



MEMOIRE DE MASTER

Pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option: CONCEPTION DES SYSTEMES D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE

THEME :

Caractérisation des effets de coup de bélier et détermination des caractéristiques d'organes de protection du réseau en utilisant le logiciel Bentley HAMMER

Présenté par :

RECHACHOU AbdelMalek, Ben Tekfa, Lamine

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
MOKRANE Wahiba	M.C.B	Président
YAHIAOUI Samir	M.A.A	Examineur
SAIMI Ahmed	M.C.A	Examineur
SALHI Chahrazed	M.C.B	Examineur
MEDDI Hind	Professeur	Promotrice

Session Octobre 2023

Remerciements

Avant tout, je veux remercier ALLAH de m'avoir donné la force, le courage et la volonté de persévérer et de vivre jusqu'à ce jour.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice Mm. H. Meddi pour sa disponibilité, ses précieux conseils qui m'ont aidé pour élaborer cette mémoire de master.

Mes vifs remerciements iront aussi aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger et d'enrichir ce travail par leurs propositions.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation et le personnel de l'ENSH.

Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude à M. Duroughi Rami.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Rechachou AbdElMalek, Ben Tekfa, Lamine

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents que ALLAH les protège, qui m'ont toujours encouragé et sacrifié beaucoup pour que je puisse réussir. Et à mes deux sœurs.

A mes amis : Malek, Khaled, Souhil, Anis,.... pour d'avoir toujours été là pour moi.

A la tante de ma mère et son mari et leurs enfants : Hasnaa, Mhamed et Ibtissem.

Rechachou AbdElMalek, Ben Tekfa, Lamine

المطرقة المائية، التي تتميز بتقلبات في السرعة والضغط، هي مشكلة كبيرة في مجال الهيدروليكا تحدث في الأنابيب المضغوطة. لذلك، عند تصميم نظام هيدروليكي، يجب أن نأخذ في اعتبارنا المخاطر التي يمكن أن تنشأ من الضربة المائية وتوفير المعدات الضرورية الواقية للتخفيف منها.

في هذه الدراسة، أكدنا على أهمية محاكاة التدفق العابر لتحليل سلوك هذه الظاهرة وتحديد ما إذا كان النظام قادرًا على تحملها. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بتقييم خصائص المعدات الواقية المطلوبة باستخدام برنامج Bentley HAMMER.

الكلمات المفتاحية : المطرقة المائية، Bentley HAMMER، محاكاة التدفق العابر، صمامات الهواء، خزان الهواء، ضغط التدفق العابر.

Résumé

Le coup de bélier, caractérisé par des fluctuations de vitesse et de pression, est un problème majeur dans le domaine hydraulique qui se produit dans les conduites en charge. Ainsi, lors de la conception d'un système hydraulique, il est essentiel de prendre en considération les risques qui pourraient découler des coups de bélier et prévoir les équipements de protection nécessaires pour les atténuer.

Dans cette étude, nous mettons en avant l'importance de simuler l'écoulement transitoire pour analyser le comportement de ce phénomène et déterminer si le système peut y résister. De plus, nous évaluons les caractéristiques de l'équipement de protection requis en utilisant le logiciel Bentley HAMMER.

Mots clés : Coup de bélier, Bentley HAMMER, Simulation de régime transitoire, Ventouses, Réservoir d'anti-bélier, Pression transitoire

Abstract

Water hammer, characterized by fluctuations in velocity and pressure, is a major problem in the hydraulic field that occurs in pressurized pipelines. So, when designing a hydraulic system, one must take into consideration the risks that could arise from water hammer and provide the necessary protective equipment to mitigate it.

In this study, we emphasize the importance of simulating transient flow to analyze the behavior of this phenomenon and determine whether the system can withstand it. Additionally, we assess the characteristics of the required protective equipment using the Bentley HAMMER software.

Key words: Water hammer, Bentley HAMMER, Transient flow simulation, Air valves, Hydropneumatic tank, Transient pressure.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur le coup de bélier	
Introduction.....	2
I.1. Définition.....	2
I.2. Les causes du coup de bélier.....	2
I.3. Les conséquences du coup de bélier.....	2
I.4. La célérité d'onde.....	3
I.5. Estimation de la valeur du coup de bélier.....	5
I.6. Dispositifs de protection contre le coup de bélier.....	6
I.6.1. Les ventouses.....	7
I.6.2. La soupape de décharge.....	7
I.6.3. Le Volant d'inertie.....	7
I.6.4. La cheminée d'équilibre.....	8
I.6.5. Le réservoir d'air anti-bélier.....	8
Conclusion.....	8
Chapitre II: Présentation du logiciel HAMMER	
Introduction.....	9
II.1. Le logiciel HAMMER.....	9
II.2. Méthodes et équations utiliser par HAMMER.....	10
II.3. Les fonctionnalités de logiciel.....	11
II.4. Données et configuration nécessaire pour faire la simulation avec HAMMER.....	13
II.4.1. Création ou importation d'un modèle et simulation d'un régime permanent.....	13
II.4.2. Simulation d'un régime transitoire.....	15
Conclusion.....	18
Chapitre III: Etudes menées par des chercheurs	
Introduction.....	19
III.1. Comparaisons des effets des réservoirs surélevés et les réservoirs d'air sur la pression du régime transitoire.....	19
III.2. L'effets des ventouses sur les pressions transitoires.....	21
III.3. Comparaison entre les résultats obtenus Bentley HAMMER et la formule de la législation grecque.....	23
II.3.1. La formule de législation grecque.....	23
II.3.2. Discussion d'étude et de résultats.....	23
III.4. Comportement d'une conduite principale dans un régime transitoire en fonction de son matériau.....	26
II.4.1. Comportement de la conduite en fonte ductile.....	27
II.4.2. Comportement de la conduite en PRV.....	27

II.4.3. Comportement de la conduite en PEHD.....	28
II.4.4. Choix de matériaux le plus adapté	30
Conclusion	30

Chapitre IV:Application réelle

Introduction.....	31
IV.1. Données de base du système	31
IV.2. Calcul de la célérité d'onde.....	32
IV.3. Simulation sans protection anti-bélier	32
IV.4. Simulation avec protection anti-bélier.....	34
IV.4.1. Réservoir d'air de 3000 litres	35
IV.4.2. Réservoir d'air de 1000 litres	36
IV.4.3. Réservoir d'air de 1000 litres + une soupape de décharge.....	36
IV.4.3. Réservoir d'air de 1000 litres + une soupape de décharge + une ventouse	37
IV.5. interprétation des résultats	40
Conclusion	41
Conclusion générale.....	42
Bibliographie.....	43

Liste des figures

Chapitre II: Présentation du logiciel HAMMER

Figure II. 1 : Fenêtre d'interface du logiciel Bentley HAMMER	9
Figure II. 2 : définition du système d'unités.....	13
Figure II. 3 : FlexTables et Barre des propriétés.....	13
Figure II. 4 : Barre de propriétés et table des nœuds.....	14
Figure II. 5 : Bibliothèque des matériaux	14
Figure II. 6 : Pump Definitions	15
Figure II. 7 : Choix de la formule de calcul des pertes de charge.....	15
Figure II. 8 : Report Points Collection	16
Figure II. 9 : Transient Solver : Summary	16
Figure II. 10 : L'outil des profils	17

Chapitre III: Etudes menées par des chercheurs

Figure III. 1 : Schéma du système d'AEP de la ville d'Assiut (source : (DARWEESH, 2021))	19
Figure III. 2 : Comparaison entre Bentley HAMMER et CHAUDHRY (source: (DARWEESH, 2021)).....	20
Figure III. 3 : Résultats d'analyse de régime transitoire sans protection (source: (XU, et al., 2023)).....	22
Figure III. 4 : Résultats d'analyse de régime transitoire après l'utilisation des ventouses (source: (XU, et al., 2023)).....	22
Figure III. 5 : Schéma représentatives du réseau d'irrigation.....	24
Figure III. 6 : les pressions transitoires maximales et minimales développées dans le cas du pire scénario (0 seconde) (Source : (TOULOUMIDIS, et al., 2020)).....	24
Figure III. 7: comparaison entre les pressions transitoires maximale obtenues par HAMMER et ceux calculées par la formule de Joukowski (Source : (TOULOUMIDIS, et al., 2020)).....	25
Figure III. 8 : Profil et ligne piézométrique de la conduite d'adduction principale (source : (POPA, et al., 2021))	26
Figure III. 9 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en fonte ductile sans installation des équipements de protection (source: (POPA, et al., 2021)).....	27
Figure III. 10 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en PRV sans installation des équipements de protection (source: (POPA, et al., 2021))	28
Figure III. 11 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en PRV avec l'installation d'un réservoir d'air de 2 500 litres (source: (POPA, et al., 2021))	28
Figure III. 12 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en PEHD sans installation des équipements de protection (source: (POPA, et al., 2021))	29
Figure III. 13 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en PEHD avec l'installation d'un réservoir d'air de 100 litres (source : (POPA, et al., 2021))	29

Chapitre IV: Application réelle

Figure IV. 1 : Profil en long et ligne piézométrique de la conduite de refoulement SP1-SP2	31
Figure IV. 2 : La fonction de "Wave Speed Calculator"	32
Figure IV. 3 : Lignes piézométriques et volume d'air pour la conduite SP1-SP2 sans protection	34

Figure IV. 4 : Volume d'aire et les pressions transitoires maximales et minimales dans le cas d'utilisation d'un réservoir de 3000 litres	35
Figure IV. 5 : Volume d'aire et les pressions transitoires maximales et minimales dans le cas d'utilisation d'un réservoir de 1000 litres	36
Figure IV. 6 : Volume d'aire et les pressions transitoires maximales et minimales dans le cas d'utilisation d'un réservoir de 1000 litres + une soupape de décharge.....	37
Figure IV. 7 : Volume d'aire et les pressions transitoires maximales et minimales dans le cas d'utilisation d'un réservoir de 1000 litres + une soupape de décharge + Ventouse	39
Figure IV. 8 : Lignes piézométriques et volume d'air pour la conduite SP1-SP2 avec l'utilisation d'un réservoir de 1000 litres + une soupape de décharge + une ventouse	40

Liste des tableaux

Chapitre I: Généralités sur le coup de bélier

Tableau I. 1 : Le coefficient k en fonction du matériau de la conduite	4
--	---

Chapitre III: Etudes menées par des chercheurs

Tableau III. 1 : les caractéristiques des matériaux utilisés	26
--	----

Chapitre IV: Application réelle

Tableau IV. 1 : Données de base du système.....	31
Tableau IV. 2 : Résultats de la simulation sans protection anti-bélier	32
Tableau IV. 3 : Le diamètre d'entrée d'air de la ventouse en fonction du diamètre de la canalisation	37
Tableau IV. 4 : Résultats de la simulation avec réservoir d'air de 1000 litres + Soupape de décharge + Ventouse	38

Introduction générale

Lorsque l'on dimensionne des systèmes d'approvisionnement en eau, qu'ils fonctionnent par gravité ou par refoulement, il est impératif de tenir compte de l'étude du comportement du coup de bélier. Ce phénomène transitoire est souvent considéré comme le plus dangereux qu'un système puisse rencontrer, en raison des nombreux dégâts matériels et physiques qu'il peut engendrer.

Pour garantir la sécurité du système, l'ingénieur doit anticiper ces catastrophes potentielles en prévoyant et en mettant en place les dispositifs de protection appropriés en fonction des spécificités du projet.

Cette étude est menée dans le but de se familiariser avec ce phénomène, ses causes, ses effets et les dispositifs de protection employée pour s'en défendre. Elle vise de mettre en évidence l'importance de simulation du régime transitoire en utilisant le logiciel Bentley HAMMER pour déterminer les caractéristiques des effets du coup de bélier, ainsi que les caractéristiques des équipements de protection utilisés, tels que : les réservoirs d'air, les ventouses, etc.

Cette étude est structurée de manière à couvrir les points suivants :

- Le chapitre I qui englobe des généralités sur le coup de bélier.
- Le chapitre II vise à faire une présentation du logiciel Bentley HAMMER
- Dans le chapitre III, nous discuterons des études menées par des chercheurs ayant utilisée le logiciel HAMMER.
- Le chapitre IV est consacré à la simulation d'un cas réel.

Chapitre I: Généralités sur le coup de bélier

Introduction

Le phénomène du coup de bélier constitue un défi significatif pour les ingénieurs dans le domaine de l'hydraulique depuis près d'un siècle et demi. Le but de ce chapitre est de présenter une vue d'ensemble de ce phénomène afin d'en acquérir une compréhension de base.

I.1. Définition

Le coup de bélier désigne les fluctuations de pression qui résultent d'une brusque modification du débit d'un liquide circulant à l'intérieur d'une conduite (FRELIN, 2002). Il est défini comme un phénomène transitoire oscillatoire caractérisé par des variations de pressions et de vitesses, ce phénomène se manifeste dans les conduites en charge, que ce soit en écoulement gravitaire ou en refoulement (SALAH, 2014).

I.2. Les causes du coup de bélier

Un changement d'un régime d'écoulement dans un réseau de conduites survient en raison de changements dans les conditions aux limites (à l'exception de la rupture d'une canalisation). De multiples types de conditions aux limites peuvent induire des phénomènes transitoires. Les plus courantes qui exigent souvent des analyses sont les suivantes :

- La mise en marche ou arrêt brutal d'un ou de plusieurs pompes.
- Modification des réglages d'une vanne, l'ouverture ou la fermeture instantanée ou trop rapide de cette dernière, qu'elles soient accidentelles ou non.
- Changement de la demande en puissance dans les turbines.
- Action des pompes alternatives.
- Changement d'élévation d'un réservoir.
- Variations des vagues sur le réservoir.
- Instabilité du régulateur de turbine.
- Vibrations des roues ou des aubes directrices dans les pompes, les ventilateurs ou les turbines.
- Vibrations d'accessoires déformables tels que les vannes.
- Instabilités des conduites d'aspiration dues au vortex.
- Caractéristiques instables des pompes ou des ventilateurs.
- Le remplissage ou le vidange d'un système d'AEP.
- La coupure de l'alimentation électrique dans une station de pompage.

(WYLIE, et al., 1993)

I.3. Les conséquences du coup de bélier

Ce phénomène entraîne des conséquences indésirables susceptibles de provoquer d'importants dommages au système hydraulique, résumés de la manière suivante :

Cas de surpression : Si la somme de la surpression et de la pression initiale excède la pression maximale admissible (PMA) de la conduite, cela peut entraîner :

- Fissuration ou rupture de la canalisation.
- Le démontage des joints.
- L'endommagement des pompes et des vannes.

Cas de dépression : En cas de pression inférieure à -10mce, cela entraînera :

- Implosion de la conduite.
- Aspiration des joints.
- Déformation de tuyaux en plastique et en acier à parois minces.
- Détérioration du revêtement intérieur en mortier de ciment des tuyauteries.
- L'aspiration d'air ou d'eau contaminée au niveau des raccords à brides, des raccords à manchon ou des joints d'étanchéité.
- Le détachement de l'enduit intérieur de protection.
- Formation de bulles de cavitation qui peuvent endommager les conduites et les accessoires de robinetterie.

(LÜDECKE, et al., 2013)

Fatigue de la conduite : les fluctuations de surpression et de dépression, qui résultent inévitablement de ce phénomène, entraînent une fatigue du matériau de la canalisation, même si leur amplitude est faible (SALAH, 2014).

I.4. La célérité d'onde

La célérité, qui est la vitesse de propagation d'une onde dans une conduite, peut être estimée en fonction des caractéristiques spécifiques de la conduite, qu'elle soit enterrée ou non. La plupart des formules utilisées pour calculer la célérité d'onde du coup de bélier sont basées sur l'hypothèse d'une conduite dont les parois sont minces et qui n'est pas soumise à une pression extérieure.

ALLIEVI a établie une formule qui nous permet de calculer la célérité d'onde pour les conduites libres et enterrées :

$$\frac{1}{C^2} = \rho \left(\frac{d\rho}{\rho dP} + \frac{dS}{S dP} \right) \quad (\text{I.1})$$

$\frac{d\rho}{\rho dP}$ et $\frac{dS}{S dP}$ représentent respectivement la compressibilité du liquide et la déformabilité de la conduite.

On peut déduire la formule d'un fluide peu compressible et une conduite élastique à paroi mince, en développant la formule (I.1) :

$$\frac{1}{C^2} = \rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{E \cdot e} f \right) \quad (\text{I.2})$$

Avec :

- C : célérité d'onde.
- ρ : Masse volumique de l'eau.
- S : la section du liquide au régime transitoire.
- ε : Elasticité du fluide.
- D : Diamètre intérieur de la conduite.
- E: module de Young de la conduite.
- e : Epaisseur de la conduite.
- f : influence du à la contrainte longitudinale.

Conduites non enterrées

L'expression (I.2) forme le fondement permettant d'établir la formule suivante qui définit la célérité d'onde dans les conduites non enterrées :

$$C = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon D}{E e} f}} \quad (\text{I.3})$$

Pour l'eau on a :

- $\varepsilon = 2.07 \times 10^9$ Pascal
- $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Donc la formule (I.3) devient :

$$C = \frac{1430}{\sqrt{1 + \frac{2.07 \times 10^9 D}{E e} f}} \quad (\text{I.4})$$

Pour l'eau, ALLIEVI présente aussi la formule suivant pour calculé la célérité d'onde :

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

- k : un coefficient qui dépend de la nature du matériau de la conduite.

Tableau I. 1 : Le coefficient k en fonction du matériau de la conduite

Matériau	Acier	Fonte grise	Fonte ductile	Amiante ciment	Plomb	Béton	PVC	PEHD	PEBD
k	0.5	1	0.6	4 ou 4.4	5	5	33	83	500

Source : (BERREKSI, 2015)

Et (KORTEWEG, 1878), a estimé la célérité d'onde par la formule suivante :

$$C = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K D}{E e}}} \quad (\text{I. 6})$$

Avec :

- ρ : Masse volumique de l'eau.
- K : coefficient d'élasticité de l'eau; $K = 2.07 \times 10^9$ Pascal. .
- E : module de Young de la conduite en Pascal.
- D : Diamètre intérieur de la conduite en m.
- e : Epaisseur de la conduite en m.

Conduites enterrées

(SALAH, et al., 2001) Ont réussi à développer la formule pour calculer la célérité des ondes dans le cas de conduites enterrées, ce qui représente la situation réelle en prenant en compte l'influence du sol sur la canalisation :

$$C = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{K \times 2 \times a \times (1 - v_m^2) \times (1 - v_s)}{(1 - v_m^2) \times a \times E_s + E_m \times e_m \times (1 - v_s)}}} \quad (\text{I. 7})$$

Avec :

- K : Coefficient d'élasticité de l'eau.
- ρ : Masse volumique de l'eau.
- E_m : module de Young du matériau de la conduite.
- E_s : module de Young du sol.
- v_m : coefficient de poisson du matériau.
- v_s : coefficient de poisson du sol entourant la conduite.
- e_m : Epaisseur de la conduite (m).
- a : rayon intérieur de la conduite (m).

I.5. Estimation de la valeur du coup de bélier

Pour évaluer la valeur du coup de bélier, on considère deux cas :

Cas d'une fermeture rapide

Une manœuvre est considérée rapide lorsque le temps requis pour annuler le débit est inférieur ou égal à $\frac{2L}{c}$, ce qui équivaut au temps nécessaire pour qu'une onde élastique fasse un aller-retour. La valeur du coup de bélier est donc donnée par la formule suivante :

$$\Delta H = \frac{C V_0}{g} \quad (\text{I. 8})$$

Tel que :

- V_0 : la vitesse moyenne de l'écoulement en régime permanent (m/s).
- g : accélération de la pesanteur (m/s^2).
- C : la célérité de l'onde (m/s).

Cas d'une fermeture lente

Dans ce cas la valeur du coup de bélier est déterminée en utilisant la formule de MICHAUD :

$$\Delta H = \frac{2LV_0}{gT} \quad (I.9)$$

Avec :

- T : le temps de fermeture totale de la vanne.

(KADI, 2022)

Lorsque l'on dimensionne les réseaux, on tient compte du scénario le plus défavorable, à savoir la fermeture soudaine de la vanne en cas gravitaire ou l'arrêt instantané de la pompe en cas de refoulement.

Pour déterminer les valeurs de surpression et dépression en utilise les formules suivantes :

$$H_s = H_g + \Delta H \quad (I.10) \quad \text{Cas de surpression}$$

$$H_d = H_g - \Delta H \quad (I.11) \quad \text{Cas de dépression}$$

Avec :

- H_g : hauteur géométrique (m).

I.6. Dispositifs de protection contre le coup de bélier

Pour réaliser une étude anti-bélier fiable et précise, il est impératif de disposer d'un ensemble de données sur le réseau, car ces données ont un impact direct sur la précision de l'étude. Parmi ces données, nous incluons :

- La fonction principale du réseau.
- Le type du fluide transporté.
- Les matériaux des conduites.
- Les caractéristiques topographiques du projet.
- Le débit circulant dans le réseau.
- Les pressions maximales et minimales admissibles du réseau.
- La localisation des équipements présents dans le réseau avec précision.

(GUHL, 2002)

Il existe de nombreux dispositifs de protection contre le coup de bélier, adaptées à chaque situation. Elles peuvent consister à ralentir la variation de la vitesse du fluide ou à limiter la surpression par rapport à la dépression.

Parmi ces dispositifs nous citons :

I.6.1. Les ventouses

Les ventouses sont utilisés pour protéger contre la dépression, Il existe deux types de ventouses, celles à triple fonction et celles à fonction unique. Les ventouses à triple fonction ont trois rôles distincts :

- Evacuation de l'air à haut débit lors de la mise en eau de la conduite.
- Permettent l'admission d'air à grand débit lors de la vidange des conduites.
- Eliminent les poches d'air (dégazage) à faible débit en exploitation.

En revanche, les ventouses à fonction unique ont un seul rôle, qui est l'évacuation des poches d'air.

Ces dispositifs sont installés aux points hauts du réseau, et sont généralement composée d'un flotteur sphérique en caoutchouc logé dans un corps en fonte.

(BERREKSI, 2015)

I.6.2. La soupape de décharge

Le rôle d'une soupape est d'acheminer un certain débit en dehors de la conduite lorsque la pression atteint une valeur prédéterminée, généralement située entre 1,04 et 1,10 de la pression maximale admissible. L'ouverture de la soupape doit être rapide pour garantir son efficacité.

- Les soupapes assurent la protection contre les surpressions exclusivement.
- Le nombre de soupapes requis varie en fonction de l'importance de l'installation, généralement entre 1 et 6.
- L'utilisation des soupapes demande une surveillance constante et un entretien régulier.
- Il est également nécessaire de prévoir un système pour évacuer l'eau libérée vers l'extérieur.

(BERREKSI, 2015)

I.6.3. Le Volant d'inertie

Monté sur l'arbre du groupe électropompe, ce dispositif permet d'allonger le temps d'arrêt du groupe et donc de diminuer les effets de coup de bélier. Mais de point de vue économique l'utilisation de ce dispositif est viable que pour des conduites de refoulement de quelques centaines de mètres (les plus grandes conduites nécessiteraient des volants de taille exagérée) (KADI, 2022).

I.6.4. La cheminée d'équilibre

Ce dispositif constituée par un réservoir en contact avec la surface libre jouera le même rôle que le réservoir d'air et permet de réduire les effets du coup de bélier quand les conditions topographiques le permettent (quand les hauteurs géométriques sont faibles). On note que la cheminée d'équilibre est réservée pour les transferts d'eau brute et les forts débits (KADI, 2022).

I.6.5. Le réservoir d'air anti-bélier

Le réservoir d'air est couramment employé pour se prémunir contre les coups de bélier. Il se compose d'un récipient avec de l'air comprimé dans sa partie supérieure et de l'eau dans sa partie inférieure. Ces dispositifs portent divers noms tels que "accumulateur, cloche à air, ballon d'air, réservoir anti-bélier,...etc.". En outre, pour maintenir le volume d'air dans les limites appropriées en raison de potentielles fuites, il est courant d'utiliser un compresseur d'air. De plus, un clapet anti-retour est souvent installé entre la pompe et le réservoir d'air. Ce mécanisme simple assure une protection efficace de l'installation contre les dépressions et les surpressions (BERREKSI, 2015).

Lorsque la pression à l'intérieur de la conduite augmente, une partie du liquide présent dans la conduite pénètre dans le réservoir d'air, comprimant ainsi l'air qui s'y trouve. En revanche, lorsque la pression dans la conduite diminue, une partie du liquide s'écoule du réservoir d'air vers la conduite, réduisant ainsi la pression de l'air dans le réservoir. De cette manière, dans de nombreuses situations, les variations de pression provoquées par le coup de bélier peuvent être significativement atténuées. Cependant, il est impératif que le réservoir d'air soit suffisamment grande et contienne un volume d'air adéquat (ZÀRUBA, 1993).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé de manière globale le sujet du coup de bélier, en discutant de ses origines, des conséquences potentielles qu'il peut entraîner, de la manière de calculer la célérité d'onde et d'estimer la valeur du coup de bélier, ainsi que des dispositifs employés pour s'en prémunir.

Chapitre II: Présentation du logiciel HAMMER

Introduction

De nos jours, la simulation et la modélisation du coup de bélier sont indispensables pour mieux comprendre le comportement de ce phénomène et pour déterminer les équipements nécessaires pour s'en protéger. Dans ce chapitre nous allons présenter le logiciel Bentley HAMMER, l'un des logiciels les plus couramment employés pour simuler les régimes transitoires.

II.1. Le logiciel HAMMER

Le logiciel Bentley HAMMER CONNECT, développé par Bentley Systems, est un simulateur numérique avancé des phénomènes transitoires hydrauliques (coup de bélier) dans les systèmes d'eau, d'eaux usées, industriels et miniers. Il simplifie la saisie des données et vous permet de vous concentrer sur la visualisation, l'amélioration et la présentation rapide et professionnelle de vos résultats. Bentley HAMMER CONNECT peut gérer n'importe quel fluide ou système qu'un modèle hydraulique en régime permanent typique comme WaterCAD peut traiter, mais il peut également résoudre une gamme plus large de problèmes, tels que : les écoulements à variation rapide ou transitoire, les fluides légèrement compressibles à deux phases (vapeur et liquide) et les systèmes à deux fluides (air et liquide), les systèmes fermés sous pression avec admission et évacuation d'air à des points discrets.

Avec HAMMER, il est possible d'analyser divers systèmes, tels que les réseaux d'eau potable, les canalisations d'eaux usées, les systèmes de protection contre les incendies, les pompes de puits et les conduites de transport d'eau brute. Vous avez la flexibilité de modifier la gravité spécifique du fluide pour représenter des substances telles que l'huile ou les boues.

Les algorithmes de Bentley HAMMER CONNECT évoluent en permanence pour suivre les pratiques actuelles de modélisation des réseaux d'eau potable et d'assainissement.

(Bentley Systems, 2018)

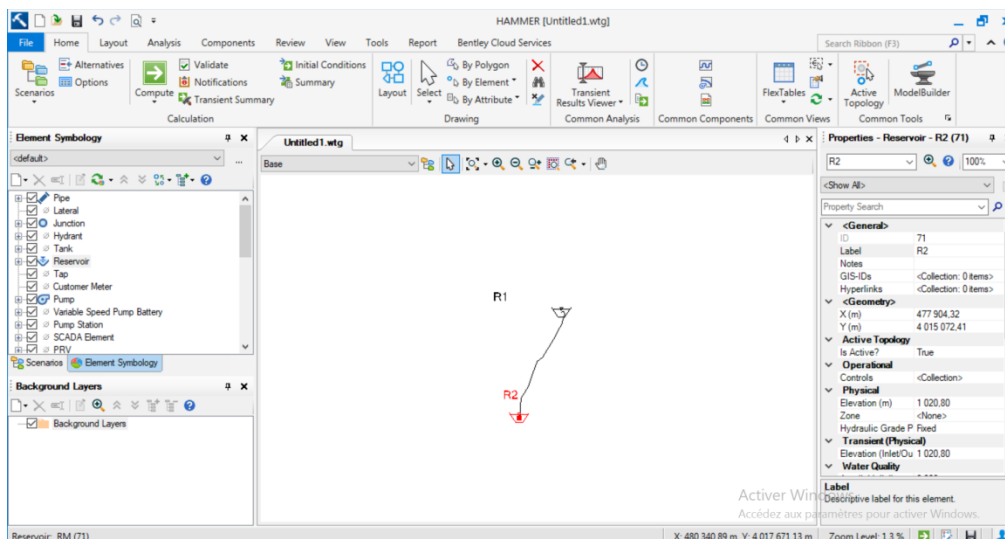


Figure II. 1 : Fenêtre d'interface du logiciel Bentley HAMMER

II.2. Méthodes et équations utiliser par HAMMER

HAMMER, comme d'autres logiciels de simulation du régime transitoire tels que CEBELMAIL, SURGE, AFT impulse, utilise la Méthode standard des Caractéristiques (MOC) comme moteur de calcul pour la résolution des équations de Saint-Venant unidimensionnelles et bidimensionnelles :

$$\begin{cases} \rho C^2 \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} + g \sin \alpha + \frac{\lambda U|U|}{2D} = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

L'algorithme reconnu comme le plus rigoureux et fiable pour l'analyse des débits en cas de phénomènes transitoires. Contrairement à des méthodes comme celle du Plan d'Ondes (ou Méthode des Caractéristiques Ondulatoires) qui ne garantissent pas la fiabilité des données car elles ne calculent les résultats qu'aux jonctions, la MOC effectue des calculs le long de la canalisation, en des points intermédiaires. Cette approche permet de détecter précisément des problèmes significatifs (comme des pressions négatives à mi-parcours) qui pourraient autrement passé inaperçus (HYDRO-BLOG, 2019).

Bentley HAMMER se base aussi sur des équations et des modèles mathématiques pour décrire le comportement des fluides au sein des systèmes de tuyauterie. Voici une vue d'ensemble des équations fondamentales et des principes appliqués par HAMMER ainsi que par d'autres logiciels de simulation des écoulements transitoires hydrauliques :

Équation de conservation de la masse : Elle est formulée mathématiquement sous la forme d'équation de continuité, qui permet de calculer les changements de débit en différents points du système. Cette équation énonce que la quantité totale de fluide contenue dans un volume spécifique demeure constante au fil du temps, en d'autres termes, la quantité de fluide qui pénètre dans un système doit correspondre à la quantité de fluide qui en sort.

$$Q_{entrant} = Q_{sortant} \quad (\text{II. 2})$$

Équation de la quantité de mouvement (Bernoulli) : Cette équation permet de déterminer les fluctuations de pression et de vitesse du fluide tout au long de la conduite. Elle tient compte de la conservation de l'énergie mécanique du fluide.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + J \quad (\text{II. 3})$$

Équations de la perte de charge : Ces équations détaillent les pertes de charge résultant des frottements à l'intérieur de la tuyauterie, des changements de direction, des variations de diamètre, etc. Les équations de Darcy-Weisbach et de Hazen-Williams sont fréquemment employées pour modéliser ces pertes.

Équations spécifiques aux composants : les composants comme les pompes, les vannes et les réservoirs ont leurs propres équations pour décrire leur fonctionnement au sein du système. Par exemple, les pompes sont caractérisées par des courbes de performance qui établissent les relations entre le débit, la pression et la puissance.

II.3. Les fonctionnalités de logiciel

HAMMER offre une variété de fonctionnalités pour la modélisation, l'analyse et l'atténuation des effets du coup de bélier dans les systèmes hydrauliques. Voici un aperçu des fonctionnalités principales du logiciel :

Modélisation des réseaux de canalisation : Bentley HAMMER permet aux utilisateurs de créer des modèles détaillés de réseaux de canalisation en intégrant des composants tels que les vannes, les pompes, les réservoirs, les connexions, les différents types du matériau de conduite, etc. Il offre une interface conviviale pour construire ces modèles.

La simulation et l'analyse des régimes transitoires : le logiciel modélise les fluctuations rapides de la pression, du débit et de la vitesse du fluide au sein du système, en réaction à des incidents tels que l'ouverture ou la fermeture de vannes, le démarrage ou l'arrêt de pompes, etc. Cette simulation offre une vision de l'impact du coup de bélier sur le système.

Bentley HAMMER détecte les zones présentant un risque élevé de coups de bélier et offre des informations approfondies concernant les pressions maximales, les surpressions, les pics de débit, etc. Cette analyse contribue à anticiper les éventuels dommages aux conduites et aux équipements.

Simulation précise de l'impact des dispositifs de protection contre le coup de bélier : HAMMER Offre une simulation précise de l'efficacité de divers dispositifs de protection contre le coup de bélier ou les équipements anti-rotation. Les utilisateurs ont la possibilité de sélectionner parmi plus de 20 dispositifs et de réaliser un nombre illimité de scénarios pour déterminer la stratégie la plus appropriée (HYDRO-BLOG, 2019).

Wave speed calculator : cette fonction permet de facilement calculer la célérité d'onde en choisissant la nature de fluide à partir de la bibliothèque du liquide et le type de matériau de la bibliothèque de matériaux qui existe dans HAMMER. Ainsi que l'épaisseur de la conduite et le support de la canalisation.

Facilité de construire un réseau et possibilités d'importation des données : HAMMER offre la possibilité de construire un réseau de manière complète grâce à des outils simples tels que la fonction de Glisser-Déposer, des outils de mise en forme intuitifs, ou encore en important des données réseau depuis Epanet. Les ingénieurs peuvent utiliser des données géospatiales, des plans CAO, des bases de données et de feuilles de calcul pour accélérer le processus de modélisation.

Les utilisateurs de WaterCAD ou de WaterGEMS ont la possibilité d'ouvrir leurs modèles directement dans HAMMER (et vice versa), éliminant ainsi la nécessité de passer par un processus d'importation ou de conversion.

(HYDRO-BLOG, 2019)

ModelBuilder : cette fonction permet d'utiliser les données SIG existants pour construire un nouveau modèle HAMMER CONNECT ou mettre à jour un modèle HAMMER CONNECT existant. ModelBuilder prend en charge une grande variété de formats de données, des bases de données simples (telles qu'Access et DBase), des feuilles de calcul (telles qu'Excel), des données SIG (telles que des fichiers .shp), des données de Bentley Map, des bases de données de haut niveau (telles qu'Oracle et SQL Server), et bien d'autres.

En utilisant ModelBuilder, vous associez les tables et les champs de votre source de données aux types d'éléments et aux attributs de votre modèle HAMMER CONNECT. Le résultat est la création d'un modèle HAMMER CONNECT. ModelBuilder peut être utilisé dans l'une des plates-formes HAMMER CONNECT, que ce soit en mode autonome, en mode MicroStation, en mode AutoCAD ou en mode ArcGIS.

(Bentley Systems, 2018)

Les modules LoadBuilder™ et TRex™ : inclus dans HAMMER facilitent la gestion des demandes en eau et de l'altitude des nœuds en utilisant des données géospatiales. Cela contribue à prévenir les erreurs de saisie et simplifie le processus de modélisation. De plus, HAMMER intègre des outils de vérification de la connectivité pour assurer la cohérence hydraulique du modèle (HYDRO-BLOG, 2019).

Les scénarios et les alternatives : permettent de créer, d'analyser, visualiser, rappeler et comparer un nombre illimité de variations de votre modèle. Dans HAMMER CONNECT, les scénarios contiennent des alternatives pour vous donner un contrôle précis sur les modifications apportées au modèle. L'utilisation de la gestion de scénarios peut considérablement améliorer votre efficacité dans les domaines de la modélisation liés aux "What if?", tels que l'étalonnage, l'analyse des opérations et la planification.(Bentley Systems, 2018).

Visualisations et rapports : le logiciel offre des outils de visualisation graphique permettant de présenter les résultats de la simulation à l'aide des graphiques, des courbes et des tableaux. De plus, il permet de générer des rapports complets pour consigner les résultats de l'analyse de manière détaillée.

Assistance technique et formation : Bentley Systems met à disposition un service d'assistance technique ainsi que des programmes de formation afin d'accompagner les utilisateurs dans l'optimisation de leur utilisation du logiciel et la résolution de tout problème éventuel.

II.4. Données et configuration nécessaire pour faire la simulation avec HAMMER

Comme on a dit précédemment, HAMMER offre la possibilité de faire la simulation d'un régime permanent ou d'un régime transitoire. Afin d'obtenir une simulation précise, le logiciel requiert plusieurs paramètres qui doivent être fournis.

II.4.1. Création ou importation d'un modèle et simulation d'un régime permanent

Si on a un modèle déjà créé sur Epanet, AutoCAD, WaterCAD on peut l'importer sur HAMMER et on introduit les données supplémentaires, sinon pour créer un nouveau modèle il faut :

- Définir le système d'unités que nous utilisons (dans notre cas c'est le SI : système international d'unités) à partir de : Tools → More → Options → Units.

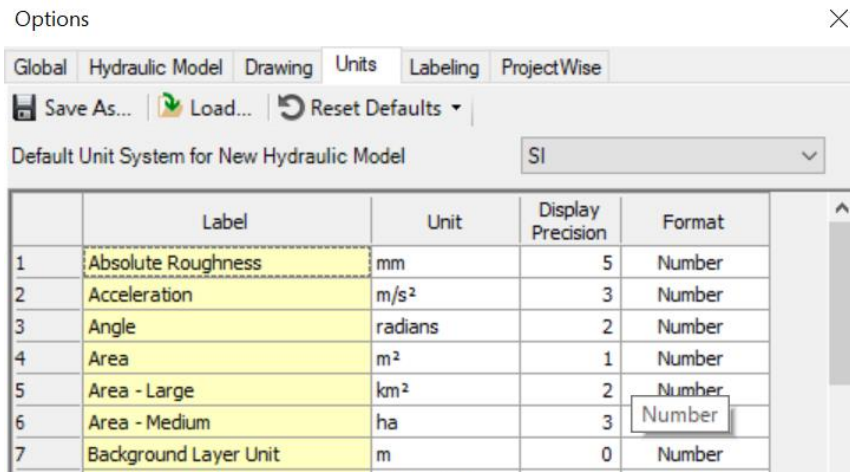


Figure II. 2 : définition du système d'unités

NB : la Barre des propriétés ainsi que l'option "Flex Tables" permettent de visualiser et introduire les propriétés des différents composants.

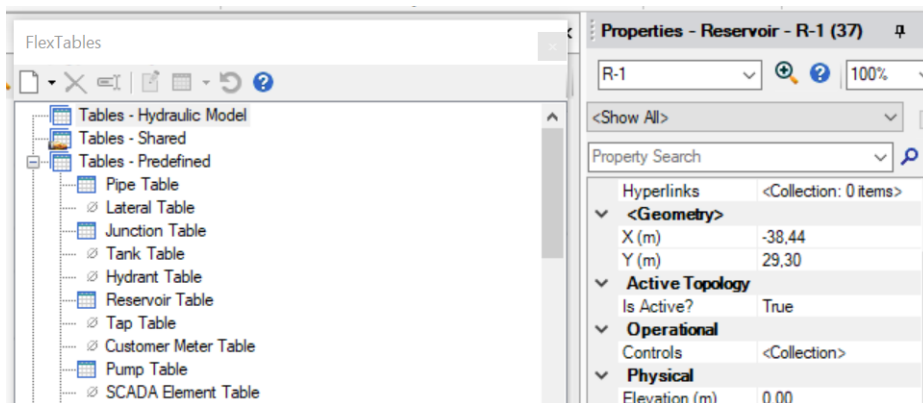


Figure II. 3 : FlexTables et Barre des propriétés

- Ajout ou création des nœuds du réseau en précisant leurs propriétés : leurs étiquètes, leurs élévation, etc.(à partir de la barre des propriétés ou de "FlexTable : Junction Table).

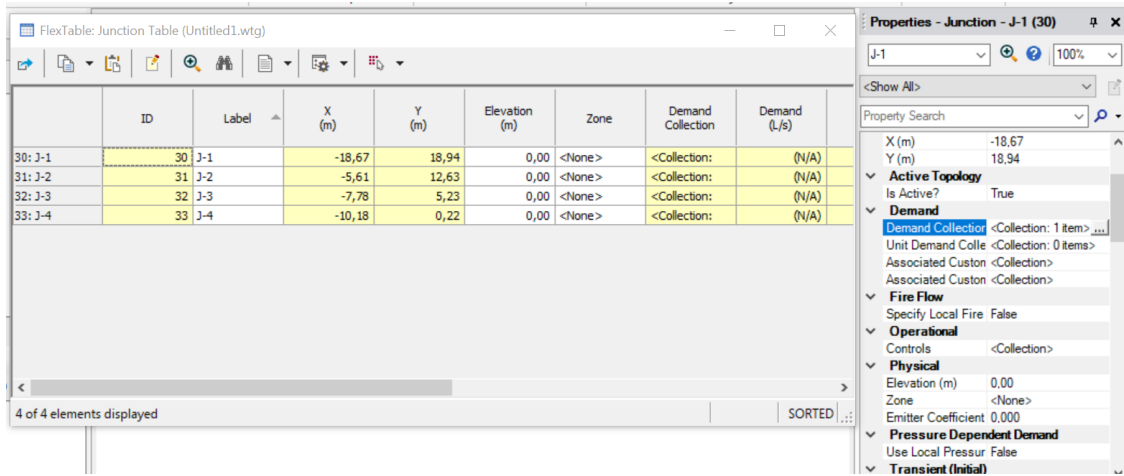


Figure II. 4 : Barre de propriétés et table des nœuds

- Ajout ou création des conduites avec leurs propriétés telles que : leurs longueurs, le type du matériau des conduites utilisés et leurs diamètres.

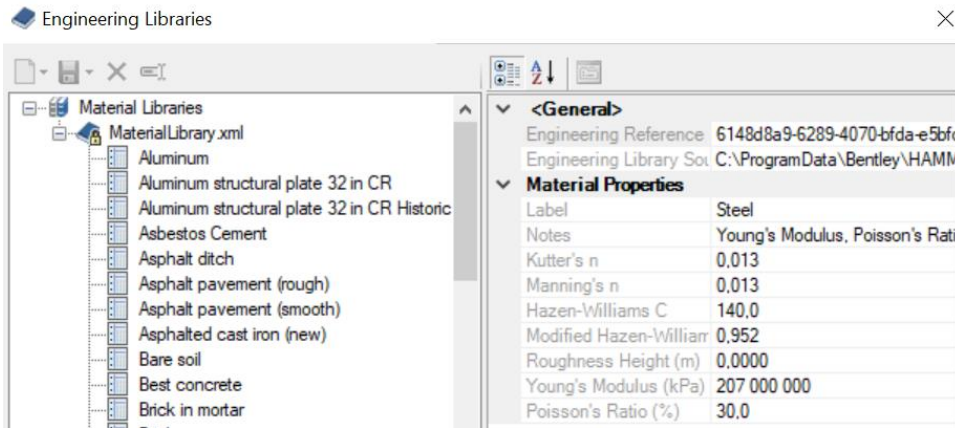


Figure II. 5 : Bibliothèque des matériaux

NB : l'option "Global Edit" permet d'attribuer la même propriété (élévation des nœuds, longueurs ou diamètres des conduites, type de matériau, etc.) à tous les composants. L'option "Statistics" permet de faire la somme des valeurs, par exemple : la somme des longueurs des conduites.

- Ajout des réservoirs en donnant leurs côtes de terrain et les côtes du trop-plein.
- Ajout des pompes en spécifiant leurs paramètres de définition tels que : le point de fonctionnement, le rendement, la puissance absorbée, la vitesse de rotation, etc. (sélectionner la pompe après dans la barre des propriétés cliquer "Pump Definition → Edit Pump Definitions → New" et saisir les informations de la pompe).

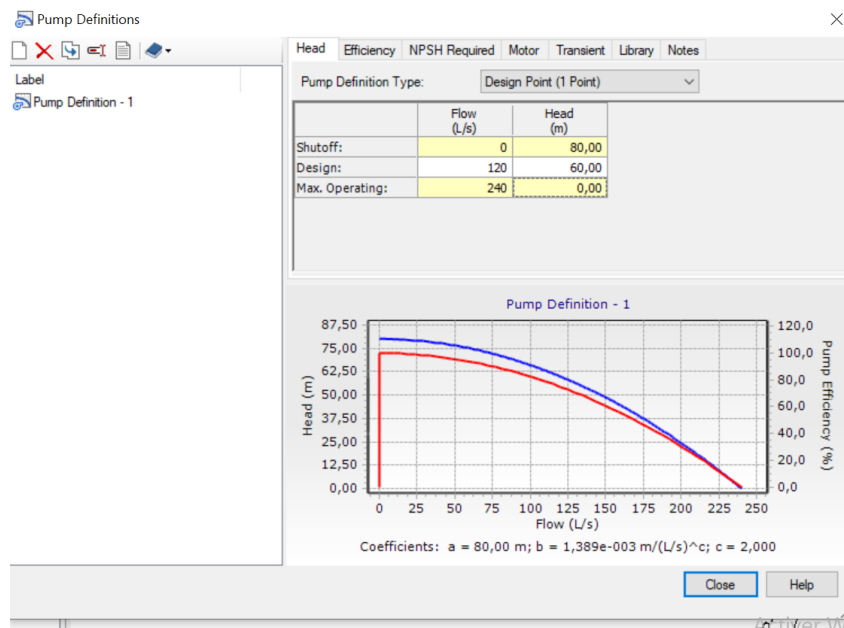


Figure II. 6 : Pump Definitions

- Ajout d'autres accessoires tels que : les clapets anti-retour, les vannes, les réducteurs de pression etc. tout en précisant leurs propriétés.
- Choix de la formule à utiliser pour le calcul des pertes de charges à partir de "Analysis → Options → Steady State/EPS Solver → Friction Method" ; la formule de Darcy-Weisbach et de Hazen-Williams sont les plus couramment utilisés.

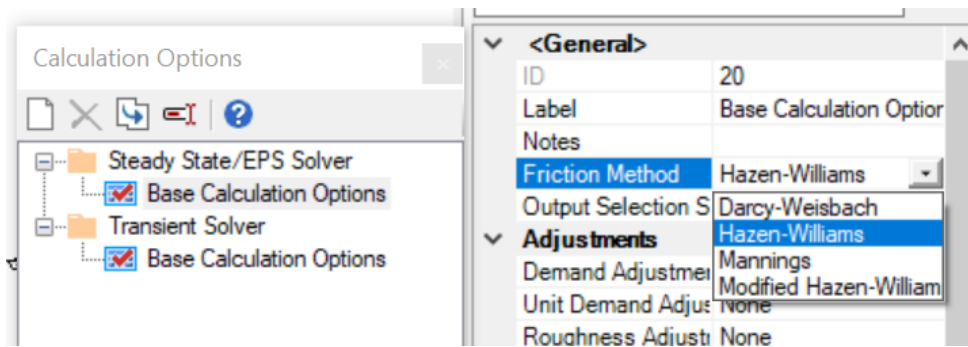


Figure II. 7 : Choix de la formule de calcul des pertes de charge

- Pour Calculer les conditions initiales en régime permanent du modèle, on clique sur "Analysis → Initial Conditions". S'il existe un problème dans la saisie des données, on peut savoir l'origine de ce dernier dans la barre "User Notifications".

II.4.2.Simulation d'un régime transitoire

Pour faire la simulation dans régime transitoire sans équipements de protection du coup de bélier il faut d'abord :

- Sélectionner les points d'intérêt qu'on veut afficher l'historique transitoire (ou variation temporelle du débit, de la hauteur et des volumes d'air ou de vapeur), généralement ces points sont : au niveau de la pompe et des nœuds à proximité (on peut également ajouter d'autres points d'intérêt ou choisir tout les points). Pour faire cette tâche on clique "Analysis → Options → Transient Solver → Report Points → Selected Points".

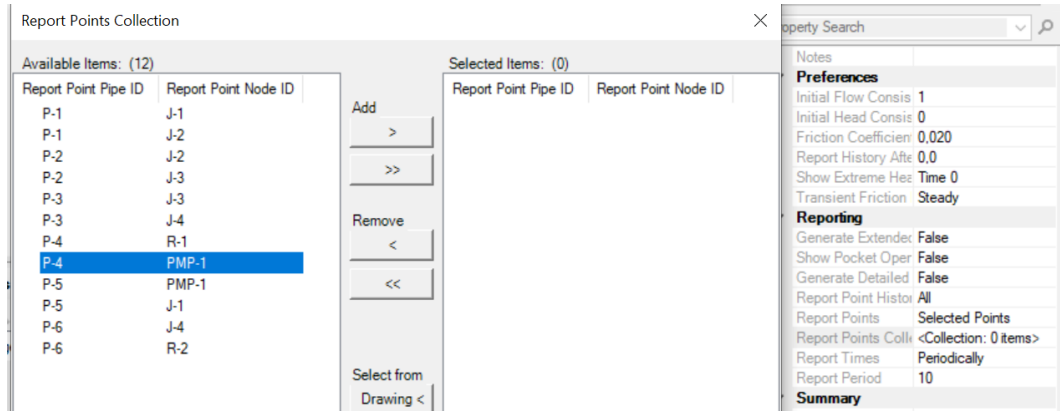


Figure II. 8 : Report Points Collection

- Choisir le type de durée d'exécution (Run Duration Type), soit "Time" ou "Time Steps" (on choisi "Time") et on introduit la durée dans "Run Duration (Time)".
- On calcul la célérité d'onde soit par "Wave Calculator" ou on peut l'introduire directement dans "Summary → Pressure Wave Speed".
- On laisse la valeur par défaut de la pression de vapeur. Et on change "Generate Animation Data" du "False" au "True".

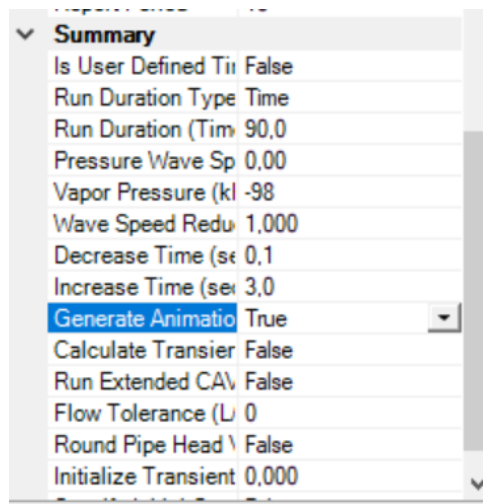


Figure II. 9 : Transient Solver : Summary

- On doit créer un profil qui donne l'élévation et la charge Hydraulique, pour faire ça on clique sur "View → Profile → New → Select from Drawing". En sélectionnant le point

amont et le point aval tout les point intermédiaire seront sélectionner. (Pour voir le profil cliquer sur "Open Profile").

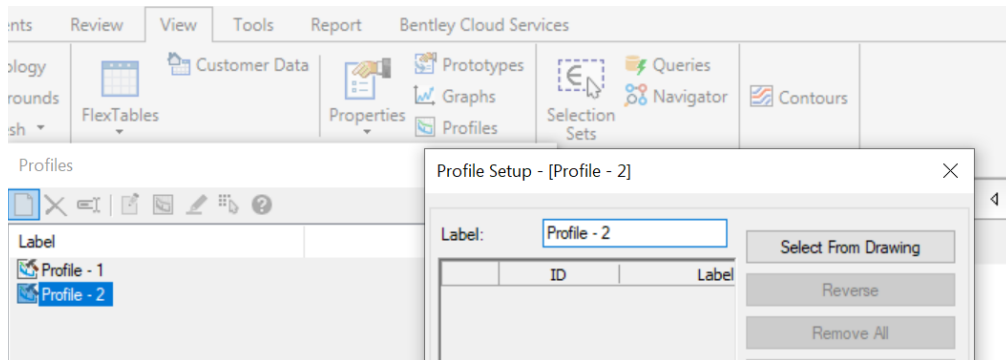


Figure II. 10 : L'outil des profils

- Dans la définition de la pompe, on doit vérifier qu'on a introduit la puissance absorbé, la vitesse de la pompe et que la case "Reverse Spin Allowed" soit décocher dans la barre "Transient". Et dans les propriétés de la pompe "Transient (Operational)" on choisi "Pump Type (Transient) → Shut down After Time Delay" et on introduit le diamètre de la vanne, la durée avant la panne du courant.
- Dans "Analysis" on clique "Validate" pour vérifier qu'il n'y a pas un problème puis on clique sur "Compute" pour faire la simulation.
- Pour voir les résultats on clique sur "Transient Results Viewer".
- Pour faire la simulation avec des équipements de protection on peut créer un nouveau scénario dans "Analysis → Scenarios → New → Child Scenario → Make Current" puis dans "Alternatives → Active Topology → New" pour introduire un scénario par exemple avec : un ou plusieurs réservoirs anti-bélier, des ventouses, etc. ou on peut directement introduire ces équipement dans le modèle de base :
 - On introduit un ou plusieurs dispositifs de protection contre le coup de bélier en spécifiant leurs propriétés, par exemple : pour un anti-bélier on introduit son élévation, son volume, le diamètre de sa bouche de connexion, etc. ou pour une ventouse les diamètres d'entrée et de sortie de l'air.
 - Nous devons mettre à jour les points de rapport et le profile.

On exécute la simulation et on compare les résultats de cette simulation avec ceux de la simulation sans protection pour déterminer les caractéristiques nécessaires pour ces équipements afin de protéger contre le phénomène du coup de bélier.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation globale du logiciel Bentley HAMMER, nous avons parlé des équations de base que ce logiciel utilise et les différentes fonctionnalités qu'il offre. Enfin on parlé des données, de la configuration et des étapes nécessaire pour effectuer la simulation via ce logiciel.

Ce logiciel peut exécuter la simulation d'un régime permanent, tout comme WaterCad, mais il spécialiser dans la simulation des régimes transitoires, avec la possibilité d'exécuter, d'évaluer, de visualiser et de comparer un nombre illimité de scénarios au sein d'un seul fichier.

Chapitre III: Etudes menées par des chercheurs

Introduction

En raison de sa popularité, de nombreux chercheurs ont utilisé le logiciel Bentley HAMMER dans leurs études. Dans ce chapitre, on va citer quelques études élaborées par ces chercheurs pour évaluer si ce logiciel HAMMER est à la hauteur de sa réputation.

III.1. Comparaisons des effets des réservoirs surélevés et les réservoirs d'air sur la pression du régime transitoire

(DARWEESH, 2021) a réalisé une étude sur l'effet de l'emplacement et du volume des réservoirs surélevés sur les pressions dans un régime transitoire qui résulte de la défaillance soudaine des pompes, ainsi qu'une comparaison entre les impacts des réservoirs surélevés et des réservoirs d'air sur le coup de bélier.

Le système d'eau potable qu'il a choisi d'étudier pour cette recherche est celui de la ville d'Assiut, la capitale de la Haute-Égypte. Il est composé de 10 mailles, 26 nœuds étiquetés "Ji" (la différence d'élévation des nœuds du réseau est faible, donc elle a été considérée comme une surface plane (élévation égale)), 35 conduites étiquetées "Pi". Toutes les conduites sont en fonte avec des diamètres allant de 300 à 1200 mm sur une longueur totale de 30 km. Il existe deux réservoirs d'alimentation en eau (R27 et R28), à partir desquels l'eau est pompée dans le réseau, avec une demande de base moyenne de 1,256 m³/s à travers deux stations de pompage (PU36 et PU37). Les deux stations ont les mêmes caractéristiques, mais la capacité de PU37 est deux fois que celle de PU36 (PU37 a une courbe de caractéristique avec des hauteurs de 70, 65, 60 m correspondant à des débits de 0, 0,6 et 0,8 m³/s, tandis que PU36 a les mêmes hauteurs avec des débits de 0, 0,3 et 0,4 m³/s). La célérité d'onde calculée par la formule de (KORTEWEG, 1878) est de 1 000 m/s. La figure ci-dessous montre le schéma du système :

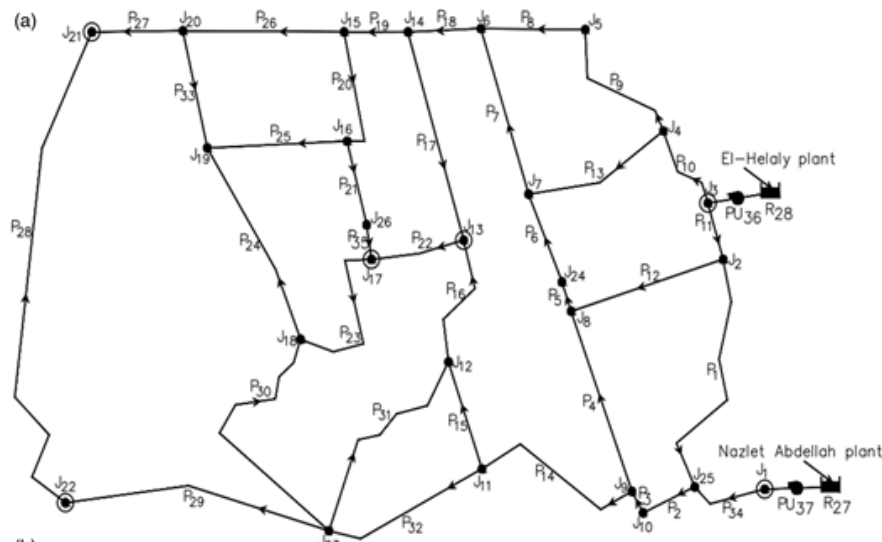


Figure III. 1 : Schéma du système d'AEP de la ville d'Assiut (source : (DARWEESH, 2021))

Il a obtenu le modèle du réseau d'eau de la ville d'Assiout a sous forme de fichier EPANET, puis il a été exporté vers HAMMER sous format (*.inp) pour valider le modèle, il a comparé les résultats calculés par Bentley HAMMER à ceux calculés par (CHAUDHRY, 2014), qui a développé un programme informatique en langage FORTRAN basé sur la méthode des caractéristiques (MOC) pour analyser et résoudre les conditions transitoires induites par l'arrêt soudain des pompes en fonctionnement dans une conduite en charge.

La Figure ci-dessous montre les résultats de (CHAUDHRY, 2014) par rapport à ceux de Bentley HAMMER. On peut constater à partir des graphes que la comparaison présente une bonne concordance avec des coefficients de corrélation (R^2) allant de 98,9 à 99,8 %. Une fois que les résultats de Bentley HAMMER ont été validés, ils peuvent être utilisés pour simuler le comportement transitoire dans le réseau d'approvisionnement en eau d'Assiout avec différentes configurations de réservoirs surélevés.

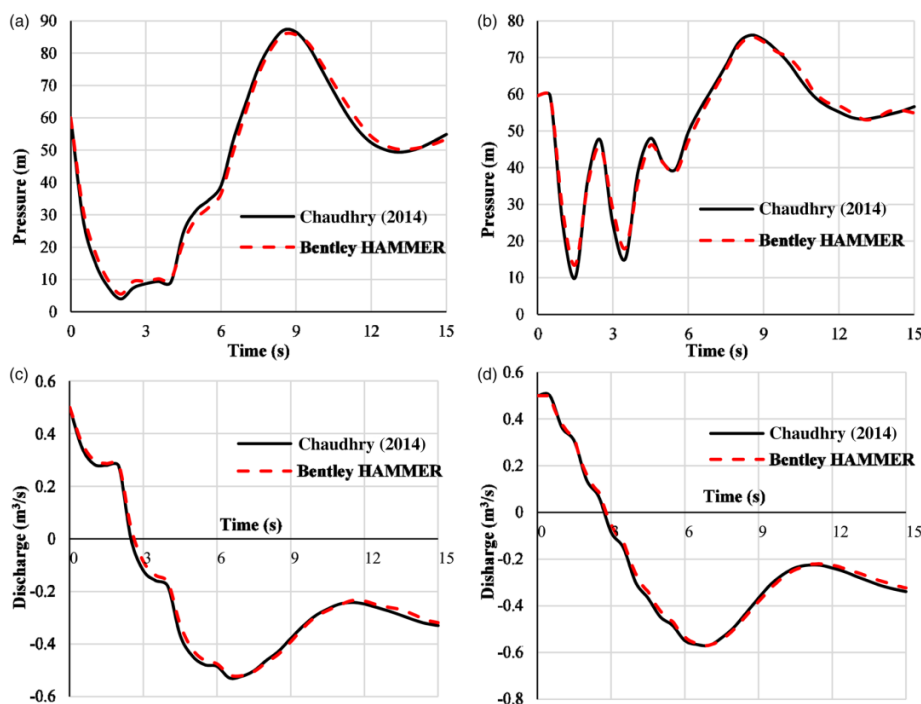


Figure III. 2 : Comparaison entre Bentley HAMMER et CHAUDHRY (source:(DARWEESH, 2021))

Pour avoir une idée de la situation transitoire hydraulique à l'intérieur du système, il a d'abord simulé et analysé le système sans réservoir surélevé, puis en intégrant un réservoir surélevé de différents volumes (5 000, 7 500 et 10 000 m³) chaque fois dans des divers endroits dans le système (près des installations de pompage (J1 et J3), au milieu (J13 et J17), et à la limite du réseau (J21 et J22)). Dans toutes les simulations, l'analyse été réalisée pour un scénario de défaillance soudaine de toutes les pompes en fonctionnement pendant l'heure de pointe.

Les résultats qu'il a obtenus indiquent que les réservoirs surélevés peuvent améliorer efficacement les pressions extrêmes à l'intérieur et autour du réservoir, mais qu'il subsiste néanmoins des pressions négatives en certains points éloignés. De plus, à mesure que le volume du réservoir surélevé augmente, les pressions transitoires s'améliorent relativement.

Dans son étude de cas, l'emplacement le plus approprié pour le réservoir surélevé est à l'extrémité du réseau, car la pression minimale est de -3,3 m (améliorée de 67 % par rapport à l'absence de réservoir), tandis qu'elle est de -10,0 m (0 %) et de -4,6 m (54 %) au milieu et au près de la station de pompage, respectivement.

Pour comparer l'influence des réservoirs d'air et des réservoirs surélevés sur les surpressions, il a étudié à nouveau le système d'eau potable de la ville d'Assiout en utilisant uniquement des réservoirs d'air, car c'est une méthode efficace pour se protéger contre les risques de coup de bélier. Il a utilisé la méthode d'essai et d'erreur, installant deux réservoirs d'air d'une capacité totale de 150 m³ (75 m³ chacun), au lieu des réservoirs de stockage, situés aux stations de pompage (PU36 et PU37), il a constaté que les réservoirs d'air peuvent atténuer efficacement les surpressions extrêmes dans des limites acceptables (pression minimale de -0,8 m et pression maximale de 35,6 m).

Ainsi, il a conclu que les réservoirs d'air comprimé protègent efficacement les canalisations d'eau contre le problème du coup de bélier plus que les réservoirs surélevés, où la pression minimale a été améliorée de 90 % et la pression maximale a augmenté de 1 % par rapport à l'absence de protection. En revanche, l'utilisation d'un réservoir surélevé d'une capacité de 10 000 m³ à J21 n'a amélioré la pression minimale dans le réseau que de 67 %, et la pression maximale a augmenté de 24 % par rapport au cas sans réservoirs surélevés.

III.2. L'effets des ventouses sur les pressions transitoires

(XU, et al., 2023) Ont étudié un cas de distribution d'eau par refoulement via une conduit en acier ordinaire DN800, depuis la source (une rivière) qui se situe à une élévation de 72,50 m jusqu'à réservoir qui le point de décharge à une élévation de 103,96 m. La station de pompage comporte trois pompes (2 en fonctionnement et 1 de secours), chacune ayant un débit de conception de 0,50 m³/s, une puissance de 355 kW et une Hmt de 45m. Ils ont créé un modèle de la canalisation en utilisant le logiciel Bentley HAMMER pour analyser et simuler le régime permanent et transitoire (sans et avec des dispositifs de protection).

Ils ont constaté que lorsque les pompes fonctionnent de manière stable, la pression dans la canalisation est conforme à la pression de conception, sans fluctuations importantes. Cependant, lors de l'arrêt soudain des pompes dans le cas où aucun dispositif de protection contre le coup de bélier n'est installé, l'analyse montre d'importantes fluctuations de pression, La pression maximale de la canalisation en conditions transitoires est supérieure de 78,48 mètres à celle en conditions stables, la pression générée par le coup de bélier lorsque la pompe s'arrête équivaut à 2,74 fois la pression de conception. En outre, l'analyse révèle la présence de pression négative le long de la conduite, ce qui va entraîner la vaporisation de l'eau dans la canalisation en conditions réelles de fonctionnement. Cela indique un risque élevé de rupture et de dommage de la canalisation en l'absence de mesures de protection. La figure suivante montre les résultats de cette simulation :

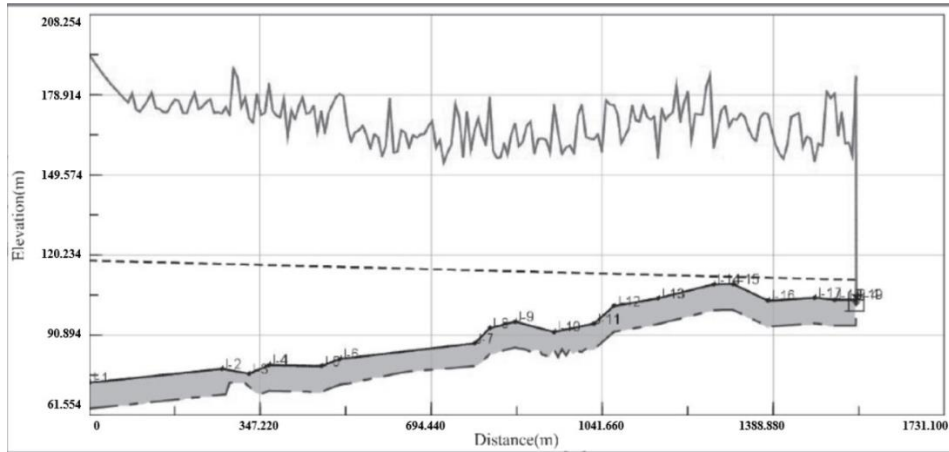


Figure III. 3 : Résultats d'analyse de régime transitoire sans protection (source: (XU, et al., 2023))

Dans cette étude (XU, et al., 2023) ont choisi d'utiliser des ventouses comme mesure de protection contre le coup de bélier, pour réaliser l'analyse et le calcul de la protection contre le coup de bélier. Les ventouses ont été placées au niveau des points hauts : J-8, J-9, J-14 et J-15, les étiquettes des ventouses dans HAMMER sont définies comme AV-8, AV-9, AV-14 et AV-15. Lorsqu'un coup de bélier se produit, les ventouses permettent de remplir rapidement le vide dans la canalisation, d'empêcher la liquéfaction du liquide, et en même temps, lorsque la pression dans la canalisation augmente, le gaz dans la canalisation peut être libéré lentement. Après des calculs, ils sont déterminés un diamètre d'entrée d'air de la ventouse de 250 mm, et le diamètre de la sortie d'air est de 20 mm.

Après la simulation par HAMMER, les résultats montrent que la pression maximale est également réduite, passant de 123,48 m avant l'ajout des mesures de protection à 59,4 m après l'ajout des ventouses. De plus, l'enveloppe de pression minimale de la canalisation se trouve au-dessus du profil de la canalisation, ce qui élimine pratiquement la pression négative dans les conditions transitoires et évite la vaporisation dans la canalisation due à un vide excessif. Les résultats obtenus sont montrés dans la figure suivante:

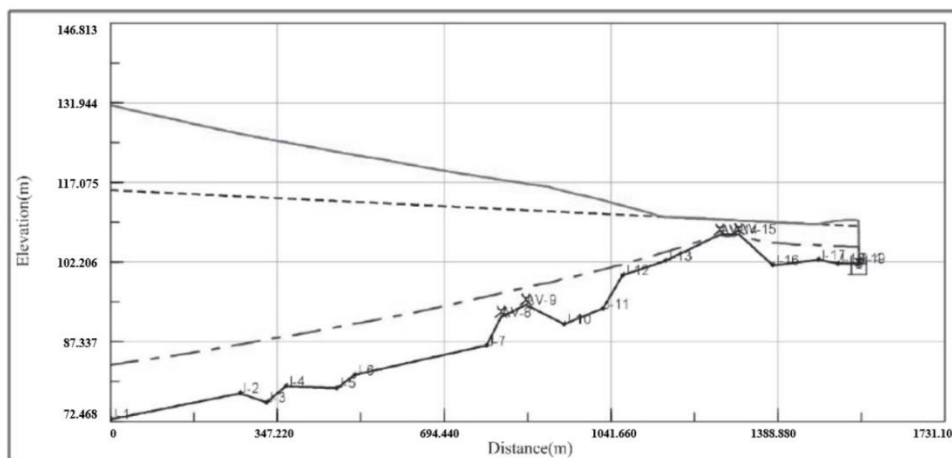


Figure III. 4 : Résultats d'analyse de régime transitoire après l'utilisation des ventouses (source: (XU, et al., 2023))

Leur étude illustre l'importance de l'analyse du coup de bélier dans la conception des canalisations d'eau sous pression et démontre l'efficacité des mesures de protection, en particulier l'utilisation des ventouses, pour réduire les dommages potentiels liés au ce phénomène.

III.3. Comparaison entre les résultats obtenus par Bentley HAMMER et par la formule de la législation grecque

II.3.1.La formule de législation grecque

La lettre circulaire D.22.200/30 – 07 – 1977 publiée par le Ministère des Travaux Publics intitulée « Instructions pour le contrôle des réseaux d'irrigation des études tubulaires » suggère que la formule utilisée pour calculer la pression transitoire maximale qui se développe au cours du phénomène de coup de bélier est la formule de Joukowski (formule proposé parla législation grecque) montré ci-dessous (TOULOUMIDIS, et al., 2020):

$$\Delta p = \frac{a \cdot \Delta V}{g} \quad (\text{III. 1})$$

Avec :

- Δp : pression transitoire maximale (m).
- a : vitesse de propagation de l'onde élastique (m/s).
- ΔV : variation de la vitesse (m/s).
- g : accélération de la gravité (m²/s).

NB : Cette formule ne permet pas de calculé les pressions transitoire minimale.

II.3.2.Discussion d'étude et de résultats

(TOULOUMIDIS, et al., 2020)Ont choisi un réseau d'irrigation comme sujet de cette étude, situé dans la municipalité d'Amyntaio, dans le nord de la Grèce, qui fait partie de la zone "Natura". Le réseau a été conçu pour couvrir une superficie de 220 ha sur une superficie totale d'environ 450 ha. La source d'eau pour ce réseau d'irrigation sera le lac "Zazari", situé à proximité des terres agricoles.

Ce réseau d'irrigation se compose d'une conduite principale et de dix conduites secondaires d'une longueur totale d'environ 11 km. Chaque nœud de branchement est marqué avec les lettres A, B, C, D, E, F, G, H, et I. Les tuyaux sont polyéthylène PE PN12.5, et les buses rotatives installées fournissent un débit de 7,5 l/s. Des ventouses et de clapets anti-retour sont installées au début de chaque conduite secondaire la pompe est installée au près du lac, cinq de régulation de débit sont installées appelées FCV-B, FCV-C, FCV-D, FCV-F, FCV-G, FCV-H. Afin de simplifier la modélisation du réseau, ils ont choisi de simulée la pompe comme un réservoir.

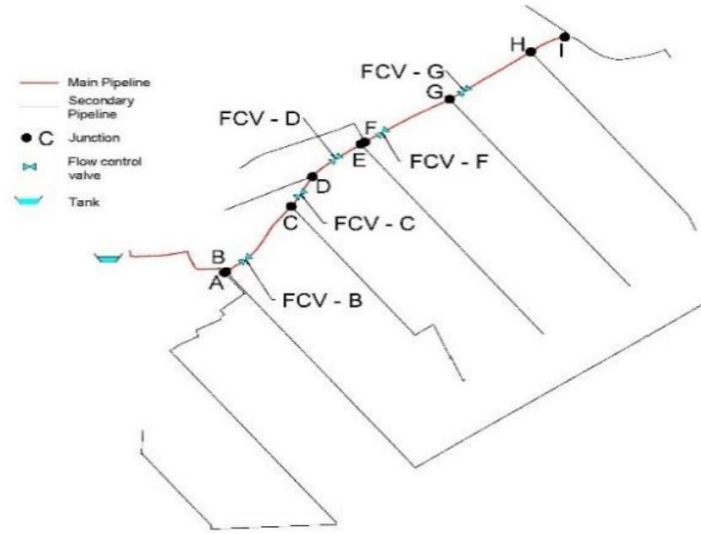


Figure III. 5 : Schéma représentatif du réseau d'irrigation (Source : (TOULOUMIDIS, et al., 2020))

Ils ont fait une simulation par HAMMER pour cinq scénarios différents pour chacune des 5 vannes : fermeture de la vanne après 0 sec, 30 sec, 45 sec, 60 secs, 90 secs. La figure suivante montre les pressions transitoires maximales et minimales développées dans le cas du pire scénario (0 seconde) :

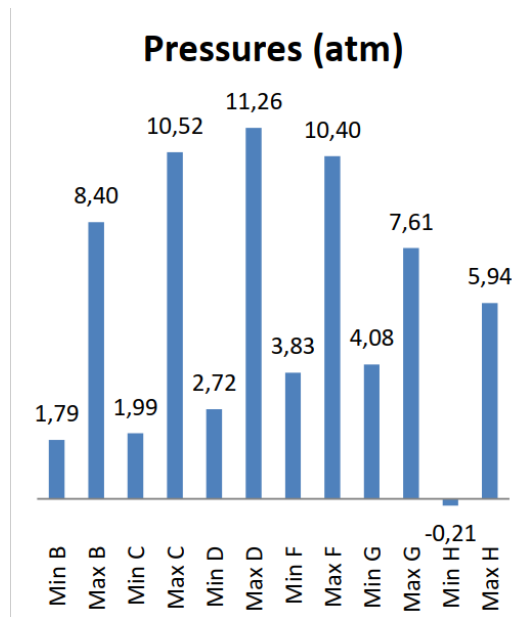


Figure III. 6 : les pressions transitoires maximales et minimales développées dans le cas du pire scénario (0 seconde) (Source : (TOULOUMIDIS, et al., 2020))

Ils ont trouvé que la pression transitoire maximale développées au niveau des conduites secondaires est inférieure à la pression maximale que les tuyaux peuvent supporter (12.5 bar). En revanche au niveau du nœud H il existe une pression négative (-0,21).

Dans le cas où ils ont utilisés la formule proposé par la législation grecque, ils ont trouvé que les pressions transitoires maximales calculées, ne dépassent pas les pressions maximales que les tuyaux peuvent supporter. (La formule ne permet pas de calculé les pressions transitoire minimale.)

La figure ci-dessous montre une comparaison entre les pressions transitoires maximale obtenues par HAMMER et ceux calculées par la formule de Joukowski :

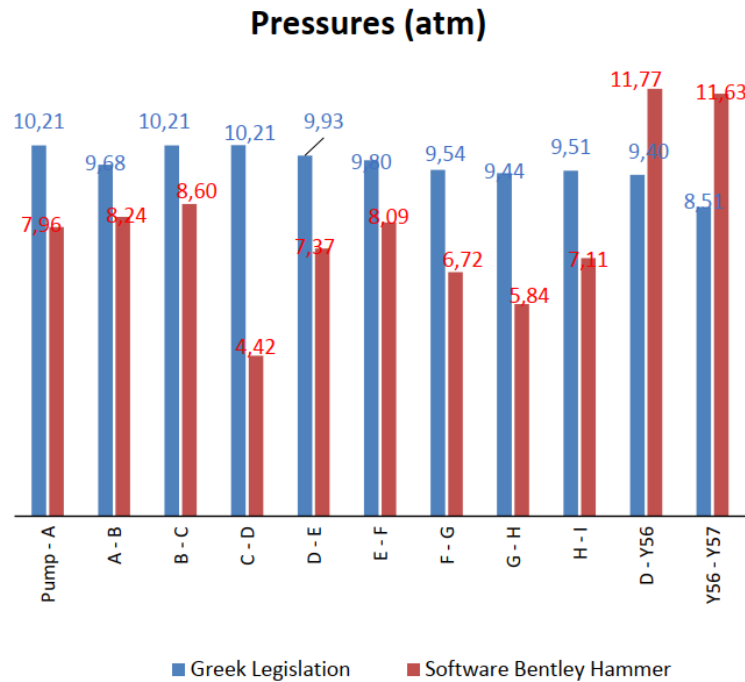


Figure III. 7: comparaison entre les pressions transitoires maximale obtenues par HAMMER et ceux calculées par la formule de Joukowski (Source : (TOULOU MIDIS, et al., 2020))

D'après la figure, il est évident que, dans la majorité des situations, la pression transitoire maximale calculée en utilisant la formule de Joukowski dépasse celle obtenue grâce à Bentley HAMMER. Cependant, dans deux conduites secondaires, la pression du logiciel excède la pression calculée avec la formule proposée par la législation grecque.

En résumé, leur étude met en évidence que la formule préconisée par la législation grecque ne suffit pas à garantir la protection du réseau, ce qui pourrait souvent entraîner une surdimensionnement de celui-ci. Les statistiques de la comparaison qu'ils ont réalisée indiquent que la différence entre les résultats des deux modèles peut avoir un impact considérable sur les coûts et le fonctionnement du système de canalisation. En outre, le logiciel Bentley HAMMER offre divers avantages, tels que la capacité à calculer les pressions transitoires négatives, l'intégration d'équipements de protection contre le coup de bélier, la visualisation des résultats, etc.

III.4. Comportement d'une conduite principale dans un régime transitoire en fonction de son matériau

(POPA, et al., 2021) Ont réalisé une étude pour analyser et déterminer le comportement d'une conduite d'adduction principale vis-à-vis du coup de bélier, en utilisant trois types de matériaux différents : la fonte ductile, le PEHD et le Polyester renforcé fibre de verre (PRV). Le tableau suivant montre les caractéristiques de ces matériaux :

Tableau III. 1 : les caractéristiques des matériaux utilisés

	Fonte ductile	fibre de verre renforcée	PEHD
Diamètre (mm)	400	400	450
PN	40	16	16
Module de Young (Gpa)	170	50	0.8
Célérité d'onde (m/s)	1450	1150	763
Coefficient de poisson	0.28	0.35	0.46
Rugosité (mm)	0.12	0.013	0.01

Le système hydraulique qui choisi comme sujet de leur étude, comprend une conduite d'adduction principale d'une longueur de 12 800 m, alimentée par une station de pompage qui fournit un débit de 125 l/s. Le réservoir d'aspiration a une fondation située à 123,50 m au-dessus du niveau de la mer Noire, avec un niveau d'eau minimum à l'intérieur à 124,20 m. Le point de décharge est un réservoir de stockage en surface libre, dont le niveau d'eau maximum est de 233,50 m. la figure ci-dessous montre le profil de la conduite et la ligne piézométrique pour un régime permanent obtenu en utilisant le logiciel HAMMER :

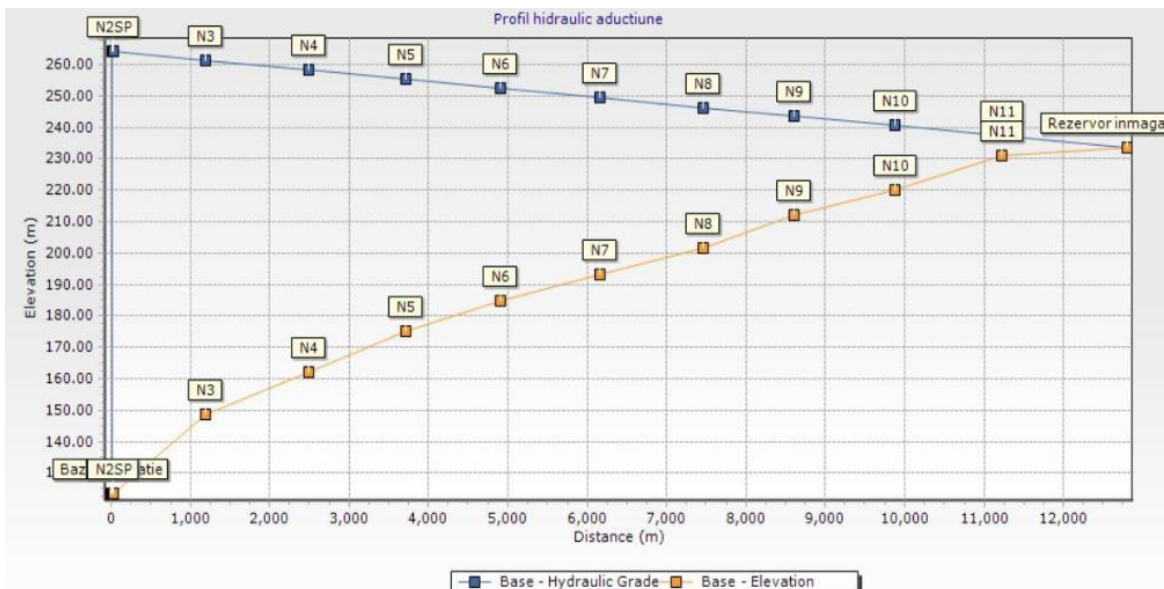


Figure III. 8 : Profil et ligne piézométrique de la conduite d'adduction principale (source : (POPA, et al., 2021))

Afin d'observer le comportement de la conduite en fonction de son matériau dans un régime transitoire, ils ont fait une simulation par HAMMER sans équipement de protection contre le coup de bélier, et avec.

II.4.1. Comportement de la conduite en fonte ductile

La figure (III.9) montre que pour la conduite en fonte ductile dans le cas où aucun dispositifs de protection contre le coup de bélier n'est installé, la ligne de pression maximale débute à 27 bars à l'entrée de la conduite, décroisse progressivement jusqu'à 10 bar à la sortie. Sachant que la pression que cette conduite peut supporter est de 40 bar, donc en garantissant que les raccords le long de la conduite (coudes, té, vannes, joints de démontage, etc.) sont dimensionnés en fonction de la pression maximale à chaque point du profil longitudinal, il est possible de garantir un fonctionnement stable sans nécessité d'installations de protection contre le coup de bélier.

De plus, la ligne de pression minimale ne descend pas en dessous du niveau géométrique de la conduite (la ligne jaune), indiquant que les ventouses positionnées aux points hauts sont adéquates pour prévenir toute pression inférieure à la pression atmosphérique.

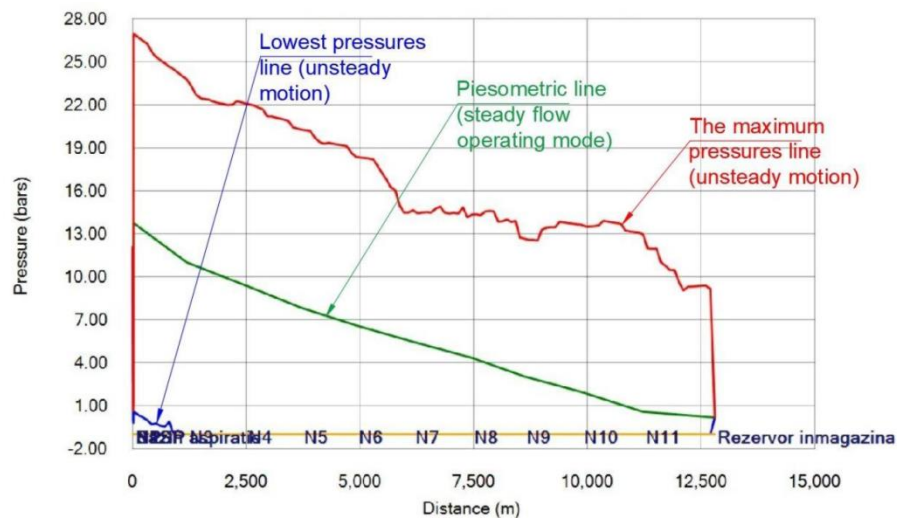


Figure III. 9 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en fonte ductile sans installation des équipements de protection (source: (POPA, et al., 2021))

II.4.2. Comportement de la conduite en PRV

Dans le cas où la conduite d'adduction est en PRV et sans installations des dispositifs de protection, la ligne de pression maximale atteint un maximum de 25.5 bar dans la section d'entrée de la conduite, dépassant ainsi de 9.5 bar la pression que cette conduite peut supporter. Sur les premiers 6 000 m la pression dépasse 16 bar en raison de la faible rugosité du PRV, tandis que sur le reste de la distance, la pression ne diminue pas de manière impressionnante, atteignant finalement 13 bar dans la section de sortie. Les résultats de la simulation sont affichés dans la figure ci-dessous :

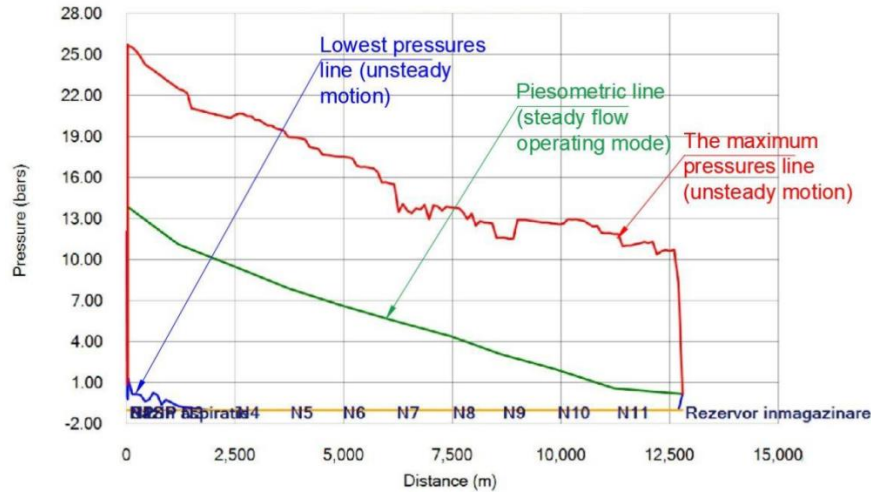


Figure III. 10 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en PRV sans installation des équipements de protection (source: (POPA, et al., 2021))

Pour résoudre ce problème, (POPA, et al., 2021) ont proposé deux solutions : la première consiste à redimensionner la classe de pression de la conduite et des raccords, mais ils ne l’ont pas adoptée car elle peut être coûteuse, en raison de la longueur totale de la conduite et des raccords à redimensionner est de 6 000 mètres, avec des pressions allant jusqu’à 26 bar. Par conséquent, ils ont opté pour la 2^{ème} solution, qui est de dimensionner des équipements de protection tels que des soupapes de décharge ou des réservoirs d’air. Après des simulations, ils ont décidé de considérer un réservoir d’air de 2 500 litres, afin de maintenir la pression jusqu’à la pression nominale de la conduite (PN16). La figure suivante montre les résultats de simulation pour une conduite en PRV avec l’installation d’un réservoir d’air de 2 500 litres :

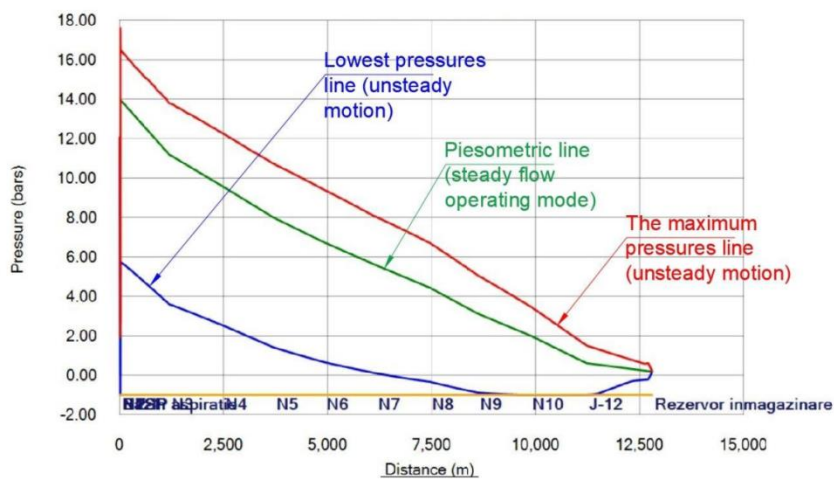


Figure III. 11 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en PRV avec l’installation d’un réservoir d’air de 2500 litres (source: (POPA, et al., 2021))

II.4.3. Comportement de la conduite en PEHD

Pour la conduite en PEHD, la célérité, directement liée au module de Young, est la plus basse, ce qui conduit à les résultats illustrés dans la figure (III.12). On observe que le

phénomène du coup de bélier se manifeste de manière moins violente que dans les deux autres matériaux. La pression maximale à l'intérieur de la conduite ne dépasse pas 21 bar dans la section d'entrée et décroît jusqu'à 7 bar dans la section de sortie. Toutefois, il convient de noter que la pression nominale maximale de la conduite (PN16) est dépassée sur les premiers 3 000 mètres de la conduite. De plus, la ligne de pression minimale ne descend pas en dessous du niveau géométrique de la conduite, garantissant ainsi l'absence de problèmes liés aux basses pressions lors de l'exploitation.

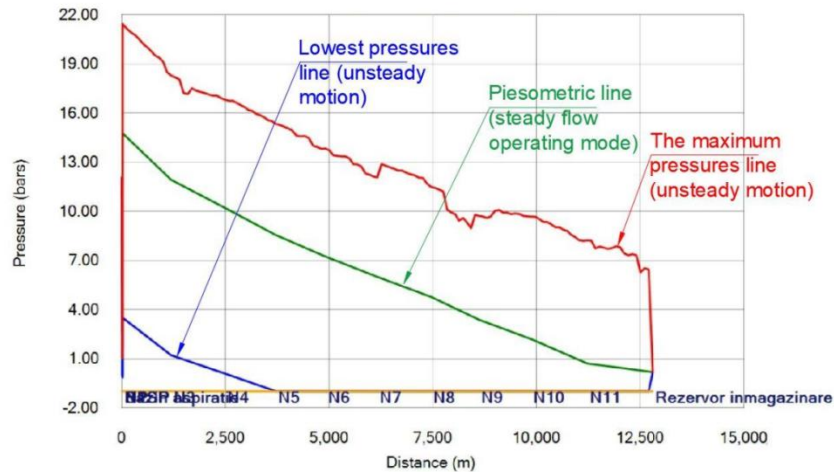


Figure III. 12 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en PEHD sans installation des équipements de protection (source: (POPA, et al., 2021))

Dans ce cas ils ont suggéré de changer la classe de la conduite avec pour la passer à une PN20. Cependant si la conduite est déjà installée, ils ont proposée est de redimensionner correctement la conduite et les raccords dans les premiers 3 000 mètres où à mettre en place des équipements de protection. Dans cette étude, ils ont opté pour l'installation d'un réservoir d'air de 100 litres. La figure suivante montre les résultats de simulation pour une conduite en PEHD avec l'installation d'un réservoir d'air de 100 litres :

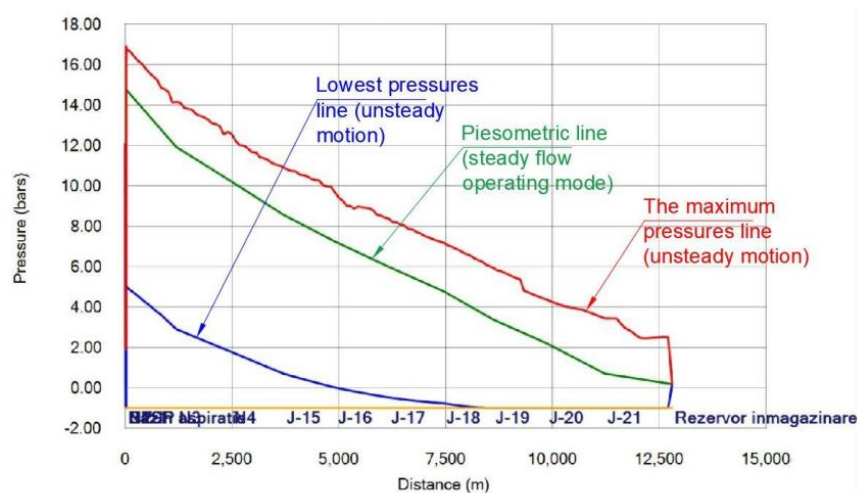


Figure III. 13 : Résultats de simulation du régime transitoire pour la conduite en PEHD avec l'installation d'un réservoir d'air de 100 litres (source : (POPA, et al., 2021))

II.4.4.Choix de matériaux le plus adapté

Ils ont effectué une comparaison entre ces conduites fabriquées à partir de différents matériaux. Les conduites en fonte ductile ont une classe de pression élevée pouvant atteindre 40 bars, ce qui signifie qu'aucun investissement supplémentaire n'est nécessaire pour protéger le système hydraulique contre le coup de bélier. Cependant, la fonte ductile est le matériau le plus coûteux de la liste. En ce qui concerne les canalisations en PRV, qui sont les moins coûteuses en termes de matériaux, les coûts d'investissement pour la protection contre les coups de bélier seront plus élevés. Enfin, dans le cas des conduites en PEHD, qui sont plus flexibles et élastiques, les phénomènes de coup de bélier se manifestent moins violemment, entraînant des pressions plus faibles par rapport aux autres matériaux, mais il faut choisir une classe qui supporte la pression maximale, car plus la classe est élevée, plus la conduite est chère.

En fin de compte, ils ont conclu qu'il était essentiel de procéder à une comparaison complète du coût total de l'investissement, englobant la conduite, les raccords, ainsi que les équipements de protection contre les phénomènes de coup de bélier, afin de choisir la solution la plus adaptée. Il serait inadéquat de sélectionner le matériau d'une conduite sans évaluer la surpression dans un régime transitoire, afin de prendre en compte tous les équipements et installations supplémentaires requis.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cité des études menées par des différents chercheurs qui ont utilisé le logiciel HAMMER, tels que :

- (DARWEESH, 2021) qui l'a utilisé pour déterminer les effets de l'emplacement et du volume des réservoirs surélevés sur la pression du régime transitoire, puis il a comparé ceux avec les effets du réservoir d'air sur la pression transitoire.
- (XU, et al., 2023) ont utilisé le logiciel pour évaluer les effets des ventouses en régime transitoire.
- (TOULOUMIDIS, et al., 2020) ont réalisé une comparaison entre HAMMER et la formule proposée par la législation grecque.
- (POPA, et al., 2021) ont utilisé HAMMER pour étudier le comportement des conduites en régime transitoire en fonction de leur matériau.

D'après ces études, on peut conclure que le logiciel Bentley HAMMER offre des divers avantages et produits des résultats fiables.

Chapitre IV: Application réelle

Introduction

Dans ce chapitre, on va faire une simulation sans protection et avec protection en utilisant HAMMER pour une conduite de refoulement qui fait partie de la chaine de Chiffa et on va comparer et discuter les résultats obtenus.

IV.1. Données de base du système

Le système qui nous a choisi de simulé a été présenté comme sujet d'étude dans mon mémoire de fin d'étude intitulé "Diagnostic et réhabilitation du system de transfert prise de la Chiffa-Médéa (W. Médéa) ", ce système est composé de 3 stations de pompage (SP1, SP2 et SP3), 3 conduites de refoulement, 3 bâches d'aspiration au niveau de chaque station et un réservoir de décharge (RM).

Dans cette étude on va faire une simulation par HAMMER pour la conduite de refoulement SP1-SP2. Les données relatives à cette conduite sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 1 : Données de base du système

Tronçons	matériau de conduite	Diamètre (mm)	Épaisseur (mm)	Longueur (m)	Débit (l/s)	Hmt (m)	Hg (m)
SP1-SP2	Fonte	400	8,1	3750	173.611	266,25	251

La côte d'aspiration est à 389 m d'altitude et la côte d'arrivé est à 640m d'altitude.

Avec le tracé de l'adduction de refoulement disponible, en utilisant EpaCAD on l'a exporté dans Epanet, puis vers HAMMER. Ensuite, nous avons introduit dans le modèle les données nécessaires pour effectuer la simulation. La figure ci-dessous présente le profil en long et la ligne piézométrique de la conduite réalisée via HAMMER :

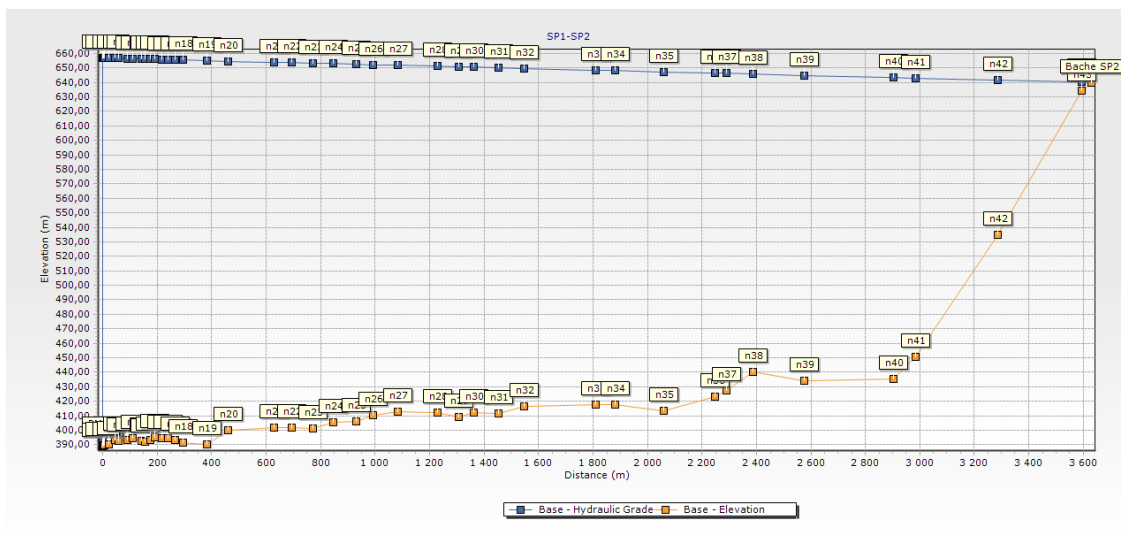


Figure IV. 1 : Profil en long et ligne piézométrique de la conduite de refoulement SP1-SP2

IV.2. Calcul de la célérité d'onde

On calculé la célérité d'onde en utilisant la fonction de "Wave Speed Calculator" intégré dans le logiciel, en introduisant le type de fluide et matériau utilisé.

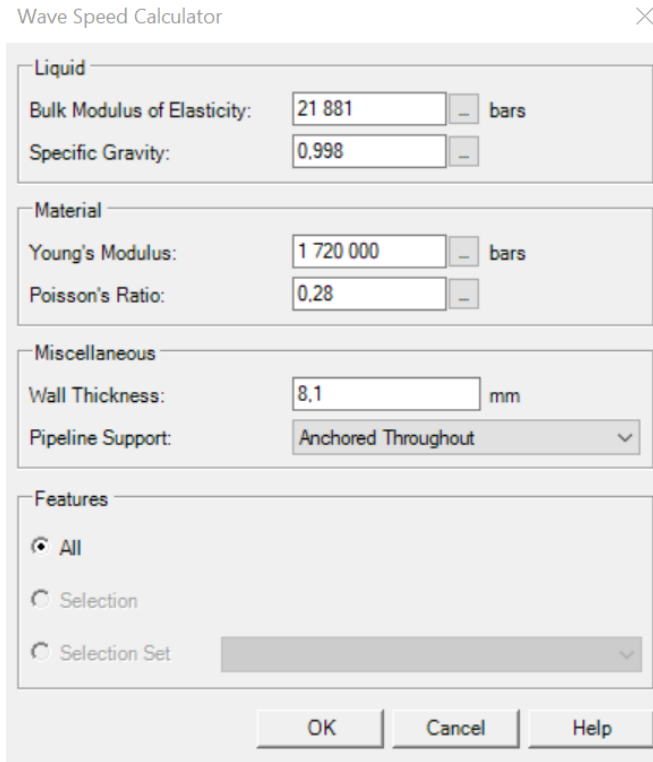


Figure IV. 2 : La fonction de "Wave Speed Calculator"

La célérité d'onde calculée par le logiciel est de 1178.37 m/s.

IV.3. Simulation sans protection anti-bélier

On va faire une simulation du modèle pour un scénario d'arrêt brusque de la pompe après 5 secondes. Le tableau ci-dessous présente les résultats obtenus :

Tableau IV. 2 : Résultats de la simulation sans protection anti-bélier

ID	Label	Elevation (m)	Head (Maximum, Transient) (m)	Head (Minimum, Transient) (m)	Pressure (Maximum, Transient) (bar)	Pressure (Minimum, Transient) (bar)	Vapor Volume (Maximum, Transient) (L)
102	n2	389,73	900,45	448,52	50	6	0
101	n3	390,22	887,92	438,85	49	5	0
100	n4	393,05	889,61	441,57	49	5	0
99	n5	392,81	876,01	443,02	47	5	0
98	n6	393,52	854,6	445,73	45	5	0

ID	Label	Elevation (m)	Head (Maximum, Transient) (m)	Head (Minimum, Transient) (m)	Pressure (Maximum, Transient) (bar)	Pressure (Minimum, Transient) (bar)	Vapor Volume (Maximum, Transient) (L)
97	n7	394,42	853,61	445,7	45	5	0
96	n8	392,43	844,07	449,7	44	6	0
95	n9	392,21	844,11	451,17	44	6	0
94	n10	392,22	844,13	452,44	44	6	0
93	n11	393,56	844,17	453,91	44	6	0
92	n12	394,91	844,2	455,17	44	6	0
91	n13	394,63	844,25	456,63	44	6	0
90	n14	394,38	844,3	457,86	44	6	0
89	n15	394,38	844,33	465	44	7	0
88	n16	393,43	844,38	471,23	44	8	0
87	n17	393,43	844,4	471,21	44	8	0
86	n18	391,41	844,45	471,16	44	8	0
85	n19	390,04	844,63	470,98	45	8	0
84	n20	399,78	844,76	470,83	44	7	0
83	n21	401,71	845,07	470,5	43	7	0
82	n22	402,06	845,19	470,38	43	7	0
81	n23	401,14	845,35	470,22	44	7	0
80	n24	405,37	845,48	470,08	43	6	0
79	n25	405,96	845,64	469,91	43	6	0
78	n26	410,17	845,76	469,79	43	6	0
77	n27	412,99	845,95	469,6	42	6	0
76	n28	412,01	846,25	469,29	43	6	0
75	n29	409,41	846,41	469,1	43	6	0
74	n30	412,36	846,51	468,99	43	6	0
73	n31	411,62	846,7	468,8	43	6	0
72	n32	416,39	846,89	468,61	42	5	0
71	n33	417,56	847,41	468,05	42	5	0
70	n34	417,59	847,56	467,89	42	5	0
69	n35	413,17	847,93	467,5	43	5	0
68	n36	423,22	848,32	467,08	42	4	0
67	n37	427,7	848,41	466,98	41	4	0
66	n38	440,25	848,6	466,77	40	3	0
65	n39	434,17	848,98	466,36	41	3	0
64	n40	435,61	846,7	465,63	40	3	0
63	n41	450,43	825,81	465,45	37	1	0
62	n42	534,93	762,43	524,95	22	-1	0
61	n43	634,22	715,83	624,24	8	-1	5,3

D'après le tableau (IV.2), il est clair que dans la majorité des nœuds, la pression transitoire maximale dépasse les 40 bars, ce qui est la limite de pression que la conduite peut supporter. De plus, des pressions négatives sont observées à l'extrémité finale de la conduite (n42 et n43). Par ailleurs, on note la présence d'un volume d'air dans la conduite au niveau du nœud 43.

La figure ci-dessous illustre deux graphes obtenus après la simulation du régime transitoire sans protection établie en utilisant HAMMER. Le premier graphique en haut, montre la variation du volume d'air le long de la conduite. Le 2ème en dessous, présente les lignes piézométriques maximales (en rouge) et minimale (en bleu). La ligne noire est la côte piézométrique à le moment actuelle, elle est délimitée par la ligne bleue en dessous et la ligne rouge au-dessus, elle varie au cours du temps de simulation pour décrire le comportement du phénomène du coup de bélier. Tandis que, la ligne verte représente le profil d'élévation de la conduite.

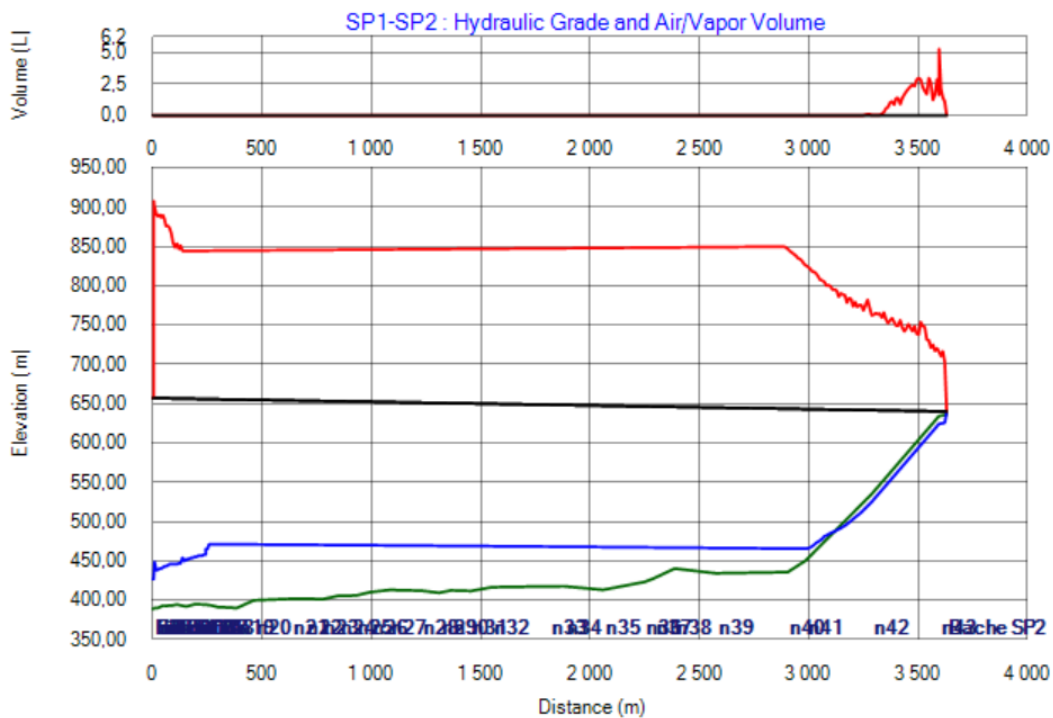


Figure IV. 3 : Lignes piézométriques et volume d'air pour la conduite SP1-SP2 sans protection

IV.4. Simulation avec protection anti-bélier

Nous allons exécuter une simulation du coup de bélier, en utilisant des différents scénarios avec le déploiement de divers équipements de protection, Sachant que :

- la station de pompage est équipé de 2 réservoirs anti-bélier de 3000 litres et une soupape de décharge qui a une pression de réglage de 28,5 bar et un diamètre DN100.
- Le volume du réservoir d'air calculé par la méthode de VIBERT est de 3000 litres.

Les scénarios qu'en va simuler sont les suivant :

- En utilisant un réservoir d'air anti-bélier de 3000 litres.
- En utilisant un réservoir d'air anti-bélier de 1000 litres.
- En utilisant un réservoir d'air de 1000 litres et une soupape de décharge.
- En utilisant un réservoir d'air de 1000 litres, une soupape de décharge et une ventouse.

IV.4.1. Réservoir d'air de 3000 litres

Pour ce cas, en vas utiliser un réservoir d'air de 3000 litres ce qu'est le volume calculé par la méthode de VIBERT, les résultats de cette simulation sont montrés dans la figure suivante :

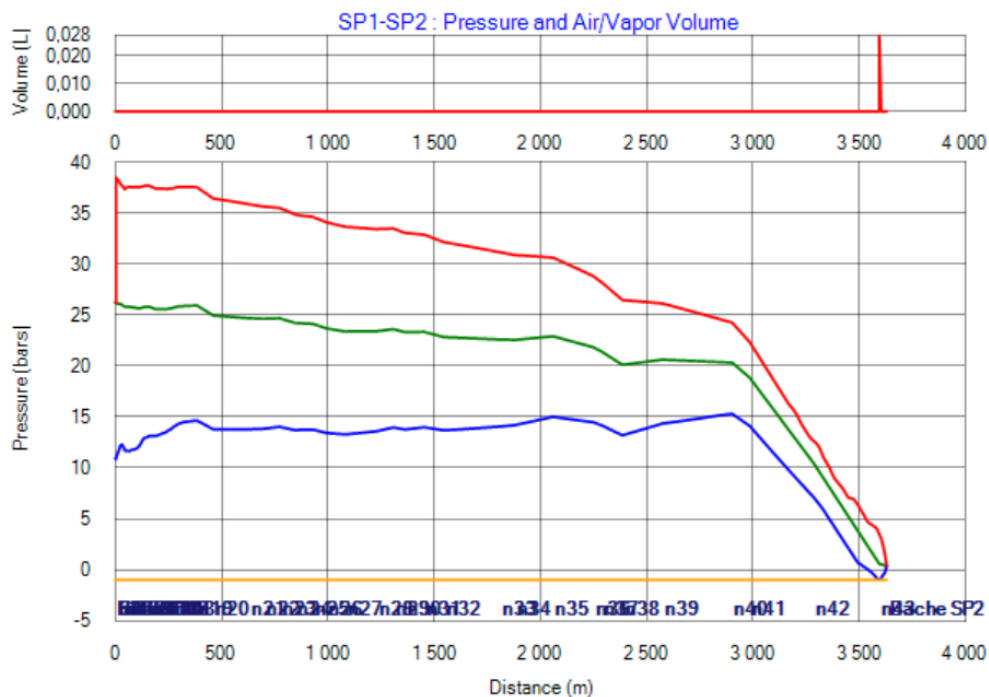


Figure IV. 4 : Volume d'aire et les pressions transitoires maximales et minimales dans le cas d'utilisation d'un réservoir de 3000 litres

La figure (IV.4) illustre les pressions transitoires maximales (en rouge) et minimales (en bleu) et la ligne piézométrique (en vert). on observe que par rapport aux résultats obtenus dans la simulation sans utilisation des équipements de protection, l'utilisation d'un réservoir d'air de 3000 litres a permis de réduire les surpressions le long du la conduite en dessous 40 bar. Ainsi, les pressions transitoires minimales ont légèrement augmenté. Cependant, il existe encore une pression négative de -1bars au niveau d'extrémité finale de la conduite (nœud 43) en raison de la présence de l'air, comme le montre le graphique en dessus.

IV.4.2. Réservoir d'air de 1000 litres

L'utilisation d'un réservoir d'air de 1000 litres, nous a conduits aux résultats présentés dans la figure ci-dessous :

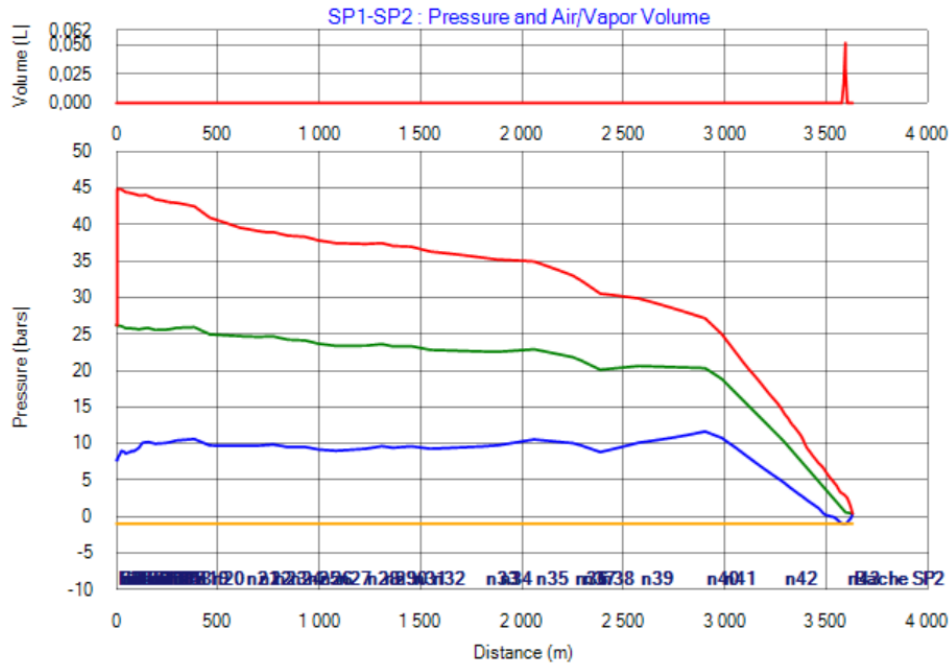


Figure IV. 5 : Volume d'aire et les pressions transitoires maximales et minimales dans le cas d'utilisation d'un réservoir de 1000 litres

D'après la figure, on voit que dans les premiers 500 mètres, la pression transitoire maximale dépasse la pression nominale de la conduite (40 bar), atteignant un maximum de 45 bar au niveau de la section d'entrée de la conduite. Tandis que, sur le reste de la distance, la pression transitoire maximale diminue progressivement. Toutes les pressions transitoires minimales sont acceptables, à l'exception d'une pression négative qui existe toujours au niveau du nœud 43 à cause de la présence d'air.

IV.4.3. Réservoir d'air de 1000 litres + une soupape de décharge

Pour ce cas, nous allons faire une simulation en utilisant un réservoir d'air de 1000 litres, plus la soupape de décharge qui existe au niveau de la station, comme on a dit précédemment cette soupape a une pression de service de 28.5 bar et un diamètre de 100 mm. Les résultats sont affichés dans la figure ci-dessous :

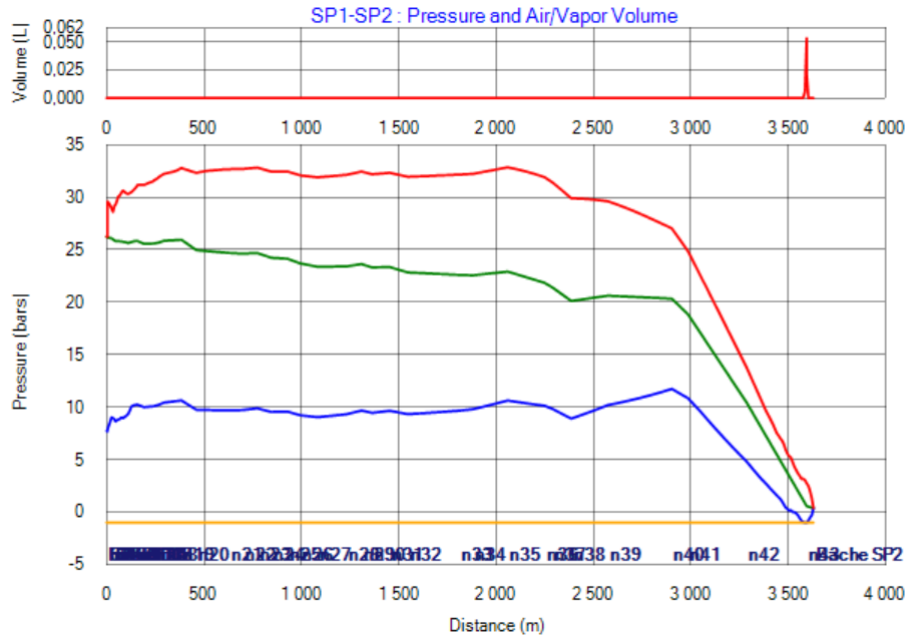


Figure IV. 6 : Volume d'aire et les pressions transitoires maximales et minimales dans le cas d'utilisation d'un réservoir de 1000 litres + une soupape de décharge

Dans ce cas, l'ajout de la soupape de décharge a permis de réduire les surpressions suite au maintien de la pressions transitoire maximale à des valeurs admissibles de 33 à 14 bar le long de la conduite et elle atteignant un minimum de 4 bar au niveau du nœud 43. La pression transitoire minimale reste toujours des valeurs admissibles le long de la conduite, à l'exception d'une pression négative qui persiste au niveau du nœud 43.

IV.4.3. Réservoir d'air de 1000 litres + une soupape de décharge + une ventouse

Afin d'éliminer la pression négative au niveau du nœud 43, on va ajouter une ventouse au niveau d'un point haut après ce nœud. Pour choisir le diamètre d'entrée d'air de la ventouse, on a consulté le tableau suivant qui donne le diamètre d'entrée d'air de la ventouse en fonction du diamètre de la canalisation :

Tableau IV. 3 : Le diamètre d'entrée d'air de la ventouse en fonction du diamètre de la canalisation

Canalisation	DN250	DN 300-600	DN700-900	DN1000-1200	DN1200-1800
Ventouse	DN50, 60,65	DN80, 100	DN150	DN200	2DN200

Source : (Saint-Gobain PAM)

Dans notre cas, on a une canalisation de DN400, donc le diamètre d'entrée d'air de la ventouse est de 100 mm et celui de la sortie d'air est de 10 mm (10% diamètre d'entrée).

Les résultats de la simulation de ce scénario sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 4 : Résultats de la simulation avec réservoir d'air de 1000 litres + Soupape de décharge + Ventouse

ID	Label	Elevation (m)	Head (Maximum, Transient) (m)	Head (Minimum, Transient) (m)	Pressure (Maximum, Transient) (bar)	Pressure (Minimum, Transient) (bar)	Vapor Volume (Maximum, Transient) (L)
102	n2	389,73	686,01	473,63	29	8	0
101	n3	390,22	687,26	483,52	29	9	0
100	n4	393,05	690,2	482,73	29	9	0
99	n5	392,81	694,66	484,6	30	9	0
98	n6	393,52	694,72	489,98	30	9	0
97	n7	394,42	696,36	494,26	30	10	0
96	n8	392,43	700,27	496,59	30	10	0
95	n9	392,21	702,17	496,7	30	10	0
94	n10	392,22	702,64	496,76	30	10	0
93	n11	393,56	702,79	496,88	30	10	0
92	n12	394,91	705,21	497,01	30	10	0
91	n13	394,63	708,41	497,19	31	10	0
90	n14	394,38	711,85	497,38	31	10	0
89	n15	394,38	712,13	497,44	31	10	0
88	n16	393,43	711,03	497,63	31	10	0
87	n17	393,43	711,78	497,69	31	10	0
86	n18	391,41	714,19	497,95	32	10	0
85	n19	390,04	724,29	498,61	33	11	0
84	n20	399,78	726,68	499,23	32	10	0
83	n21	401,71	734,99	500,64	33	10	0
82	n22	402,06	735,95	501,26	33	10	0
81	n23	401,14	739,31	502	33	10	0
80	n24	405,37	740	502,68	33	10	0
79	n25	405,96	740,46	503,58	33	10	0
78	n26	410,17	740,86	504,33	32	9	0
77	n27	412,99	741,52	505,31	32	9	0
76	n28	412,01	742,96	507,12	32	9	0
75	n29	409,41	743,73	508,14	33	10	0
74	n30	412,36	744,21	508,86	33	9	0
73	n31	411,62	744,9	510,11	33	10	0
72	n32	416,39	745,59	511,58	32	9	0
71	n33	417,56	748,4	516,19	32	10	0
70	n34	417,59	749,33	517,59	33	10	0
69	n35	413,17	751,36	521,49	33	11	0
68	n36	423,22	753,21	526,58	32	10	0
67	n37	427,7	749,48	527,89	32	10	0

ID	Label	Elevation (m)	Head (Maximum, Transient) (m)	Head (Minimum, Transient) (m)	Pressure (Maximum, Transient) (bar)	Pressure (Minimum, Transient) (bar)	Vapor Volume (Maximum, Transient) (L)
66	n38	440,25	746,24	530,98	30	9	0
65	n39	434,17	737,62	538,26	30	10	0
64	n40	435,61	713,2	555,51	27	12	0
63	n41	450,43	705,37	560,49	25	11	0
62	n42	534,93	676,55	583,35	14	5	0
61	n43	634,22	648,82	629,46	1	0	0

D'après ces résultats montrés dans le tableau (IV.4) on peut dire que le déploiement d'un réservoir d'air, d'une soupape de décharge et d'une ventouse a permis de réduire les surpression de manière plus efficace que dans les autres cas, avec des pressions transitoires maximales entre 14 et 33 bar et un minimum de 1 bar au niveau de nœud 43. La conduite est aussi protégée contre la dépression, avec des pressions transitoires minimale entre 5 et 12 bar et nous avons enfin éliminé la pression négative au niveau de nœud 43 à la suite de l'installation d'une ventouse qui a permet l'air qui a été présent dans la conduite de s'échapper.

La figure suivante illustre les graphiques de volume d'air et des pressions transitoires maximales et minimales obtenu après la simulation de ce scénario :

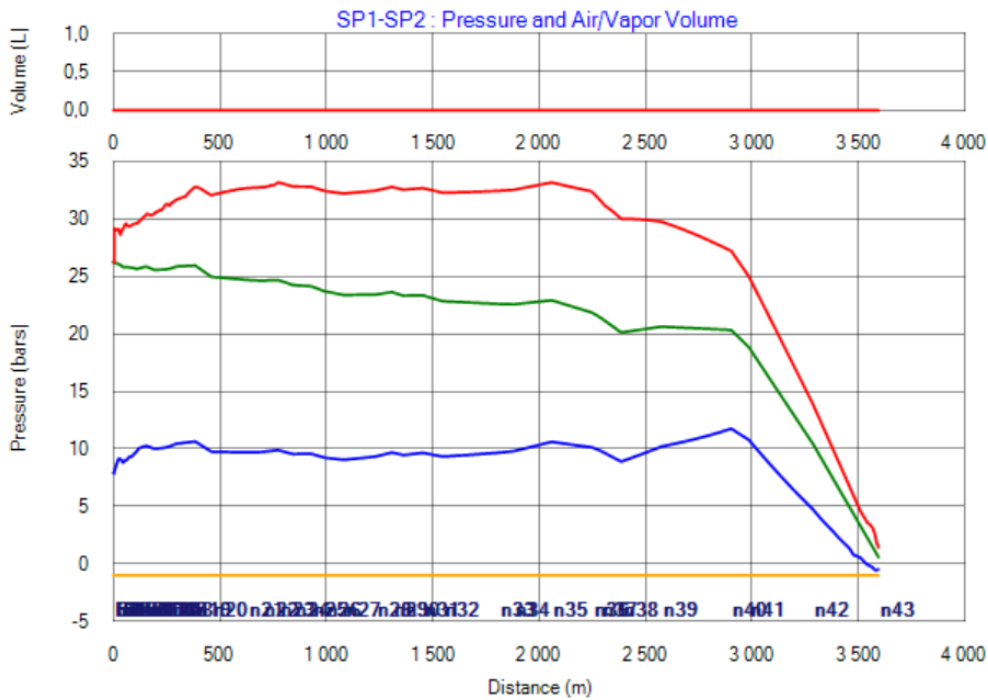


Figure IV. 7 : Volume d'aire et les pressions transitoires maximales et minimales dans le cas d'utilisation d'un réservoir de 1000 litres + une soupape de décharge + Ventouse

Les lignes piézométriques sont présentées dans la figure ci-dessous :

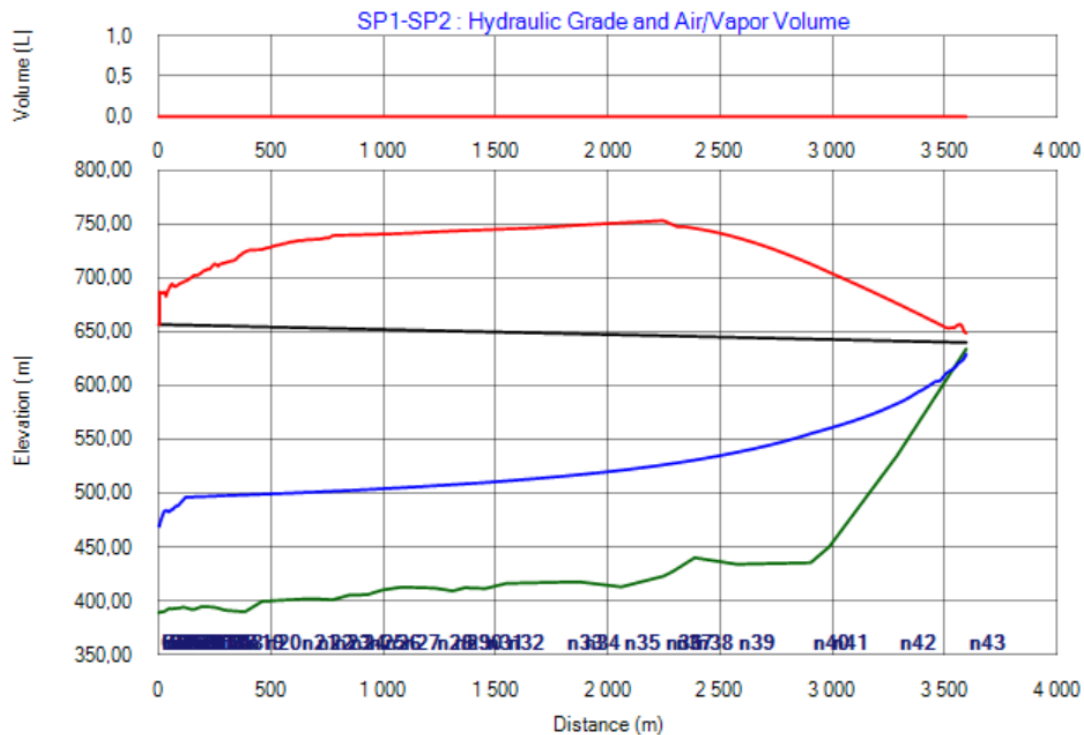


Figure IV. 8 : Lignes piézométriques et volume d'air pour la conduite SP1-SP2 avec l'utilisation d'un réservoir de 1000 litres + une soupape de décharge + une ventouse

IV.5. interprétation des résultats

En comparant les résultats obtenus après la simulation de ces différentes scénarios, on peut dire que :

- Les réservoirs d'air disponibles au niveau de la station sont très surdimensionnés.
- L'utilisation de la méthode de VIBERT peut donner des volumes de réservoir d'air suffisants pour protéger la conduite contre le coup de bélier. Mais, cette méthode est limitée juste à la détermination du volume de réservoir anti-bélier, et il y a toujours le problème de surdimensionnement.
- L'utilisation de réservoir anti-bélier de volume adéquat, permet de réduire les surpressions et les dépressions.
- Les soupapes de décharge permettent de réduire les surpressions, tandis que les ventouses sont efficaces pour atténuer les dépressions.
- Dans certains cas, l'utilisation d'un seul dispositif de protection ne suffit pas à protéger les conduites contre le phénomène transitoire. Il est donc essentiel de comprendre le comportement de ce dernier afin de pouvoir choisir la combinaison de dispositifs appropriée.

Conclusion

Dans ce chapitre on a effectué une simulation en utilisant HAMMER pour une conduite de refoulement, pour les scénarios suivantes : sans protection anti bélier, avec l'installation d'un réservoir d'air de 3000 litres, avec un réservoir d'air de 1000 litres, avec un réservoir d'air de 1000 litres et une soupape de décharge, avec un réservoir d'air de 1000 litres et une soupape de décharge plus une ventouse.

La simulation de ces différents scénarios nous a permis de mettre en évidence l'importance de cette tâche dans l'étude du coup de bélier. Elle nous a également aidés visualiser et à comprendre son comportement, ce qui nous permettra de choisir le meilleur dispositif ou la meilleure combinaison de dispositifs de protection nécessaire pour prévenir le phénomène transitoire et protéger la conduite de refoulement.

Conclusion générale

À travers cette étude, notre objectif était de caractériser les effets du phénomène de coup de bélier et déterminer les caractéristiques d'organes utilisés pour la protection contre ce dernier.

Nous avons commencé cette thèse avec des généralités sur le coup de bélier, où on a discuté les causes qui peuvent générer ce phénomène, ainsi que les dommages potentiels qu'il peut provoquer. Puis, nous avons parlé de différents équipements de protection qui peuvent être utilisés pour le prévenir.

Ensuite, nous avons présenté le logiciel Bentley HAMMER, en expliquant les méthodes et les équations qu'il utilise, bien que les données et configuration nécessaires à introduire pour exécuter une simulation du régime transitoire. Ainsi, nous avons mentionné des études antérieures menées par des chercheurs ayant utilisés ce logiciel, ce qui nous a confirmé sa fiabilité et sa capacité à fournir des résultats de qualité

Enfin, nous avons procédé à la simulation d'un régime transitoire pour des différents scénarios, ce qui nous permis de visualiser ce phénomène et de le mieux comprendre. Cette compréhension nous aidera à choisir les meilleurs équipements de protection pour prémunir contre le coup de bélier.

Bibliographie

ALLEIVI

Bentley Systems. 2018. [En ligne] 26 Décembre 2018. [Citation : 17 Septembre 2023.] <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-EE4EA18F-F9CE-43C7-93E5-906EEF8A0FC9.html>.

BERREKSI, Ali. 2015. *Cours module: hydraulique 3*. Béjaia : Département d'Hydraulique Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE-Bejaia), 2015. pp. 32-35.

CHAUDHRY, M. Hanif. 2014. *Applied Hydraulic Transients*. s.l. : Springer New York, NY, 2014. 978-1-4614-8537-7.

DARWEESH, Moustafa S. 2021. *Elevated tanks effect on transient pressures: case study*. Department of Civil Engineering, Assiut University, Assiut 71516, Egypt. s.l. : Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development Vol 00 No 0, 1 doi: 10.2166/washdev.2021.022, 2021. 0000-0002-0050-2663.

FRELIN, Marcel. 2002. *Coups de bélier*. s.l. : Techniques Ingénieur, 2002. p. 1.

GUHL, Florent. 2002. *Guide méthodologique d'études anti-bélier pour les réseaux d'eau*. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales. s.l. : Cemagref Éditions, 2002. p. 9. 978-2-85362-596-8.

HYDRO-BLOG. 2019. HYDRO BLOG Le blog des hydrauliciens. [En ligne] 9 Juin 2019. [Citation : 17 Septembre 2023.] <https://hydro-blog.com/hammer/>.

Joukowski

KADI, Latifa. 2022. *Polycopie du cour d'AEP : Régime transitoire dans les conduites d'eau sous pression*. 2022. pp. 3-4.

KORTEWEG, Diederik Johannes. 1878. *Ueber die fortpflanzungsgeschwindigkeit des schalles in elastischen röhren (On the velocity of propagation of sound in elastic tubes)*. s.l. : Ann. Phys., 1878. doi:10.1002/andp.18782411206..

LÜDECKE, Horst Joachim et KOTHE, Bernd. 2013. *Le coup de bélier*. Communication de la société KSB . 2013. p. 6.

POPA, Ion, et al. 2021. *Behaviour simulation of a main pipe depending on it's execution material, in a non-steady flowing state (water hammer)*. Hydraulic and Environmental Protection Department, Technical University of CivilEngineering. Bucharest, România : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 10.1088/1755-1315/664/1/012011.

Saint-Gobain PAM. PAM Saint-Gobain. PAM Saint-Gobain. [En ligne] [Citation : 2023 Septembre 18.] <https://www.pamline.fr/ventouses-type-ventex-version-standard>.

SALAH, Boualem. 2014. *Polycopie d'alimentation en eau potable*. 2014. p. 95.

SALAH, Boualem, et al. 2001. *Célérité de l'onde de coup de bélier dans les conduites enterrées*. s.l. : La Houille Blanche, 2001. 10.1051/lhb/2001029.

TOULOU MIDIS, Dimos Theodoros, et al. 2020. *Comparing the results of two simulating models of the Water Hammer phenomenon: Bentley Hammer V8i and Greek Legislation*. Amsterdam, the Netherlands : FIG Working Week 2020 Smart surveyors for land and water management, 2020.

WYLIE, Evan Benjamin et STREETER, Victor Lyle. 1993.*Fluid Transients*. s.l. : McGraw-Hill Inc, 1993. pp. 11-12. ISBN 0-07-072187-4.

XU, Sen, et al. 2023.*Water Hammer Protection Measures and Calculation Analysis of Reservoir Water Pipelines*. s.l. : Journal of Physics Conference Series 2441(1):012049, 2023.

ZÀRUBA, Josef. 1993.*Water Hammer in Pipe-Line Systems*. s.l. : Elsevier Science, 1993. p. 70. 9780080870342.