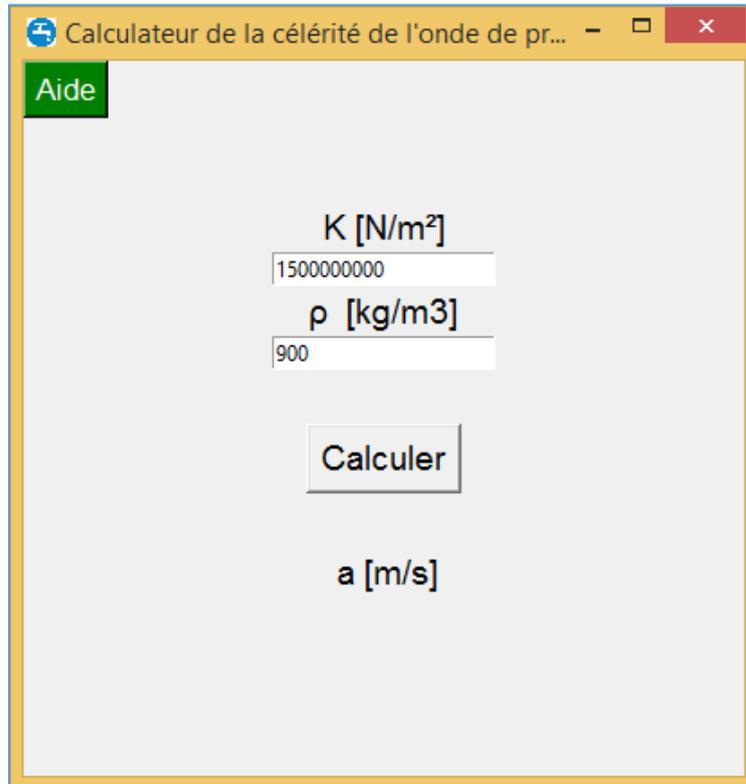


Figure A.22: interface paramètres de la conduite rigide

Remarques

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

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