

**RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



**Faculté du Génie de la Construction
Département Génie civil**

Mémoire fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en Hydraulique

Option : Ouvrages Hydrauliques

Thème :

**Protection des conduites contre le phénomène
transitoire du coup de bélier, Application sur le
logiciel Hammer**

Réalisé par :

- BOUDLAL Yasmina
- TAIBI Celia

- **Promoteur** : Prof. KHATTAOUI Mohammed
- **Co-Promoteur**: Dr. ZAMOUM Said

Année académique : 2020 / 2021

Dédicace

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

A mes très chers parents, tout mon respect et affection en témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que pour leurs conseils et leur précieux aide morale et financière dont ils ont fait preuve pour que je réussisse, que Dieu les protège et les entoure de sa bénédiction.

A mes chers frères: Brahim, Said, Mourad et sa femme Dalila et a ma sœur Hakima son mari Hafid

A ma deuxième famille mes très chers copines : Sarah, Sonia, Ounissa, Yasmine, Dadi, Que Dieu garde notre amitié pour toujours

A mes amis (es) :Djoher, Nouara, Celia, Manel, Farhat, Lyes

Aussi au groupe de tamda 2 merci pour les bons moments qu'on a partagé ensemble

A mes cousins et mes cousines sans exception

A ma binôme Celia

A toute la Promotion Master 2 Ouvrage Hydraulique

A la mémoire de Dada Ali, dieu t'accueille dans son vaste paradis.

Merci à vous tous

Yasmine

Dédicace

Que ce travail témoigne de mes respects

A mes parents

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le

climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, mes considérations et mes profonds sentiments envers eux.

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes sœurs

Vous avez toujours été présentes pour les bons conseils, Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon affection.

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

A tous mes amis

je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères, sur qui je peux compter

*Et à toute la promotion 2020/2021
d'ouvrages hydrauliques.*

Célia

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté et les moyens d'achever ce travail.

On remercie notre promoteur KHATTAOUI Mohammed et notre co-promoteur ZAMOUM Saïd pour leurs soutiens scientifique, Leurs conseils précieux, leurs orientations, leurs disponibilité durant notre préparation de ce mémoire et pour le temps qu'ils nous ont accordé.

À l'ensemble des enseignants du département génie civil, en particulier Mr BOUHALLI.

Nos remerciements aux membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

On remercie également, toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Grand merci à vous tous

Table des matières

Chapitre I : Etude bibliographique sur le coup de bélier

Introduction générale	
I.1. Introduction	1
I.2. Définition	1
I.3. Causes du coup de bélier.....	1
I.4. Les risques dus aux coups de bélier	2
I.4.2. Risque de pression négative (dépression)	3
I.4.3. Fatigue du tuyau.....	Erreur ! Signet non défini.
I.5. Notion générale sur le phénomène.....	4
I.5.1. Les régimes d'écoulements	4
I.6. Description physique.....	5
I.6.1. Analyse physique du coup de bélier dans les conduites.....	5
I.6.1.1. Hypothèses.....	5
I.6.1.2. Notations.....	5
I.6.2. Modélisation mathématique	7
I.6.2.1. Hypothèses simplificatrices.....	7
I.6.3. Mise en équations du phénomène.....	8
I.6.4. Interprétation des équations différentielles du mouvement	9
I.6.5. Formule d'Allievi donnant la célérité des ondes « a »	10
I.7. Valeur numérique du coup de bélier	13
I.7.1. Cas de la fermeture brusque $T \leq 2La$	14
I.7.2. Cas de la fermeture lente $T > 2La$	14
I.8. Conclusion.....	14

Chapitre II : Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

II.1. Introduction	15
II.2. Le rôle des moyens de protection.....	15

II.3. Les moyens les plus utilisés	15
II.3.1. Les volants d'inertie (protection contre la dépression)	15
II.3.2. Soupapes de décharge (protection contre la surpression)	16
II.3.3. Les ventouses (protection contre la dépression et la surpression)	17
II.3.4. Cheminée d'équilibre	18
II.3.4.1. Types de cheminées	19
II.3.5. Les réservoirs d'air	20
II.3.5.1. Méthodes de calcul du réservoir d'air	22
a. Méthode de VIBERT	22
b. Méthode de PEUCH et MEUNIER	22
c. Méthode de BEURGERON	25
II.4. Application des principes	26
II.5. Avantages et inconvénients	Erreur ! Signet non défini.
II.6. Conclusion	30

Chapitre III : Etude d'un cas de refoulement

III.1. Introduction	32
III.2. Protection de la conduite de refoulement	32
III.2.1. Caractéristique de la conduite	32
III.2.2. Profil en long de la conduite	33
III.3. Dimensionnement du réservoir d'air par la méthode de Peuch et Meunier	33
a. Dépression	33
b. Surpression	36
III.4. Tracé l'épure de Bergeron	37
III.5. Dimensionnement du réservoir d'air par la méthode de Vibert	42
III.6. Interprétation des résultats	44
III.7. Caractéristiques de la pompe	45
III.8. Conclusion	45

Chapitre IV: Simulation d'un régime transitoire avec le logiciel Bentley Hammer

IV.1. Introduction	47
IV.2. Présentation de Bentley Hammer	47
IV.3. Environnement de travail.....	48
IV.4. Fonctionnalités et capacités.....	48
IV.5. Les principales étapes à suivre pour la simulation d'un projet.....	49
IV.5.1. Démarrage du logiciel.....	49
IV.5.2. Création d'un modèle sur Bentley HAMMER.....	50
IV.5.3. Options de réglage.....	50
IV.5.4. La barre d'outils Disposition	51
IV.5.5. Insertion des éléments du projet	52
IV.5.6. Insertion des données de la pompe.....	54
IV.5.7. Enregistrement du modèle créé	55
IV.5.8. Affichage du profil transitoire	55
IV.5.9. Affichage des graphiques dans Bentley HAMMER.....	56
IV.6. Simulation d'un coup de bélier dans un cas de refoulement avec Bentley HAMMER	57
VI.6.1 Résultats obtenus a. Résultats sans protection.....	57
a. Résultats sans protecti.....	57
b. Résultats avec protection.....	60
IV.6.2. Interprétation des résultats obtenus.....	62
IV.7 Conclusion.....	62
Conclusion générale	

Liste des tableaux

Chapitre I: Etude bibliographique sur le coup de bélier

Tableau I. 1: Les régimes d'écoulements	4
Tableau I. 2: Notations	5
Tableau I. 3: La valeur du coefficient k dépend de la nature de la conduite.....	11

Chapitre II : Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

Tableau II. 1: La spécificité du volant d'inertie	16
Tableau II. 2: La spécificité du cheminée d'équilibre.	19
Tableau II. 3: Profil en long général de la conduite.	24
Tableau II. 4:Tableau de calcul.	27
Tableau II. 5: Avantages et inconvénients des appareils anti-bélier.	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III : Etude d'un cas de refoulement

Tableau III. 1: Caractéristique de la conduite	32
Tableau III. 2: Profil en long de la conduite.	33
Tableau III. 3: Profil en long de la conduite.	34
Tableau III. 4: Calcul du réservoir d'air.....	40
Tableau III. 5: Résultats des différentes méthodes de dimensionnement des protections.	44
Tableau III. 6: Caractéristiques requises	40
Tableau III. 7: Caractéristiques de la pompe.....	44

Chapitre IV : Simulation d'un régime transitoire avec le logiciel Bentley Hammer

Tableau IV. 1: Quelques éléments de la barre d'outils disposition (Layout).....	51
---	----

Liste des figures

Chapitre I : Etude bibliographique sur le coup de bélier

Figure I. 1: Représentation du phénomène du coup de bélier	1
Figure I. 2: Dilatation du tuyau	2
Figure I. 3: Implosion ou écrasement de la conduite	3
Figure I. 4: Éclatement de la conduite.....	4
Figure I. 5 : Tuyauterie détruite.....	4
Figure I. 6 : Conduite gravitaire avec vanne à l'aval	5
Figure I. 7: Phases 1 de propagation de l'onde.	6
Figure I. 8 : Phases 2 de propagation de l'onde.	6
Figure I. 9: Phases 3 de propagation de l'onde.	7
Figure I. 10 : Phases 4 de propagation de l'onde.	7
Figure I. 11: Élément de contrôle sur une conduite gravitaire.	8

Chapitre II: Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

Figure II. 1: Volant d'inertie vertical.	16
Figure II. 2: Soupape de décharge.....	17
Figure II. 3: Ventouse à une seule fonction.	17
Figure II. 4: Ventouse à trois fonctions.....	17
Figure II. 5: Cheminée d'équilibre à Montevideo, Uruguay.	18
Figure II. 6: Cheminée d'équilibre de St-Alban, Québec.	18
Figure II. 7: Cheminée à étranglement.	19
Figure II. 8 : Cheminée à épanouissement.	19
Figure II. 9: Cheminée différentielle.....	19
Figure II. 10: Principe de fonctionnement d'un réservoir d'air.	21
Figure II. 11: Réservoir d'air.....	22
Figure II. 12: L'enveloppe de dépression absolue.	24
Figure II. 13: Principe de la construction de l'épuration de BERGERON.	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III : Etude d'un cas de refoulement

Figure III.1: Schéma d'adduction d'un refoulement.....	32
Figure III.2: Graphe PEUCH et MEUNIER.	35
Figure III.3: Epuration de Bergeron.	41
Figure III.4: Abaque de Vibert	43
Figure III.4: Les courbes caractéristiques de la pompe.....	43

Chapitre IV: Simulation d'un régime transitoire avec le logiciel Bentley Hammer

Figure IV. 1: Présentation du logiciel.	47
Figure IV. 2: Interface du logiciel HAMMER.	48
Figure IV. 3 : Affichage de la boîte de dialogue Bienvenue (welcome).	49
Figure IV. 4: Création d'un nouveau modèle.	50
Figure IV. 5: Boîte de dialogue Options - Onglet Unités.	51
Figure IV. 6: Barre d'outils disposition.	52
Figure IV. 7: Propriétés d'une pompe PMP.	53
Figure IV. 8: Modification globale.	53
Figure IV. 9 : Insertion de la valeur du diamètre.	53
Figure IV. 10: Création d'une nouvelle définition de pompe.	54
Figure IV. 11: Affichage des courbes caractéristiques de la pompe.	54
Figure IV. 12: Modèle créé.	55
Figure IV. 13: Enregistrement du modèle.	55
Figure IV. 14: Profil transitoire.	55
Figure IV. 15: Historique du temps.	56
Figure IV. 16: Représentation graphique des résultats.	56
Figure IV. 17: Tableau des résultats.	57
Figure IV. 18: Profil.	57
Figure IV. 19: Graphique qualité hydraulique, volume d'air/de vapeur.	58
Figure IV. 20: Tableau des résultats.	58
Figure IV. 21: Variation de la surpression et de la dépression.	59
Figure IV. 22: Tableau des pressions maximal et des pressions minimal.	59
Figure IV. 23: Graphique qualité hydraulique, volume d'air/de vapeur.	60
Figure IV. 24: Tableau des résultats (annexe VI).	60
Figure IV. 25: Variation de la surpression et de la dépression.	61
Figure IV. 26: Tableau des pressions maximal et des pressions minimal.	61
Figure IV. 27: Résultats obtenus.	62

Liste des notations et symboles

Symboles	Désignation	Unité
L	Longueur	m
D	Diamètre	m
e	Epaisseur	m
S	Surface	m ²
V	Vitesse	m/s
F	Force	N
h	Hauteur	m
P	Pression	N/m ²
q	Débit massique	Kg/s
S ₀	Section de la conduite	m ²
t	Temps	s
HMT	Hauteur manométrique totale	m
H _{abs}	Hauteur absolu	m
H _G	Hauteur géométrique	m
H ₀	La hauteur géométrique de refoulement	m
P _{min}	Pression minimum	m.c.e
U _{max}	Volume maximal	m ³
V _f	La vitesse finale	m/s
V _m	Vitesse moyen	m/s
V ₀	Vitesse initial	m/s
∅	Diamètre de la conduite	m
ΔH	une variation de hauteur	m
a	Célérité d'onde	m/s
B	La valeur du coup de bélier	-
g	L'accélération de la gravité	m/s ²
Z	Côte	m
μ	Viscosité dynamique	kg.m ⁻¹
ν	Viscosité cinématique	l.m ⁻²
ρ	Masse volumique du fluide	m ² /s
Re	Nombre de Reynolds	Kg/m ³
J	La perte de charge	-
ε	Module d'élasticité volumétrique	m
Tapez une équation ici.	Coefficient de pertes de charge linière	-
θ	Angle d'inclinaison de la conduite avec l'horizontale	•

Introduction Générale

Introduction générale

Dans le cadre de la gestion et de l'exploitation des systèmes hydrauliques en charge (alimentation en eau potable ou autres) les ingénieurs sont confrontés au problème récurrent du coup de bélier, qui nuit au bon fonctionnement de ces systèmes.

Le coup de bélier étant un cas particulier du régime transitoire, est un phénomène oscillatoire qui se manifeste dans les conduites entre deux régimes permanents. C'est le nom que l'on donne à une onde de choc hydraulique, lorsqu'un liquide non compressible comme l'eau, est stoppé net dans une canalisation. Autrement dit, c'est l'arrêt brutal de la circulation de l'eau lorsqu'un robinet (ou tout autre appareil) se ferme.

Dans l'optique d'une meilleure compréhension du phénomène et des paramètres intrinsèques le caractérisant, on se propose, dans le cadre de notre mémoire, de faire une étude de l'application coup de bélier ; Ce travail se divise en deux grandes parties.

La première partie purement théorique et qui se subdivise en deux chapitres ; Dans le premier chapitre nous allons donner un aperçu bibliographique sur le coup de bélier, ou nous allons le définir et citer ses principales causes ainsi que ses conséquences sur les conduites en charges. Aussi nous ferons une analyse qualitative et quantitative du phénomène, c'est à dire que l'on essaiera de comprendre et d'illustrer ce qui se passe réellement pendant un coup de bélier dans une conduite. Puis de formuler les équations régissant le phénomène en appliquant deux théorèmes bien connus en hydraulique, à savoir le théorème de conservation de la masse, et le théorème des quantités de mouvement. Dans le deuxième chapitre on va exposer les appareils anti-bélier qui devront avoir essentiellement pour effet de limiter la surpression et la dépression. Les principaux types de protection anti-bélier sont explicités dans ce qui suit citant leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans la seconde partie c'est-à-dire troisième et dernier chapitre on traitera un exemple pratique de protection d'une conduite de refoulement, contre le coup de bélier, à l'aide d'un réservoir d'air. Il sera procédé en premier au dimensionnement du réservoir d'air par la méthode de Puech et Meunier et par la méthode de Vibert, et puis la vérification sera faite par le tracé de l'épure de Bergeron et par le logiciel Hammer

Chapitre I

Etude bibliographique sur le coup de bélier

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu bibliographique sur le coup de bélier, ou nous allons le définir et citer ses principales causes ainsi que ses conséquences sur les conduites en charge.

Nous allons aussi faire une analyse du régime transitoire du point de vue physique. Cette analyse se base sur les équations des écoulements non permanents tels que l'équation de continuité et l'équation dynamique, celles-ci nous permettent de quantifier le phénomène de coup de bélier pour mieux dimensionner une protection anti bélier.

I.2. Définition

Le coup de bélier étant un cas particulier du régime transitoire, est un phénomène oscillatoire qui se manifeste dans les conduites en charge à écoulement gravitaire ou par refoulement.

On entend aussi sous le terme « coup de bélier » un écoulement non permanent du liquide accompagné des variations pratiquement sensibles de la pression qui peuvent engendrer d'énormes dommages matériels et quelques fois des pertes de vie humaine.[1]

I.3. Causes du coup de bélier

Le coup de bélier est un phénomène oscillatoire dont les causes les plus fréquentes sont les suivantes :

- La mise en marche ou l'arrêt des pompes dans les conduites en charge par refoulement.
- L'ouverture ou la fermeture des vannes (instantanée ou trop rapide).
- Le remplissage ou la vidange d'un système d'AEP.
- La rupture de l'alimentation électrique dans une station de pompage est cependant la cause la plus répandue du coup de bélier.
- Variation rapide du niveau d'eau dans le réservoir (Changement du niveau d'aspiration de l'eau).[2]

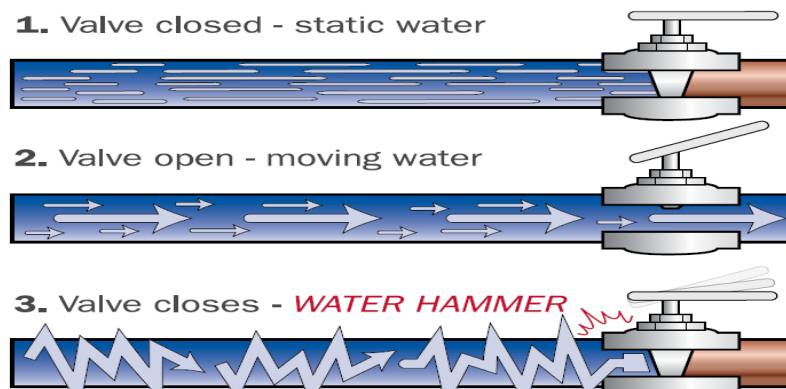


Figure I. 1: Représentation du phénomène du coup de bélier

Le coup de bélier, dont la brutalité est susceptible d'entraîner des ruptures de tuyaux, peut atteindre des valeurs très élevées pouvant être égale à plusieurs fois la pression de service sur les réseaux à basse pression.

Il est donc de toute première importance d'étudier des moyens propres à limiter ses effets puisqu'il en résultera une économie dans la construction des tuyaux, lesquels sont calculés notamment, pour résister à une pression intérieure donnée.

I.4. Les risques dus aux coups de bélier

I.4.1. Risque de forte pression

Les coups de bélier provoquent des surpressions qui s'ajoutent à la pression initiale. Si la somme (pression initiale) plus (surpression) est supérieure à la pression maximale admissible des tuyaux, il y a des risques de :

- Dilatation du tuyau qui peut provoquer l'explosion de ce dernier.
- Rupture des conduites, réservoirs ou flexibles.
- Usure des joints, des soudures de raccordement et des appareils sanitaires.
- Détérioration des dispositifs de coupure, clapet anti-retour et de régulation.
- Bruits importants et fortes vibrations dans les canalisations et les cloisons.

L'importance de la surpression dépend de nombreux facteurs :

- Temps de fermeture des appareils.
- Longueur, diamètre et type de matériaux des canalisations.
- Vitesse de l'eau.

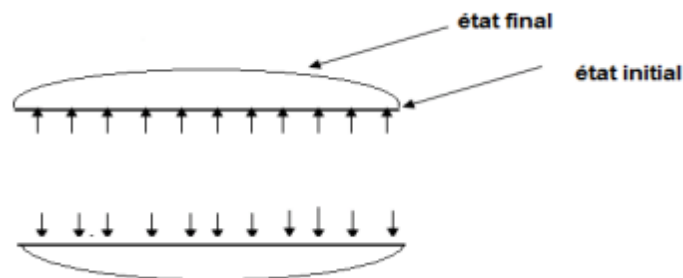


Figure I. 2: Dilatation du tuyau

Pour pouvoir calculer la surpression lors d'un coup de bélier, la formule suivante prend en compte, de façon instantanée, les caractéristiques habituelles d'une installation sanitaire :

$$\Delta P = \rho * g * \frac{2VL}{t} \quad (I.1)$$

où :

ΔP : est la surpression due au coup de bélier (Pa)

V : est la vitesse de l'eau au moment de la fermeture (m/s)

L : est la longueur du tube (m)

g : est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²)

t : est le temps de fermeture de la vanne (s)

La Formule précédente valable si $t > t^*$, Si l'on veut définir simplement le "temps de fermeture" (mieux défini comme "temps de réaction") on peut utiliser la formule suivante:

$$T = \frac{2L}{a} \quad (\text{I.2})$$

Où :

t^* : est le temps de réaction de la vanne (s)

L : est la longueur du tube (m)

α : est la vitesse de propagation de l'onde (m/s) (en fonction du type de fluide, des matériaux, du diamètre interne et externe de la canalisation)[3]

I.4.2. Risque de pression négative (dépression)

Une autre conséquence des coups de bélier peut être l'apparition d'une pression relative négative. Si cette pression devient inférieure à -5 mce, il se produit une poche de cavitation. Si le profil en long de la canalisation est défavorable, c'est à dire si la poche de vapeur peut se former sur une grande distance, la canalisation peut être aplatie par implosion et les joints peuvent être aspirés. Une autre conséquence de la cavitation est la détérioration de l'enduit intérieur du tuyau, mais le risque le plus grave est celui d'éclatement de la conduite lors du retour à des pressions positives : les pressions obtenues à ce moment sont en effet souvent très importantes.[2]

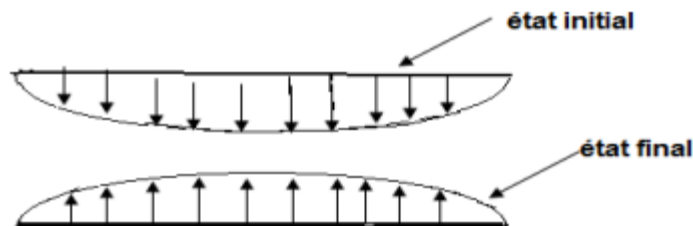


Figure I. 3: Implosion ou écrasement de la conduite

I.4.3. Fatigue du tuyau

Comme autre conséquence des coups de bélier, on peut citer la fatigue qu'entraîne pour le matériau une alternance rapide de fortes et de faibles pressions même si chaque onde de surpression n'est pas suffisante en elle-même pour créer la rupture.[1]



Figure I. 5: Éclatement de la conduite



Figure I. 4 : Tuyauterie détruite

I.5. Notion générale sur le phénomène

I.5.1. Les régimes d'écoulements

Tableau I. 1: Les régimes d'écoulements

Ecoulement permanent et non permanent	Ecoulement permanent	L'écoulement de liquide est dit permanent lorsque les propriétés du fluide et les caractéristiques hydrauliques de celui-ci restent invariables dans le temps[4]	$\frac{\partial P}{\partial t} = 0$ \mathbf{et} $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$
	Ecoulement non permanent ou transitoire	L'écoulement du liquide est dit non permanent ou transitoire si les grandeurs physiques (P, v ou Q) caractérisant l'écoulement dans chaque point de l'espace varient dans le temps.	$\frac{\partial P}{\partial t} \neq 0$ \mathbf{et} $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$
Ecoulement uniforme et non uniforme	Ecoulement uniforme	Un écoulement est dit uniforme lorsque la vitesse du fluide à un instant donné, à une même direction et une même intensité en tous points de ce fluide.	$\frac{\partial v}{\partial x} = 0$
	Ecoulement non uniforme	Un écoulement est dit non uniforme si la vitesse du fluide varie d'une section à l'autre	$\frac{\partial v}{\partial x} \neq 0$

I.6. Description physique

I.6.1. Analyse physique du coup de bélier dans les conduites

L'analyse physique du coup de bélier sera faite pour le cas d'une fermeture brusque d'une vanne placée à l'aval d'une conduite d'adduction idéale de longueur L et de diamètre D .

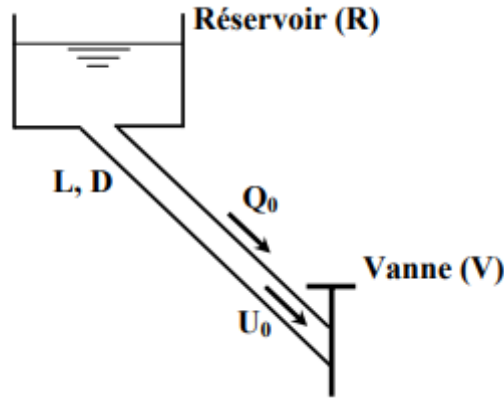


Figure I. 6 : Conduite gravitaire avec vanne à l'aval.

I.6.1.1. Hypothèses

- Manœuvre instantanée (faite à l'instant $t = 0$).
- Pertes de charge supposées nulle (conduite idéale).
- Pas de dispositifs de protection.

Le temps que met l'onde pour parcourir la conduite de longueur L est " L/a ", avec a : célérité des ondes du coup de bélier a (m/s).

I.6.1.2. Notations

Tableau I.2: Notations

	Régime permanent (avant la manœuvre)	Régime transitoire (après la manœuvre)
- Débit	Q_0	Q
- Vitesse	U_0	U
- Pression dans la conduite	P_0	P
Et, comme il est tenu compte de l'élasticité de la conduite et de la compressibilité du liquide transporté :		
- Section de la conduite	S_0	S
- Masse volumique du liquide	ρ_0	ρ

Supposons qu'à l'instant $t = 0$ nous fermons la vanne instantanément, la colonne liquide lancée à la vitesse V_0 va trouver la vanne fermée et sera obligée de s'arrêter. Ceci aura quatre effets combinés :

- Annulation de la vitesse.

- Augmentation de la pression.
 - Dilatation (éventuellement allongement) de la conduite dans les limites élastiques.
 - Compressibilité du liquide[5]
- **Phase 1** : l'onde de dépression se propage vers le réservoir en laissant derrière elle une conduite contractée dans laquelle l'eau est immobile. A l'instant $t = L/\alpha$, toute la longueur de la conduite est en dépression.

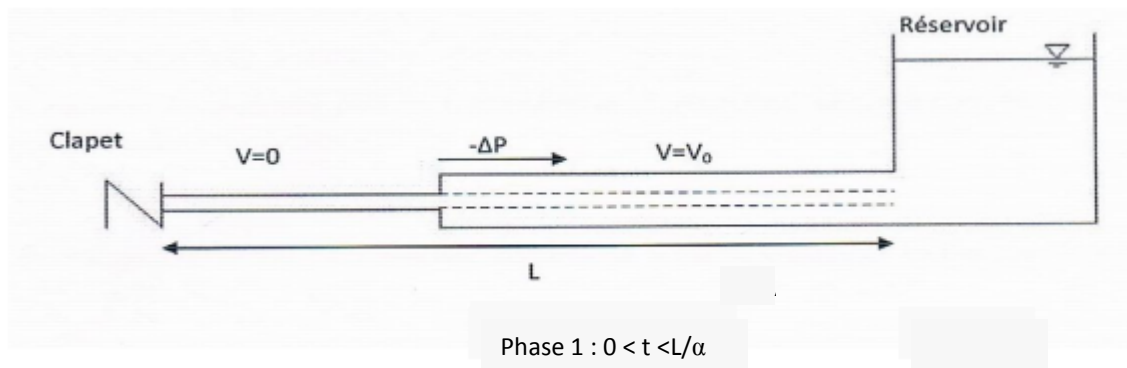


Figure I. 7: Phases 1 de propagation de l'onde.

- **Phase 2** : lorsque l'onde atteint le réservoir, il y a réflexion avec changement de signe provoquant une onde de surpression qui repart vers le clapet. La conduite reprend sa section initiale induisant un retour d'eau. A l'instant $t = 2L/\alpha$, la conduite a repris sa forme initiale et l'onde de surpression est réfléchi sur le clapet.

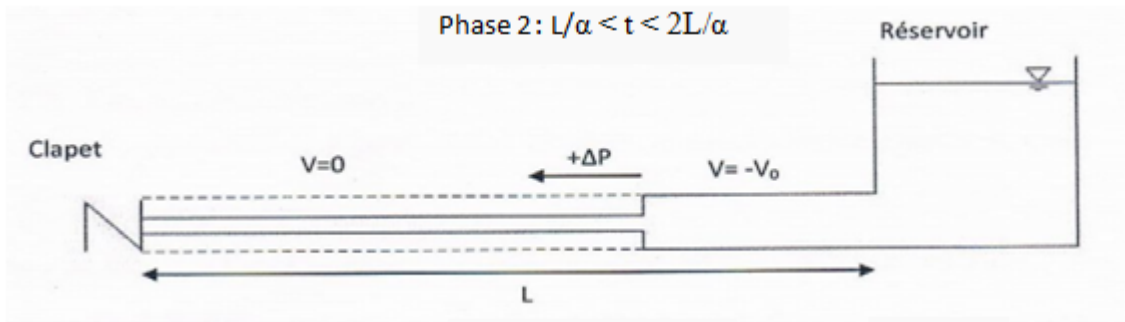


Figure I. 8: Phases 2 de propagation de l'onde.

- **Phase 3** : la réflexion de l'onde de surpression entraîne une nouvelle onde de même signe annulant le débit d'écoulement sur son passage et dilatant la conduite.

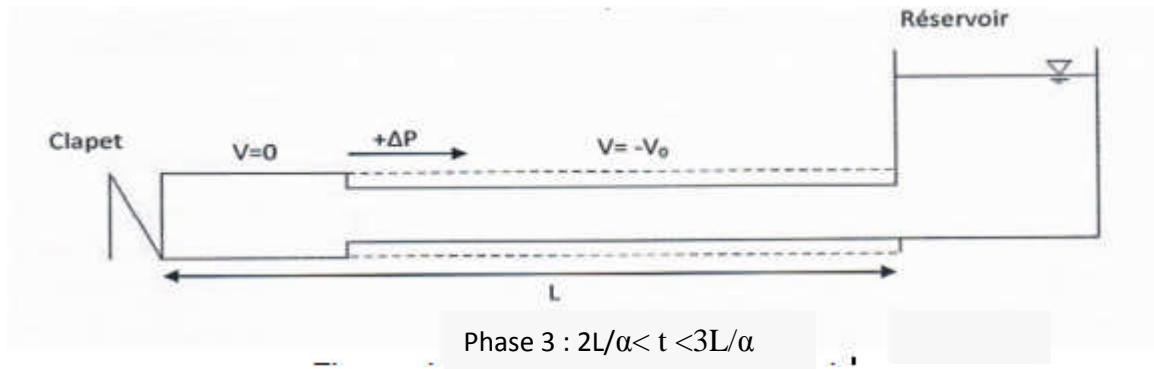


Figure I. 9: Phases 3 de propagation de l'onde.

- **Phase 4 :** à l'instant de $t = 3L/\alpha$, une onde réfléchi sur l'extrémité libre du réservoir repart vers le clapet en annulant la dilatation de la conduite et provoquant un écoulement dans la direction du réservoir. Lorsque l'onde atteint le clapet à $t = 4L/\alpha$, la conduite et l'écoulement deviennent identique à ce qu'ils étaient à l'instant $t = 0$ et les quarts phases se répètent une nouvelle fois.

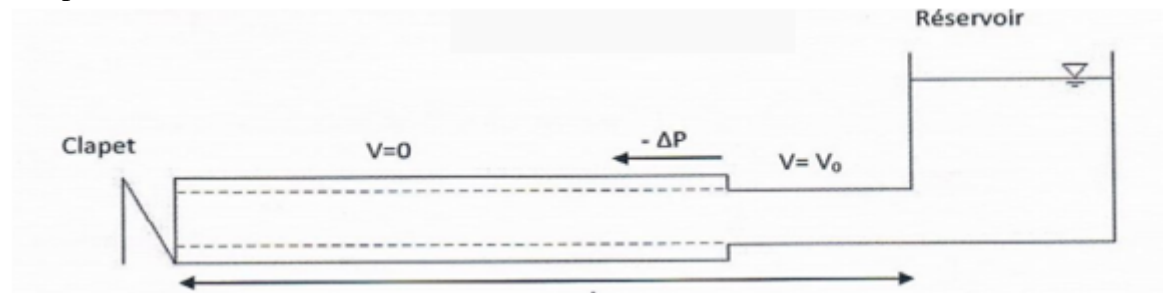


Figure I. 10 : Phases 4 de propagation de l'onde.

Le coup de bélier dans une conduite simple est donc un phénomène périodique de période $4L/a$ comportant une succession de phases de dépression et de phases de surpression.[6]

I.6.2. Modélisation mathématique

Les équations du mouvement régissant les écoulements transitoires (coup de bélier) sont celles données par **Lorenzo Allievi**. Ces dernières sont déduites par des équations générales du mouvement données par **Saint Venant**. Elles sont obtenues en appliquant à une tranche de canalisation :

- Le théorème des quantités de mouvement (l'équation dynamique).
- L'équation de continuité (équation de la conservation de la masse).

I.6.2.1. Hypothèses simplificatrices

- La conduite est élastique.
- Le liquide est compressible.
- Les vitesses et les pressions sont supposées uniformes dans une section donnée. [7]
- La conduite est à caractéristiques uniques (le diamètre, la nature et l'épaisseur sont constants).
- Le réservoir est suffisamment grand (niveau d'eau est constant durant le phénomène).

I.6.3. Mise en équations du phénomène

Considérons l'installation donnée par la figure ci-après :

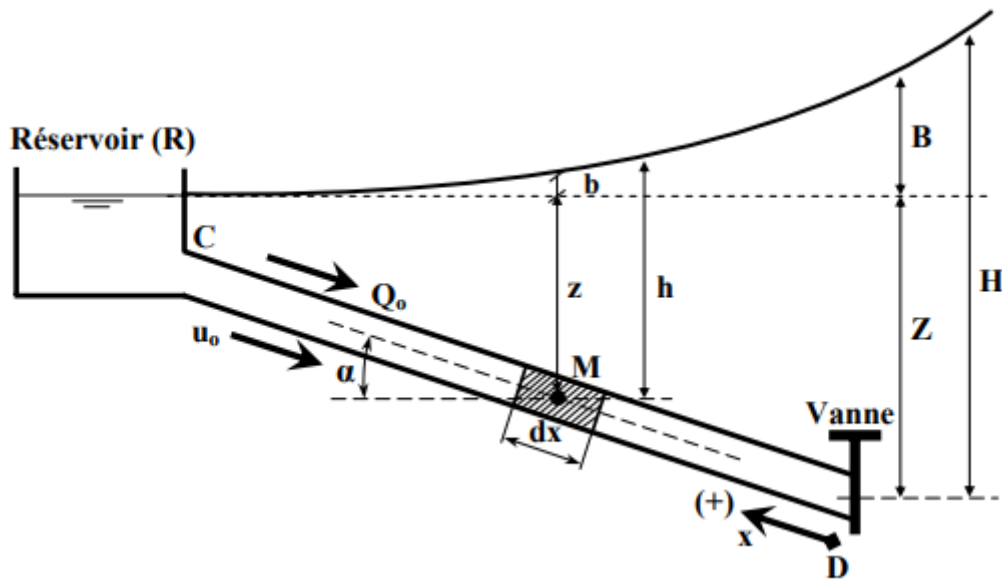


Figure I. 11: Elément de contrôle sur une conduite gravitaire.

En régime permanent (avant la fermeture de la vanne), le débit dans la conduite est Q_0 , la vitesse est U_0 et la pression est P_0 . La pression statique y sera donc : $P = \rho g z$, Si on ferme brusquement la vanne en D, nous allons observer dans les instants qui vont suivre une vitesse U (un débit Q) et une pression dynamique ($P = \rho g h$) en x variables avec le temps. Par ailleurs, à un même instant t , les quantités P et u auront évidemment des valeurs différentes le long de la conduite (varieront avec x). Ainsi, P et u sont des fonctions des deux variables x et t . On a donc, deux inconnues à déterminer, à savoir : $h(x, t)[P(x,t)]$ et $u(x,t) [Q(x,t)]$.

Remarque : L'écoulement se fait du réservoir vers la vanne. Lors de l'établissement des équations du mouvement, l'axe est pris positivement du point D vers le point C, c'est-à-dire qu'on remonte le courant.[7]

- ❖ L'application du théorème de la quantité de mouvement donnera l'équation dynamique suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \tag{I.3}$$

- ❖ L'application du principe de conservation de la masse donnera l'équation de continuité suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{g}{a^2} \frac{\partial h}{\partial t} \tag{I.4}$$

U : la vitesse moyenne dans une section.

h : la hauteur piézométrique.

avec :

$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} \quad ; \text{ exprimée en hauteur de fluide (m.c.e ; mètre de colonne d'eau)}$$

Où, a représenté la vitesse de propagation des ondes, et qui s'écrit :

$$a^2 = \frac{1}{\rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right)} \quad (\text{I.5})$$

Dans ce cas :

ε : est la compressibilité volumique de l'eau,

e : est l'épaisseur de la paroi

E : représente le module d'élasticité de YOUNG, ou module d'élasticité de la paroi de la conduite.

α : correspond à l'angle d'inclinaison de l'axe de la conduite avec l'horizontale.

Finalement, le système d'équations du mouvement obtenu est comme suit :

Equations de Saint Venant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} = g \left(\sin \alpha + \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{g}{a^2} \frac{\partial h}{\partial t} \end{array} \right. \quad (\text{I.6.a})$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} = g \left(\sin \alpha + \frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{g}{a^2} \frac{\partial h}{\partial t} \end{array} \right\} \quad (\text{I.6.b})$$

Remarque : On suppose implicitement que la dilatation des parois dans le phénomène du coup de bélier est purement transversale et qu'il n'y a pas de dilatation longitudinale.

I.6.4. Interprétation des équations différentielles du mouvement

Si on dérive (I.6.a) par rapport à t et (I.6.b) par rapport à x et en posant que : $\frac{\partial^2}{\partial x \partial t} = \frac{\partial^2}{\partial t \partial x}$

On aura :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (\text{I.7})$$

Si on dérive (I.6.a) par rapport à x et (I.6.b) par rapport à t , de la même manière on aura :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (\text{I.8})$$

Ainsi, le système d'équations est ramené à deux équations indépendantes du second ordre :

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mathbf{a}^2 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} \quad (\text{I.9.a})$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial t^2} = \mathbf{a}^2 \frac{\partial^2 \mathbf{h}}{\partial x^2} \quad (\text{I.9.b})$$

\mathbf{u} et \mathbf{h} sont liés aux variables x et t par une même équation différentielle qui est l'équation classique des "**Cordes Vibrantes**" (équation de d'**Alembert**). La résolution de ce système est de la forme :

$$\mathbf{h} = \mathbf{F}\left(t - \frac{x}{a}\right) + \mathbf{f}\left(t + \frac{x}{a}\right) + \text{Cste} \quad (\text{I.10})$$

En tenant compte des conditions initiales ($\mathbf{t} = \mathbf{0}$), on a $\mathbf{h} = \mathbf{h}_0$ et $\mathbf{u} = \mathbf{u}_0$, ce qui donnera :

$$\mathbf{h} = \mathbf{h}_0 + \mathbf{F}\left(t - \frac{x}{a}\right) + \mathbf{f}\left(t + \frac{x}{a}\right) \quad (\text{I.11})$$

$$\mathbf{h} = \mathbf{u}_0 - \frac{g}{t} \left[\mathbf{F}\left(t - \frac{x}{a}\right) - \mathbf{f}\left(t + \frac{x}{a}\right) \right] \quad (\text{I.12})$$

Où, \mathbf{F} et \mathbf{f} sont deux fonctions définies par les conditions initiales et aux limites (dont l'expression dépend de la loi de fermeture ou l'ouverture de la vanne), qui représentent deux ondes se propageant dans la conduite, en sens inverse, avec la même célérité a .

\mathbf{h}_0 et \mathbf{U}_0 sont des constantes, elles représentent respectivement la cote de la ligne piézométrique et la vitesse du fluide (vitesse uniforme dans une section).

La surpression ou la dépression correspondant à la valeur du coup de bélier au point M est : $\mathbf{b} = \mathbf{h} - \mathbf{h}_0$, d'où on peut écrire l'équations d'**Allievi** :

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{b} = \mathbf{F}\left(t - \frac{x}{a}\right) + \mathbf{f}\left(t + \frac{x}{a}\right) \end{array} \right. \quad (\text{I.13.a})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u} = \mathbf{u}_0 - \frac{g}{a} \left[\mathbf{F}\left(t - \frac{x}{a}\right) - \mathbf{f}\left(t + \frac{x}{a}\right) \right] \end{array} \right. \quad (\text{I.13.b})$$

I.6.5. Formule d'**Allievi** donnant la célérité des ondes « a »

Allievi donne pour la vitesse " a " de l'onde, la valeur suivante

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}} \quad (\text{I.14})$$

D : diamètre de la conduite

e : épaisseur de la conduite

k : dépend de la nature de la conduite (voir le tableau I. 3)

Tableau I. 4: la valeur du coefficient k dépend de la nature de la conduite.

Matériaux	K
Fer	0.5
Acier	0.5
Fonte grise	1
Fonte ductile	0.59
Béton	5
Amiante ciment	4
PVC	33
PEHD	83

- La célérité d'onde dans l'eau dans des installations ou machines standards est de l'ordre de 1000 m/s à 1400 m/s, ce qui est de 100 à 1000 fois plus élevé que la vitesse de l'écoulement.
- Plus la pression de service est élevée, et plus la célérité est forte (puisque l'épaisseur est plus élevée). [8]
- Le maximum de la célérité serait atteint pour un tuyau indéformable ($k = 0$ ou $E = \infty$) et sa valeur correspondrait à la vitesse de propagation du son dans l'eau, soit 1425m/s.

N.B. : il est difficile pour les tuyaux en matériaux composites, comme les tuyaux en béton armé par exemple, de calculer la célérité, en plus de l'épaisseur du béton, il faut ajouter une surépaisseur due aux armatures.

Nous prendrons une valeur moyenne de : 1100m/s pour les tuyaux en béton précontraint.

1200m/s pour les tuyaux en béton armé et âme tôle.[9]

I.6.6. Représentation graphique du phénomène

A partir du système d'équations d'Allievi (I.13.a) et (I.13.b) on tire :

$$b = F \left(t - \frac{x}{a} \right) + f \left(t + \frac{x}{a} \right) \quad (\text{I.15})$$

$$-\frac{a}{g} (u - u_0) = F \left(t - \frac{x}{a} \right) - f \left(t + \frac{x}{a} \right) \quad (\text{I.16})$$

En additionnant et en retranchant membre à membre les deux équations ci-dessus, on obtient :

$$b - \frac{a}{g} (u - u_0) = 2F \quad (\text{I.17})$$

$$b + \frac{a}{g} (u - u_0) = 2f \quad (\text{I.18})$$

Appelons :

S : la section de la conduite.

Q₀, u₀ : le débit et la vitesse en régime permanent.

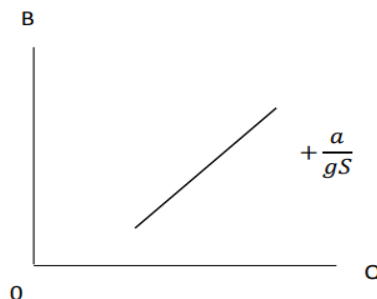
Q, u : le débit et la vitesse à un instant quelconque.

Les équations ci-dessus peuvent s'écrire comme suit :

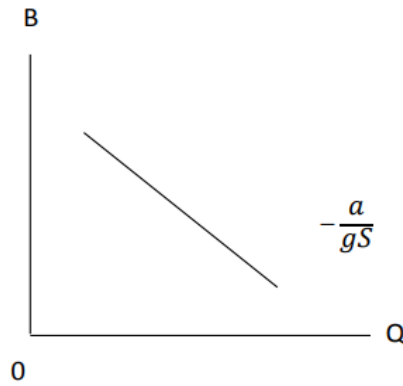
$$b = \frac{a}{gS} (q - q_0) + 2F \quad (\text{I.19.a})$$

$$b = -\frac{a}{gS} (q - q_0) + 2f \quad (\text{I.19.b})$$

Comme nous l'avons vu précédemment, pour un observateur se déplaçant en sens inverse du courant, à la vitesse a , la valeur de F resterait toujours la même. Par conséquent, si l'on rapporte Q et b à deux axes $(0B)$ et $(0Q)$, l'équation (I.19.a) pour une valeur de F , est l'équation d'une droite de pente $(+a/gS)$.

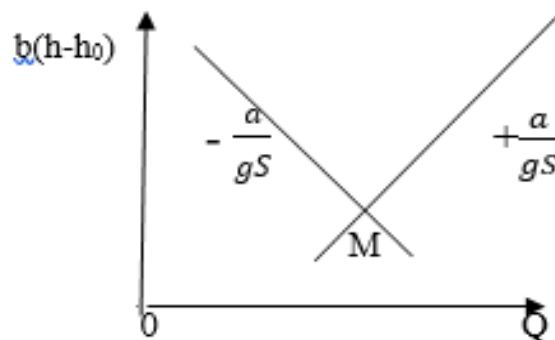


De même, pour un observateur se déplaçant dans le sens du courant à la vitesse $-a$, la valeur de f reste constante et dans le même système de coordonnées $(0B)$ et $(0Q)$, l'équation (I.19.b) pour une valeur de f , est l'équation d'une droite de pente $(-a/gS)$



Le point de fonctionnement M est donc parfaitement défini à l'instant t en un point déterminé de la conduite

- Cette représentation c'est la base de la méthode graphique de **BERGERON** Qui exprime que, pour un observateur se déplace à la vitesse a des ondes, parti d'un point donné à un temps donné ou les caractéristique q_0 , h_0 régime sont connues.[10]
- Cette méthode graphique adjointe à un calcul simultané permet de résoudre les problèmes de coup de bélier les plus compliqués.
- Notons que les pertes de charge dans la conduite sont réintroduites par l'intermédiaire d'un diaphragme équivalent.
- Cette méthode est fastidieuse et ne donne les valeurs de la surpression et de la dépression qu'en un seul point de la conduite. Il est absolument nécessaire de considérer la conduite dans son ensemble.
- Dans certains cas, il peut être intéressant de faire toute ces constructions graphiques.



I.7. Valeur numérique du coup de bélier

Le coup de bélier est étudié pour les deux cas :

I.7.1. Cas de la fermeture brusque $T \leq \frac{2L}{a}$

a: valeur numérique du coup de bélier sera calculée par la formule de **Jukowski**:

$$\mathbf{B} = \frac{aV_0}{g} \quad (\text{m}) \quad (\text{I.20})$$

Ou :

V : vitesse moyenne d'écoulement (m/s).

g : accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

I.7.2. Cas de la fermeture lente $T > \frac{2L}{a}$

Elle est caractérisée par un temps de fermeture supérieure à $\frac{2L}{a}$ c'est-à-dire supérieure à un aller et retour d'onde la valeur du coup de bélier est donné par la formule de **MICHAUND** :

$$\mathbf{B} = \frac{2LV_0}{gT} \quad (\text{m}) \quad (\text{I.21})$$

L : la longueur de la conduite en m.

$$\text{❖ En cas de surpression : } H_{\max} = H_g + \frac{aV_0}{g} \quad (\text{I.22})$$

$$\text{❖ En cas de dépression : } H_{\min} = H_g - \frac{aV_0}{g} \quad (\text{I.23})$$

❖ La pression absolue statique H_0 (avant l'apparition du coup de bélier)

$$H_0 = H_g + 10 \quad (\text{I.24})$$

I.8. Conclusion

Tout au long de ce chapitre, nous avons abordé brièvement certaines notions liées au coup de bélier et les causes les plus probables provoquant le phénomène, nous avons pu aussi établir une série d'équations analysant le régime transitoire.

Les équations de SAINT-VENANT sont générales et traduisent tous les mouvements transitoires. Après les avoir simplifiés, en rétrécissant leur champ de validité, nous avons abouti aux équations d'ALLIEVI.

En faisant intervenir les conditions aux limites, nous pouvons établir des solutions analytiques à partir de ces équations pour des cas simples

Chapitre II

Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on va exposer les appareils anti-bélier qui devront avoir essentiellement pour effet de limiter la surpression et la dépression. Les principaux types de protection anti-bélier sont explicités dans ce qui suit citant leurs avantages et leurs inconvénients.

II.2. Le rôle des moyens de protection

Lors de la conception d'un réseau, les risques éventuels de coup de bélier doivent être étudiés, afin de mettre en œuvre les protections qui s'imposent[11]

Ces dispositifs de coup de bélier doivent jouer un rôle important :

- De limiter la dépression
- De limiter la surpression

II.3. Les moyens les plus utilisés

Il existe plusieurs types d'organes de protections à mettre en œuvre pour limiter un coup de bélier à une valeur admissible. Elles agissent soit en ralentissant la modification de la vitesse du fluide, soit en limitant la surpression par rapport à la dépression [12]. Les équipements de protection contre le coup de bélier sont très variés. Ils sont choisis en fonction de la disposition de l'installation et des caractères géométriques de cette dernière. Nous citons quelques-uns :

II.3.1. Les volants d'inertie (protection contre la dépression)

La spécificité de ce type de protection est qu'il continue à assurer l'alimentation de la veine liquide, et ce malgré l'arrêt du moteur actionnant la pompe. Ce volant qui est placé sur l'arbre du groupe, restitue l'énergie cinétique accumulée pendant la marche en régime normal au moment de la disjonction et permet ainsi de prolonger le temps d'arrêt de l'ensemble du groupe, et donc, de diminuer l'intensité du coup de bélier.

L'inertie du volant doit être suffisante pour transformer la manœuvre instantanée en manœuvre lente, c'est-à-dire qu'il doit garantir le mouvement pendant un temps supérieur à $2L/a$. [13]

Le volant d'inertie est généralement peu ou non utilisable, pour les raisons suivantes :

- Ce procédé est utilisé seulement pour limiter les dépressions.
- Dans le cas d'une conduite de refoulement assez grande, il faut envisager des volants avec des poids considérables, et par conséquent le système ne sera en aucun cas économique.
- Par ailleurs, plus le volant est lourd, plus le moteur doit être puissant pour pouvoir vaincre, au démarrage, l'inertie de ce volant, ce qui peut conduire à des appels d'intensité de courant inadmissibles.[6]

Tableau II. 1: La spécificité du volant d'inertie

Fonction	Augmentation du temps d'annulation du débit
Rôle anti-bélier	Écrêter les dépressions à l'aval de la pompe
Cas d'utilisation	Pour la protection des conduites à longueurs de refoulement faibles ou moyennes et qui n'excèdent pas quelques centaines de mètres



Figure II. 1: Volant d'inertie vertical.(Entraînement par l'intermédiaire d'un arbre articulé, $D = 790 \text{ mm}$)

II.3.2.Soupapes de décharge (protection contre la surpression)

Le rôle d'une soupape consiste à dévier un certain débit à l'extérieur de la conduite à protéger, dès que la pression atteint une certaine valeur de réglage estimée généralement à environ 1.04 à 1.10 de la pression maximale admissible. L'ouverture doit pouvoir s'effectuer très rapidement pour que l'opération soit efficace.

Elles ne sont mises en œuvre que là où d'autres mesures ne sont plus possibles. Leurs inconvénients sont les suivants :

- Nécessité d'une maintenance régulière.
- En cas de disposition incorrecte et de montage non conforme, elles peuvent provoquer des coups de bélier aggravés.
- Dans certaines conditions, le mode de fonctionnement de l'installation peut être limité, car l'air aspiré doit ensuite être éliminé.
- Pour les eaux usées, il est nécessaire de recourir à des conceptions spécifiques.[14]



Figure II. 2: Soupape de décharge.

II.3.3. Les ventouses (protection contre la dépression et la surpression)

On distingue des ventouses à trois fonctions (Figure II.4) à savoir, l'évacuation de l'air contenu dans les conduites, l'admission de l'air dans ces conduites lorsqu'on procède à leur vidange et l'élimination des poches d'air qui se manifestent aux points hauts du circuit (qui peuvent provoquer des coups de bélier), d'où leur installation en des points hauts. Il y a également des ventouses à fonction unique (Figure II.3) en l'occurrence, l'évacuation des poches d'air seulement. Une ventouse est constituée en principe d'un flotteur sphérique en caoutchouc logé dans un corps en fonte.[6]

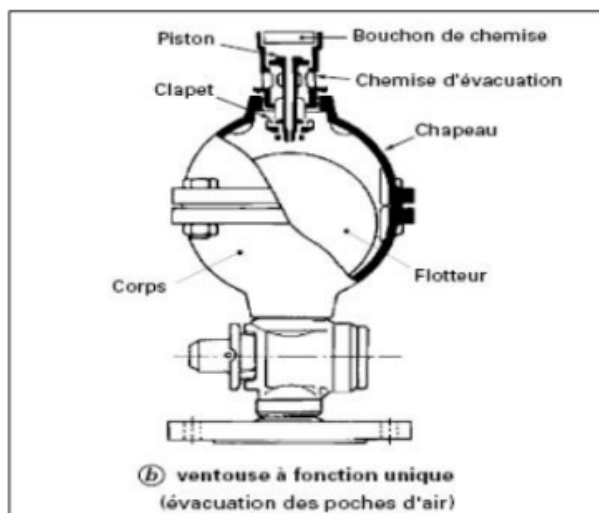


Figure II. 3: Ventouse à une seule fonction.



Figure II. 4: Ventouse à trois fonctions.

II.3.4. Cheminée d'équilibre

La cheminée d'équilibre est une réserve d'eau en contact permanent avec la conduite et dont la surface libre traduit exactement les variations de pression du fluide.

La cheminée doit donc avoir une section assez large pour combler la dépression sans se vider complètement et doit être assez haute pour ne pas déborder lorsqu'une surpression fait monter son niveau. La présence d'une cheminée modifie le mouvement transitoire engendré par une disjonction. Au lieu d'un mouvement oscillatoire de période $\frac{4L}{a}$ caractéristique du coup de bélier d'onde, s'instaure un mouvement oscillatoire de période plus grande, l'oscillation en masse.[1]

Dans le domaine des réseaux sous pression, les cheminées sont rarement utilisées car il faudrait qu'elles aient une hauteur supérieure à la hauteur manométrique totale ; on n'imagine pas une telle cheminée dès que la hauteur de refoulement dépasse quelques mètres. Son emploi redevient d'ailleurs maintenant d'actualité puisqu'on réalise de plus en plus des conduites d'assainissement sous pression. [15].

Les cheminées d'équilibre sont usuellement utilisées lorsque l'installation est constituée d'une longue canalisation ou d'un long chenal d'amenée à faible pente suivi d'une canalisation à forte pente terminée par un appareil de manœuvre susceptible d'engendrer des

variations plus ou moins rapides de débit. [16]



Figure II. 5: Cheminée d'équilibre **Figure II. 6:** Cheminée d'équilibre à Montevideo, Uruguay. de St-Alban, Québec.

Tableau II. 2: La spécificité de la cheminée d'équilibre.

Fonction	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire la valeur des surpressions produites par le coup de bélier dans la conduite forcée. • Diminuer les surpressions dues au coup de bélier dans la galerie d'amenée. • Amortir les oscillations importantes. • Assurer l'alimentation de la veine liquide, en diminuant les dépressions engendrées par l'arrêt du moteur actionnant la pompe.
Rôle anti-bélier	Stockage/restitution d'énergie mécanique.
Cas d'utilisation	Sont usuellement utilisées lorsque l'installation est constituée d'une longue canalisation ou d'un long chenal d'amenée à faible pente suivi d'une canalisation à forte pente terminée par un appareil de manœuvre susceptible d'engendrer des variations plus ou moins rapides de débit.

II.3.4.1. Types de cheminées

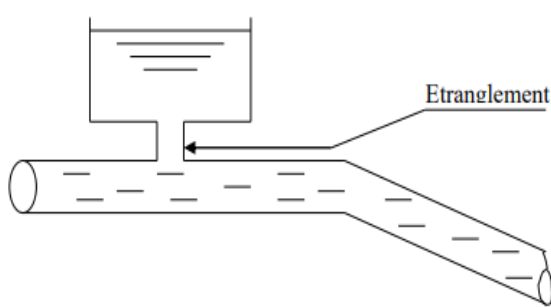


Figure II. 7: Cheminée à étranglement.

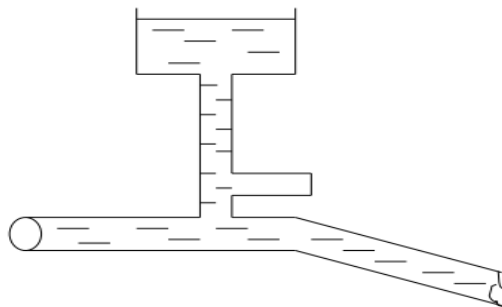


Figure II. 8 : Cheminée à épanouissement.

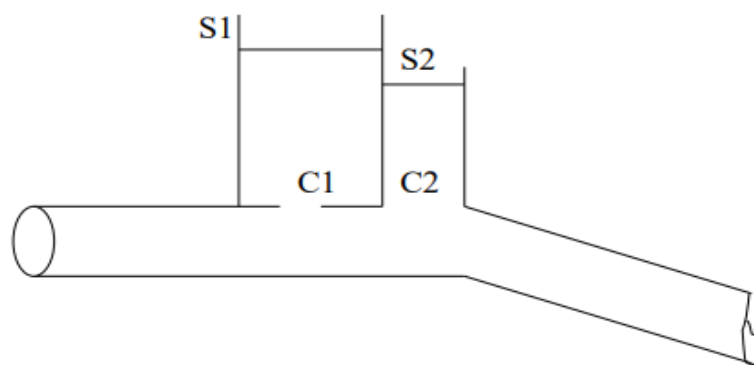


Figure II. 9: Cheminée différentielle.

Le dimensionnement est fait par les relations de CALAME et GADEN

- Choix de l'emplacement de la cheminée d'équilibre.
- Fixer le diamètre de la cheminée d'équilibre (D_{ch}) et calculer la section de la cheminée

$$A = \pi \frac{D_{ch}^2}{4} \quad (\text{m}^2) \quad (\text{II.1})$$

Calcul les paramètres H_{\max} et K :

$$H_{\max} = V_0 * \sqrt{\frac{L \cdot S}{g \cdot A}} \quad (\text{II.2})$$

$$K = \frac{\Delta h}{H_{\max}} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

H_{\max} : L'amplitude de mouvement sinusoïdal autour du niveau statique sans perte de charge.

K : nombre sans dimension.

L : longueur de la canalisation (m).

S : section de la canalisation (m^2).

A : section de la cheminée d'équilibre (m^2).

g : accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2).

Δh : Perte de charge totale (m).

- Déterminer le niveau maximal et minimal de la cheminée d'équilibre par les équations suivantes :

$$H_d = H_{\max} \left(1 - \frac{2}{3}K + \frac{1}{9}K^2 \right) \quad (\text{II.4})$$

$$H_m = H_{\max} (0.973 - 1.326 K + 0.654 K^2) \quad (\text{II.5})$$

Avec

H_d : Le niveau minimal de la cheminée d'équilibre.

H_m : Le niveau maximal de la cheminée d'équilibre.

- Déterminer la cote maximale et minimale de la cheminée d'équilibre :

$$\text{La cote inférieure de la cheminée : } Z_{\text{inf}} = Z_{\text{ch}} - H_d \quad (\text{II.6})$$

$$\text{La cote supérieure de la cheminée : } Z_{\text{sup}} = Z_{\text{ch}} + H_m \quad (\text{II.7})$$

Avec

$$Z_{\text{ch}} : \text{La cote de la cheminée : } Z_{\text{ch}} = Z_{\text{CTN}} + \Delta h \quad (\text{II.8})$$

Z_{CTN} : La cote du point de l'emplacement de la cheminée.

Δh : Perte de charge totale (m).

II.3.5. Les réservoirs d'air

Le réservoir d'air est l'appareil le plus utilisé pour la protection contre le coup de bélier. C'est un récipient contenant de l'air comprimé dans sa partie supérieure et de l'eau dans sa partie inférieure. Ces appareils sont aussi appelés "accumulateurs, cloche à air, ballon d'air, réservoir anti-bélier, etc. Par ailleurs, un compresseur d'air est habituellement utilisé pour

Chapitre II Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

garder le volume d'air dans certaines limites (à cause des fuites) d'une part, et d'autre part, un clapet anti-retour est souvent prévu entre la pompe et le ballon d'air. Ce dispositif est très simple et protégera l'installation aussi bien contre les dépressions que contre les surpressions.

Suite à une disjonction, le clapet se ferme et à ce moment-là, la pression de l'air de la cloche est encore supérieure à celle qui s'exerce à l'autre extrémité de la conduite ; ainsi, une partie de l'eau de la cloche est chassée dans la conduite. Après diminution progressive, puis annulation de sa vitesse, l'eau de la conduite revient en arrière et remonte dans la cloche, et ainsi de suite. La dissipation de l'énergie de l'eau peut être obtenue par le passage de celle-ci à travers un organe d'étranglement disposé à la base de la cloche. A cause du remplissage ou de la vidange du réservoir anti-bélier, l'air dans ce dispositif se comprime ou se dilate, et l'amplitude de la surpression et de la dépression seront réduites suite à la variation graduelle de la vitesse d'écoulement dans la conduite.

On distingue deux phases :

- ❖ **1^{ère} phase** : A la fin de la dépression, l'air occupe un volume plus grand et sa pression sera donc plus faible ; ainsi la pression absolue est Z_{\min} .
- ❖ **2^{ème} phase** : A la fin de la surpression, l'air occupe un volume plus petit qu'en marche normale et sa pression sera dans ce cas Z_{\max} .

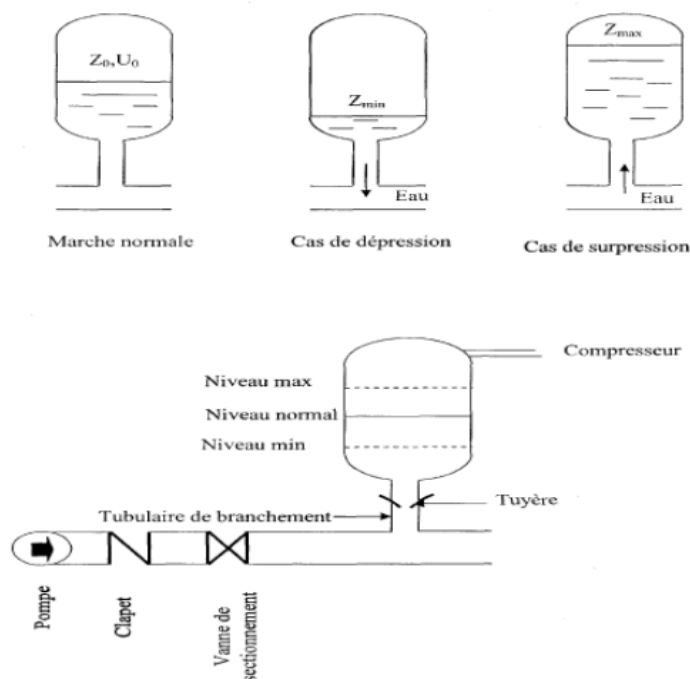


Figure II. 10: Principe de fonctionnement d'un réservoir d'air.



Figure II. 11: Réservoir d'air.

II.3.5.1. Méthodes de calcul du réservoir d'air

Il existe plusieurs méthodes pour le calcul du réservoir d'air, parmi ces méthodes il y a celle de Vibert et de Bergeron.

a. Méthode de VIBERT

En faisant obstruction des pertes de charges dans la conduite de refoulement et en considérant le phénomène comme une oscillation en masse, VIBERT arrive à une expression qui donne le volume d'air (U_0) contenu dans le réservoir sous un régime démarrage à la vitesse (v_0).

VIBERT a donné un abaque permettant d'avoir U_0 , et ceci en utilisant l'expression suivante :

$$U_0 = \frac{V_0}{2gZ_0} * \frac{L.S}{f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad \text{(II.9)}$$

D'où :

U_0 : volume d'air (m^3) ;

V_0 : vitesse initiale de l'écoulement (m/s) ;

L : longueur de la conduite de refoulement (m) ;

S : section de la conduite de refoulement (m^2) ;

Z_0 : hauteur de pression absolue dans le réservoir en régime normal (permanent) (m) ;

Z : hauteur de pression dans le réservoir après fonctionnement du phénomène transitoire (m)

Telle que:
$$f\left(\frac{Z}{Z_0}\right) = \frac{Z_0}{Z_{min}} - 1 - \log\left(\frac{Z_0}{Z_{min}}\right) \quad \text{(II.10)}$$

Pour l'établissement de cet abaque, la formule a été mise sous la forme suivante :

$$\frac{U_0}{L.S} = \frac{V_0^2}{2g} * \frac{1}{Z_0} \frac{1}{f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad \text{(II.11)}$$

On pose $\frac{V_0^2}{2g} = H_0$:

$$\frac{U_0}{L.S} = \frac{H_0}{Z_0} \frac{1}{f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad \text{(II.12)}$$

Chapitre II Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

Dans laquelle, $\frac{U_0}{L.S}$, $\frac{H_0}{z_0}$, $f\left(\frac{z}{z_0}\right)$ se trouvent sur les trois échelles de l'abaque (voir l'annexe II).

Cet abaque permet une approche pour le dimensionnement d'un réservoir d'air. Une fois que les dimensions de ce réservoir sont connues, on effectue une étude du coup de bélier en fonction des paramètres géométriques de ce réservoir.

b. Méthode de PEUCH et MEUNIER

L'étude comparative faite par MM. PEUCH et MEUNIER surtout les abaques existants montre que tous les résultats sont compris dans une fourchette de 10%. Cette précision est suffisante pour faire un dimensionnement industriel et nous choisirons la méthode la plus simple à appliquer.

La méthode de PEUCH et MEUNIER utilise trois nombres adimensionnels qui sont :

$$\mathbf{K} : \text{qui caractérise les pertes de charge ; } K = \frac{H_{abs} - H_0}{H_0} \quad (\text{II.13})$$

$$\mathbf{A} : \text{qui caractérise la conduite de refoulement ; } A = \frac{a \cdot V_0}{g \cdot H} \quad (\text{II.14})$$

$$\mathbf{B} : \text{qui caractérise le volume d'air du réservoir anti-bélier ; } B = \frac{V_0^2}{g \cdot H_{abs}} * \frac{L \cdot S}{U_0} \quad (\text{II.15})$$

a: célérité d'onde de choc (m/s) ;

V₀ : vitesse d'écoulement en régime permanent (m/s) ;

H₀ : pression statique absolue = Hg+10 (m) ;

H_{abs}: la pression de service absolue

Tel que :

$$\text{HMT} = Hg + j_T \quad (\text{m}) \quad (\text{II.16})$$

$$H_{abs} = \text{HMT} + 10 \quad (\text{m}) \quad (\text{II.17})$$

L : longueur totale de la conduite de refoulement (m) ;

S : section de la conduite de refoulement (m) ;

U₀ : volume d'air initial (m³)

g : accélération de pesanteur (m/s²)

➤ Calcul des pertes de charge :

Les pertes de charge sont des chutes de pression dues à la résistance que rencontrent les fluides en écoulement.

Les pertes de charge peuvent être :

- **Linéaires** : elles correspondent alors à l'écoulement le long des conduites. Elles sont déterminées par la formule de DARCY-WEISBACH suivante[17] :

$$j = \frac{\lambda L V^2}{D 2g} \quad (\text{II.18})$$

Chapitre II Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

g : accélération de la pesanteur $g = 9,81$ (m/s²) ;

D : diamètre en (m) ;

L : La longueur de la conduite de refoulement ;

λ : coefficient de frottement adimensionnel qui dépend de la nature du régime d'écoulement.

En ce qui concerne le coefficient de pertes de charge linéaire () il sera déterminé à partir de la résolution de l'équation de Collebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right] \quad (\text{II.19})$$

Singulières : elles se manifestent sur les pièces spéciales qui modifient la direction ou la section de passage du fluide (raccord, T, vannes, soupapes, etc...)

$$\Delta H_s = 10\% \Delta H_L = 0.10 \Delta H_L \text{ donc } \Delta H_T = \Delta H_L + 0.10 \Delta H_s = 1.1 \Delta H_L [9]$$

Calcul de dépression

Ayant calculé K et A nous superposons la famille des courbes enveloppe correspondantes B au profil en long de la conduite. Nous choisissons la courbe qui laisse au moins une sécurité de 5 m de pressions absolue au-dessus du point le plus défavorable. La valeur de B permet alors de calculer U_0 qui sera ainsi déterminé

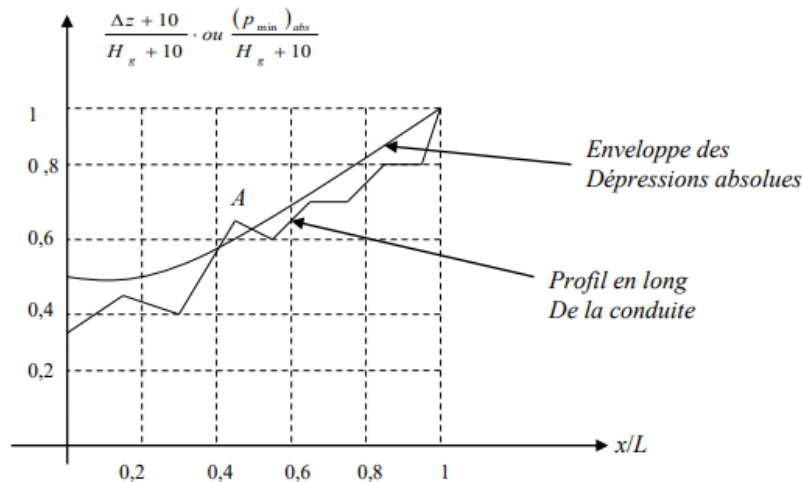


Figure II. 12: L'enveloppe de dépression absolue.

L'enveloppe des dépressions absolues dépend du volume d'air initial U_0 en régime permanent. Nous choisissons donc U_0 pour que l'enveloppe ne coupe pas le profil en long. Tracer le profil en long de la conduite de refoulement, comme suit :

Tableau II. 3: Profil en long général de la conduite.

Z(m)	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
X	0	X_1	X_2	X_3	X_4
$\frac{\Delta Z + 10}{H_g + 10}$	$\frac{(Z_0 - Z_0) + 10}{H_g + 10}$	$\frac{(Z_1 - Z_0) + 10}{H_g + 10}$	$\frac{(Z_2 - Z_0) + 10}{H_g + 10}$	$\frac{(Z_3 - Z_0) + 10}{H_g + 10}$	$\frac{(Z_4 - Z_0) + 10}{H_g + 10}$

$\frac{X}{L}$	0	$\frac{X_1}{L}$	$\frac{X_2}{L}$	$\frac{X_3}{L}$	$\frac{X_4}{L}$
---------------	---	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

Z : La pression totale.

$\frac{X}{L}$: Le rapport entre les abscisses de différents points et la longueur totale.

Après avoir trouver la valeur de B qui permet de protégée la conduite contre les dépressions absolues est laisse au-dessus du point le plus défavorable du profil une pression supérieure ou égale à 5m d'eau. Cette valeur permet de calculer le volume d'air U_0 en régime permanent.

$$U_0 = \frac{V_0^2}{gH_{abs}} \frac{L.S}{B} \quad (\text{II.20})$$

Calcul de Surpression

Pour protéger la conduite contre la surpression nous calculerons à l'aide de la méthode de DUBIN et GUENEAU (annexe III), le diamètre optimum d du diaphragme afin que la surpression soit laminée au maximum

Pour une valeur de B et A connue l'abaque de DUBIN et GUENEAU permet de lire :

$$\alpha \frac{V_0^2}{2g} \text{ et } \frac{P_{max}}{H_0}$$

Telle que :

$$\alpha = \frac{1}{2g} \left[\frac{D^2}{0.6d^2} - 1 \right]^2$$

a. Méthode de BERGERON

C'est une méthode grapho-analytique, Une fois, les caractéristiques du réservoir d'air (Volume U_0 d'air en régime normal) et de son dispositif d'étranglement sont fixés, les valeurs maximales de la surpression et de la dépression seront déterminées par la méthode de BERGERON.

Le premier essai conduira peut-être à des valeurs inadmissibles pour la surpression ou pour la dépression, ou pour les deux à la fois. Les calculs seront alors recommencés à partir de nouvelles caractéristiques du réservoir, ou de l'étranglement, ou des deux. Cette méthode nécessitera donc quelques tâtonnements, mais, en fait, ils resteront très limités et la précision sera bonne.

Le principe est comme suit:

Dans le digramme de BERGERON, les abscisses sont graduées selon les vitesses de l'eau dans la conduite au lieu des débits.

- De préférence les calculs du régime transitoire seront faits avec un pas de calcul $\Delta t = 2L/a$ en prenant L/a comme unité de temps.
- La ligne de référence est l'horizontale passant par le plan d'eau du réservoir d'eau elle correspond à la hauteur géométrique de refoulement H_0 augmentée de 10 m d'eau pour avoir la pression absolue ($Z_0 = H_0 + 10$).
- On doit tenir compte des pertes de charge dans la conduite, et qui sont par supposition, concentrées en un point fictif au départ de la pompe. Ces pertes de charge sont représentées

Chapitre II Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

sur l'épure de BERGERON par la parabole classique, qui n'est autre que la caractéristique de la conduite.

- On doit tenir compte des pertes de charge dans l'organe d'étranglement. Celles-ci auront des valeurs différentes selon que l'eau sort du réservoir d'air ou pénètre dans le réservoir d'air.
- Une fois la pression dans la conduite déterminée (trouvée), on vérifie alors, en menant une horizontale passant par la valeur de cette pression finale, que cette droite coupe la droite de pente a/g au droit de la vitesse choisie au début (V_f), sinon les calculs seront refaits avec une autre valeur de V_f (voir la figure)

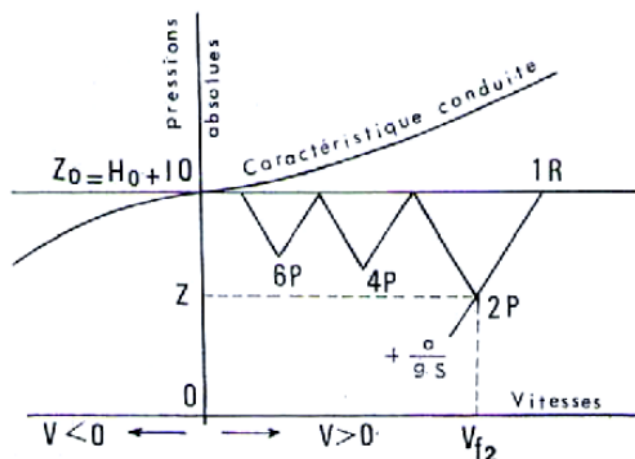


Figure II. 13: Principe de la construction de l'épure de BERGERON.

II.4. Application des principes ci-dessus

On sait qu'à la suite de l'arrêt brusque, l'eau continue de monter vers le réservoir d'eau pendant un certain temps et, cela, avec une vitesse décroissante. A un moment donné, la vitesse de l'eau est nulle puis, toute la colonne redescend vers le réservoir d'air avec une vitesse négative qui va croître en valeur absolue puis décroître pour redevenir nulle, ect..., et le phénomène se poursuit en s'amortissant.

On considérera qu'au cours d'un aller-retour d'onde, donc d'un intervalle de temps $T = 2L/a$ l'eau qui poursuit, par exemple, sa montée est animée, au début d'un intervalle quelconque T , d'une vitesse $V_{f_{n-1}}$ et à la fin d'une vitesse : $V_{f_n} < V_{f_{n-1}}$

Comme les sommets 2P, 4P, 6P... de l'épure correspondent à des états finals, c'est la vitesse finale de l'eau au cours de l'intervalle qui doit être considérée et c'est cette vitesse V_f qui l'on se fixe au départ, a priori

Par ailleurs, en partant d'une valeur arbitraire d'un volume initial du réservoir d'air et d'une vitesse finale d'eau dans un intervalle de temps considéré, on peut calculer à la fin de cet intervalle :

- La pression dans le réservoir
- La pression en aval de l'étranglement
- La pression en aval du diaphragme fictif représentatif des pertes de charge dans la conduite

Chapitre II Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

On vérifie alors, que cette droite coupe bien a/gS au droit de V_f , sinon les calculs seront recommencés avec une autre valeur de V_f .

Il est plus commode dans ce genre de résolution de dresser le tableau de calcul suivant :

Tableau II. 4: Tableau de calcul.

Intervalles de temps T	0	T	2T
Variation du volume d'air $\Delta U = S \cdot V_m \cdot T$				
Volume d'air U_0				
Pression dans le réservoir d'air $Z_{0+\delta_0} U_0^{1.2} = Z U^{1.2}$				
Vitesse dans la tubulure de branchement : Montée : $V_1 = K \cdot V$ Descente : $V_2 = K' V_f$				
Perte de charge dans la tuyère Montée : $\Delta h_1 = c V_1^2 / 2g$ Descente : $\Delta h_2 = c' V_2^2 / 2g$				
Pression dans la conduite avec pertes de charge Montée : $Z - \Delta h_1$ Descente : $Z + \Delta h_2$				
Perte de charge refoulement : δ				
Pression dans la conduite sans pertes de charge Montée : $Z - \Delta h_1 - \delta$ Descente : $Z + \Delta h_2 + \delta$				
Vitesse lue sur le graphique V_f				
Désignation du point				
Vitesse moyenne V_m				
Vitesse finale choisie V_f				

➤ Les principales étapes de calculs seront alors comme suit :

- Les temps se suivent selon des valeurs :

$$T = \frac{2L}{a} \quad (\text{II.21})$$

- La vitesse moyenne : Au cours des calculs, V_m sera donc la moyenne arithmétique entre la vitesse finale (définitive) de l'intervalle précédent et la nouvelle vitesse finale qui sera choisie pour l'intervalle considéré :

$$V_{mi} = \frac{V_{i-1} + V_i}{2} \quad (\text{II.22})$$

Pour le premier intervalle T, on aura :

Chapitre II Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

$$V_{m1} = \frac{V_0 + V_{f1}}{2} \quad (\text{II.23})$$

Où :

V_0 : Vitesse de régime normal avant la disjonction (Ecoulement initial).

V_{f1} : Vitesse finale choisie (à la fin du temps T).

N.B : Au cours des calculs, il faut faire attention aux vitesses négatives, cela signifie que l'eau passe de la conduite au réservoir d'air.

- Le volume d'eau qui est transité dans la conduite de refoulement de section S pendant le temps T avec une vitesse moyenne V_m qui sera supposée égale à la moyenne arithmétique des vitesses au début et à la fin de T. La formule du volume d'air est donnée par :

$$\Delta U = S * V_m * T \quad (\text{II.24})$$

Le volume d'air U du réservoir sera égal, à la fin du premier intervalle T, au volume d'air choisi arbitrairement U_0 au départ, augmenté de la quantité trouvée à la colonne précédente ΔU .

$$U_i = U_{i-1} \pm \Delta U \quad (\text{II.25})$$

- La nouvelle pression dans le réservoir d'air est donnée par la loi de POISSON, telle que :
 $(Z_0 + \delta_0) U_0^{1.2} = Z U^{1.2} \quad (\text{II.26})$

δ_0 : Perte de charge dans la conduite en régime de fonctionnement normal.

Z_0 : Pression absolue.

U_0 : Volume d'air initial.

U : Nouveau volume d'air.

Z : Pression dans le réservoir d'air.

Donc :

$$Z = \frac{(Z_0 + \delta_0) U_0^{1.2}}{U^{1.2}} \quad (\text{II.27})$$

- Cette étape se rapporte à l'organe d'étranglement ; on choisit par exemple une tuyère. On calculera, à la montée de l'eau, la vitesse V_1 de l'eau dans la tuyère en fonction de la vitesse finale V_f de l'eau dans la conduite pour l'intervalle de temps considéré. On calculera aussi la vitesse V_2 dans la tuyère à la descente de l'eau.

- ✓ Cas de la montée de l'eau la perte de charge Δh_1 à la montée de l'eau est donnée par :

$$\Delta h_1 = \frac{c V_1^2}{2g} \quad (\text{II.28})$$

c : Coefficient de perte de charge.

- ✓ Cas de la descente de l'eau

Chapitre II Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

$$\Delta h_1 = \frac{c'V_2^2}{2g} \quad (\text{II.29})$$

c' : Coefficient de perte de charge.

tel que :

$$m = \frac{1}{2} \left(\frac{d}{D} \right)^2 \quad (\text{II.30})$$

D : Diamètre de la tubulure

- A partir des calculs ci-dessus, la pression absolue se déduit comme suit :
 - En faisant la différence $Z - \Delta h_1$ quand l'eau monte.
 - En faisant la somme $Z + \Delta h_2$ quand l'eau descend.

La pression manométrique, exprimée en mètres d'eau, s'obtient en déduisant 10 m des valeurs ainsi trouvées

- La perte de charge au refoulement :

$$\delta = \frac{1.15 * \lambda * L * V_f^2}{2gD} \quad (\text{II.31})$$

- La pression finale absolue dans la conduite, en aval du point fictif des pertes de charge s'obtient :

- A la montée : $Z - \Delta h_1 - \delta$ (II.32)

- A la descente : $Z + \Delta h_2 + \delta$ (II.33)

- C'est par cette valeur de la pression finale absolue que sera menée l'horizontale qui recoupera la droite (+ a/g) en un point tel que 2P, 4P, 6P... et qui devra correspondre à la vitesse V_f fixée au départ.

Chapitre II Protection des canalisations passant par différents appareils et équipements

II.5. Avantages et inconvénients

Tableau II.5 : Avantages et inconvénients des appareils anti-bélier.

Appareils	Avantages	Inconvénients	Observations
Volants d'inertie	<ul style="list-style-type: none"> • Dispositif économique. • Intéressants sur les installations qui ne s'arrêtent pas trop souvent. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consommation d'énergie supplémentaire • Protection limitée par la puissance du moteur et les caractéristiques de démarrage. • Inappropriée dans les stations à fortes fréquences de démarrage. 	Utilisé comme protection contre les dépressions
Soupape de décharge	<ul style="list-style-type: none"> • Coûts limités. • Entretien et réglage facile. • Ne consomme pas d'énergie. • Indépendant d'une installation électrique. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite un entretien et un contrôle attentifs (ressort). • Pertes considérables d'eau pendant le fonctionnement. 	Utilisé comme protection contre la surpression
Ventouses (reniflards)	<ul style="list-style-type: none"> • Bon fonctionnement pour un écoulement stable. • Peuvent être placées sur la plupart des points hauts d'un réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quelques difficultés dans des cas de dépression ou il se produit une aspiration d'eau sale dans le réseau. • Dépression d'origine inconnue (poteau d'incendie, manœuvre de vannes etc...) ou d'une opération mal préparée. 	Utilisé comme protection contre la surpression (et dépression dans certains types a triples fonctions)
Réservoir d'air	<ul style="list-style-type: none"> • Bon fonctionnement. • Bonne sécurité. • Pas de pertes d'eau. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entretien et réglage compliqués qui exige du personnel qualifié. • Coût élevé. 	Utilisé comme protection contre la dépression et la surpression
Cheminée d'équilibre	<ul style="list-style-type: none"> • Bon fonctionnement(ne comporte pas d'organes mécaniques susceptibles de fonctionnement défectueux). • Importante durée de vie ; <ul style="list-style-type: none"> • Indépendante d'une installation électrique ; • Pas de pertes d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilités d'installation limitées. • Ouvrage coûteux. (hauteur généralement très développée). 	Utilisé comme protection et pour la dépression et pour la surpression

II.6. Conclusion

Dans ce deuxième chapitre on s'est focalisé sur les différents appareils anti béliers utilisées pour la protection des canalisations dans les deux cas de variation de pression ; cas de la surpression et celui de la dépression, décrivant leur système de fonctionnement et méthode d'utilisation ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Chapitre III

Etude d'un cas de refoulement

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude d'un cas réel de protection d'une conduite de refoulement, contre le coup de bélier, à l'aide d'un réservoir d'air. Il sera procédé en premier au dimensionnement du réservoir d'air et de ses organes annexes. par la méthode de Puech et Meunier et par la méthode de Vibert., et puis La vérification sera faite par le tracé de l'épure de Bergeron et la méthode de Vibert.

III.2. Protection de la conduite de refoulement [18]

L'adduction de la figure (Figure III. 1) refoule un débit d'eau de $0.0254 \text{ m}^3/\text{s}$ sur une distance de 1268.2 m . Déterminer la protection anti-bélier pour protéger la conduite de fonte grise. $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

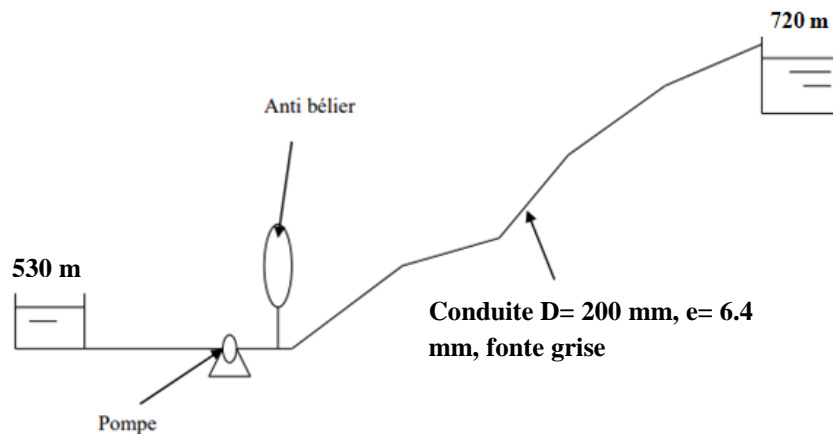


Figure III.1: Schéma d'adduction d'un refoulement.

III.2.1. Caractéristique de la conduite

Tableau III. 1: Caractéristique de la conduite.

Longueur de la conduite	1268.2 m
Diamètre de la conduite	0.2 m
Epaisseur de la paroi	6.4 mm
Section de la conduite	0.0314 m^2
Débit	$0.0254 \text{ m}^3/\text{s}$
Vitesse	0.81 m/s
Lamda	0.017
Accélération de la gravité	9.81 m/s^2
Type de matériau de la conduite	Fonte grise

III.2.2. Profil en long de la conduite

Tableau III. 2: Profil en long de la conduite.

Cote (Z)	530	543.41	577.18	584.45	605.1	618.88	637.44	671.04	687.53	706.54	720.00
L	0	128.63	257.27	385.91	514.54	644.61	774.69	904.76	1034.83	1151.5	1268.2

Avec :

I : longueur partielle de la conduite (m)

Z : cote du terrain naturel de chaque longueur partielle (m)

III.3. Dimensionnement du réservoir d'air par la méthode de Peuch et Meunier

a. Dépression

➤ Caractéristique des pertes de charges, **K**

Calcule des pertes de charges en tenant compte que $\lambda = 0.017$; alors d'après la formule (II.18) on aura :

$$j = \frac{\lambda L V^2}{D 2g}$$

$$j = \frac{0.017 \times 0.81^2}{2 \times 9.81 \times 0.2}$$

$$j = 0.0028 \text{ m/ml}$$

$$J_T = J_s + J_L \quad ; \text{ avec : } J_s = 10\%J_L$$

$$J_T = 1.1 J_L = 1.1 \times J_L \times L$$

$$J_T = 1.1 \times 0.0028 \times 1268.2$$

$$J_T = 3.9 \text{ m}$$

Nous avons:

- $H_G = 720 - 530 = 190 \text{ m}$
- $H_0 = H_G + 10 = 190 + 10 = 200 \text{ m}$
- $HMT = H_G + J_T = 190 + 3.9 = 194 \text{ m}$
- $H_{abs} = HMT + 10 = 194 + 10 = 204 \text{ m}$

Comme la conduite est en fonte grise on calcule la célérité :

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}}$$

Nous avons : $k = 1$.

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + 1 \frac{0.2}{0.0064}}}$$

$$a = 1109,98 \text{ m/s}$$

Et d'après la formule (II.13) on aura :

$$K = \frac{H_{abs} - H_0}{H_0}$$

$$K = \frac{204 - 200}{200}$$

$$K = 0.1$$

➤ **Caractéristique de la conduite A**

Selon M.MOREL d'après la formule (II.14)

$$A = \frac{a V_0}{g H}$$

$$A = \frac{1109.98 \times 0.81}{9.81 \times 200} = 0.45$$

$$A = 0.5$$

➤ **Caractéristique du réservoir d'air B**

Nous considérons alors la famille de courbes B pour A = 0.5 et K = 0,1 Pour cela constituons le profil en long absolu de la conduite.

Tableau III. 3: Profil en long de la conduite.

Cote (Z)	530	543.41	577.18	584.45	605.1	618.88	637.44	671.04	687.53	706.54	720.00
L (m)	0	128.63	257.27	385.91	514.54	644.61	774.69	904.76	1034.83	1151.5	1268.2
$\frac{\Delta Z + 10}{H_G + 10}$	0.05	0.12	0.26	0.32	0.43	0.49	0.59	0.76	0.84	0.93	1
x/L	0	0.1	0.2	0.3	0.41	0.51	0.61	0.71	0.82	0.91	1

Nous superposons ce profil en long aux familles des courbes B du graphe de PEUCH et MEUNIER

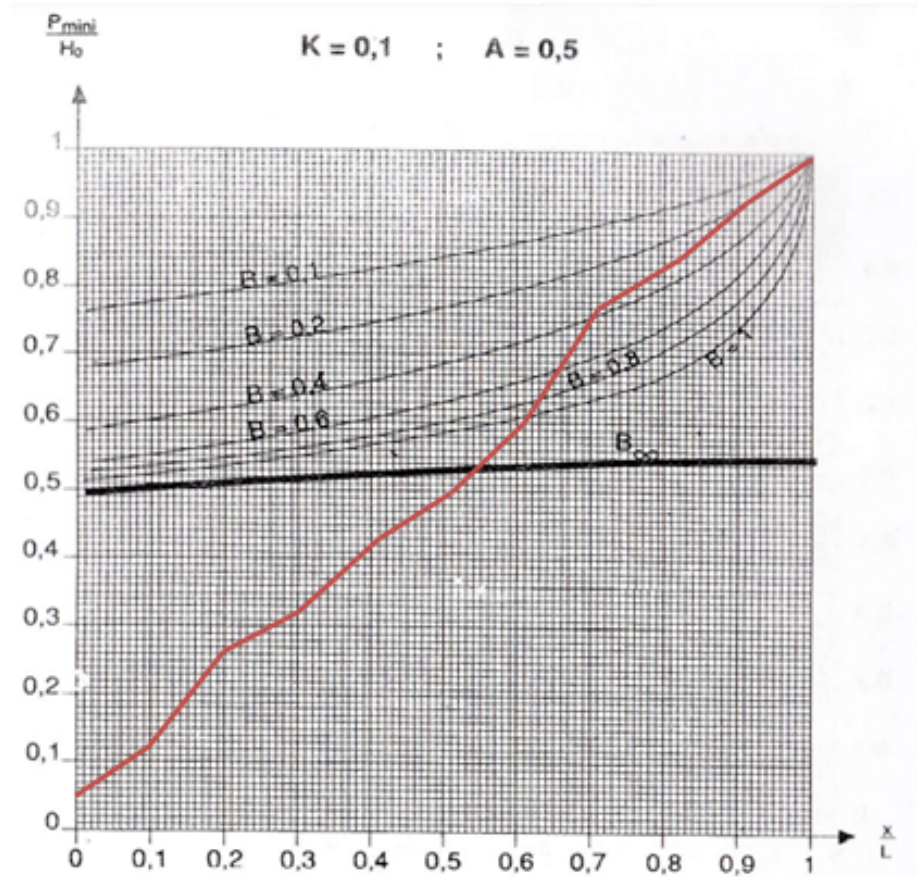


Figure III. 2: Graphe PEUCH et MEUNIER.

Pour $B = 0.1$, on aura une conduite protégé contre les variations des pressions.

Cette valeur de B nous permet de calculer le volume d'air comprimé U_0 en régime permanent

Le volume du réservoir d'air initial serait :

$$U_0 = \frac{V_0^2}{g H_{abs}} \frac{L.S}{B}$$

$$U_0 = \frac{0.81^2}{9.81 \times 204} \cdot \frac{1268.2 \times 0.0314}{0.1}$$

$$U_0 = 0.13 \text{ m}^3$$

Le plus grand volume d'air sera pour la faible pression, et nous lisons sur le graphe :

$$\frac{P_{min}}{H_0} = 0.93$$

$$P_{min} = 186 \text{ m d'eau.}$$

Le volume d'air max serait :

$$U_{\max} = U_0 \left(\frac{H_{abs}}{P_{min}} \right)^{\frac{1}{1.2}}$$

$$U_{\max} = 0.13 \left(\frac{204}{186} \right)^{\frac{1}{1.2}}$$

$$U_{\max} = 0.14 \text{ m}^3$$

Le plus grand volume est 0.14 m^3 , si nous voulons qu'il reste 20% d'eau lors de la plus grande dépression, il faut prévoir un réservoir d'un volume serait $\tau = 0.17 \text{ m}^3$.

$$U'_{\max} = U_{\max} \times 1.2 = 0.14 \times 1.2$$

$$U'_{\max} = 0.17 \text{ m}^3.$$

b. Surpression

L'abaque de Dubin et Guéneau (annexe II). Pour $A = 0.5$ et $B = 0,1$ permet de lire :

$$\begin{cases} \alpha \frac{V_0^2}{H_0} = 0.6 & \text{avec } \alpha = \frac{1}{2g} \left[\frac{D^2}{0.6 d^2} - 1 \right]^2 \\ \frac{P_{\max}}{H_0} = 1.075 \Rightarrow P_{\max} = 1.075 \times H_0 \end{cases}$$

$$\alpha = 0.6 \frac{H_0}{V_0^2} = 0.6 \times \frac{200}{0.81^2} = 182.89^\circ$$

$$P_{\max} = 215 \text{ m d'eau}$$

A partir de la formule de α on peut tirer le diamètre d :

$$d^2 = \frac{D^2}{0.6 \sqrt{2g \alpha} + 1} = \frac{0.2^2}{0.6 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 182.89} + 1}$$

$$d = 32.91 \text{ mm}$$

$d = 32.91 \text{ mm}$ représente le diamètre de diaphragme fictif représentatif des pertes de charge dans la conduite.

La surpression / $H_0 = 215 - 200 = 15 \text{ m}$

III.4. Tracé l'épure de Bergeron

Dans cette méthode nous devons agir par tâtonnement qui restera très limité, mais d'une bonne précision.

Calcul préliminaire :

- Valeur de la célérité :

$$a = 1109.98 \text{ m/s}$$

- Valeur du coup de bélier :

$$B = \frac{a V_0}{g} = \frac{1109.98 \times 0.81}{9.81}$$

$$B = 91.6 \text{ m}$$

- Valeur maximale de la pression dans la conduite :

$$H_{\max} = H_g + b = 190 + 91.6$$

$$H_{\max} = 281.6 \text{ m}$$

- Valeur minimale de la pression dans la conduite :

$$H_{\min} = H_g - b = 190 - 91.6$$

$$H_{\min} = 98.4 \text{ m}$$

Supposons d'une part, que le volume d'air en régime normal soit :

$U_0 = 0.13 \text{ m}^3$, et d'autre part, que l'on dispose d'un diaphragme du diamètre $d = 32.91 \text{ mm}$.

a. Variation du volume d'air dans le réservoir :

le temps se suivent selon des valeurs :

$$\theta = \frac{2L}{a}$$

$$\theta = \frac{2 \times 1268.2}{1109.98}$$

$$\theta = 2.28 \text{ s}$$

D'ou :

$$\Delta U = \theta.S. V_m$$

$$\Delta U = 2.28 \times 0.0314 \times V_m$$

$$\Delta U = 0.072 V_m$$

ΔU : Variation du volume d'air pour chaque intervalle ($-\Delta U$, quand l'eau redescend dans la conduite)

Le volume d'air à la fin de chaque intervalle est :

$$U_i = U_{i-1} \pm 0.072 V_m$$

b. la nouvelle pression dans le réservoir (Z) :

Elle est exprimée que la détente du fluide s'effectue conformément à la loi formule (II.14)

$$Z = \frac{H_{abs} \cdot U_0^{1.2}}{U^{1.2}} = \frac{204 \cdot 0.13^{1.2}}{U^{1.2}}$$

$$Z = \frac{17.71}{U^{1.2}}$$

c. Les pertes de charge à la montée de l'eau dans la conduite

La perte de charge à l'aller vers le réservoir d'air, est négligeable devant la perte de charge provoquée par le diaphragme donc :

$$\Delta h_1 = 0$$

d. Les pertes de charge à la descente de l'eau dans la conduite

La perte de charge au retour vers le réservoir d'air, est calculée par la formule suivante :

$$\Delta h_1 = 0 \Delta h_2 = K \frac{Vf^2}{2g} = \left[\left(\frac{s}{m s_0} - 1 \right)^2 + \frac{1}{9} \right] \frac{Vf^2}{2g}$$

$$\Delta h_2 = K \frac{Vf^2}{2 \times 9.81} = \left[\left(\frac{200^2}{0.6 \times 32.91^2} - 1 \right)^2 + \frac{1}{9} \right] \frac{Vf^2}{2 \times 9.81}$$

$$\Delta h_2 = 183.02 Vf^2$$

e. calcul de la perte de charge au refoulement

Elle est exprimée par la formule (II.31)

$$\delta_r = \frac{1.15 \times L \times \lambda \times Vf^2}{2 \times g \times D.}$$

$$\delta_r = \frac{1.15 \times 1268.2 \times 0.017 \times Vf^2}{2 \times 9.81 \times 0.2.}$$

$$\delta_r = 6.32 Vf^2$$

F. Epure de Bergeron

Détermination de la pente de la droite

$$P = \frac{a}{gs} = \frac{1109.98}{9.81 \times 0.0314}$$

$$P = 3603.43 \text{ s/m}^2$$

Echelle des pressions :

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ cm} \rightarrow 10 \text{ m} \\ B \rightarrow 3603.43 \end{array} \right. \Rightarrow B = 360.343 \text{ cm}$$

Echelle des débits :

Pour $V = 0.81 \text{ m/s}$, le débit $Q = 0.0255 \text{ m}^3/\text{s}$; on a alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = 0.0255 \rightarrow 10 \text{ cm} \\ 1 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow A \end{array} \right. \Rightarrow A = 392.16 \text{ cm}$$

Pour chaque 1 cm ; $V = 0.081 \text{ m/s}$

$$\alpha = \arctg \frac{B}{A} = \arctg \frac{360.43}{392.16} = \arctg (0.9188)$$

$$\alpha = 43^\circ \text{ (angle d'inclinaison).}$$

Explication du tableau

1. On choisit la vitesse finale (V_f) légèrement inférieure à la vitesse en marche normale (V_0) et on l'inscrit dans la ligne (9).
2. On calcul la vitesse moyenne $V_m = \frac{(V_f)_i + (V_f)_{i+1}}{2}$ et on l'inscrit dans la ligne (10).
3. On calcul la variation du volume d'air (ΔU) qu'est fonction de V_0 ligne (2).
4. Au volume initial, choisi auparavant en marche normale U_0 du réservoir d'air (calculé par la méthode de Meunier et Puech), on y ajoute ou on retranche à chaque fois la valeur de ΔU correspondante, ainsi on a le volume d'air (U) de cette étape ligne (3).
5. A partir de la ligne (3), nous remplaçons tous simplement les valeurs dans chaque expression selon la montée ou la descente de l'eau dans le réservoir d'air, on obtient ainsi les valeurs des lignes (4), (5), (6), (8); pour la ligne (7), il suffit de remplacer V_f par sa valeur.

6. La valeur de la pression obtenue dans la ligne (8) est rapportée sur l'axe des coordonnées du diagramme de Bergeron et projetée sur la droite $\frac{a}{gs}$ qui doit être projetée ensuite sur l'axe des abscisses (axe des vitesses).
7. Si cette dernière projection (sur l'axe des vitesses) coïncide avec la même valeur que la vitesse choisie (V_f), on considère que notre choix de vitesse pour cette étape est bon (c'est-à-dire que la vitesse V_f choisie est égale à la vitesse V_f lue). Dans ce cas, on inscrit alors la valeur dans la ligne (9) et on choisit de nouveau, une nouvelle vitesse V_f toujours, légèrement inférieur à la vitesse précédente en répétant les mêmes calculs.
8. Si la vitesse choisie ne coïncide pas avec la même valeur que l'axe des vitesses, nous concluons que le choix de la vitesse n'est pas exact et on doit choisir une autre vitesse (V_f).

De cette manière, on effectue le calcul du tableau en combinaison avec le diagramme de Bergeron.

Tableau III. 4: Calcul du réservoir d'air.

1	intervalle de temps Θ (s)	0	8.73	17.46	26.19	34.92
2	variation du volume d'air $\Delta u=0,071V_m$	-	0.041	-0.001	-0.028	-0.019
3	volume d'air $U_i=U_{i-1}+U$	0.130	0.171	0.170	0.142	0.123
4	pression de l'air $Z=17,71/U^{1,2}$	204	147.624	148.364	184.169	218.023
5	perte de charge aller: $\Delta h_1=0$ retour: $\Delta h_2=183,02V_f^2$	0	0	23.719	33.840	1.652
6	pression conduite avec σ aller: $Z- \Delta h_1$ retour: $Z+\Delta h_2$	204.874	147.624	172.083	218.009	219.675
7	perte de charge σ	3.965	0.699	0.783	1.117	0.055
8	pression conduite sans σ aller: $Z- \Delta h_1- \sigma$ retour: $Z+\Delta h_2+\sigma$	200	147	173	219	220
9	vitesse V_f	0.810	0.340	-0.360	-0.430	-0.095
10	vitesse moyenne V_m	0	0.575	-0.010	-0.395	-0.263
11	vitesse V_f choisie		0.3	-0.358	-0.40	-0.90
12	Désignation des points	1R	2P	4P	6P	8P

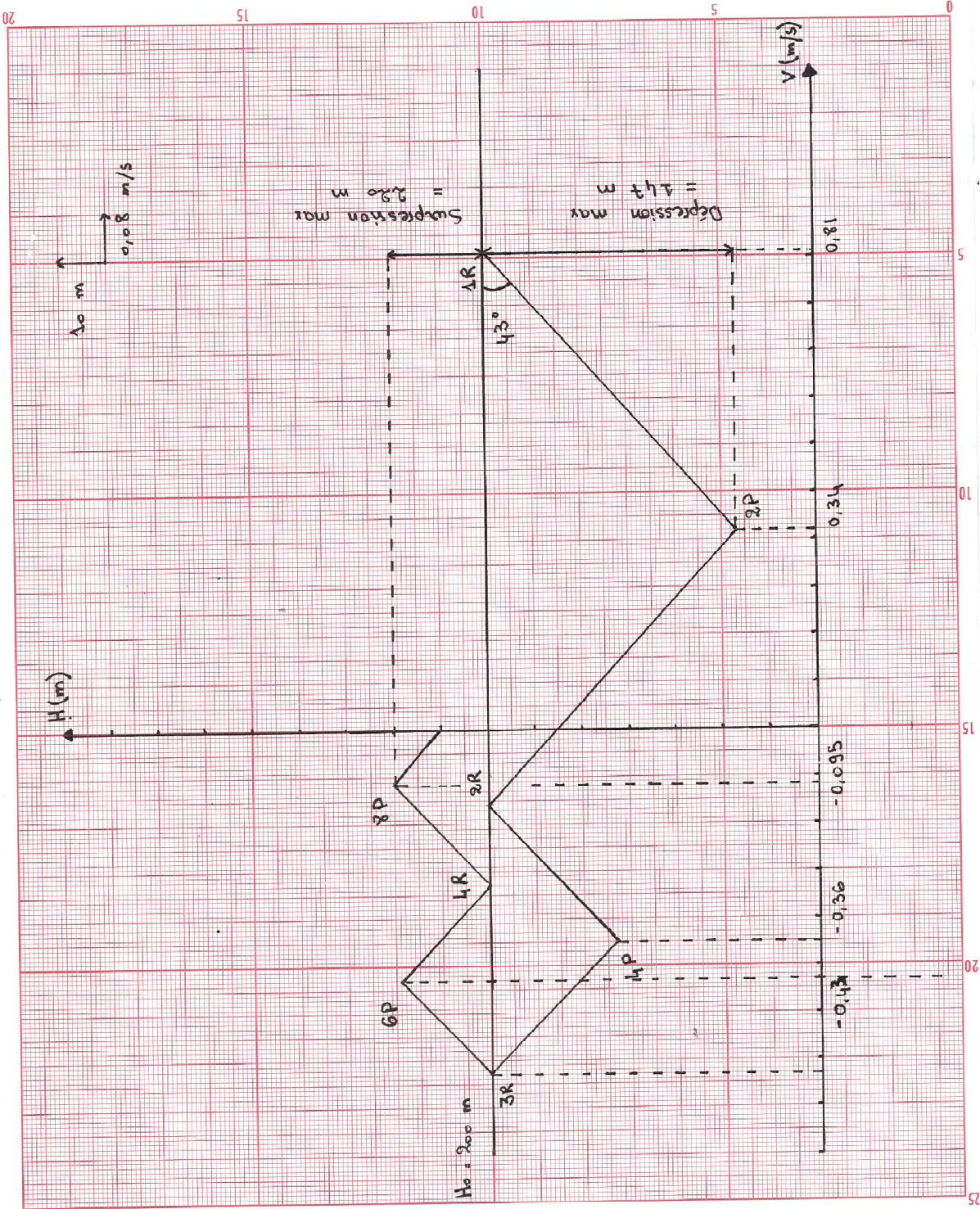


Figure III. 3: Epure de Bergeron.

Caractéristiques finales du réservoir d'air

L'examen de la troisième colonne du tableau (III. 5) montre que l'air peut occuper un volume maximal de 0.171 m^3 , comme il est nécessaire qu'il reste toujours de l'eau dans le réservoir, nous avons pris un volume total de la cloche égal à 0.205 m^3 (20 % de 0.171) dans laquelle l'air n'occupera que $0,13 \text{ m}^3$ en marche normale.

Pendant la phase de dépression, le volume d'air $U_0 = 0.13 \text{ m}^3$ passe à $0,171 \text{ m}^3$ à la fin, avec une dépression maximale de 147 m, soit 14.7 bars.

Pendant la phase de surpression, le volume d'air $U_0 = 0,13 \text{ m}^3$ passe à $0,12 \text{ m}^3$ avec une surpression maximale de 220 m, soit 22 bars.

III.5. Dimensionnement du réservoir d'air par la méthode de Vibert

Nous avons : $a = 1109.98 \text{ m/s}$

En cas de fermeture brusque, le coup de bélier peut atteindre une valeur de :

$$B = \frac{a V_0}{g}$$

$$B = \frac{1109.98 \times 0.81}{9.81}$$

$$B = 91.6 \text{ m}$$

La valeur maximale de la surpression :

$$H_{\max} = H_g + \frac{aV_0}{g}$$

$$H_{\max} = 190 + 91.6$$

$$H_{\max} = 281.6 \text{ m}$$

< PN 30 (300m)

Si l'on s'impose de ne pas dépasser pour la conduite une pression de 26 bar ou de 260m d'eau le calcul du réservoir s'effectuera comme suit :

- La charge statique absolue :

$$Z_0 = H_g + 10 = 190 + 10 = 200 \text{ m}$$

- La charge maximale absolue

$$Z_{\max} = PN + 10 = 260 + 10 = 270 \text{ m}$$

Donc :

➤
$$\frac{Z_{\max}}{Z_0} = \frac{270}{200} = 1.35$$

➤
$$h_0 = \frac{V_0^2}{2g} = \frac{(0.81)^2}{2 \cdot 9.81} = 0.033$$

➤
$$\frac{h_0}{Z_0} = \frac{0.033}{200} = 1.67 \cdot 10^{-4}$$

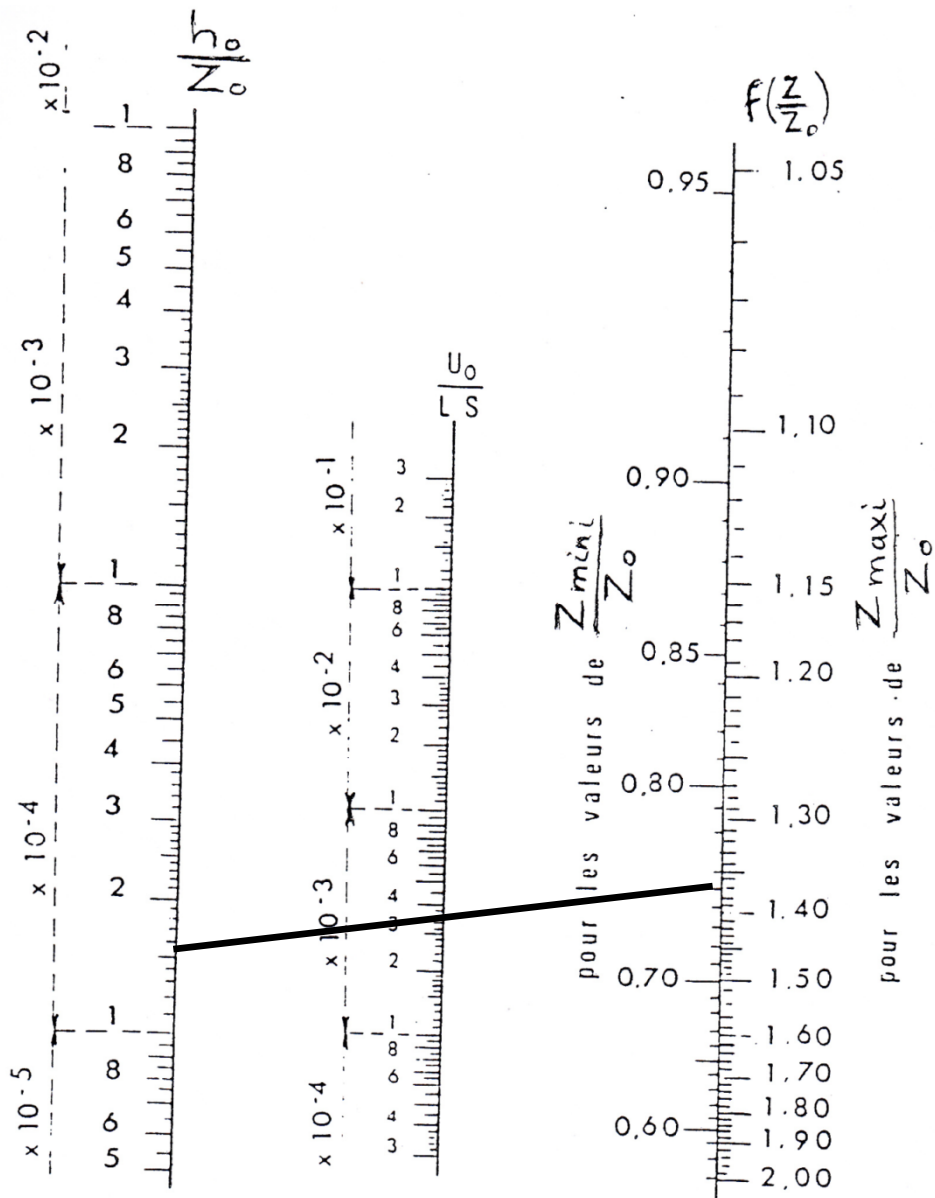


Figure III. 4: Abaque de Vibert .

D'après l'Abaque de VIBERT :

$$\frac{U_0}{L.S} = 4 * 10^{-3} \quad \Rightarrow \quad U_0 = L.S * 4 * 10^{-3}$$

$$U_0 = 1268.2 * 0.0314 * 4 * 10^{-3}$$

$$U_0 = 0.16 \text{ m}^3$$

Précautions à prendre pour l'anti-bélier

Par suite de contact permanent entre l'air et l'eau dans le réservoir, l'air se dissout peu à peu dans l'eau. Il est donc indispensable de compenser sa dissipation par des injections régulières d'air dans le réservoir. Il existe aussi des réservoirs équipés d'une vessie en caoutchouc dans laquelle est stockée l'eau (l'air est donc séparé de l'eau).

Après une période de fonctionnement, il est nécessaire de vidanger entièrement le réservoir pour enlever les dépôts se trouvant au fond de celui-ci.

III.6. Interprétation des résultats

Les résultats trouvés avec les différentes méthodes de dimensionnement des protections sont illustrés dans le tableau (III. 6)

Tableau III. 7: Résultats des différentes méthodes de dimensionnement des protections.

	1		2	3
	Puech et Meunier	Dubin et Gueneau	Bergeron	Vibert
Pression minimal (m)	186	/	147	152
Pression maximal (m)	281.6	215	220	260
Suppression/ H ₀ (m)	/	15	20	/
U ₀ (m ³)	0.13	/	0.13	0.16
U _{max} (m ³)	0.14	/	0.17	/

Le tableau ci-dessus, montre que les résultats calculé pour les 3 méthodes sont un peu proche.

- Les pressions minimales calculées par Bergeron et Vibert sont respectivement 147 m, 152 m sont inférieures à celle calculé par peuch et meunier 186 m.
- Les pressions maximales calculé par « Dubin et Gueneau » et « Bergeron » ont presque la même valeur par contre la suppression calculé par Vibert est supérieur avec une valeur de 260 m.
- Le volume initiale dans le réservoir d'air est le même pour les 2 premières méthodes et supérieur pour la 3eme méthode avec une valeur de 0.16 m³.
- Le volume maximal est un peu différent avec une valeur de 0.14 m³ donné par la méthode de Peuch et Meunier, et une valeur de 0.16 m³ par Bergeron.

III.7. Caractéristique de la pompe :

La pompe choisie à les caractéristiques suivants :

Tableau III.6 : Caractéristiques requises.

Caractéristiques requises	
Débit	25,4 l/s
Hauteur de refoulement	195 m
Fluide	Eau potable
Température	290 K
Type d'installation	Pompe seule
N.be de pompes	1

Tableau III. 7 : Caractéristiques de la pompe.

Caractéristiques de la pompe	
Débit	25.4 l/s
Hauteur de refoulement	195 m
Puissance absorbée	71,2 kW
Rendement	69.7 %
Hauteur manométrique H(Q=0)	225 m
Orif. de refoulement	125 mm

Les courbes caractéristiques sont présentées dans la figure.ci dessous :

Et pour plus de détails voir l'annexe (VIII)

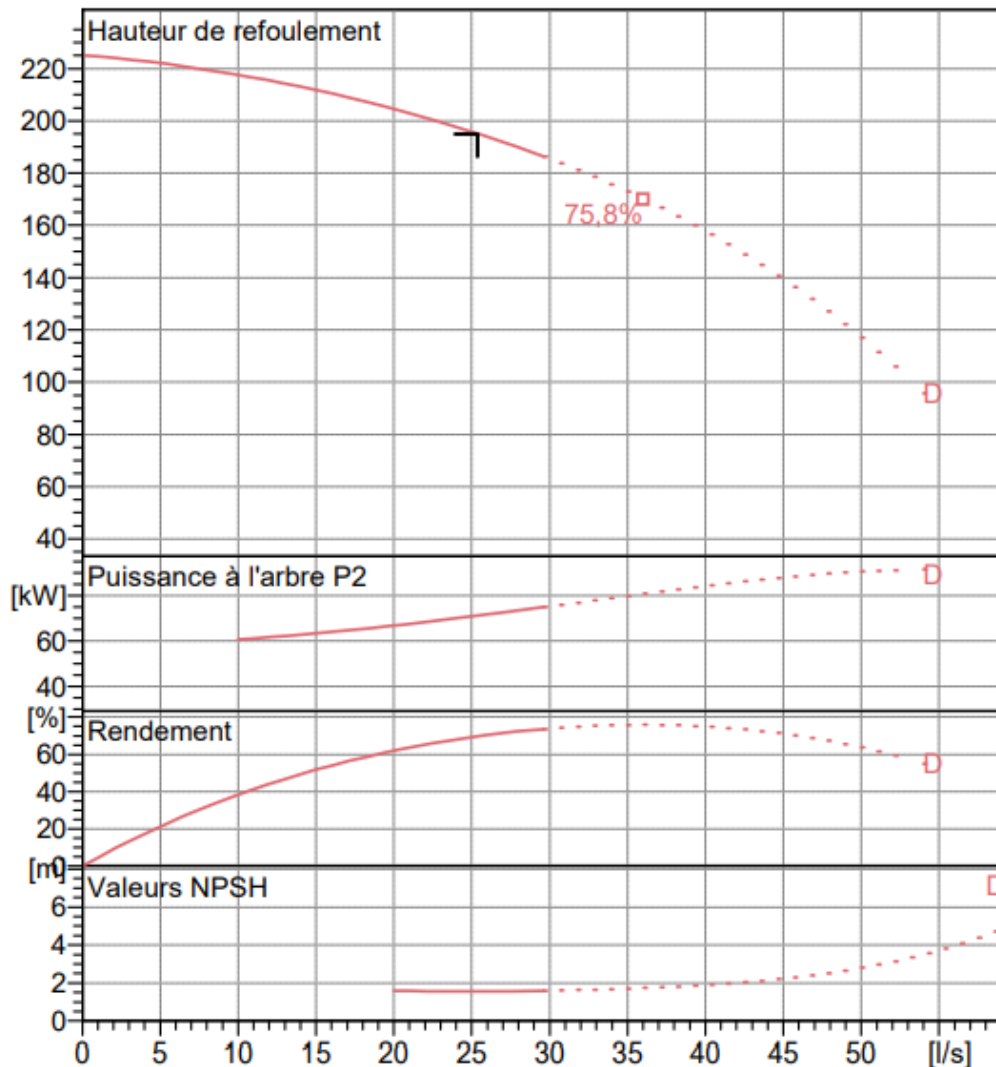


Figure III.5: Les courbes caractéristiques de la pompe.

Remarque : la pompe choisie ne nécessite aucun réglage, elle correspond aux caractéristiques de la pompe requise.

III.8. Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous avons calculé un régime transitoire (coup de bélier) pour une conduite d'adduction au refoulement on utilisant les trois méthodes « Peuch et meunier » « Bergeron » « Vibert » , ou nous avons déterminé la dépression et la surpression dans la conduite, ainsi que, le volume total du réservoir d'air de 200 litres qui est nécessaire pour la protection de la conduite de refoulement contre le coup de bélier.

Chapitre IV
Simulation d'un régime transitoire avec
le logiciel Bentley HAMMER

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous nous sommes focalisés sur l'utilisation du programme BENTLEY HAMMER qui est un outil très efficace et puissant pour les simulations l'hydraulique transitoires dans les canalisations et les réseaux. HAMMER utilise la méthode des caractéristiques afin que les résultats calculés correspondent exactement aux conditions du terrain.

Dans la première partie, nous allons citer les principales étapes à suivre pour créer un modèle hydraulique.

Pour la deuxième partie nous prenons l'exemple résolu dans le chapitre précédant, qui est un cas de refoulement à partir d'un réservoir R1 vers un réservoir R2, pour lui faire une simulation avec le logiciel HAMMER.



Figure IV. 1: Présentation du logiciel..

IV.2. Présentation de Bentley Hammer

Développé par la société BENTLEY, HAMMER est un logiciel qui permet aux professionnels des réseaux hydrauliques d'effectuer une analyse des phénomènes transitoires (perturbations et coups de bélier) essentielle pour protéger les réseaux.

HAMMER utilise la méthode standard des caractéristiques (MOC) l'algorithme incontestablement le plus rigoureux et le plus fiable pour l'analyse de débit des phénomènes transitoires. Contrairement à des algorithmes tels que ceux de la méthode du plan d'ondes (méthode des caractéristiques ondulatoires) qui ne garantissent pas la fiabilité des points intermédiaires. [19]

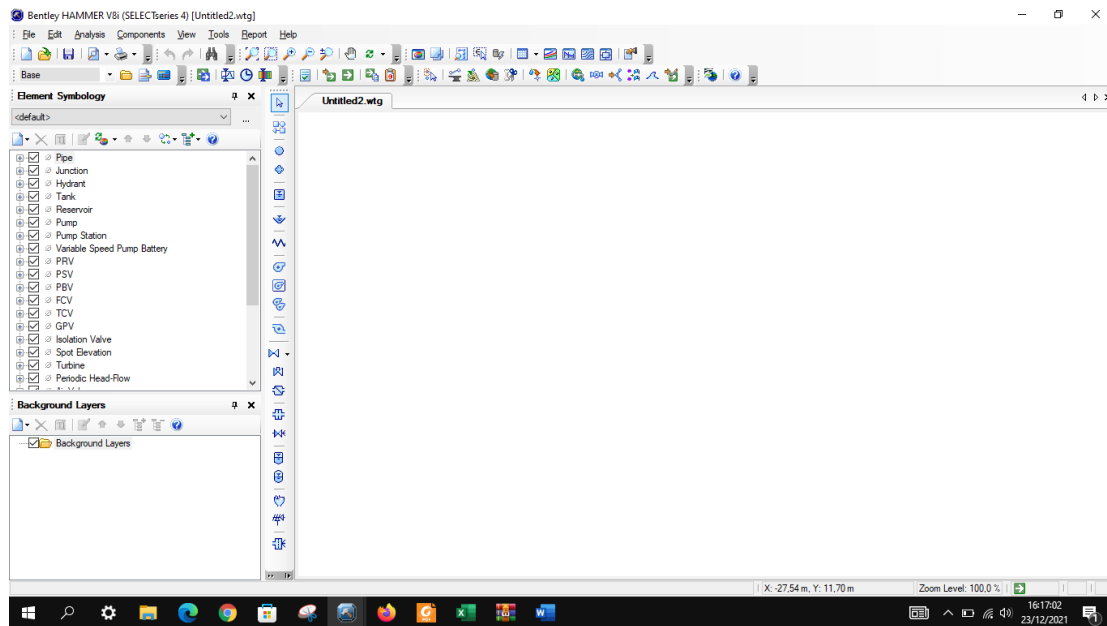


Figure IV. 2: Interface du logiciel HAMMER.

IV.3. Environnement de travail

HAMMER nous permet de choisir notre environnement de travail : mode autonome ou intégré à AutoCAD ou à Microstation (un logiciel D.A.O comme AutoCAD). Quel que soit notre choix, HAMMER génère le même jeu de fichiers, compatible entre plates-formes. D'une souplesse exceptionnelle, l'interface autonome propose des outils de modélisation d'emploi facile, supporte des arrière-plans multiples, ingère des utilitaires de conversion à partir des logiciels CAO, SIG et bases de données, ainsi qu'une fonction « annuler/rétablir » illimitée.

L'interface MicroStation, incluse dans toutes les versions de HAMMER, met à notre disposition une dimension géospatiale, ainsi que des outils de publication et de visualisation exceptionnels. Les utilisateurs d'AutoCAD peuvent ajouter au logiciel des fonctions d'intégration dans cette plate-forme, qui leur permettent de créer, disposer et tracer leurs modèles depuis leur environnement habituel. [19]

IV.4. Fonctionnalités et capacités

- HAMMER permet de simuler avec précision l'impact d'un large choix de protections anti-bélier ou d'équipements anti-rotation. L'utilisateur peut choisir parmi plus de 20 dispositifs et exécuter un nombre illimité de scénarios pour mettre en œuvre la stratégie la mieux adaptée,
- Protection de canalisation en assemblant une canalisation à l'aide de l'éditeur graphique et en effectuant deux analyses de transitoires hydrauliques ; sans protection et avec protection.
- Réduction des risques du réseau en ouvrant un modèle de réseau de distribution d'eau créé dans Bentley WaterGEMS et en effectuant une analyse des transitoires hydrauliques à l'aide de méthodes avancées de protection et de présentation contre les surtensions.

- HAMMER fournit des outils de profilage puissants pour vous aider à comprendre rapidement où les phénomènes transitoires se produisent dans votre système, accélérera le processus de saisie des données et facilitera l'examen des résultats.
- Gérer les demandes en eau et l'altitude des nœuds à partir des données géospatiale. Ceci évite les erreurs de saisie et rationalise le processus de modélisation. HAMMER intègre également des outils de vérification de la connectivité qui garantissent la cohérence hydraulique du modèle.
- Les utilisateurs de WaterCAD ou de WaterGEMS peuvent ouvrir leurs modèles directement dans HAMMER (et inversement).[20]

IV.5. Les principales étapes à suivre pour la simulation d'un projet

IV.5.1. Démarrage du logiciel

Une fois l'installation de HAMMER CONNECT terminée, redémarrons notre système avant de démarrer HAMMER CONNECT pour la première fois.

Pour démarrer HAMMER CONNECT :

- 1- Double-clique sur l'icône HAMMER CONNECT sur notre bureau,
- 2- Cliquons sur Démarrer > Tous les programmes > Bentley > HAMMER CONNECT

Lorsque HAMMER CONNECT est démarré, la boîte de dialogue bienvenue s'ouvre. La boîte de dialogue Bienvenue contient les commandes suivantes : [20]

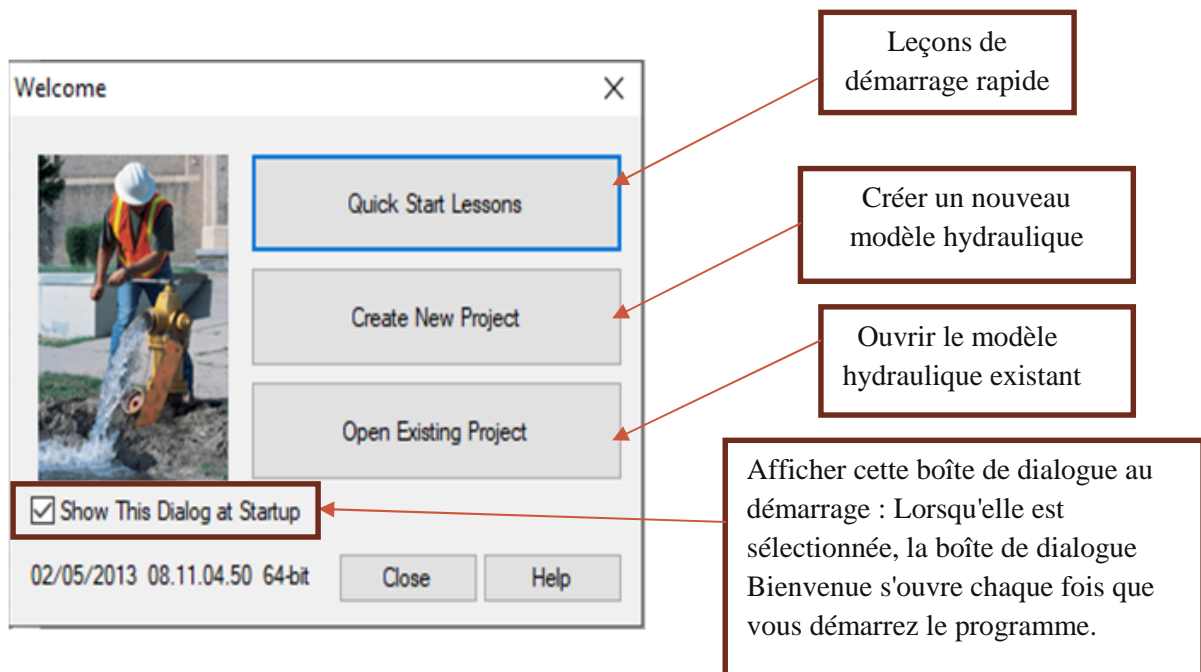


Figure IV. 3 : Affichage de la boîte de dialogue Bienvenue (welcome).

IV.5.2. Création d'un modèle sur Bentley HAMMER

Bentley HAMMER est un outil extrêmement efficace pour l'aménagement d'une transmission d'eau pipeline ou même tout un réseau de distribution. Il est facile de préparer un modèle schématique et laissez Bentley HAMMER s'occuper de la connectivité des nœuds de liaison et des étiquettes d'éléments qui sont attribués automatiquement. Pour un modèle schématique seul les longueurs de tuyaux doivent être saisie manuellement pour terminer la mise en page.

Pour créer un modèle hydraulique à l'aide de l'interface Bentley HAMMER Modeler :

Click File > New to start a new project → Cela démarre le graphique de Bentley HAMMER éditeur d'éléments, nous pouvons donc dessiner le système en insérant des éléments hydrauliques.

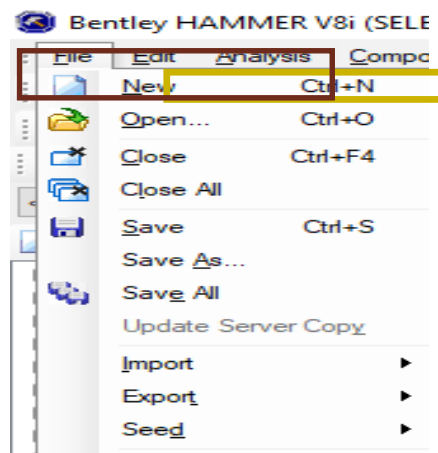


Figure IV. 4: Création d'un nouveau modèle.

IV.5.3. Options de réglage

On peut modifier les paramètres généraux de HAMMER CONNECT dans la boîte de dialogue Options

Click Tools menu > Options >

La boîte de dialogue Options contient différents onglets dans lesquels nous pouvons modifier les paramètres :

Onglet Global; Onglet Modèle hydraulique; Onglet Dessin; Onglet Unités; Onglet Étiquetage; Onglet ProjectWise;

Allons dans l'ongle **Units tab**, cliquons sur le bouton Réinitialiser les valeurs par défaut et modifions le système d'unités par défaut pour le projeter en système international (SI).

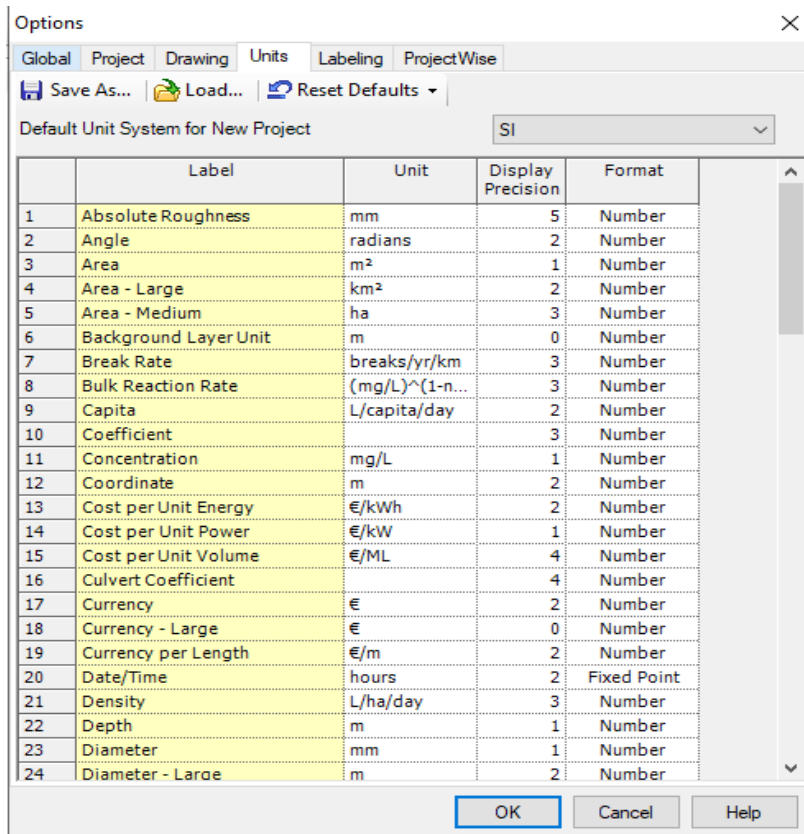










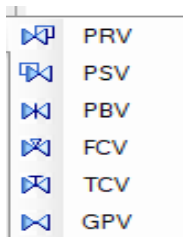

Figure IV.5: Boîte de dialogue Options - Onglet Unités.

IV.5.4. La barre d'outils Disposition

Click Tools menu>Layout ; La barre d'outils disposition contient les éléments suivants : [21]

Tableau IV. 1: Quelques éléments de la barre d'outils disposition (Layout).

Selectionner 	Transformer le curseur de la souris en outil de sélection
Tuyau 	Changer le curseur de la souris en outil de tuyau.
Jonction 	changer le curseur en outils de jonction. Lorsque cet outils est activé,on cliquent dans le dessin pour placer l'élément. Nommer J-1
Bouche d'incendie 	changer le curseur en outils de bouche d'incendie. Lorsque cet outils est activé,on clique dans le dessin pour placer l'élément. Nommer H-1
Réservoir 	Cliquer sur le bouton Réservoir dans la barre d'outils. Bentley HAMMER nomme automatiquement cet élément R-1 .
Pompe 	changer le curseur en outils de pompe Nommer PMP-1
Robinet 	Changer le curseur de votre souris en symbole de turbine. Lorsque cet outil est actif Nommer BNT-1

<p>Valve </p> 	<p>Change le curseur de la souris en outil de valve. nous Cliquons sur la flèche vers le bas pour sélectionner le type de vanne que nous souhaitons placer dans notre modèle :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Détendeur • Soupape de maintien de la pression • Valve de rupture de pression • Vanne de régulation de débit • Soupape de commande des gaz • Vanne à usage général
<p>Réservoir hydropneumatique </p>	<p>Changer le curseur de la souris en un symbole de réservoir hydropneumatique</p>

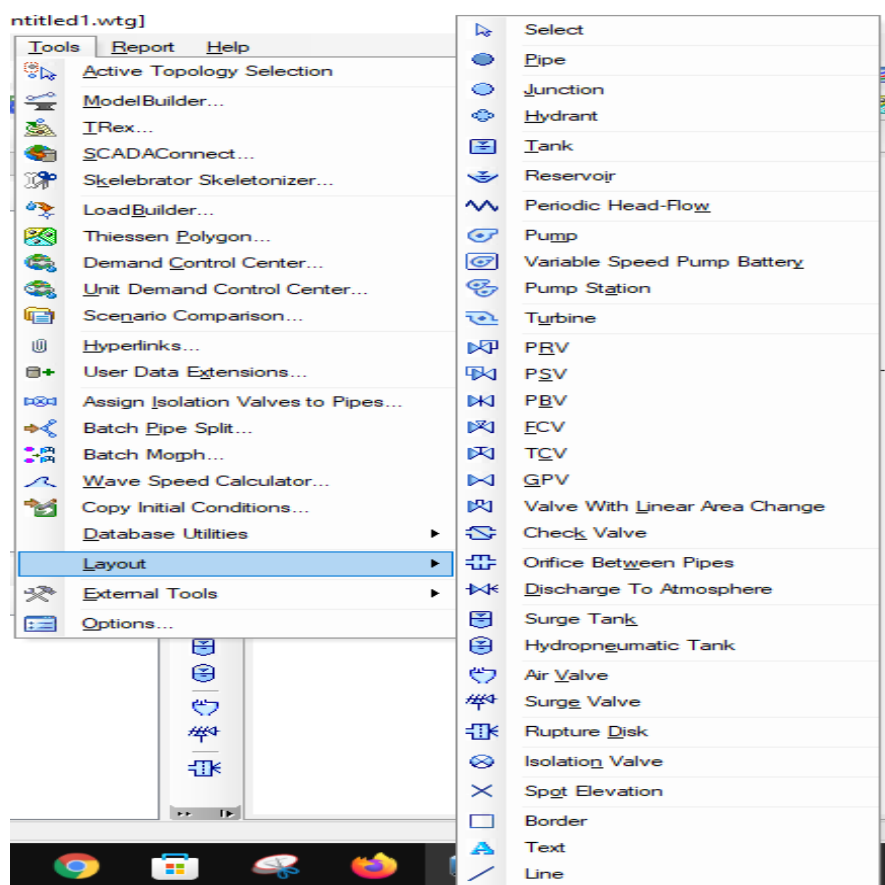


Figure IV. 6: Barre d'outils disposition.

IV.5.5. Insertion des éléments du projet

Pour insérer un élément : il suffit de faire un clique sur l'élément voulu par exemple: Pump (pompe)

Pour afficher les propriétés: Double-clique sur les éléments pour ouvrir l'éditeur de propriétés

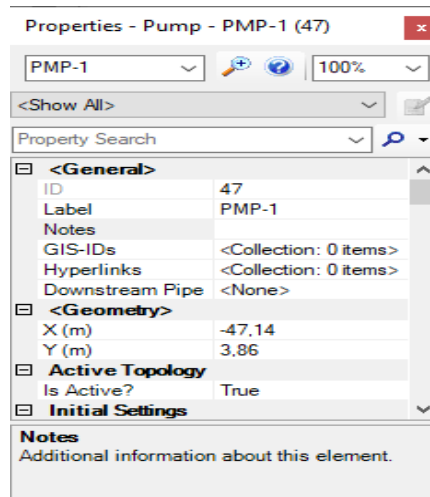


Figure IV. 7: Propriétés d'une pompe PMP.

Avant d'exécuter le modèle Bentley HAMMER que nous avons créé dans Les étapes précédentes, nous devons définir certains paramètres d'exécution tels que :

- Les propriétés du fluide.
- Les propriétés du système de tuyauterie.
- La durée d'exécution.
- Les exigences de sortie.

Lors de l'édition de données pour un grand nombre d'éléments, Il est souvent plus pratique de les saisir pour un élément similaire sous forme de tableau, plutôt que d'ouvrir individuellement une boîte de dialogue pour un élément, c'est pour cette raison nous utilisons FlexTables.

Click View menu> select Flex Tables, double-click Pipe Table.

Cliquez avec le bouton droit sur la colonne Diamètre et sélectionnez Modification globale (Global edit) .

Laissez l'opération à **Set** et entrez la valeur du diamètre, Cliquez sur OK.

Diameter (mm)	Material	Hazen-	Wave Speed (m/s)
			1 109,98
			1 109,98
			1 109,98
			1 109,98
			1 109,98
			1 109,98
200,0	Ductile I...	130,0	1 109,98
200,0	Ductile I...	130,0	1 109,98
200,0	Ductile I...	130,0	1 109,98

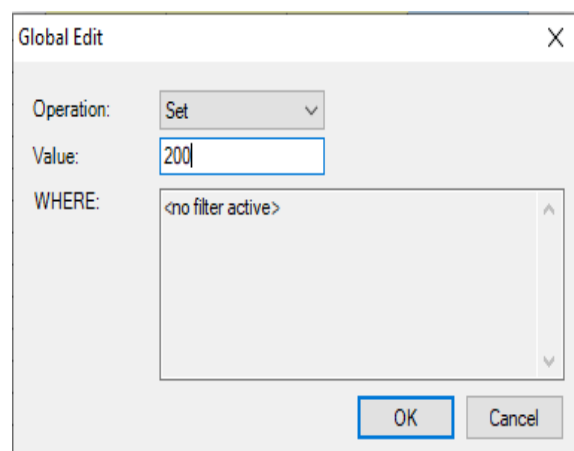


Figure IV.8: Modification globale.

Figure IV.9 : Insertion de la valeur du diamètre.

Nous pouvons utiliser la Fonction Global Edit pour entrer la vitesse d'onde. (Voir la figure IV.8)

IV.5.6.Insertion des données de la pompe

Une fois terminé de modifier les données, fermer le FlexTable.

La pièce finale des données de l'élément que nous devons définir sont la définition de la pompe

Click components menu >select Pump Definitions

Cliquez sur le bouton « new » pour créer une nouvelle définition de pompe. Puis sélectionner « Design Point (1 Point) ». Entrer une valeur pour le **design flow (débit)** et **design head (Hmt)**.

pour finir cliquer sur le bouton **Fermer**.

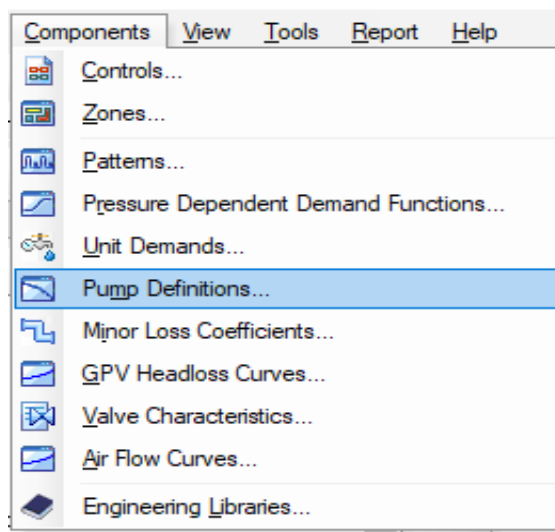


Figure IV..10 : Création d'une nouvelle définition de pompe.

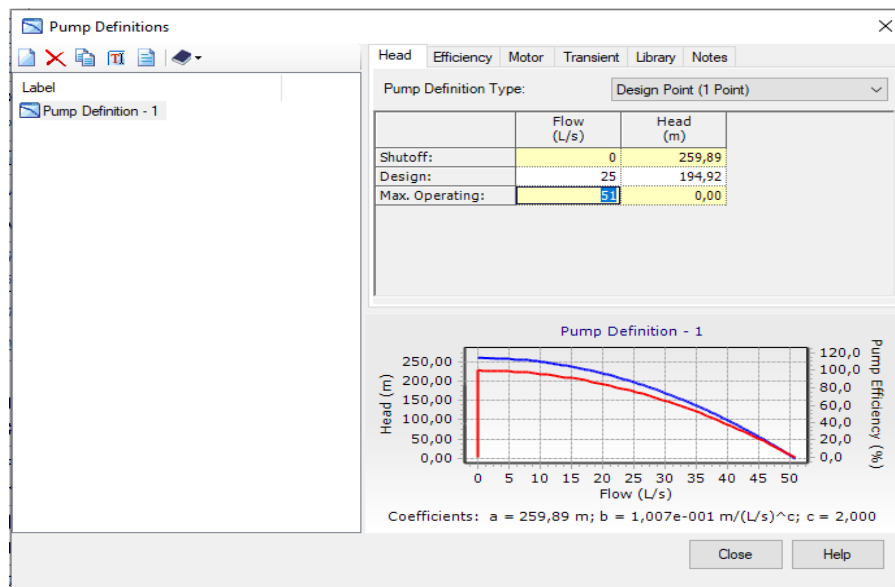


Figure IV..11 : Affichage des courbes caractéristiques de la pompe.

Une fois passer par toutes les étapes précédentes, le modèle devrait ressembler à ça :

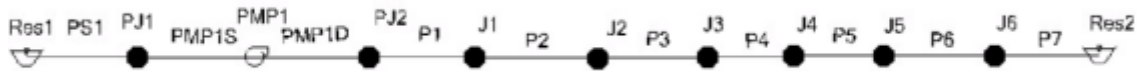


Figure IV..12: Modèle créé.

IV.5.7. Enregistrement du modèle créé

Click file > Save as et enregistrer le fichier sous formatwtg

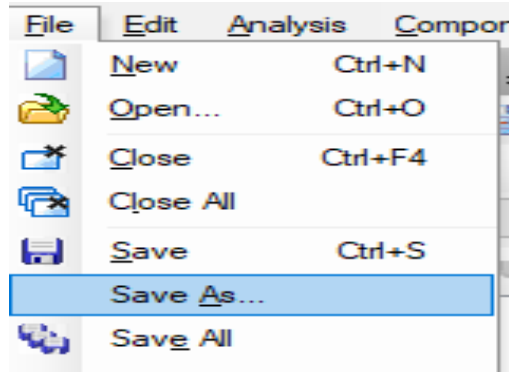


Figure IV.. 13: Enregistrement du modèle.

IV.5.8. Affichage du profil transitoire

- Click View menu >select profil
- Cette boîte de dialogue affiche le profil transitoire.
- Dans la boîte de dialogue Options de la série de profils qui s'affiche, cliquez sur OK pour accepter le profil par défaut réglages.
-

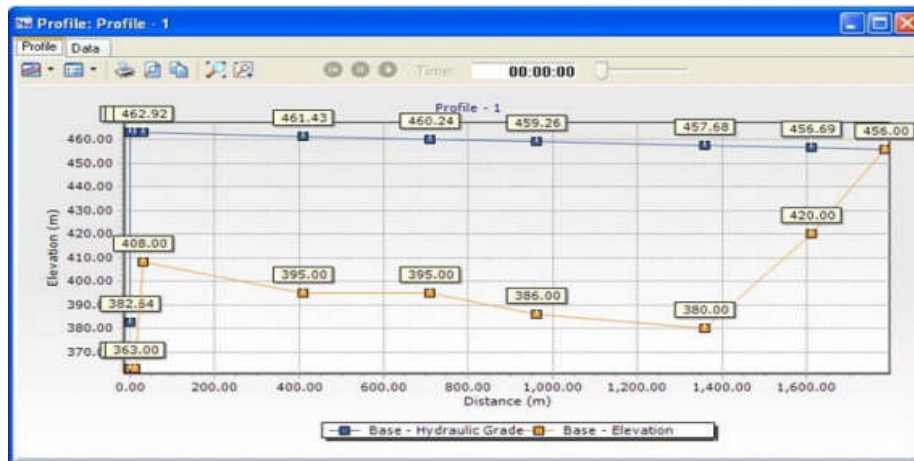


Figure IV..14: Profile transitoire.

IV.5.9. Affichage des graphiques dans Bentley HAMMER

À l'aide de Bentley HAMMER Transient Results Viewer, on peut tracer un transitoire historique à n'importe quel point du système pour afficher la variation temporelle des paramètres (tels que les pressions et le débit).

- 1. Click analysis menu >select Transient Results Viewer.
- 2. Dans l'onglet Historiques, sélectionnez :
 - Historique du temps :
 - Type de graphique : qualité hydraulique, débit et volume d'air/de vapeur.

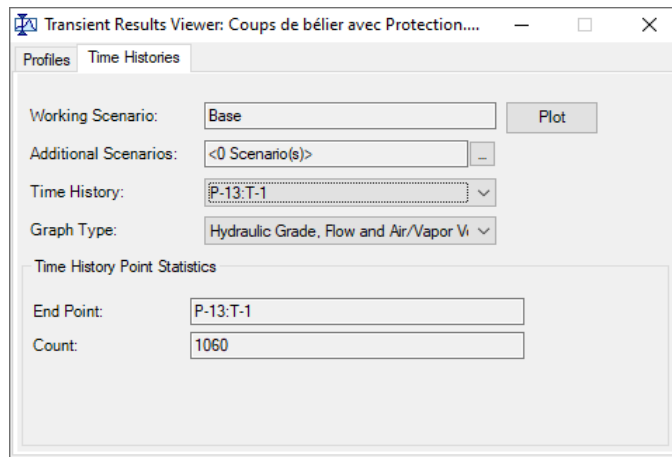


Figure IV.. 15: Historique du temps.

- 1. Cliquez sur **Plot** pour afficher cet historique transitoire.(voir la figure IV.15)

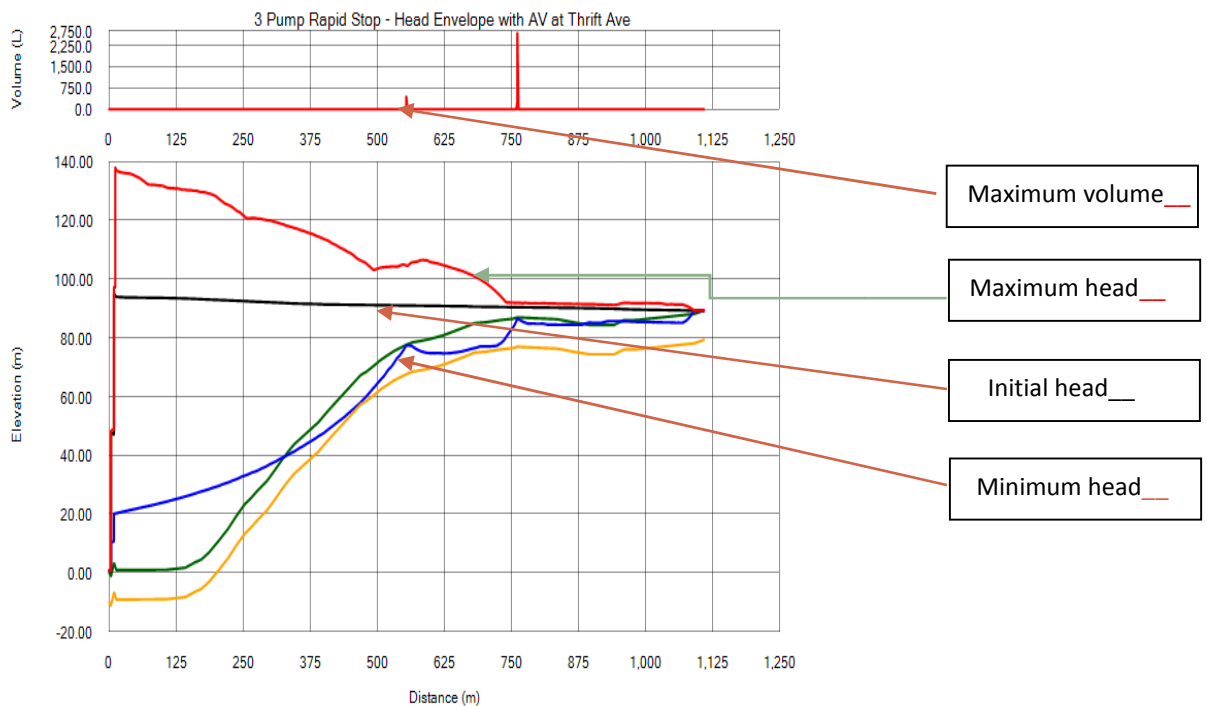


Figure IV.. 16: Représentation graphique des résultats.

Pour afficher les données numériques de l'historique temporel, **click Data**.

De là, nous pouvons trier les données en cliquant avec le bouton droit sur l'en-tête de colonne et en choisissant **Sort**.

Nous pouvons également modifier les unités et précision des résultats en faisant un clic droit sur l'en-tête de colonne et en choisissant **Units and Formatting**.

Hydraulic Grade (Minimum) (m)	Hydraulic Grade (Maximum) (m)	Hydraulic Grade (Initial) (m)	Hydraulic Grade (m)	Air/Vapor Volume (L)	Air/Vapor Volume (Maximum) (L)	Vapor Pressure (m)
680,00	740,20	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
680,10	740,10	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
680,10	740,10	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
680,20	740,10	726,40	726,40	0,0	0,0	520,90
680,30	740,00	726,40	726,40	0,0	0,0	521,90
680,50	739,80	726,40	726,40	0,0	0,0	522,80
680,60	739,60	726,30	726,30	0,0	0,0	523,70
680,70	739,60	726,30	726,30	0,0	0,0	524,60
680,90	739,50	726,30	726,30	0,0	0,0	525,60
681,00	739,30	726,20	726,20	0,0	0,0	526,50
681,10	739,20	726,20	726,20	0,0	0,0	527,40

Figure IV.. 17: Tableau des résultats.

IV.6. Simulation d'un coup de bélier dans un cas de refoulement avec Bentley HAMMER

Après avoir inséré toutes les données et les informations nécessaires de notre cas dans le logiciel Bentley Hammer, et après avoir passé par toutes les étapes mentionnées précédemment, nous avons obtenu les résultats suivants:

VI.6.1 Résultats obtenus

a. Résultats sans protection

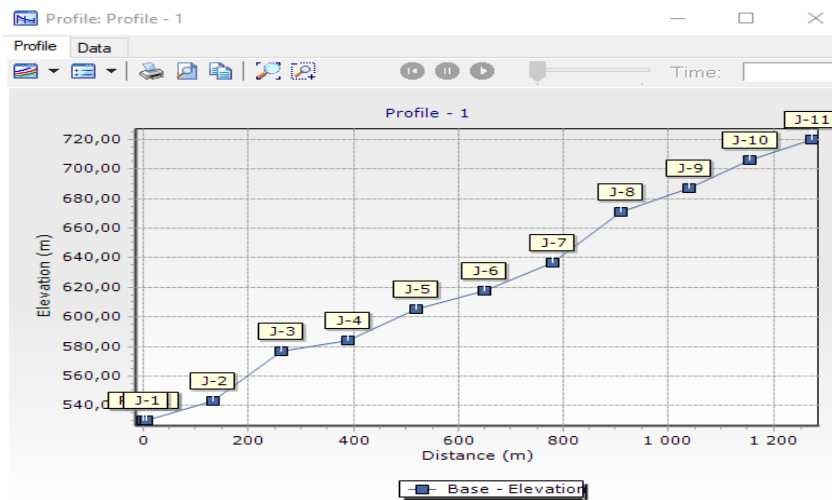


Figure IV.. 18: Profil.

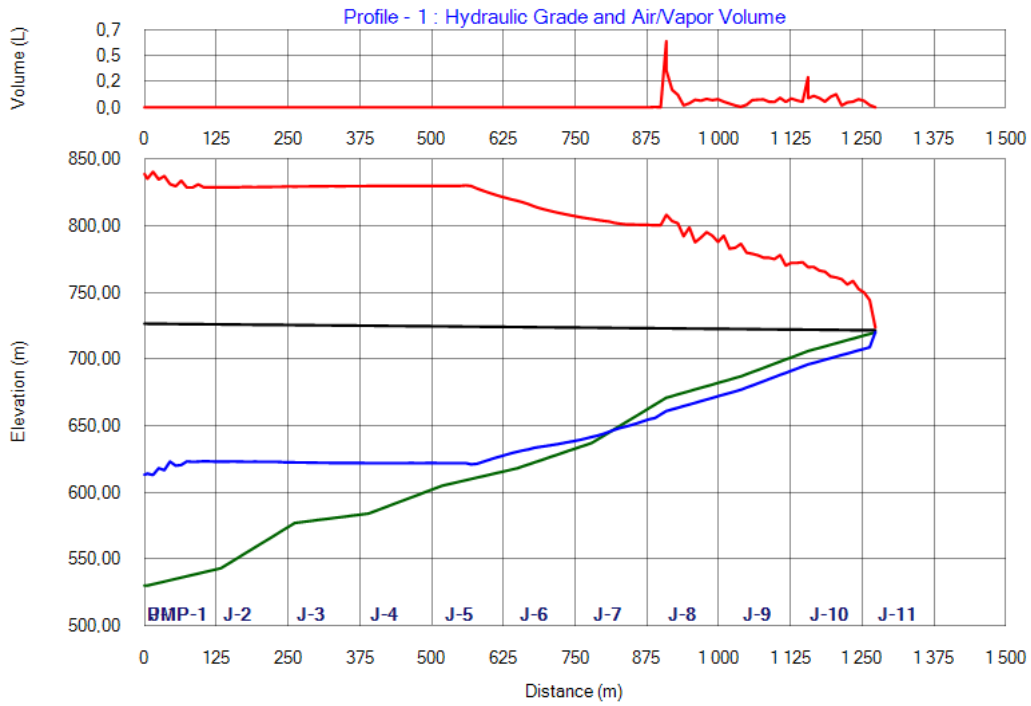


Figure IV.. 19: Graphique qualité hydraulique, volume d'air/de vapeur.

	Point	Distance (m)	Elevation (m)	Hydraulic Grade (Minimum) (m)	Hydraulic Grade (Maximum) (m)	Hydraulic Grade (Initial) (m)	Hydraulic Grade (m)	Air/Vapor Volume (L)	Air/Vapor Volume (Maximum) (L)	Vapor Pressure (m)
1	P-12:PMP-1	0	530,00	613,20	838,80	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
2	P-12:J-1	5	530,00	614,00	835,30	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
3	P-1:J-1	5	530,00	614,00	835,30	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
4	P-1:7,69%	15	531,00	613,00	840,50	726,40	726,40	0,0	0,0	521,00
5	P-1:15,38%	25	532,00	618,10	834,80	726,40	726,40	0,0	0,0	522,00
6	P-1:23,08%	34	533,00	616,60	837,30	726,40	726,40	0,0	0,0	523,00
7	P-1:30,77%	44	534,00	623,10	831,30	726,30	726,30	0,0	0,0	524,00
8	P-1:38,46%	54	535,00	620,00	829,70	726,30	726,30	0,0	0,0	525,00
9	P-1:46,15%	64	536,00	620,50	833,80	726,20	726,20	0,0	0,0	526,00
10	P-1:53,85%	74	537,00	623,20	828,70	726,20	726,20	0,0	0,0	527,00
11	P-1:61,54%	84	538,00	622,80	828,70	726,20	726,20	0,0	0,0	528,00
12	P-1:69,23%	94	539,00	623,00	831,10	726,10	726,10	0,0	0,0	529,00
13	P-1:76,92%	103	540,00	623,30	828,80	726,10	726,10	0,0	0,0	530,00
14	P-1:84,62%	113	541,00	623,20	828,80	726,00	726,00	0,0	0,0	531,00

Figure IV..20: Tableau des résultats (voir annexe IV).

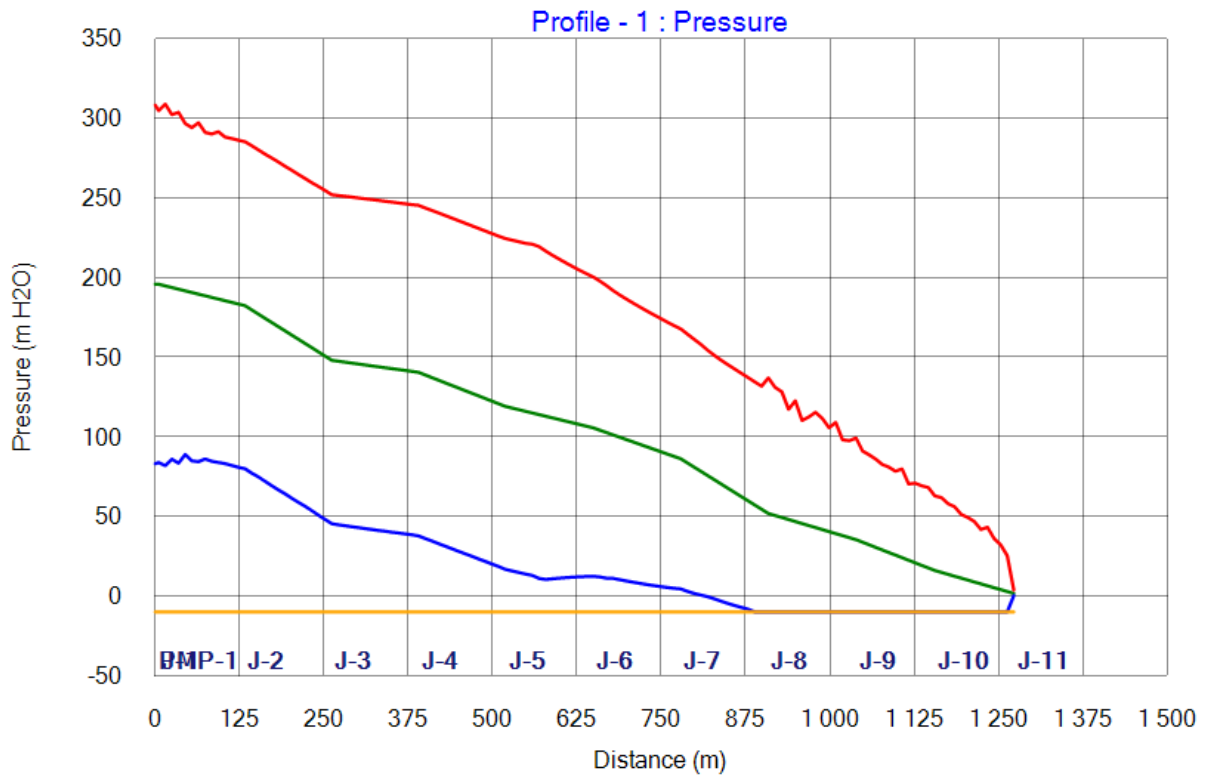


Figure IV.. 21: Variation de la surpression et de la dépression.

	Point	Distance (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)
1	P-12:PMP-1	0	83	308
2	P-12:J-1	5	84	305
3	P-1:J-1	5	84	305
4	P-1:7,69%	15	82	309
5	P-1:15,38%	25	86	302
6	P-1:23,08%	34	83	304
7	P-1:30,77%	44	89	297
8	P-1:38,46%	54	85	294
9	P-1:46,15%	64	84	297
10	P-1:53,85%	74	86	291
11	P-1:61,54%	84	85	290
12	P-1:69,23%	94	84	292
13	P-1:76,92%	103	83	288
14	P-1:84,62%	113	82	287

Figure IV.. 22: Tableau des pressions maximal et des pressions minimal.(annexe V).

b. Résultats avec protection

La conduite est en dépression

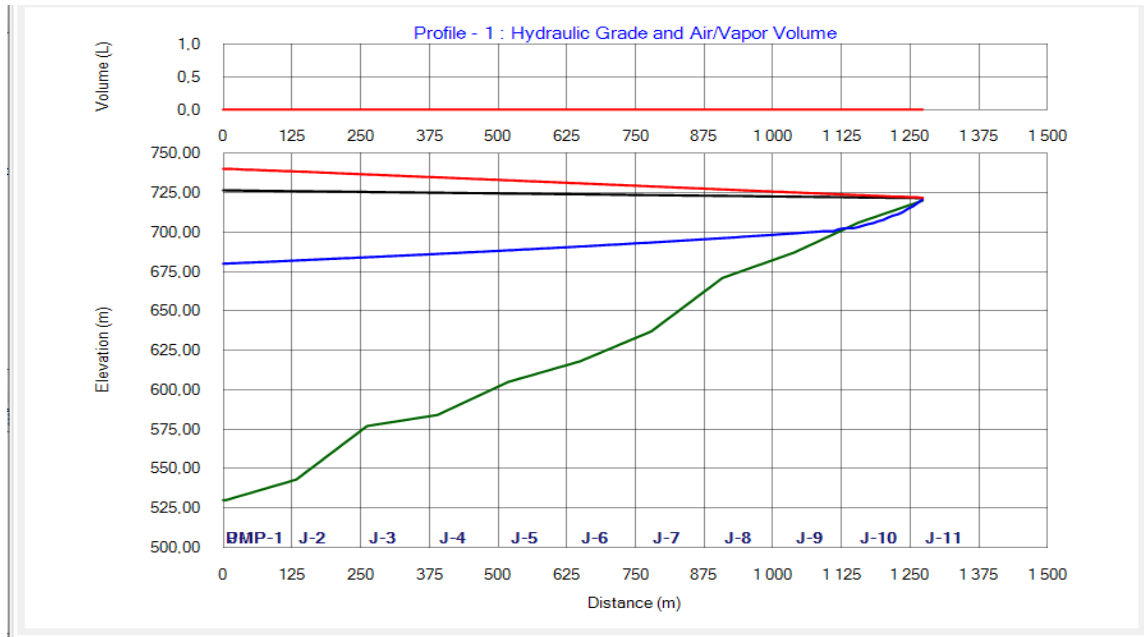


Figure IV.. 23: Graphique qualité hydraulique, volume d'air/de vapeur.

Point	Distance (m)	Elevation (m)	Hydraulic Grade (Minimum) (m)	Hydraulic Grade (Maximum) (m)	Hydraulic Grade (Initial) (m)	Hydraulic Grade (m)	Air/Vapor Volume (L)	Air/Vapor Volume (Maximum) (L)	Vapor Pressure (m)
P-12:PMP-1	0	530,00	680,00	740,20	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
P-12:J-1	5	530,00	680,10	740,10	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
P-1:J-1	5	530,00	680,10	740,10	726,50	726,50	0,0	0,0	520,00
P-1:7,14%	14	530,90	680,20	740,10	726,40	726,40	0,0	0,0	520,90
P-1:14,29%	23	531,90	680,30	740,00	726,40	726,40	0,0	0,0	521,90
P-1:21,43%	32	532,80	680,50	739,80	726,40	726,40	0,0	0,0	522,80
P-1:28,57%	41	533,70	680,60	739,60	726,30	726,30	0,0	0,0	523,70
P-1:35,71%	50	534,60	680,70	739,60	726,30	726,30	0,0	0,0	524,60
P-1:42,86%	60	535,60	680,90	739,50	726,30	726,30	0,0	0,0	525,60
P-1:50%	69	536,50	681,00	739,30	726,20	726,20	0,0	0,0	526,50
P-1:57,14%	78	537,40	681,10	739,20	726,20	726,20	0,0	0,0	527,40
P-1:64,29%	87	538,40	681,30	739,00	726,20	726,20	0,0	0,0	528,40
P-1:71,43%	96	539,30	681,40	739,00	726,10	726,10	0,0	0,0	529,30
P-1:78,57%	105	540,20	681,60	738,80	726,10	726,10	0,0	0,0	530,20

Figure IV.. 24: Tableau des résultats(annexe VI).

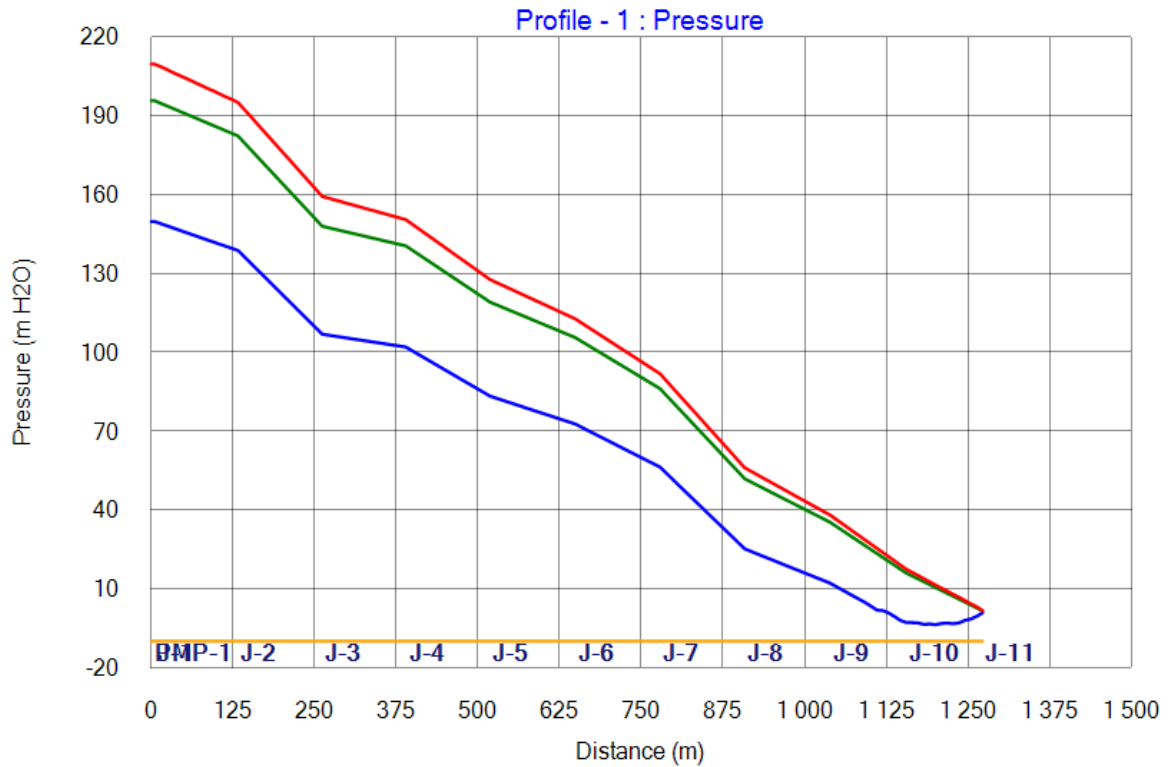


Figure IV.. 25: Variation de la surpression et de la dépression.

	Point	Distance (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)
1	P-12:PMP-1	0	150	210
2	P-12:J-1	5	150	210
3	P-1:J-1	5	150	210
4	P-1:7,14%	14	149	209
5	P-1:14,29%	23	148	208
6	P-1:21,43%	32	147	207
7	P-1:28,57%	41	147	206
8	P-1:35,71%	50	146	205
9	P-1:42,86%	60	145	204
10	P-1:50%	69	144	202
11	P-1:57,14%	78	143	201
12	P-1:64,29%	87	143	200
13	P-1:71,43%	96	142	199
14	P-1:78,57%	105	141	198

Figure IV.. 26: Tableau des pressions maximal et des pressions minimal (annexe VII).

IV.6.2. Interprétation des résultats obtenus

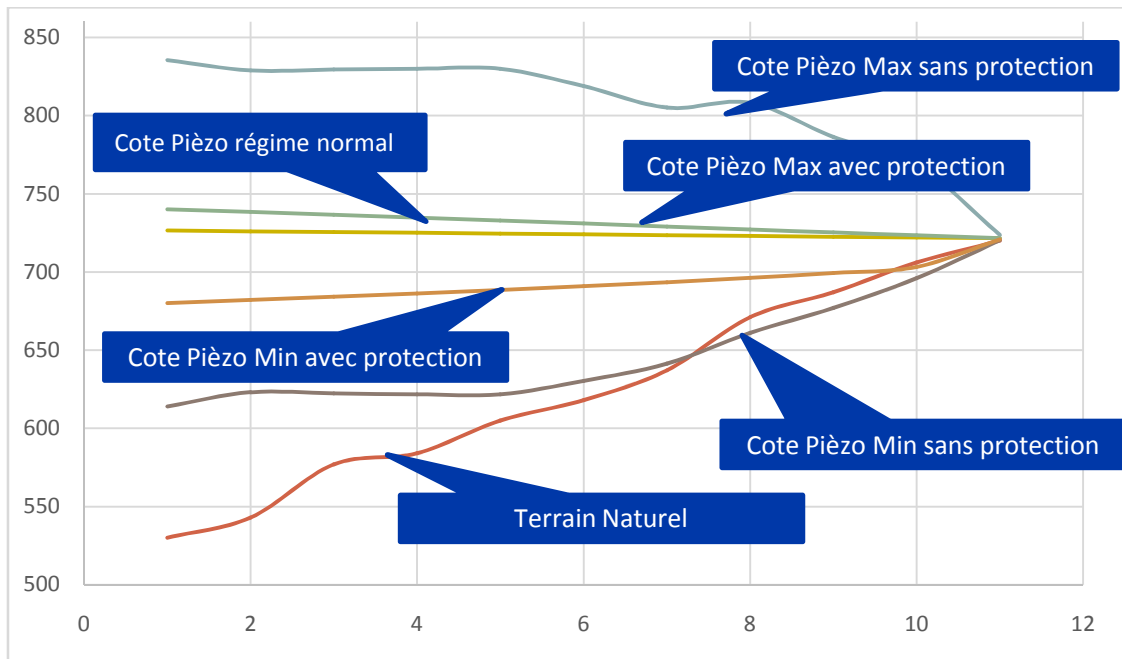


Figure IV.. 27: Comparaison des Résultats de simulation.

- On remarque sur le graphique (IV.21) qu'il y a une dépression sur la conduite de refoulement (J-7), cette dépression atteint sa valeur maximale de 89 m d'eau.
- La pression maximale (surpression) atteinte pendant cette manœuvre est de 305 m d'eau qui est supérieure à la pression maximale admissible. (Figure IV.21 ; IV.22)
- Les surpressions sont un peu supérieures à celles calculées par la formule de Joukowski c'est dû aux formules utilisées par le logiciel.
- Sur le graphique (IV.23), on remarque qu'avec la présence d'un ballon anti-bélier placé juste après la pompe, il n'y a plus apparition de zone de dépression sur le profil du réseau, d'où le volume du ballon anti-bélier dimensionnée auparavant d'une valeur de 200 L, est suffisant pour protéger la conduite pendant l'arrêt ou la disjonction de la pompe.
- Les courbes enveloppes de dépressions et de surpressions sont incluses dans l'enveloppe des pressions admissibles définies (avec protection).
- L'insertion de la protection nous a permis de corriger les surpressions et les dépressions,
- La valeur de la surpression maximale après installation de la protection est de 210m.
- La valeur de la dépression après installation de la protection est de 150m.

IV.7 Conclusion

D'après les résultats graphiques obtenus à l'aide du logiciel Hammer, le volume du ballon anti-bélier dimensionné dans le chapitre précédent, est suffisant pour protéger la conduite contre les surpressions et les dépressions.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les travaux réalisés au cours de notre mémoire de fin d'études, dont le thème est « Protection des conduites contre le phénomène transitoire du coup de bélier avec application sur le logiciel Hammer », nous ont permis de constater la grande importance du coup de bélier, tant que ce phénomène représente un danger potentiel dans la pratique. Par conséquent, une étude soignée des régimes transitoires dans les conduites s'apparente comme nécessité imposante constituant un test ultime à chaque installation hydraulique (station de pompage, de turbinage, hydroélectrique...etc.). L'idée qui nous a guidés à présenter quelques solutions important pour éviter les endommages qui peuvent provoquer par le coup de bélier sur les conduites. A cet effet l'intérêt essentiel de ce travail est de montrer :

L'importance du coup de bélier et les conséquences majeure survenues sur le régime transitoire, qu'est dû à une fermeture brusque de la vanne d'une canalisation dont l'écoulement est permanent, et crée ainsi en un point quelconque de la canalisation une surpression ou dépression qui peut endommager cette dernière.

Les différentes solutions anti-coup de bélier existant (les ballons anti-bélier, les cheminées d'équilibre, les soupapes anti-bélier,...etc.); à savoir leur emplacement et la capacité de fonctionnements pour supprimer ou réduire les pressions engendré.

Cependant, le réservoir d'air est le moyen de protection le plus utilisé, très utilisée dans les stations de pompage où il peut être surveillé.

Pour éviter et limiter un peu le risque du coup de bélier dans une conduite de refoulement, nous avons opté impérativement pour un réservoir anti- bélier, pour limiter les surpressions et les dépressions dans la conduite, une protection pour la continuité de l'eau.

D'une part, nous avons utiliser les trois méthodes « Peuch et meunier » « Bergeron » « Vibert » , ou nous avons déterminé la dépression et la surpression dans la conduite, ainsi que, le volume total du réservoir d'air de 200 litres qui est nécessaire pour la protection de la conduite de refoulement contre le coup de bélier.

D'autre part nous avons fait une simulation par le logiciel HAMMER. Les différentes courbes tracer à l'aide de ce logiciel nous a permis de bien suivre le comportement du coup de bélier le long de la conduite.

Il en résulte donc que les expérimentations numériques effectuées dans ce travail, affirme que la méthode des caractéristiques est parfaitement adaptée à la simulation de phénomène du coup de bélier en faisant preuves, à l'instar du domaine des écoulements transitoires.

Finalement, on espère que notre étude sera utile aux ingénieurs et aux étudiants chercheurs pour l'étude du phénomène du coup de bélier et fera l'objet d'une amélioration dans l'avenir.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- # **AISSANI, C.** (2020). Méthodologie de recherche sur les phénomènes transitoires en adduction d'eau. Mémoire de master en hydraulique. Université Mohamed Khider Biskra, Algérie [1]
- # **BENNIS, S.** Hydraulique et hydrologie. Deuxième édition revue et augmentée. Université du Québec, école de technologie supérieure. [13]
- # **BERREKSI, A.** Cours hydraulique 3, laboratoire de recherche en hydraulique appliquée et environnement, Bejaia 2015 [6]
- # **BLOMMAERT.G.** "Étude du comportement dynamique des turbines francis "contrôle actif de leur stabilité de fonctionnement. Thèse de doctorat 2000 [8]
- # **BOUABDELI, I.** (2014). Modélisation numérique des écoulements transitoires dans les conduites en charge. Mémoire de master hydraulique. Ecole nationale supérieure d'hydraulique ARBAOUI Abdellah, Algérie. [2]
- # **DUPONT A. (1974)** Hydraulique urbain Tome 2 ouvrages de transport élévation et distribution des eaux. 3ème édition Paris V pp 239-241. [10]
- # [Elearning.univ-annaba.dz](http://elearning.univ-annaba.dz) [5]
- # **Guhl, F.** (2002). Guide méthodologique d'études anti – bélier pour les réseaux d'eau.[11]
- # Quick Start Lessons, Bentley HAMMER V8i Edition User's Guide.[20]
- # Guide méthodologique sur le coup de bélier. KSB volume 1, 4 allée des barbanniers F- 92635 Gennevilliers Cedex. [14]
- # **KHENFOUF, O. LALOUANI, A.** (2015). Etude de transfert Boussiaba Jijel-Beni Haroun Mila. Mémoire de master. Université Larbi Ben M'hidi Oum el Bouaghi, Algérie [7]
- # **KHELALFA, B.** (2019). Méthodologie de recherche sur la protection des conduites en charge contre la variation de pression. Mémoire de master en

hydraulique. Université Mohamed Khider Biskra, Algérie. [3]

✚ **LENCASTRE. A** "Hydraulique générale", Edition Eyrolles, paris 1983[4]

✚ **LENCASTRE, M.**(1996). Manuel d'Hydraulique Générale. Paris: Eyrolles.[12]

✚ **MEUNIER, M.** (1980) Les coup de bélier et la protection des réseaux d'eau sous pression, ENGREF, Paris, France [15]

✚ **Michel A,** Morel tome 2, turbomachines construction graphiques phénomène transitoire[9]

✚ **OURAGH.Y.** "Ecoulement forcé en Hydraulique" Tome II OP,1986[16]

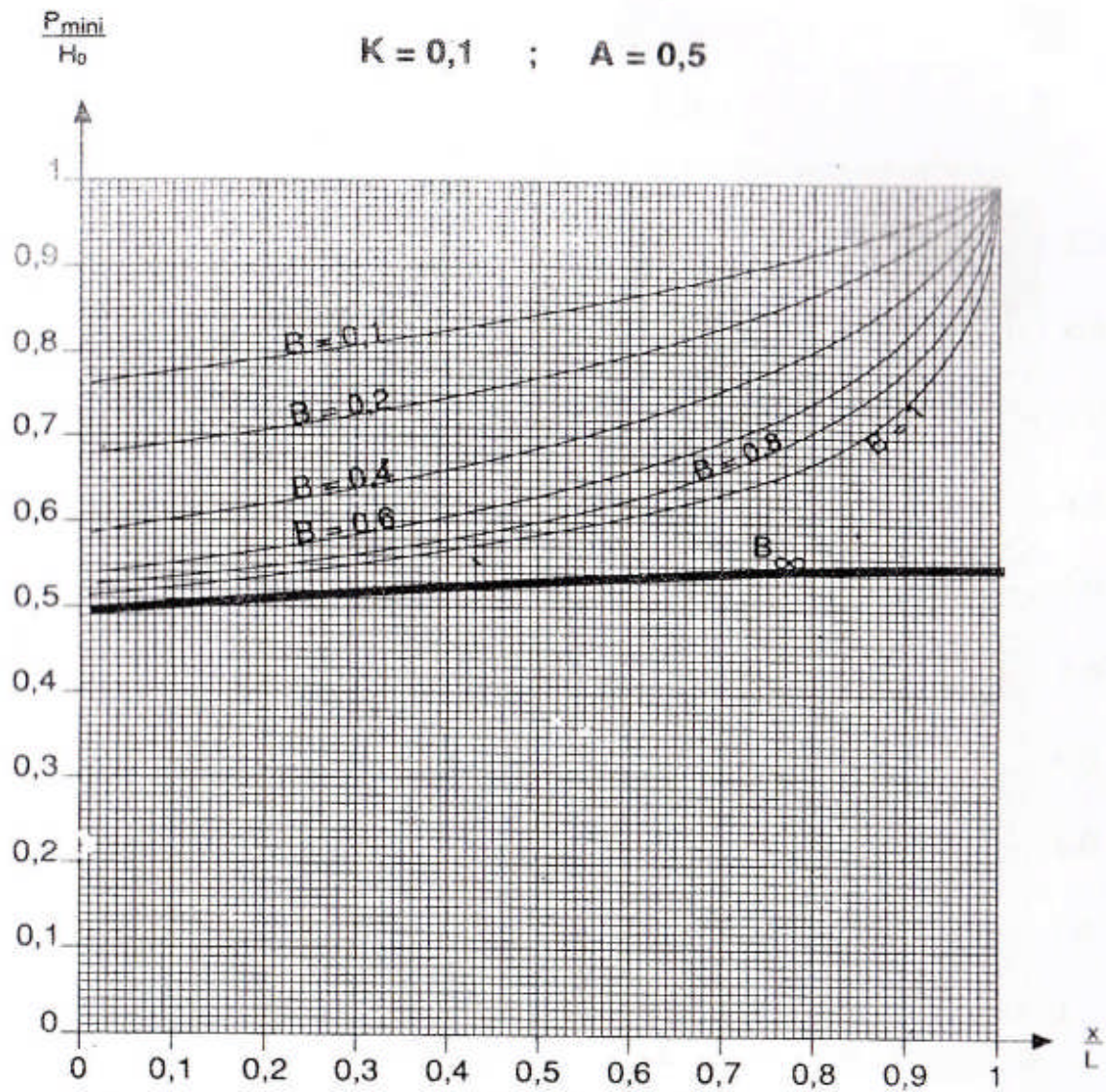
✚ **ECOULEMENT DANS LES CONDUITES PERTES DE CHARGE**
https://www.lycee-champollion.fr/IMG/pdf/pertes_de_charge.pdf[17]

✚ pdf.directindustry.com/pdf/bentley-systems-europe-bv/bentley-hammer/28711-18158.html[19]

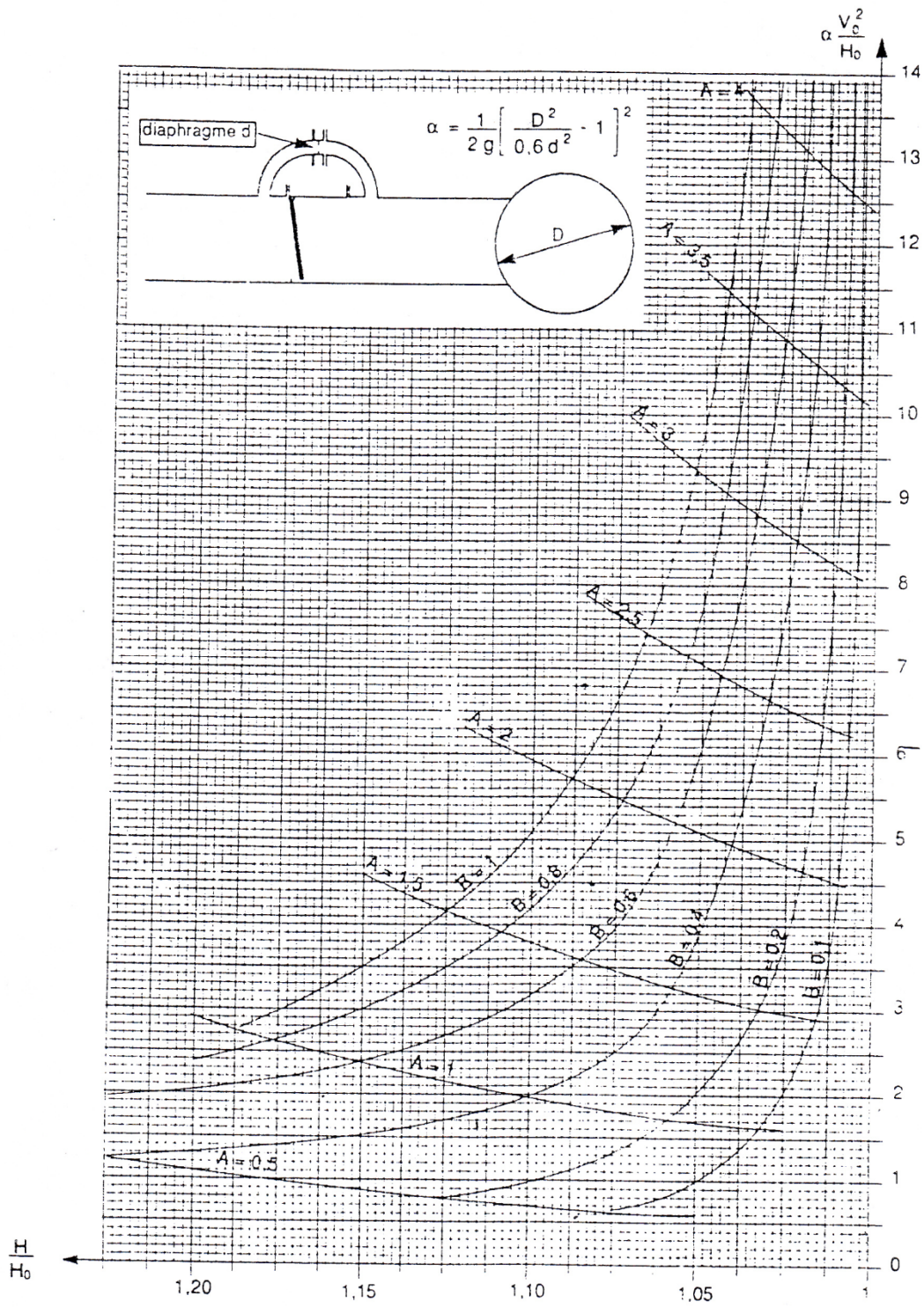
✚ Bently HAMMER connect edition
helpdocs.bentley.com/LiveContent/web/Bentley%20HAMMER%20SS6-v1/en/GUID-8BBE358222DF43EAB56A97868802258D.html[21]

Annexes

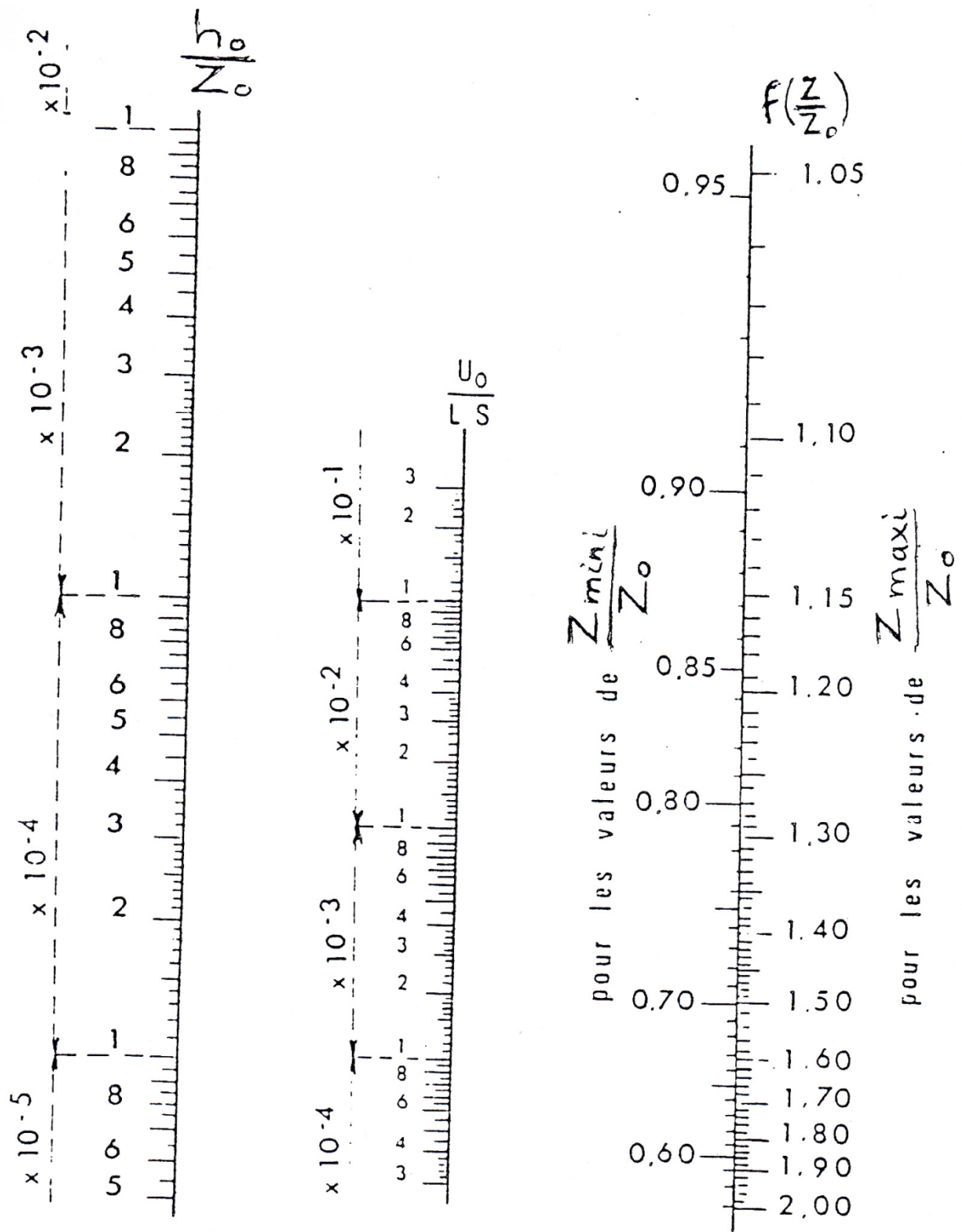
Annexe I : Abaques de Puech et Meunier pour l'étude de la dépression d'une conduite protégée par un ballon



Annexe II : Abaque de Dubin et Guéneau donnant la surpression d'une conduite protégée par un ballon



ANNEXE III : Abaque de Vibert pour la détermination du volume des réservoirs anti-béliers



Annexe IV

Point	Distance (m)	Elevation (m)	Hydraulic Grade (Minimum) (m)	Hydraulic Grade (Maximum) (m)	Hydraulic Grade (Initial) (m)	Hydraulic Grade (m)	Air/Vapor Volume (L)	Air/Vapor Volume (Maximum) (L)	Vapor Pressure (m)
P-12:PMP-1	0	530	613,2	838,8	726,5	726,5	0	0	520
P-12:J-1	5	530	614	835,3	726,5	726,5	0	0	520
P-1:J-1	5	530	614	835,3	726,5	726,5	0	0	520
P-1:7,69%	15	531	613	840,5	726,4	726,4	0	0	521
P-1:15,38%	25	532	618,1	834,8	726,4	726,4	0	0	522
P-1:23,08%	34	533	616,6	837,3	726,4	726,4	0	0	523
P-1:30,77%	44	534	623,1	831,3	726,3	726,3	0	0	524
P-1:38,46%	54	535	620	829,7	726,3	726,3	0	0	525
P-1:46,15%	64	536	620,5	833,8	726,2	726,2	0	0	526
P-1:53,85%	74	537	623,2	828,7	726,2	726,2	0	0	527
P-1:61,54%	84	538	622,8	828,7	726,2	726,2	0	0	528
P-1:69,23%	94	539	623	831,1	726,1	726,1	0	0	529
P-1:76,92%	103	540	623,3	828,8	726,1	726,1	0	0	530
P-1:84,62%	113	541	623,2	828,8	726	726	0	0	531
P-1:92,31%	123	542	623	828,8	726	726	0	0	532
P-1:J-2	133	543	623,1	828,8	726	726	0	0	533
P-2:J-2	133	543	623,1	828,8	726	726	0	0	533
P-2:7,69%	143	545,6	622,9	828,9	725,9	725,9	0	0	535,6
P-2:15,38%	153	548,2	623,2	828,9	725,9	725,9	0	0	538,2
P-2:23,08%	163	550,8	623	828,9	725,9	725,9	0	0	540,8
P-2:30,77%	173	553,5	622,9	829,1	725,8	725,8	0	0	543,5
P-2:38,46%	183	556,1	622,8	829,1	725,8	725,8	0	0	546,1
P-2:46,15%	192	558,7	623	829	725,7	725,7	0	0	548,7
P-2:53,85%	202	561,3	622,8	829,2	725,7	725,7	0	0	551,3
P-2:61,54%	212	563,9	622,8	829,1	725,7	725,7	0	0	553,9
P-2:69,23%	222	566,5	622,9	829,2	725,6	725,6	0	0	556,5
P-2:76,92%	232	569,2	622,8	829,2	725,6	725,6	0	0	559,2
P-2:84,62%	242	571,8	622,6	829,4	725,6	725,6	0	0	561,8
P-2:92,31%	252	574,4	622,5	829,5	725,5	725,5	0	0	564,4
P-2:J-3	262	577	622,4	829,4	725,5	725,5	0	0	567
P-3:J-3	262	577	622,4	829,4	725,5	725,5	0	0	567
P-3:7,69%	272	577,5	622,3	829,5	725,4	725,4	0	0	567,5
P-3:15,38%	282	578,1	622,3	829,5	725,4	725,4	0	0	568,1
P-3:23,08%	291	578,6	622,2	829,6	725,4	725,4	0	0	568,6
P-3:30,77%	301	579,2	622,2	829,6	725,3	725,3	0	0	569,2
P-3:38,46%	311	579,7	622,1	829,6	725,3	725,3	0	0	569,7
P-3:46,15%	321	580,2	622,1	829,7	725,3	725,3	0	0	570,2
P-3:53,85%	331	580,8	622	829,7	725,2	725,2	0	0	570,8
P-3:61,54%	341	581,3	622,1	829,6	725,2	725,2	0	0	571,3
P-3:69,23%	350	581,8	622	829,7	725,1	725,1	0	0	571,8

Annexes

P-3:76,92%	360	582,4	622	829,7	725,1	725,1	0	0	572,4
P-3:84,62%	370	582,9	622	829,7	725,1	725,1	0	0	572,9
P-3:92,31%	380	583,5	622	829,7	725	725	0	0	573,5
P-3:J-4	390	584	621,8	829,9	725	725	0	0	574
P-4:J-4	390	584	621,8	829,9	725	725	0	0	574
P-4:7,69%	400	585,6	621,8	829,8	725	725	0	0	575,6
P-4:15,38%	410	587,2	621,9	829,9	724,9	724,9	0	0	577,2
P-4:23,08%	420	588,8	621,8	829,9	724,9	724,9	0	0	578,8
P-4:30,77%	430	590,5	621,9	829,9	724,8	724,8	0	0	580,5
P-4:38,46%	439	592,1	621,8	829,9	724,8	724,8	0	0	582,1
P-4:46,15%	449	593,7	621,8	829,9	724,8	724,8	0	0	583,7
P-4:53,85%	459	595,3	621,9	829,9	724,7	724,7	0	0	585,3
P-4:61,54%	469	596,9	621,9	829,8	724,7	724,7	0	0	586,9
P-4:69,23%	479	598,5	621,8	829,8	724,6	724,6	0	0	588,5
P-4:76,92%	489	600,2	621,9	829,8	724,6	724,6	0	0	590,2
P-4:84,62%	499	601,8	621,9	829,8	724,6	724,6	0	0	591,8
P-4:92,31%	509	603,4	621,9	829,8	724,5	724,5	0	0	593,4
P-4:J-5	519	605	621,8	829,9	724,5	724,5	0	0	595
P-5:J-5	519	605	621,8	829,9	724,5	724,5	0	0	595
P-5:7,69%	529	606	621,8	829,9	724,5	724,5	0	0	596
P-5:15,38%	539	607	621,8	829,9	724,4	724,4	0	0	597
P-5:23,08%	549	608	621,8	829,9	724,4	724,4	0	0	598
P-5:30,77%	559	609	621,9	830,3	724,3	724,3	0	0	599
P-5:38,46%	569	610	621	829,8	724,3	724,3	0	0	600
P-5:46,15%	579	611	621,4	828	724,3	724,3	0	0	601
P-5:53,85%	589	612	622,8	826,4	724,2	724,2	0	0	602
P-5:61,54%	599	613	624,2	824,9	724,2	724,2	0	0	603
P-5:69,23%	609	614	625,6	823,5	724,1	724,1	0	0	604
P-5:76,92%	619	615	626,8	822,2	724,1	724,1	0	0	605
P-5:84,62%	629	616	628,1	821	724,1	724,1	0	0	606
P-5:92,31%	639	617	629,3	819,8	724	724	0	0	607
P-5:J-6	649	618	630,4	818,8	724	724	0	0	608
P-6:J-6	649	618	630,4	818,8	724	724	0	0	608
P-6:7,69%	659	619,5	631,4	817,6	724	724	0	0	609,5
P-6:15,38%	669	620,9	632,2	816,2	723,9	723,9	0	0	610,9
P-6:23,08%	679	622,4	633,4	814,5	723,9	723,9	0	0	612,4
P-6:30,77%	689	623,8	634,1	813,1	723,8	723,8	0	0	613,8
P-6:38,46%	699	625,3	634,7	812	723,8	723,8	0	0	615,3
P-6:46,15%	709	626,8	635,4	810,9	723,8	723,8	0	0	616,8
P-6:53,85%	719	628,2	636,1	809,9	723,7	723,7	0	0	618,2
P-6:61,54%	729	629,7	636,9	809	723,7	723,7	0	0	619,7
P-6:69,23%	739	631,2	637,7	808,1	723,6	723,6	0	0	621,2
P-6:76,92%	749	632,6	638,5	807,3	723,6	723,6	0	0	622,6
P-6:84,62%	759	634,1	639,4	806,4	723,6	723,6	0	0	624,1
P-6:92,31%	769	635,5	640,4	805,7	723,5	723,5	0	0	625,5

Annexes

P-6:J-7	779	637	641,5	805,1	723,5	723,5	0	0	627
P-7:J-7	779	637	641,5	805,1	723,5	723,5	0	0	627
P-7:7,69%	789	639,6	642,5	804,4	723,5	723,5	0	0	629,6
P-7:15,38%	799	642,2	643,8	803,7	723,4	723,4	0	0	632,2
P-7:23,08%	809	644,8	645,4	803,2	723,4	723,4	0	0	634,8
P-7:30,77%	819	647,5	647	802,1	723,3	723,3	0	0	637,5
P-7:38,46%	829	650,1	648,3	801,5	723,3	723,3	0	0	640,1
P-7:46,15%	839	652,7	649,4	801	723,3	723,3	0	0	642,7
P-7:53,85%	849	655,3	650,6	800,9	723,2	723,2	0	0	645,3
P-7:61,54%	859	657,9	651,9	800,8	723,2	723,2	0	0	647,9
P-7:69,23%	869	660,5	653,4	800,6	723,1	723,1	0	0	650,5
P-7:76,92%	879	663,2	654,8	800,6	723,1	723,1	0	0	653,2
P-7:84,62%	889	665,8	655,7	800,4	723,1	723,1	0	0	655,8
P-7:92,31%	899	668,4	658,4	800,4	723	723	0	0	658,4
P-7:J-8	909	671	661	808,2	723	723	0	0,6	661
P-8:J-8	909	671	661	808,2	723	723	0	0,4	661
P-8:7,69%	919	672,2	662,2	803,5	723	723	0	0,2	662,2
P-8:15,38%	929	673,5	663,4	801,9	722,9	722,9	0	0,1	663,5
P-8:23,08%	939	674,7	664,7	792,1	722,9	722,9	0	0	664,7
P-8:30,77%	949	675,9	665,9	798,7	722,8	722,8	0	0	665,9
P-8:38,46%	959	677,2	667,1	787,6	722,8	722,8	0	0,1	667,2
P-8:46,15%	969	678,4	668,4	791,1	722,8	722,8	0	0,1	668,4
P-8:53,85%	979	679,6	669,6	795,2	722,7	722,7	0	0,1	669,6
P-8:61,54%	989	680,8	670,8	792,6	722,7	722,7	0	0,1	670,8
P-8:69,23%	999	682,1	672,1	787,9	722,7	722,7	0	0,1	672,1
P-8:76,92%	1 009	683,3	673,3	792,5	722,6	722,6	0	0,1	673,3
P-8:84,62%	1 019	684,5	674,5	782,8	722,6	722,6	0	0	674,5
P-8:92,31%	1 029	685,8	675,7	783,5	722,5	722,5	0	0	675,8
P-8:J-9	1 039	687	677	786,4	722,5	722,5	0	0	677
P-9:J-9	1 039	687	677	786,4	722,5	722,5	0	0	677
P-9:8,33%	1 049	688,6	678,6	779,8	722,5	722,5	0	0	678,6
P-9:16,67%	1 058	690,2	680,1	779	722,4	722,4	0	0,1	680,2
P-9:25%	1 068	691,7	681,7	777,9	722,4	722,4	0	0,1	681,7
P-9:33,33%	1 078	693,3	683,3	776,1	722,3	722,3	0	0,1	683,3
P-9:41,67%	1 088	694,9	684,9	776	722,3	722,3	0	0,1	684,9
P-9:50%	1 097	696,5	686,5	775	722,3	722,3	0	0,1	686,5
P-9:58,33%	1 107	698,1	688,1	778	722,2	722,2	0	0,1	688,1
P-9:66,67%	1 117	699,7	689,6	770,2	722,2	722,2	0	0,1	689,7
P-9:75%	1 127	701,2	691,2	772,2	722,2	722,2	0	0,1	691,2
P-9:83,33%	1 136	702,8	692,8	772,1	722,1	722,1	0	0,1	692,8
P-9:91,67%	1 146	704,4	694,4	772,7	722,1	722,1	0	0,1	694,4
P-9:J-10	1 156	706	696	769	722	722	0	0,3	696
P-10:J-10	1 156	706	696	769	722	722	0	0,1	696
P-10:8,33%	1 166	707,2	697,1	769,1	722	722	0	0,1	697,2
P-10:16,67%	1 175	708,3	698,3	766,4	722	722	0	0,1	698,3

P-10:25%	1 185	709,5	699,5	765,6	721,9	721,9	0	0,1	699,5
P-10:33,33%	1 195	710,7	700,6	762	721,9	721,9	0	0,1	700,7
P-10:41,67%	1 205	711,8	701,8	761,2	721,9	721,9	0	0,1	701,8
P-10:50%	1 214	713	703	759,9	721,8	721,8	0	0	703
P-10:58,33%	1 224	714,2	704,1	756	721,8	721,8	0	0	704,2
P-10:66,67%	1 234	715,3	705,3	758,6	721,7	721,7	0	0,1	705,3
P-10:75%	1 244	716,5	706,5	752,6	721,7	721,7	0	0,1	706,5
P-10:83,33%	1 253	717,7	707,6	749,9	721,7	721,7	0	0,1	707,7
P-10:91,67%	1 263	718,8	708,8	744,2	721,6	721,6	0	0	708,8
P-10:J-11	1 273	720	720,2	723,7	721,6	721,6	0	0	710

Annexe V : tableau de variation de la surpression et dépression

Point	Distance (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Initial) (m H2O)	Pressure (m H2O)	Vapor Pressure (m H2O)
P-12:PMP-1	0	83	308	196	196	-10
P-12:J-1	5	84	305	196	196	-10
P-1:J-1	5	84	305	196	196	-10
P-1:7,69%	15	82	309	195	195	-10
P-1:15,38%	25	86	302	194	194	-10
P-1:23,08%	34	83	304	193	193	-10
P-1:30,77%	44	89	297	192	192	-10
P-1:38,46%	54	85	294	191	191	-10
P-1:46,15%	64	84	297	190	190	-10
P-1:53,85%	74	86	291	189	189	-10
P-1:61,54%	84	85	290	187	187	-10
P-1:69,23%	94	84	292	186	186	-10
P-1:76,92%	103	83	288	185	185	-10
P-1:84,62%	113	82	287	184	184	-10
P-1:92,31%	123	81	286	183	183	-10
P-1:J-2	133	80	285	182	182	-10
P-2:J-2	133	80	285	182	182	-10
P-2:7,69%	143	77	283	180	180	-10
P-2:15,38%	153	75	280	177	177	-10
P-2:23,08%	163	72	278	174	174	-10
P-2:30,77%	173	69	275	172	172	-10
P-2:38,46%	183	67	272	169	169	-10
P-2:46,15%	192	64	270	166	166	-10
P-2:53,85%	202	61	267	164	164	-10
P-2:61,54%	212	59	265	161	161	-10
P-2:69,23%	222	56	262	159	159	-10
P-2:76,92%	232	54	259	156	156	-10
P-2:84,62%	242	51	257	153	153	-10
P-2:92,31%	252	48	255	151	151	-10

P-2:J-3	262	45	252	148	148	-10
P-3:J-3	262	45	252	148	148	-10
P-3:7,69%	272	45	251	147	147	-10
P-3:15,38%	282	44	251	147	147	-10
P-3:23,08%	291	43	250	146	146	-10
P-3:30,77%	301	43	250	146	146	-10
P-3:38,46%	311	42	249	145	145	-10
P-3:46,15%	321	42	249	145	145	-10
P-3:53,85%	331	41	248	144	144	-10
P-3:61,54%	341	41	248	143	143	-10
P-3:69,23%	350	40	247	143	143	-10
P-3:76,92%	360	40	247	142	142	-10
P-3:84,62%	370	39	246	142	142	-10
P-3:92,31%	380	38	246	141	141	-10
P-3:J-4	390	38	245	140	140	-10
P-4:J-4	390	38	245	140	140	-10
P-4:7,69%	400	36	244	139	139	-10
P-4:15,38%	410	35	242	137	137	-10
P-4:23,08%	420	33	241	136	136	-10
P-4:30,77%	430	31	239	134	134	-10
P-4:38,46%	439	30	237	132	132	-10
P-4:46,15%	449	28	236	131	131	-10
P-4:53,85%	459	27	234	129	129	-10
P-4:61,54%	469	25	232	127	127	-10
P-4:69,23%	479	23	231	126	126	-10
P-4:76,92%	489	22	229	124	124	-10
P-4:84,62%	499	20	228	122	122	-10
P-4:92,31%	509	19	226	121	121	-10
P-4:J-5	519	17	224	119	119	-10
P-5:J-5	519	17	224	119	119	-10
P-5:7,69%	529	16	223	118	118	-10
P-5:15,38%	539	15	222	117	117	-10
P-5:23,08%	549	14	221	116	116	-10
P-5:30,77%	559	13	221	115	115	-10
P-5:38,46%	569	11	219	114	114	-10
P-5:46,15%	579	10	217	113	113	-10
P-5:53,85%	589	11	214	112	112	-10
P-5:61,54%	599	11	212	111	111	-10
P-5:69,23%	609	12	209	110	110	-10
P-5:76,92%	619	12	207	109	109	-10
P-5:84,62%	629	12	205	108	108	-10
P-5:92,31%	639	12	202	107	107	-10
P-5:J-6	649	12	200	106	106	-10
P-6:J-6	649	12	200	106	106	-10
P-6:7,69%	659	12	198	104	104	-10

P-6:15,38%	669	11	195	103	103	-10
P-6:23,08%	679	11	192	101	101	-10
P-6:30,77%	689	10	189	100	100	-10
P-6:38,46%	699	9	186	98	98	-10
P-6:46,15%	709	9	184	97	97	-10
P-6:53,85%	719	8	181	95	95	-10
P-6:61,54%	729	7	179	94	94	-10
P-6:69,23%	739	7	177	92	92	-10
P-6:76,92%	749	6	174	91	91	-10
P-6:84,62%	759	5	172	89	89	-10
P-6:92,31%	769	5	170	88	88	-10
P-6:J-7	779	4	168	86	86	-10
P-7:J-7	779	4	168	86	86	-10
P-7:7,69%	789	3	164	84	84	-10
P-7:15,38%	799	2	161	81	81	-10
P-7:23,08%	809	1	158	78	78	-10
P-7:30,77%	819	0	154	76	76	-10
P-7:38,46%	829	-2	151	73	73	-10
P-7:46,15%	839	-3	148	70	70	-10
P-7:53,85%	849	-5	145	68	68	-10
P-7:61,54%	859	-6	143	65	65	-10
P-7:69,23%	869	-7	140	62	62	-10
P-7:76,92%	879	-8	137	60	60	-10
P-7:84,62%	889	-10	134	57	57	-10
P-7:92,31%	899	-10	132	54	54	-10
P-7:J-8	909	-10	137	52	52	-10
P-8:J-8	909	-10	137	52	52	-10
P-8:7,69%	919	-10	131	51	51	-10
P-8:15,38%	929	-10	128	49	49	-10
P-8:23,08%	939	-10	117	48	48	-10
P-8:30,77%	949	-10	123	47	47	-10
P-8:38,46%	959	-10	110	45	45	-10
P-8:46,15%	969	-10	112	44	44	-10
P-8:53,85%	979	-10	115	43	43	-10
P-8:61,54%	989	-10	112	42	42	-10
P-8:69,23%	999	-10	106	40	40	-10
P-8:76,92%	1 009	-10	109	39	39	-10
P-8:84,62%	1 019	-10	98	38	38	-10
P-8:92,31%	1 029	-10	98	37	37	-10
P-8:J-9	1 039	-10	99	35	35	-10
P-9:J-9	1 039	-10	99	35	35	-10
P-9:8,33%	1 049	-10	91	34	34	-10
P-9:16,67%	1 058	-10	89	32	32	-10
P-9:25%	1 068	-10	86	31	31	-10
P-9:33,33%	1 078	-10	83	29	29	-10

P-9:41,67%	1 088	-10	81	27	27	-10
P-9:50%	1 097	-10	78	26	26	-10
P-9:58,33%	1 107	-10	80	24	24	-10
P-9:66,67%	1 117	-10	70	22	22	-10
P-9:75%	1 127	-10	71	21	21	-10
P-9:83,33%	1 136	-10	69	19	19	-10
P-9:91,67%	1 146	-10	68	18	18	-10
P-9:J-10	1 156	-10	63	16	16	-10
P-10:J-10	1 156	-10	63	16	16	-10
P-10:8,33%	1 166	-10	62	15	15	-10
P-10:16,67%	1 175	-10	58	14	14	-10
P-10:25%	1 185	-10	56	12	12	-10
P-10:33,33%	1 195	-10	51	11	11	-10
P-10:41,67%	1 205	-10	49	10	10	-10
P-10:50%	1 214	-10	47	9	9	-10
P-10:58,33%	1 224	-10	42	8	8	-10
P-10:66,67%	1 234	-10	43	6	6	-10
P-10:75%	1 244	-10	36	5	5	-10
P-10:83,33%	1 253	-10	32	4	4	-10
P-10:91,67%	1 263	-10	25	3	3	-10
P-10:J-11	1 273	0	4	2	2	-10

Annexe VI

Point	Distance (m)	Elevation (m)	Hydraulic Grade (Minimum) (m)	Hydraulic Grade (Maximum) (m)	Hydraulic Grade (Initial) (m)	Hydraulic Grade (m)	Air/Vapor Volume (L)	Air/Vapor Volume (Maximum) (L)	Vapor Pressure (m)
P-12:PMP-1	0	530	680	740,2	726,5	726,5	0	0	520
P-12:J-1	5	530	680,1	740,1	726,5	726,5	0	0	520
P-1:J-1	5	530	680,1	740,1	726,5	726,5	0	0	520
P-1:7,14%	14	530,9	680,2	740,1	726,4	726,4	0	0	520,9
P-1:14,29%	23	531,9	680,3	740	726,4	726,4	0	0	521,9
P-1:21,43%	32	532,8	680,5	739,8	726,4	726,4	0	0	522,8
P-1:28,57%	41	533,7	680,6	739,6	726,3	726,3	0	0	523,7
P-1:35,71%	50	534,6	680,7	739,6	726,3	726,3	0	0	524,6
P-1:42,86%	60	535,6	680,9	739,5	726,3	726,3	0	0	525,6
P-1:50%	69	536,5	681	739,3	726,2	726,2	0	0	526,5
P-1:57,14%	78	537,4	681,1	739,2	726,2	726,2	0	0	527,4
P-1:64,29%	87	538,4	681,3	739	726,2	726,2	0	0	528,4
P-1:71,43%	96	539,3	681,4	739	726,1	726,1	0	0	529,3
P-1:78,57%	105	540,2	681,6	738,8	726,1	726,1	0	0	530,2
P-1:85,71%	114	541,1	681,7	738,7	726	726	0	0	531,1
P-1:92,86%	123	542,1	681,9	738,7	726	726	0	0	532,1
P-1:J-2	133	543	682	738,4	726	726	0	0	533
P-2:J-2	133	543	682	738,4	726	726	0	0	533

P-2:7,14%	142	545,4	682,2	738,4	725,9	725,9	0	0	535,4
P-2:14,29%	151	547,9	682,3	738,3	725,9	725,9	0	0	537,9
P-2:21,43%	160	550,3	682,5	738,1	725,9	725,9	0	0	540,3
P-2:28,57%	169	552,7	682,6	738	725,8	725,8	0	0	542,7
P-2:35,71%	179	555,1	682,8	737,8	725,8	725,8	0	0	545,1
P-2:42,86%	188	557,6	682,9	737,7	725,8	725,8	0	0	547,6
P-2:50%	197	560	683,1	737,6	725,7	725,7	0	0	550
P-2:57,14%	206	562,4	683,2	737,4	725,7	725,7	0	0	552,4
P-2:64,29%	216	564,9	683,4	737,3	725,7	725,7	0	0	554,9
P-2:71,43%	225	567,3	683,5	737,1	725,6	725,6	0	0	557,3
P-2:78,57%	234	569,7	683,6	737	725,6	725,6	0	0	559,7
P-2:85,71%	243	572,1	683,8	736,9	725,6	725,6	0	0	562,1
P-2:92,86%	252	574,6	683,9	736,7	725,5	725,5	0	0	564,6
P-2:J-3	262	577	684,1	736,6	725,5	725,5	0	0	567
P-3:J-3	262	577	684,1	736,6	725,5	725,5	0	0	567
P-3:7,14%	271	577,5	684,2	736,5	725,4	725,4	0	0	567,5
P-3:14,29%	280	578	684,4	736,4	725,4	725,4	0	0	568
P-3:21,43%	289	578,5	684,5	736,2	725,4	725,4	0	0	568,5
P-3:28,57%	298	579	684,7	736,1	725,3	725,3	0	0	569
P-3:35,71%	307	579,5	684,8	735,9	725,3	725,3	0	0	569,5
P-3:42,86%	316	580	685	735,8	725,3	725,3	0	0	570
P-3:50%	326	580,5	685,1	735,7	725,2	725,2	0	0	570,5
P-3:57,14%	335	581	685,3	735,5	725,2	725,2	0	0	571
P-3:64,29%	344	581,5	685,4	735,4	725,2	725,2	0	0	571,5
P-3:71,43%	353	582	685,6	735,3	725,1	725,1	0	0	572
P-3:78,57%	362	582,5	685,7	735,1	725,1	725,1	0	0	572,5
P-3:85,71%	371	583	685,9	735	725,1	725,1	0	0	573
P-3:92,86%	380	583,5	686	734,9	725	725	0	0	573,5
P-3:J-4	389	584	686,2	734,8	725	725	0	0	574
P-4:J-4	390	584	686,2	734,8	725	725	0	0	574
P-4:7,14%	399	585,5	686,4	734,7	725	725	0	0	575,5
P-4:14,29%	408	587	686,5	734,5	724,9	724,9	0	0	577
P-4:21,43%	417	588,5	686,7	734,4	724,9	724,9	0	0	578,5
P-4:28,57%	426	590	686,8	734,2	724,8	724,8	0	0	580
P-4:35,71%	436	591,5	687	734,1	724,8	724,8	0	0	581,5
P-4:42,86%	445	593	687,2	734	724,8	724,8	0	0	583
P-4:50%	454	594,5	687,3	733,8	724,7	724,7	0	0	584,5
P-4:57,14%	463	596	687,5	733,7	724,7	724,7	0	0	586
P-4:64,29%	473	597,5	687,6	733,6	724,7	724,7	0	0	587,5
P-4:71,43%	482	599	687,8	733,4	724,6	724,6	0	0	589
P-4:78,57%	491	600,5	688	733,3	724,6	724,6	0	0	590,5
P-4:85,71%	500	602	688,1	733,2	724,6	724,6	0	0	592
P-4:92,86%	509	603,5	688,3	733	724,5	724,5	0	0	593,5
P-4:J-5	519	605	688,5	732,9	724,5	724,5	0	0	595
P-5:J-5	519	605	688,5	732,9	724,5	724,5	0	0	595

P-5:7,14%	528	605,9	688,6	732,8	724,5	724,5	0	0	595,9
P-5:14,29%	537	606,9	688,8	732,6	724,4	724,4	0	0	596,9
P-5:21,43%	547	607,8	689	732,5	724,4	724,4	0	0	597,8
P-5:28,57%	556	608,7	689,1	732,3	724,4	724,4	0	0	598,7
P-5:35,71%	565	609,6	689,3	732,2	724,3	724,3	0	0	599,6
P-5:42,86%	574	610,6	689,5	732,1	724,3	724,3	0	0	600,6
P-5:50%	584	611,5	689,7	731,9	724,2	724,2	0	0	601,5
P-5:57,14%	593	612,4	689,8	731,8	724,2	724,2	0	0	602,4
P-5:64,29%	602	613,4	690	731,7	724,2	724,2	0	0	603,4
P-5:71,43%	612	614,3	690,2	731,5	724,1	724,1	0	0	604,3
P-5:78,57%	621	615,2	690,3	731,4	724,1	724,1	0	0	605,2
P-5:85,71%	630	616,1	690,5	731,2	724,1	724,1	0	0	606,1
P-5:92,86%	639	617,1	690,7	731,1	724	724	0	0	607,1
P-5:J-6	649	618	690,9	731	724	724	0	0	608
P-6:J-6	649	618	690,9	731	724	724	0	0	608
P-6:7,14%	658	619,4	691	730,8	724	724	0	0	609,4
P-6:14,29%	667	620,7	691,2	730,7	723,9	723,9	0	0	610,7
P-6:21,43%	677	622,1	691,4	730,6	723,9	723,9	0	0	612,1
P-6:28,57%	686	623,4	691,6	730,4	723,9	723,9	0	0	613,4
P-6:35,71%	695	624,8	691,8	730,3	723,8	723,8	0	0	614,8
P-6:42,86%	704	626,1	692	730,1	723,8	723,8	0	0	616,1
P-6:50%	714	627,5	692,1	730	723,7	723,7	0	0	617,5
P-6:57,14%	723	628,9	692,3	729,9	723,7	723,7	0	0	618,9
P-6:64,29%	732	630,2	692,5	729,7	723,7	723,7	0	0	620,2
P-6:71,43%	742	631,6	692,7	729,6	723,6	723,6	0	0	621,6
P-6:78,57%	751	632,9	692,9	729,5	723,6	723,6	0	0	622,9
P-6:85,71%	760	634,3	693,1	729,3	723,6	723,6	0	0	624,3
P-6:92,86%	769	635,6	693,2	729,2	723,5	723,5	0	0	625,6
P-6:J-7	779	637	693,4	729	723,5	723,5	0	0	627
P-7:J-7	779	637	693,4	729	723,5	723,5	0	0	627
P-7:7,14%	788	639,4	693,6	728,9	723,5	723,5	0	0	629,4
P-7:14,29%	797	641,9	693,8	728,8	723,4	723,4	0	0	631,9
P-7:21,43%	806	644,3	694	728,6	723,4	723,4	0	0	634,3
P-7:28,57%	816	646,7	694,2	728,5	723,4	723,4	0	0	636,7
P-7:35,71%	825	649,1	694,4	728,3	723,3	723,3	0	0	639,1
P-7:42,86%	834	651,6	694,6	728,2	723,3	723,3	0	0	641,6
P-7:50%	844	654	694,8	728,1	723,2	723,2	0	0	644
P-7:57,14%	853	656,4	695	727,9	723,2	723,2	0	0	646,4
P-7:64,29%	862	658,9	695,2	727,8	723,2	723,2	0	0	648,9
P-7:71,43%	871	661,3	695,4	727,7	723,1	723,1	0	0	651,3
P-7:78,57%	881	663,7	695,6	727,5	723,1	723,1	0	0	653,7
P-7:85,71%	890	666,1	695,8	727,4	723,1	723,1	0	0	656,1
P-7:92,86%	899	668,6	696	727,2	723	723	0	0	658,6
P-7:J-8	909	671	696,2	727,1	723	723	0	0	661
P-8:J-8	909	671	696,2	727,1	723	723	0	0	661

P-8:7,14%	918	672,1	696,4	727	723	723	0	0	662,1
P-8:14,29%	927	673,3	696,6	726,8	722,9	722,9	0	0	663,3
P-8:21,43%	936	674,4	696,8	726,7	722,9	722,9	0	0	664,4
P-8:28,57%	946	675,6	697,1	726,5	722,9	722,9	0	0	665,6
P-8:35,71%	955	676,7	697,3	726,4	722,8	722,8	0	0	666,7
P-8:42,86%	964	677,9	697,5	726,3	722,8	722,8	0	0	667,9
P-8:50%	974	679	697,7	726,1	722,7	722,7	0	0	669
P-8:57,14%	983	680,1	697,9	726	722,7	722,7	0	0	670,1
P-8:64,29%	992	681,3	698,1	725,9	722,7	722,7	0	0	671,3
P-8:71,43%	1 001	682,4	698,3	725,7	722,6	722,6	0	0	672,4
P-8:78,57%	1 011	683,6	698,6	725,6	722,6	722,6	0	0	673,6
P-8:85,71%	1 020	684,7	698,8	725,5	722,6	722,6	0	0	674,7
P-8:92,86%	1 029	685,9	699	725,3	722,5	722,5	0	0	675,9
P-8:J-9	1 038	687	699,2	725,2	722,5	722,5	0	0	677
P-9:J-9	1 039	687	699,2	725,2	722,5	722,5	0	0	677
P-9:7,69%	1 048	688,5	699,4	725,1	722,5	722,5	0	0	678,5
P-9:15,38%	1 057	689,9	699,7	724,9	722,4	722,4	0	0	679,9
P-9:23,08%	1 066	691,4	699,9	724,8	722,4	722,4	0	0	681,4
P-9:30,77%	1 075	692,8	700,1	724,7	722,4	722,4	0	0	682,8
P-9:38,46%	1 084	694,3	700,3	724,6	722,3	722,3	0	0	684,3
P-9:46,15%	1 093	695,8	700,6	724,4	722,3	722,3	0	0	685,8
P-9:53,85%	1 102	697,2	700,6	724,3	722,3	722,3	0	0	687,2
P-9:61,54%	1 111	698,7	700,6	724,2	722,2	722,2	0	0	688,7
P-9:69,23%	1 120	700,2	701,8	724	722,2	722,2	0	0	690,2
P-9:76,92%	1 129	701,6	702,4	723,9	722,2	722,2	0	0	691,6
P-9:84,62%	1 138	703,1	702,6	723,8	722,1	722,1	0	0	693,1
P-9:92,31%	1 147	704,5	702,5	723,6	722,1	722,1	0	0	694,5
P-9:J-10	1 155	706	703,2	723,5	722	722	0	0	696
P-10:J-10	1 156	706	703,2	723,5	722	722	0	0	696
P-10:7,69%	1 165	707,1	704,2	723,4	722	722	0	0	697,1
P-10:15,38%	1 174	708,2	705,1	723,2	722	722	0	0	698,2
P-10:23,08%	1 183	709,2	705,7	723,1	721,9	721,9	0	0	699,2
P-10:30,77%	1 192	710,3	706,9	723	721,9	721,9	0	0	700,3
P-10:38,46%	1 201	711,4	707,7	722,9	721,9	721,9	0	0	701,4
P-10:46,15%	1 210	712,5	709,2	722,7	721,8	721,8	0	0	702,5
P-10:53,85%	1 219	713,5	710,5	722,6	721,8	721,8	0	0	703,5
P-10:61,54%	1 228	714,6	711,3	722,5	721,8	721,8	0	0	704,6
P-10:69,23%	1 237	715,7	712,7	722,5	721,7	721,7	0	0	705,7
P-10:76,92%	1 246	716,8	714,8	722,3	721,7	721,7	0	0	706,8
P-10:84,62%	1 255	717,8	716,3	722,1	721,7	721,7	0	0	707,8
P-10:92,31%	1 264	718,9	718,5	722,1	721,6	721,6	0	0	708,9
P-10:J-11	1 273	720	720,8	721,7	721,6	721,6	0	0	710

Annexe VII

Point	Distance (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Initial) (m H2O)	Pressure (m H2O)	Vapor Pressure (m H2O)
P-12:PMP-1	0	150	210	196	196	-10
P-12:J-1	5	150	210	196	196	-10
P-1:J-1	5	150	210	196	196	-10
P-1:7,14%	14	149	209	195	195	-10
P-1:14,29%	23	148	208	194	194	-10
P-1:21,43%	32	147	207	193	193	-10
P-1:28,57%	41	147	206	192	192	-10
P-1:35,71%	50	146	205	191	191	-10
P-1:42,86%	60	145	204	190	190	-10
P-1:50%	69	144	202	189	189	-10
P-1:57,14%	78	143	201	188	188	-10
P-1:64,29%	87	143	200	187	187	-10
P-1:71,43%	96	142	199	186	186	-10
P-1:78,57%	105	141	198	185	185	-10
P-1:85,71%	114	140	197	184	184	-10
P-1:92,86%	123	140	196	183	183	-10
P-1:J-2	133	139	195	182	182	-10
P-2:J-2	133	139	195	182	182	-10
P-2:7,14%	142	136	193	180	180	-10
P-2:14,29%	151	134	190	177	177	-10
P-2:21,43%	160	132	187	175	175	-10
P-2:28,57%	169	130	185	172	172	-10
P-2:35,71%	179	127	182	170	170	-10
P-2:42,86%	188	125	180	168	168	-10
P-2:50%	197	123	177	165	165	-10
P-2:57,14%	206	121	175	163	163	-10
P-2:64,29%	216	118	172	160	160	-10
P-2:71,43%	225	116	170	158	158	-10
P-2:78,57%	234	114	167	155	155	-10
P-2:85,71%	243	111	164	153	153	-10
P-2:92,86%	252	109	162	150	150	-10
P-2:J-3	262	107	159	148	148	-10
P-3:J-3	262	107	159	148	148	-10
P-3:7,14%	271	107	159	147	147	-10
P-3:14,29%	280	106	158	147	147	-10
P-3:21,43%	289	106	157	146	146	-10
P-3:28,57%	298	105	157	146	146	-10
P-3:35,71%	307	105	156	145	145	-10
P-3:42,86%	316	105	156	145	145	-10
P-3:50%	326	104	155	144	144	-10
P-3:57,14%	335	104	154	144	144	-10

P-3:64,29%	344	104	154	143	143	-10
P-3:71,43%	353	103	153	143	143	-10
P-3:78,57%	362	103	152	142	142	-10
P-3:85,71%	371	103	152	142	142	-10
P-3:92,86%	380	102	151	141	141	-10
P-3:J-4	389	102	150	140	140	-10
P-4:J-4	390	102	150	140	140	-10
P-4:7,14%	399	101	149	139	139	-10
P-4:14,29%	408	99	147	137	137	-10
P-4:21,43%	417	98	146	136	136	-10
P-4:28,57%	426	97	144	134	134	-10
P-4:35,71%	436	95	142	133	133	-10
P-4:42,86%	445	94	141	131	131	-10
P-4:50%	454	93	139	130	130	-10
P-4:57,14%	463	91	137	128	128	-10
P-4:64,29%	473	90	136	127	127	-10
P-4:71,43%	482	89	134	125	125	-10
P-4:78,57%	491	87	133	124	124	-10
P-4:85,71%	500	86	131	122	122	-10
P-4:92,86%	509	85	129	121	121	-10
P-4:J-5	519	83	128	119	119	-10
P-5:J-5	519	83	128	119	119	-10
P-5:7,14%	528	83	127	118	118	-10
P-5:14,29%	537	82	126	117	117	-10
P-5:21,43%	547	81	124	116	116	-10
P-5:28,57%	556	80	123	115	115	-10
P-5:35,71%	565	80	122	114	114	-10
P-5:42,86%	574	79	121	113	113	-10
P-5:50%	584	78	120	112	112	-10
P-5:57,14%	593	77	119	111	111	-10
P-5:64,29%	602	76	118	110	110	-10
P-5:71,43%	612	76	117	109	109	-10
P-5:78,57%	621	75	116	108	108	-10
P-5:85,71%	630	74	115	108	108	-10
P-5:92,86%	639	73	114	107	107	-10
P-5:J-6	649	73	113	106	106	-10
P-6:J-6	649	73	113	106	106	-10
P-6:7,14%	658	72	111	104	104	-10
P-6:14,29%	667	70	110	103	103	-10
P-6:21,43%	677	69	108	101	101	-10
P-6:28,57%	686	68	107	100	100	-10
P-6:35,71%	695	67	105	99	99	-10
P-6:42,86%	704	66	104	97	97	-10
P-6:50%	714	65	102	96	96	-10
P-6:57,14%	723	63	101	95	95	-10

P-6:64,29%	732	62	99	93	93	-10
P-6:71,43%	742	61	98	92	92	-10
P-6:78,57%	751	60	96	90	90	-10
P-6:85,71%	760	59	95	89	89	-10
P-6:92,86%	769	57	93	88	88	-10
P-6:J-7	779	56	92	86	86	-10
P-7:J-7	779	56	92	86	86	-10
P-7:7,14%	788	54	89	84	84	-10
P-7:14,29%	797	52	87	81	81	-10
P-7:21,43%	806	50	84	79	79	-10
P-7:28,57%	816	47	82	76	76	-10
P-7:35,71%	825	45	79	74	74	-10
P-7:42,86%	834	43	76	71	71	-10
P-7:50%	844	41	74	69	69	-10
P-7:57,14%	853	38	71	67	67	-10
P-7:64,29%	862	36	69	64	64	-10
P-7:71,43%	871	34	66	62	62	-10
P-7:78,57%	881	32	64	59	59	-10
P-7:85,71%	890	30	61	57	57	-10
P-7:92,86%	899	27	59	54	54	-10
P-7:J-8	909	25	56	52	52	-10
P-8:J-8	909	25	56	52	52	-10
P-8:7,14%	918	24	55	51	51	-10
P-8:14,29%	927	23	53	49	49	-10
P-8:21,43%	936	22	52	48	48	-10
P-8:28,57%	946	21	51	47	47	-10
P-8:35,71%	955	21	50	46	46	-10
P-8:42,86%	964	20	48	45	45	-10
P-8:50%	974	19	47	44	44	-10
P-8:57,14%	983	18	46	42	42	-10
P-8:64,29%	992	17	44	41	41	-10
P-8:71,43%	1 001	16	43	40	40	-10
P-8:78,57%	1 011	15	42	39	39	-10
P-8:85,71%	1 020	14	41	38	38	-10
P-8:92,86%	1 029	13	39	37	37	-10
P-8:J-9	1 038	12	38	35	35	-10
P-9:J-9	1 039	12	38	35	35	-10
P-9:7,69%	1 048	11	37	34	34	-10
P-9:15,38%	1 057	10	35	32	32	-10
P-9:23,08%	1 066	8	33	31	31	-10
P-9:30,77%	1 075	7	32	29	29	-10
P-9:38,46%	1 084	6	30	28	28	-10
P-9:46,15%	1 093	5	29	26	26	-10
P-9:53,85%	1 102	3	27	25	25	-10
P-9:61,54%	1 111	2	25	23	23	-10

P-9:69,23%	1 120	2	24	22	22	-10
P-9:76,92%	1 129	1	22	20	20	-10
P-9:84,62%	1 138	-1	21	19	19	-10
P-9:92,31%	1 147	-2	19	17	17	-10
P-9:J-10	1 155	-3	17	16	16	-10
P-10:J-10	1 156	-3	17	16	16	-10
P-10:7,69%	1 165	-3	16	15	15	-10
P-10:15,38%	1 174	-3	15	14	14	-10
P-10:23,08%	1 183	-4	14	13	13	-10
P-10:30,77%	1 192	-3	13	12	12	-10
P-10:38,46%	1 201	-4	11	10	10	-10
P-10:46,15%	1 210	-3	10	9	9	-10
P-10:53,85%	1 219	-3	9	8	8	-10
P-10:61,54%	1 228	-3	8	7	7	-10
P-10:69,23%	1 237	-3	7	6	6	-10
P-10:76,92%	1 246	-2	5	5	5	-10
P-10:84,62%	1 255	-2	4	4	4	-10
P-10:92,31%	1 264	0	3	3	3	-10
P-10:J-11	1 273	1	2	2	2	-10

Annexe VII

PM 125/ 10 D

Caractéristiques requises

Débit	25,4 l/s
Hauteur de refoulement	195 m
Fluide	Eau potable
Température	290 K
Type d'installation	Pompe seule
N.be de pompes	1

Caractéristiques de la pompe

Débit	25,4 l/s
Hauteur de refoulement	195 m
Puissance absorbée	71,2 kW
Rendement	69,7%
Hauteur manométrique H(Q=0)	225 m
Orif. de refoulement	125 mm

Caractéristiques moteur

Fréquence	50 Hz
Tension nominale	400 V
Vitesse nominale	1450 1/min
Nombre de pôles	4
Puissance nominale P2	75 kW
Courant nominal	- A
Type de moteur	3~
Classe d'isolation	F
Degré de protection	IP 55

Limites opérationnelles

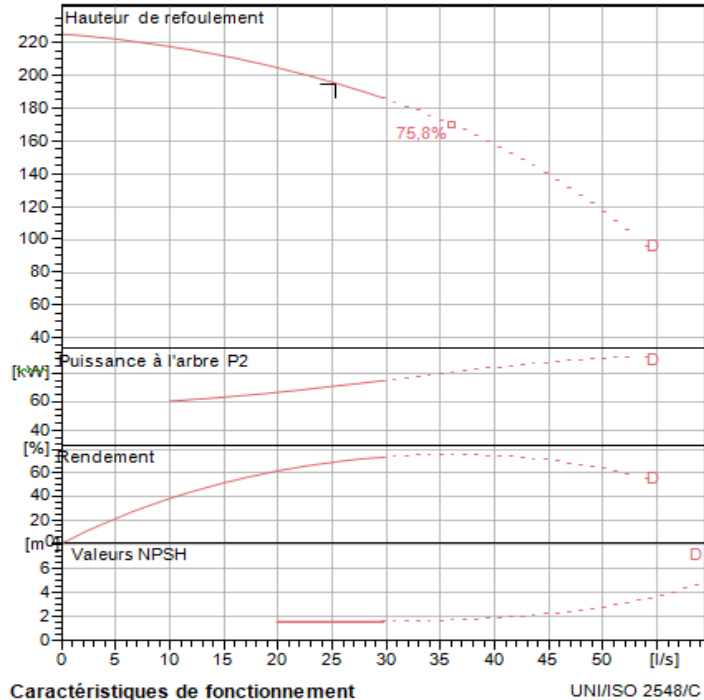
Démarrages / h max.	5
Température maxi. du liquide pompé	363 K
Teneur maximum en matières solides	40 g/m ³
Densité max.	998 kg/m ³
Viscosité maxi.	1 mm ² /s

Caractéristiques générales

Poids	1370 kg
-------	---------

Matériaux

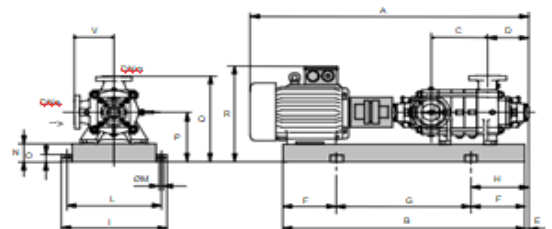
Corps de pompe	Fonte
Corps d'aspiration	Fonte
Roue	Fonte
Bague d'usure	Fonte
Corps d'étage	Fonte
Chemise	Fonte
Arbre	Acier inox
Douille arbre	Acier inox
Anneau d'étanchéité	Caoutchouc au nitrile
Roulements a billes	Acier
Presse-Etoupe	Fonte
Etoupe	Tresse graphitée



Q [l/s]	H [m]	P [kW]	Rend. [%]	NPSH [m]

Dimensions mm

A = 2762
B = 2376
C = 1045
D = 337
DNa = 150
DNm = 125
E = 244
F = 400
G = 1576
H = 644
I = 720
L = 670
M = 20
N = 140
O = 45
P = 420
Q = 740
R = 836
V = 320



Notes:

Date 21.12.2021	Page 1	Offre n°	Pos.N°
--------------------	-----------	----------	--------



Modena - Italy

COMPANY
WITH QUALITY SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO 9001 ==
