

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Institut de Technologie



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -
معهد التكنولوجيا

Département de Technologie Génie de l'Eau

Rapport de soutenance

En vue de l'obtention du diplôme

De Licence professionnelle en :

Hydraulique

Thème :

**CONCEPTION ET CONTRACTION D'UNE POMPE
HYDRAULIQUE A BELIER**

Réalisé par :

BOUNOUARA Dhiya Eddine

Encadré par :

Mr. HAFIED Yacine

Corrigé par :

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Par la grâce de notre bon Dieu, notre guide, notre force, notre bonheur et notre raison d'être. Il est celui qui nous a fait comprendre le but de cette vie, et nous a donné la force d'apprécier les choses. Merci d'avoir été là dans les moments les plus difficiles.

Tout d'abord, je voudrais remercier M. Yacine Hafied d'être mon honneur. Je lui suis reconnaissant de sa disponibilité et de son écoute ainsi que de sa confiance pour bien faire ce travail.

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au sein de l'entreprise AMENHYD SPA, pour laquelle je remercie son encadrant, M. Yassin, pour sa présence face aux difficultés, ainsi que ses encouragements au travail, notamment les moments d'écoute et de besoins . Et aussi Mme Laïla Fathia

*Rahal qui m'a aidée et qui a été présente tout au long
de cette période.*

*Je tiens également à remercier tous les professeurs
qui ont contribué à ma formation en hydraulique,
pour m'avoir donné l'opportunité d'apprendre, et pour
avoir partagé leurs connaissances avec moi.*

*Je tiens également à remercier tous ceux qui ont
participé à Développer ce travail de près ou de loin.*

DEDICACE

Avant tout à mes chers parents, la dévotion ne peut être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de faire pour moi depuis ma naissance, à travers mon enfance et même jusqu'à l'âge adulte.

A mes frères Anouar Aya, Abdullah et Abderraouf qui sont ma force dans la vie.

Pour toute la famille

A tous les étudiants de l'institut de technologie.

A tous les affiliés de l'Institut Technologique de Bouira.

Résumé :

Le coup de bélier hydraulique est un phénomène qui se produit lorsque l'écoulement d'un liquide est brusquement interrompu, provoquant une augmentation soudaine de la pression au-delà des niveaux normaux. Cette surpression génère une onde de choc qui se propage dans le tuyau, pouvant causer des dommages au système si elle n'est pas contrôlée. Cependant, le coup de bélier peut également être utilisé de manière bénéfique, notamment dans les systèmes de pompage d'eau, pour augmenter la pression à des niveaux supérieurs à ceux produits par la pompe elle-même.

Dans le contexte d'une application domestique, l'utilisation d'une pompe à coup de bélier peut être envisagée pour élever l'eau à une hauteur supérieure en exploitant l'énergie cinétique du liquide. Cela permet de minimiser la consommation d'électricité ou de carburant, car la pompe fonctionne sans avoir besoin de ces sources d'énergie externes.

L'objectif d'un projet de diplôme portant sur ce sujet serait de concevoir et de construire une pompe à coup de bélier adaptée à une utilisation domestique, en prenant en compte les paramètres de fonctionnement et les considérations économiques. Il est également important de tenir compte des dispositifs de protection, tels que les soupapes d'arrêt de coup de bélier, les amortisseurs de pression et les vannes de régulation, pour minimiser les risques associés à ce phénomène et protéger le système contre d'éventuels dommages.

Le projet vise également à identifier les avantages potentiels de l'utilisation d'une pompe à coup de bélier en termes de réduction de la consommation d'eau et des coûts. La simplicité de fonctionnement de cette technologie, avec un rendement d'environ 70 % et une capacité de fonctionnement continu, la rend attrayante pour les applications domestiques, offrant ainsi une alternative durable aux pompes traditionnelles.

ملخص:

المطرقة المائية الهيدروليكية هي ظاهرة تحدث عندما ينقطع تدفق السائل بشكل مفاجئ، مما يتسبب في زيادة مفاجئة في الضغط بما يتجاوز المستويات الطبيعية. ينتج عن هذا الضغط الزائد موجة صدمة تنتشر عبر الأنبوب، والتي يمكن أن تتسبب في تلف النظام إذا تركت دون رادع. ومع ذلك، يمكن أيضاً استخدام مطرقة الماء بشكل مفيد، خاصة في أنظمة ضخ المياه، لزيادة الضغط إلى مستويات أعلى من تلك التي تنتجها المضخة نفسها. في سياق التطبيق المحلي، يمكن اعتبار استخدام مضخة المطرقة المائية لرفع الماء إلى ارتفاع أعلى من خلال استغلال الطاقة الحركية للسائل. هذا يقلل من استهلاك الكهرباء أو الوقود، حيث تعمل المضخة دون الحاجة إلى مصادر الطاقة الخارجية هذه. سيكون الهدف من مشروع درجة في هذا الموضوع هو تصميم وبناء مضخة مطرقة مائية مناسبة للاستخدام المنزلي، مع مراعاة معايير التشغيل والاعتبارات الاقتصادية. من المهم أيضاً مراعاة أجهزة الحماية، مثل صمامات إغلاق مطرقة المياه، وامتصاص الضغط وصمامات التحكم، لتقليل المخاطر المرتبطة بهذه الظاهرة وحماية النظام من التلف المحتمل. يهدف المشروع أيضاً إلى تحديد الفوائد المحتملة لاستخدام مضخة المطرقة المائية من حيث تقليل استهلاك المياه وتكاليفها. إن بساطة تشغيل هذه التقنية، بكفاءة تبلغ حوالي 70% وقدرة على التشغيل المستمر، تجعلها جذابة للتطبيقات المحلية، وبالتالي تقدم بديلاً مستداماً للمضخات التقليدية.

Contents

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Présentation d'entreprise

Introduction	3
---------------------------	----------

1. Présentation de l'entreprise.....	3
---	----------

1.1. Localisation géographique d'Amenhyd SPA.....	4
---	---

1.2. La vision d'Amenhyd.....	5
-------------------------------	---

1.3. La mission d'Amenhyd.....	5
--------------------------------	---

1.4. Les filiales de groupement	5
---------------------------------------	---

1.4.1. Amenhyd SPA.....	5
-------------------------	---

1.4.2. Alcahyd precast.....	6
-----------------------------	---

1.4.3. Gatech.....	6
--------------------	---

1.4.4. International process.....	7
-----------------------------------	---

1.4.5. Bimeca.....	7
--------------------	---

1.5. Les services d'Amenhyd.....	7
----------------------------------	---

1.6. L'organigramme de l'entreprise.....	8
--	---

Chapitre II : Partie Théorique

Introduction	11
1. Coupe de Béliet :	12
1.1. Historique de coupe de Béliet :	12
1.2. Définitoire de coup a béliet :	17
1.3. Étude du phénomène des coups de béliet :	18
1.4. Le Comportement des Vagues dans le cadre de l'opération Béliet	21
1.5. Des exemples vivant de pompes à Béliet utilisées pour pomper l'eau dans une station de pompage	23
2. La pompe à coups de béliet	27
2.1. Historique de la pompe à coup de béliet	27
2.2. Définition de la pompe à coup de Béliet :	29
2.3. Configuration typique d'une pompe à béliet.....	30
2.4. Principe de fonctionnement	31
2.4.1. Cycle Hydraulique de la pompe à coup de béliet.....	33
2.5. Caractéristiques de la pompe à coup de béliet.....	34

Chapitre III : Partie Pratique

1. Conception, construction et mise en service de la pompe à coup de bélier.....	37
1.1. La pompe à coups de bélier enfin construite.....	37
1.2. Structure de support de la pompe à coup de bélier.....	38
1.3. Essais de pompage.....	40
1.4. Assemblage effectué pour les essais de pompage.....	40

Chapitre IV :

1. Résultats obtenus lors des essais de pompage.....	45
1.1. L'analyse respective du graphique obtenu permet de déterminer :	51
Conclusion générale	53
Références bibliographiques	54

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Comparaison du vérin hydraulique avec d'autres pompes 35

Tableau 2 : Débits de He (hauteur d'entrée 1m) VS Hs(2m) 45

Tableau 3: Débits de He (hauteur d'entrée 1m) VS Hs(3m) 45

Tableau 4: Débits de He (hauteur d'entrée 1m) VS Hs(4m) 46

Tableau 5: Débits de He (hauteur d'entrée 1m) VS Hs(5m) 46

Tableau 6: Débits de He (hauteur d'entrée 1.5m) VS Hs(2m)..... 47

Tableau 7: Débits de He (hauteur d'entrée 1.5m) VS Hs(3m) 47

Tableau 8: Débits de He (hauteur d'entrée 1.5m) VS Hs(4m) 48

Tableau 9: Débits de He (hauteur d'entrée 1.5m) VS Hs(5m) 48

Tableau 10: Débits de He (hauteur d'entrée 2m) VS Hs(2m) 49

Tableau 11: Débits de He (hauteur d'entrée 2m) VS Hs(3m) 49

Tableau 12: Débits de He (hauteur d'entrée 2m) VS Hs(4m) 50

Tableau 13: Débits de He (hauteur d'entrée 2m) VS Hs(5m) 50

Liste des figures

Figure 01 : Logo d’Amenhyd..... 4

Figure 02 : Localisation d’Amenhyd spa 4

Figure 03 : Logo d’Alcahyd precast..... 6

Figure 04 : Logo de Gatech..... 6

Figure 05 : Logo de International Process..... 7

Figure 06 : Logo de bimeca..... 7

Figure 07 : Organigramme d’Amenhyd..... 9

Figure 08: Représentation schématique du coup de bélier..... 17

Figure 9: Représentation discrète des phénomènes se produisant dans le tuyau d'alimentation. 19

Figure 10: Séquence de propagation des ondes..... 22

Figure 11 : une prise grillagée de PVC de 3pouces 25

Figure 12 : un petit barrage de roche pour l'admission 25

Figure 13 : Le réservoir qui alimente la pompe 25

Figure 14 :La pompe à Bélier..... 26

Figure 15 : La conduite de sortie..... 26

Figure 16 :baignoire froide..... 27

Figure 17. Schéma du bélier conçu par John Whitehurst..... 28

Figure 18 : Pompe à Bélier conçu par Joseph Michael Montgolfier..... 28

Figure 19 : Configuration typique d'une pompe à bélier.....	30
Figure 20 : Présentation en coupe d'un modèle de bélier typique	32
Figure 21 : Proposition finale pour la pompe à bélier. Conception du professeur Jorge Alberto Valero Fandiño.....	37
Figure 22 : Pompe à bélier	38
Figure 23 : Dimensions de la pompe à bélier finalement construite	38
Figure 24 : Fabrication de la base pour l'ancrage du vérin.....	39
Figure 25 : Base du bélier en béton.....	39
Figure 26 : Dispositif d'essai de pompage mis en place par les auteurs de la présente étude	40
Figure 27 :Assemblage pour les tests de pompage.....	41

Introduction générale

Introduction générale

La pompe à coup de bélier hydraulique, est un outil qui utilise l'énergie cinétique d'une petite différence de niveau pour élever l'eau à une hauteur supérieure, sans avoir besoin d'utiliser de l'électricité ou du carburant. Ainsi, cette pompe prélève de l'eau dans un réservoir situé à une hauteur légèrement supérieure, en profitant de l'énergie cinétique générée par le fluide lui-même lorsqu'il se déplace dans un tuyau jusqu'au corps de la pompe, provoquant une surpression causée par l'ouverture et la fermeture continues d'une vanne de tête de puits conçue pour générer la pression appropriée et atteindre sa hauteur idéale ; cette surpression produite est appelée coup de bélier et constitue le principe de base de son fonctionnement. (Nebra, 2013).

Cette technologie est attribuée au Français Joseph Michel Mongolfier qui l'a brevetée en 1796. Selon certaines références bibliographiques examinées, le bélier hydraulique est un outil de construction et de fonctionnement très simple, dont le rendement est d'environ 70 %, fonctionnant sans interruption 24 heures sur 24, 365 jours par an (Ibañez, 2012).

L'objectif de ce projet de diplôme est de répondre à certaines préoccupations telles que la prise en compte des considérations de conception et de construction d'une pompe à coup de bélier pour une application domestique, en tenant compte des paramètres de fonctionnement et d'économie. Il convient de noter que la pompe à coup de bélier sera développée pour une application domestique et non pour une application industrielle ou de laboratoire. En outre, l'objectif de ce travail est d'identifier la réduction de la consommation d'eau et des coûts.

Chapitre I :

Présentation d'entreprise

Introduction

Le stage pratique permet à l'étudiant d'acquérir un savoir-faire additionnel par rapport au savoir obtenu à l'université, qui est nécessaire pour s'introduire et s'intégrer facilement à la vie professionnelle. Répondant à ce besoin primordial, j'ai décidé de faire un stage Professional au niveau de l'entreprise Amenhyd SPA, pour acquérir et apprendre de l'expérience du personnel de l'entreprise dans les différents domaines, à savoir, l'environnement et l'hydraulique.

Ce stage me permet de découvrir l'un des grands projets dans l'entreprise, et bien sûr avant de le réaliser il faut faire une étude avant-projet qui permet d'avoir un descriptif sur les éléments du projet et la zone d'étude. C'est la phase de cadrage du projet. Elle consiste à identifier et analyser toute information valable pour mettre en place les piliers principaux de travail. Et ça ce que nous allons traiter dans ce chapitre.

1. Présentation de l'entreprise

Amenhyd contraction des mots (aménagement, environnement, hydraulique) est leader dans les métiers liés à l'environnement et l'hydraulique depuis 25 ans, c'est une entreprise privée de droit algérien, conçoit et déploie des solutions sur mesure pour : eau, environnement, construction, déconstruction, engineering. Elle exerce ces activités aussi bien pour le compte de collectivités publiques que pour celui d'acteurs du secteur industriel.

L'entreprise a commencé ses activités dans le domaine de bâtiments et travaux publics en 1994 sous le nom « ETB/TCE Chelghoum Djamel Eddine ». Le groupement Amenhyd a été fondé en 2003 pour répondre aux besoins du marché Algérien, par le biais de ses activités dans les domaines Amenhyd participe activement à la mise en œuvre des politiques sectorielles gouvernementales en matière de développement durable avec des moyens et techniques alliant efficacité et économies.

L'évolution d'Amenhyd nécessite la création de sociétés filiales (développement d'autres métiers construction et déconstruction) ainsi que le développement de partenariats permettant l'acquisition de savoir-faire, ce qui a permis de développer la chaîne des valeurs de ces cœurs de métier et activer dans des secteurs d'activité considérés jusque-là, comme

Chapitre I : Présentation d'entreprise

chasse gardée des entreprises étrangères, pour se constituer en tant qu'outil de production nationale.

Amenhyd contient :

- 2300 employés,
- 3030 unités matérielles,
- 12 milliard DZD d'affaires moyen et 3.654 milliard DZD capital social. [1]



Figure 01 : Logo d'Amenhyd

1.1. Localisation géographique d'Amenhyd SPA



Figure 02 : Localisation d'Amenhyd spa

La direction générale de Amenhyd SPA se situé dans le quartier de Rabiah de la commune de Bab Ezzouar,   Alger. [1]

1.2. La vision d'Amenhyd

L'entreprise a une vision de se positionnée comme :

- La plus performante et la plus importante dans la protection de l'environnement en Afrique à l'horizon 2030 [1], à savoir traitement de lixiviat et des déchets.
- Parmi les meilleures entreprises au monde dans le domaine de traitement d'eau potable et eaux usées (WWTP).
- Introduire la valorisation des concentr ts des stations de dessalement en Algérie.
- Etre la seule entreprise Algérienne qui utilise le BIM comme outil dans la réalisation de ses Projet.

1.3. La mission d'Amenhyd

Valoriser les ressources d'eau et protéger l'environnement à travers des solutions fiables, innovantes et digitale grâce à : [1]

- Des partenariats solides.
- Une équipe performante.
- Des processus optimaux.

1.4. Les filiales de groupement

Le groupement Amenhyd se compose principalement des filiales suivantes : [1]

1.4.1. Amenhyd SPA

L'eau, déchets et la construction et déconstruction civile et industrielle.

1.4.2. Alcahyd precast

Préfabrication d'éléments en béton armé et canalisations hydraulique.



Figure 03 : Logo d'Alcahyd precast

1.4.3. Gatech

Génie électrique automation contrôle commande.



Figure 04 : Logo de Gatech

1.4.4. International process

Fabrication des équipements de process et mécanique.



Figure 05 : Logo de International Process

1.4.5. Bimeca

Un bureau d'ingénierie dédié aux études des équipements mécaniques



Figure 06 : Logo de bimeca

1.5. Les services d'Amenhyd

Un portefeuille complet de services à haut valeur ajoutée.

- ✓ Etude de conception de système.
- ✓ Les systèmes de service d'installation et de mise en service.
- ✓ Réparation et entretien des installations.
- ✓ Réhabilitation des stations.

- ✓ L'exploitation de stations de traitement.
- ✓ Formation et assistance technique.
- ✓ Suivi et supervision.

1.6. L'organigramme de l'entreprise

L'organigramme de l'entreprise d'Amenhyd est représenté dans la figure suivante.

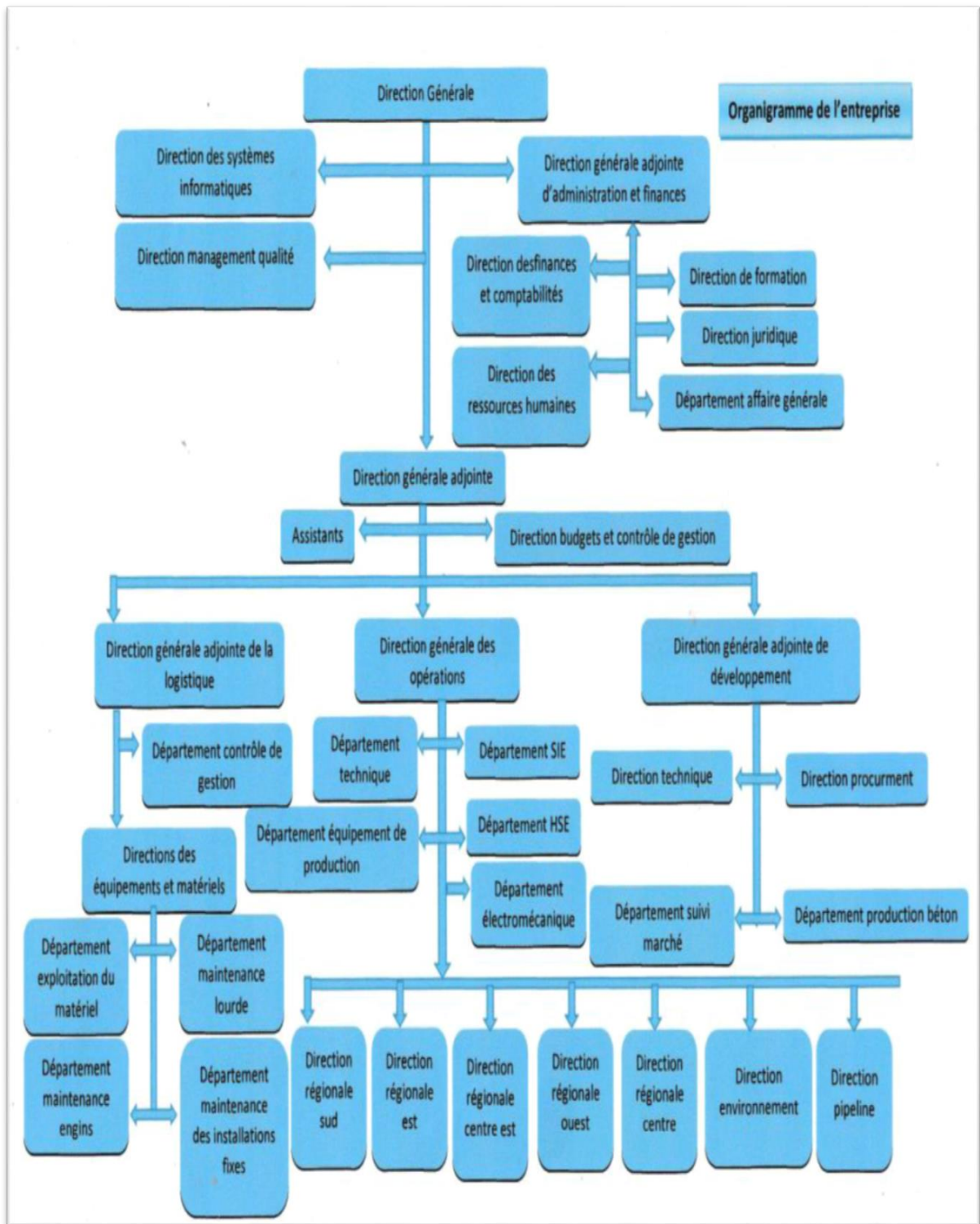


Figure 07 : Organigramme d'Amenhyd

Chapitre II :

Partie Théorique

Introduction

Le coup de bélier hydraulique, également connu sous le nom de coup de bélier d'eau (Hammer flow), est un phénomène fascinant qui se produit dans les systèmes de tuyauterie lorsqu'un débit de liquide est brusquement interrompu. Il est caractérisé par une augmentation soudaine de la pression, bien au-delà des niveaux normaux, suivie d'une onde de choc qui se propage dans le tuyau.

L'effet de coup de bélier hydraulique peut se produire dans diverses situations, mais il est plus couramment observé dans les systèmes de distribution d'eau. Lorsqu'un robinet ou une vanne est fermé rapidement, l'énergie cinétique du liquide en mouvement est convertie en une surpression, provoquant une augmentation brutale de la pression. Cette surpression peut être plusieurs fois supérieure à la pression de fonctionnement normale du système.

L'onde de choc résultante se propage à travers le tuyau, reflétant plusieurs fois aux points de jonction, créant ainsi des fluctuations de pression significatives. Ces variations de pression peuvent provoquer des dommages aux tuyaux, aux joints, aux vannes et à d'autres composants du système. Si le phénomène n'est pas contrôlé, il peut entraîner des ruptures de tuyaux, des fuites ou même la défaillance complète du système. Bien que le coup de bélier hydraulique puisse entraîner des effets indésirables, il existe certains avantages potentiels à les prendre en compte :

1. **Énergie hydraulique supplémentaire** : Lorsque le débit d'eau est rapidement arrêté ou modifié, une surpression peut se produire, générant une quantité d'énergie hydraulique supplémentaire. Cette énergie peut être exploitée et utilisée pour des applications spécifiques, telles que l'alimentation de petites turbines hydrauliques ou de pompes.
2. **Élimination des airlocks** : Le coup de bélier hydraulique peut aider à éliminer les accumulations d'air dans les canalisations, connues sous le nom de "bouchons d'air" ou "airlocks". Lorsque le débit est interrompu brusquement, la surpression générée peut pousser l'air à travers la canalisation, permettant ainsi son évacuation et le rétablissement d'un écoulement fluide.

3. Délogement de dépôts : Lorsque le fluide est brusquement arrêté ou modifié, la surpression résultante peut aider à déloger les dépôts ou les obstructions présents dans la canalisation. Cela peut contribuer à maintenir la canalisation dégagée et à améliorer l'efficacité du système.

Afin de minimiser les risques associés au coup de bélier hydraulique, des dispositifs de protection, tels que des soupapes d'arrêt de coup de bélier, des amortisseurs de pression et des vannes de régulation, peuvent être installés dans les systèmes de tuyauterie. Ces dispositifs permettent de contrôler et de réduire les fluctuations de pression, protégeant ainsi le système contre les dommages potentiels.

1. Coupe de Bélier :

1.1. Historique de coupe de Bélier :

L'étude des phénomènes transitoires en hydraulique est née avec la recherche sur la propagation des ondes sonores dans l'air, la propagation des ondes dans l'eau peu profonde et la circulation du sang dans les artères. Cependant, aucun de ces problèmes ne pouvait être résolu avec rigueur avant le développement des théories d'élasticité et de calcul et la solution des équations aux dérivées partielles. Newton a présenté, dans son œuvre *Principal*, les résultats de ses recherches sur la propagation des ondes sonores dans l'air et sur la propagation des ondes de l'eau dans les conduites. Newton et Lagrange ont déterminé théoriquement que la vitesse du son dans l'air est de 298,4 m/s par rapport à leur valeur expérimentale de 348 m/s. Lagrange a attribué cette différence à l'erreur expérimentale, alors que Newton a expliqué que la vitesse théorique était incorrecte et que cet écart était dû à l'espacement des particules solides de l'air et la présence de vapeurs dans l'air, en comparant les oscillations d'un liquide dans un tube en U à celle d'un pendule, Newton a dérivé d'une expression incorrecte de la célérité des ondes de l'eau dans un canal $\pi\sqrt{l/g}$, où l = la longueur d'onde et g = accélération due à la gravité. [1]

Euler a développé une théorie détaillée de la propagation des ondes élastiques et il a dérivé l'équation différentielle partielle pour la propagation des ondes. [1]

Lagrange a analysé l'écoulement de fluides incompressibles et compressibles donnant par la suite le développement du concept de potentiel de vitesse, il a également dérivé d'une

expression correcte pour la célérité des ondes dans un canal $c = \sqrt{gd}$, dans laquelle ; d = la profondeur du canal. En 1789, Monge a développé une méthode graphique pour l'intégration des équations aux dérivées partielles et introduit le terme méthode des caractéristiques. En 1808, Laplace a souligné les causes de la différence entre les valeurs théoriques et mesurées de la vitesse du son dans l'air, il a expliqué que les relations obtenues par Newton et Lagrange ont été basées sur la loi de Boyle et que cette loi n'était pas valide en vertu des pressions variables comme la température de l'air qui n'est pas constante, il a en outre estimé que la vitesse théorique devrait augmenter d'environ 20% si les conditions adiabatiques ont été utilisées à la place des conditions isothermes. [1]

Young a étudié le débit de circulation sanguine, les pertes de frottement, les pertes singulières, et la propagation des ondes de pression dans les conduites. Helmholtz semble être le premier à démontrer que la vitesse des ondes de pression de l'eau contenue dans une conduite est inférieure à celle de l'eau en milieu ouvert, Il a correctement attribué cette différence à l'élasticité des parois des tubes. En 1869, Riemann a développé et appliqué une équation tridimensionnelle du mouvement et il l'a simplifiée en une forme adimensionnelle dans les domaines tels que : cordes vibrantes et ondes sonores. Weber a étudié l'écoulement d'un fluide incompressible dans une conduite élastique et a réalisé des expériences pour déterminer la vitesse des ondes de pression, Il a aussi développé les équations de la quantité du mouvement et la continuité qui sont la base de nos études. Marey a réalisé d'intensives séries de tests pour déterminer la vitesse des ondes de pression dans l'eau et en mercure et il a conclu que la vitesse de l'onde est:

- ◆ Indépendante de l'amplitude des ondes de pression.
- ◆ Trois fois supérieure dans le mercure que dans l'eau.
- ◆ Proportionnelle à l'élasticité du tuyau.

Resal a développé la continuité, les équations dynamiques et une équation d'onde de second ordre, Il a utilisé les résultats empiriques de Marey pour vérifier ses études analytiques. En 1877, Lord Rayleigh a publié son livre sur la théorie du son, qui résume les études antérieures et ses propres recherches. [1]

Chapitre II : Partie théorique

Korteweg a été le premier qui a déterminé la vitesse de l'onde en tenant compte de l'élasticité de la paroi de conduite et le fluide à la fois, les chercheurs précédents avaient considéré que l'un des deux à la fois. [1]

Bien que Wood ait mentionné Michaud comme étant le premier qui a traité le problème des coups de bélier, cependant, des études récentes faites par Anderson ont démontré que c'est Menabrea qui fut le précurseur., Michaud a étudié le problème du coup de bélier, la conception et l'utilisation des chambres à air et soupapes de décharge. [1]

Gromek a inclus les pertes de charge dans l'analyse d'un coup de bélier pour la première fois et supposé cependant que le liquide est incompressible et que les pertes de frottement sont directement proportionnelles à la vitesse d'écoulement. [1]

Weston et Carpenter, deux ingénieurs américains, ont mené un certain nombre d'expériences visant à développer une relation théorique entre la réduction de la vitesse dans une conduite et l'augmentation de la pression correspondante mais n'y ont pas réussi puisque leurs conduites étaient courtes. Frizell a présenté une analyse des coups de bélier sur la base des études menées tout en agissant comme un ingénieur-conseil pour le développement hydroélectrique de l'Ogden dans l'Utah, cette centrale a eu une conduite forcée de longueur 9449m, il a en outre développé des expressions pour calculer la célérité des ondes de coups de bélier et l'augmentation de pression due à la réduction du débit instantané, il a déclaré que la célérité de l'onde serait la même que celle du son dans l'eau en milieu ouvert si le module d'élasticité des parois de la conduite, est infini, Il a également examiné les effets des embranchements, des réflexions des ondes et vagues successives de célérité régulière, Malheureusement le travail de Frizell n'a pas été apprécié comme autant que celle de ses contemporains, Joukovski et Allievi. [1]

En 1897, Joukovski a mené des expériences approfondies à Moscou sur les conduites ayant les dimensions suivantes : (exprimées en longueur et en diamètre, respectivement): (7620 m, 50 mm), (305m, 101,5 mm) et (305m, 152.5mm), sur la base de ses études expérimentales et théoriques, il a publié son rapport classique sur la théorie de base des coups de bélier, il a développé une formule de célérité d'onde en tenant compte de l'élasticité de l'eau et des parois de la conduite à la fois, il a également développé la relation entre la réduction de la vitesse et de l'augmentation de pression résultant en utilisant deux méthodes: la conservation

de l'énergie et de la condition de continuité, il a discuté la propagation de l'onde de pression le long de la conduite et la réflexion des ondes de pression de l'extrémité ouverte de la branche, il a étudié les effets de chambres à air, les cheminées d'équilibre, les soupapes de décharge à ressort sur les pressions résultantes des coups de bélier, Il a également étudié les effets de la variation de taux de fermeture d'une vanne et a trouvé que la pression maximale correspond au temps de fermeture, ($T \leq 2l/c$), où l = longueur de la conduite et c = célérité de l'onde

Allievi a développé la théorie générale des coups de bélier à partir des premiers principes et a publié en 1902 L'équation dynamique qui a été plus précise que celle de Korteweg. [1]

Les théories de Joukovski et Allievi qui prévalaient dans les deux premières décennies du 20^{ème} siècle, Camichel et Al ont démontré que le doublement de la charge de pression n'est possible que si ($H_0 > cV_0/g$), Constantinescu a décrit un mécanisme pour transmettre l'énergie mécanique en utilisant les ondes de coups de bélier, dans la 1^{ère} guerre mondiale Des avions de combat britanniques ont été équipés avec l'engrenage Constantinescu pour le tir des mitrailleuses, basé sur la théorie de Joukovski, Gibson a présenté un document qui contient, pour la première fois, les pertes par frottement dans l'analyse, il a également inventé un appareil pour mesurer le débit de turbine à l'aide du rapport temps- pression. [1]

Strowger et Kerr, ont présenté une procédure de calcul étape par étape pour déterminer les variations de vitesse d'une turbine hydraulique causée par les variations de charge, la Pressions de coup de bélier, les changements dans le rendement de la turbine à différentes ouvertures de la vanne, et les mouvements de la vanne uniformes et non uniforme ont été pris en compte dans l'analyse. [1]

Dans sa discussion de l'analyse Stowger et Kerr, Wood a introduit la méthode graphique pour l'analyse coups de bélier, Lowy a développé de manière indépendante et présente une méthode graphique identique en 1928, il a également étudié la résonance provoquée par les mouvements périodiques de la vanne et la diminution de pression due à une ouverture graduelle de la vanne, il a considéré les pertes de charge dans son analyse par introduction des termes de frottement dans l'équation aux dérivées partielles de base, Schnyder a inclus les caractéristiques de pompage complètes dans son analyse des coups de bélier dans les conduites raccordées aux pompes centrifuges. Bergeron a étendu la méthode graphique pour déterminer les conditions dans les sections intermédiaires d'une conduite, et Schnyder a été

le premier qui a introduit les pertes par frottement dans l'analyse graphique ; lors d'un symposium sponsorisé conjointement par la société américaine des ingénieurs civils et de la société américaine des ingénieurs mécaniciens en 1933 à Chicago, plusieurs communications ont été présentées sur l'analyse des coups de bélier dans les conduites forcées et de refoulements. [1]

Angus a décrit la théorie de base et quelques applications de la méthode graphique, y compris pertes par frottement "localisés", et Bergeron a présenté un article décrivant la théorie des ondes planes élastiques dans des milieux différents. Un autre colloque sur les coups de bélier a eu lieu en 1937 lors de la réunion annuelle de la société américaine des ingénieurs mécaniciens, Lors de ce colloque, des articles ont été présentés sur l'analyse de chambres à air et vanne, sur l'inclusion de caractéristiques de la pompe, et sur la comparaison des résultats d'ordinateur et des résultats mesurés, En linéarisant le terme de frottement, Wood a utilisé le calcul opérationnel de Heaviside, et plus tard il a utilisé les transformations de Laplace pour analyser le coup de bélier dans les conduites. Angus a présenté en 1938 l'analyse du composé, de canalisations de branchement et de cheminée d'équilibre. D'autres articles sur le cheminé d'équilibre ont été publiés par Lupton, dans Richard et Duc. [1]

De 1940 à 1960, en plus des livres de Rich, Jeager et Parmakian, de nombreux articles ont été publiés sur l'analyse des coups de bélier, En raison de leur grand nombre ils ne sont pas répertoriés ici. [1]

Ruus a été le premier à présenter des procédures pour déterminer une séquence de fermeture de vanne, nommée fermeture de vanne optimale, de sorte que la pression maximale est restée dans les limites prescrites. Plus tard, Cabelka et Franc, et Streeter, indépendamment développé le concept et le second étendu et il informatisée pour les systèmes de tuyauteries complexes. [1]

Gray a introduit la méthode des caractéristiques pour une analyse informatique des coups de bélier. Lui l'a utilisé dans sa thèse de doctorat, et son document commun avec Streeter a été la publication fondatrice qui a fait cette méthode et l'utilisation des ordinateurs pour l'analyse des phénomènes transitoires en hydraulique. Plus tard, Streeter a publié de nombreux articles sur la méthode des caractéristiques, ainsi que d'un texte sur les phénomènes transitoires en hydrauliques. [1]

Sur la théorie des réservoirs tampons, les premières contributions de l'Europe ont été faites par Léauté, Rateau, Prasil et Vogt, Calame et Gaden, et Frank et Schuller. On a résumé le plus tôt investigations et de leurs propres recherches. Thoma fut le premier qui a démontré que la cheminée d'équilibre d'une turbine hydraulique dirigée serait stable que si la surface de la section de la cheminée d'équilibre était plus d'une certaine valeur minimale, maintenant connue sous le nom de la zone Thoma. Johnson a inventé la cheminée d'équilibre différentiel pour développer accélération ou décélération de la charge rapidement. D'autres contributeurs à la théorie de cheminée d'équilibre sont Escande Jaeger, Gardel, Binnie, Evangelisti, Paynter, Marris et Chaudry Haniff. [1]

1.2. Définition de coup à béliet :

"Le coup de béliet a été décrit pour la première fois par Joukowski en 1889 et il l'a défini comme la variation de pression dans les conduites d'eau, causée par une augmentation ou une diminution soudaine de la vitesse du liquide. Dans les installations de démarrage et d'arrêt des pompes, ainsi que dans l'ouverture et la fermeture des vannes, et en général dans toute variation pouvant provenir de la vitesse de circulation de l'eau dans une installation, ce phénomène se produit, provoquant une série de surpressions et de dépressions alternatives, qui s'amortissent avec le temps". [3] (Nebra, 2013)

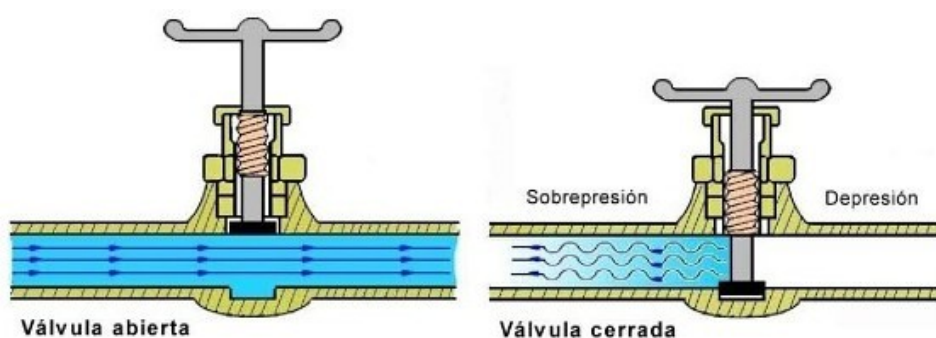


Figure 08: Représentation schématique du coup de béliet

Au moment où l'on actionne une vanne dans une conduite contenant un liquide sous pression, la vitesse du liquide dans la section adjacente au dispositif est modifiée, et une transformation de l'énergie cinétique en énergie de pression est provoquée. Cela implique l'apparition de pressions locales différentes de celles qui existaient avant la perturbation. Par conséquent, l'analyse correcte du coup de béliet est nécessaire dans les cas suivants les tuyaux pour leur dimensionnement optimal, en ce qui concerne la tuyauterie, car une erreur à ce

niveau peut conduire à deux situations différentes : d'une part, le surdimensionnement et, par conséquent, l'augmentation du coût de l'installation ; d'autre part, le calcul du tuyau par défaut avec le risque de rupture qui en découle" (Albert Soriano Rull, 2012). [3]

1.3.Étude du phénomène des coups de bélier :

Selon le principe de fonctionnement du vérin, la fermeture de la vanne d'impulsion crée une suspension soudaine du mouvement de l'eau. Comme l'explique Massey, si le fluide est totalement incompressible et que les parois du tuyau sont totalement rigides, toutes les particules de la colonne d'eau devraient s'arrêter simultanément en raison de l'effet de choc ; compte tenu de la deuxième loi de Newton, pour arrêter instantanément l'ensemble du débit, la décélération serait infinie, et donc la force requise serait infinie, ce qui n'est tout simplement pas possible. [2]

Le phénomène ci-dessus est justifié par la compressibilité du liquide, la fermeture soudaine de la vanne n'arrête pas instantanément toute la colonne d'eau, mais seulement les couches situées à l'avant de la colonne d'eau en mouvement, qui sont en contact direct avec la vanne, le reste de la colonne arrivant au repos grâce à la collision progressive des couches avant avec les couches arrière déjà à l'arrêt. Le reste de la colonne arrive au repos grâce à la collision progressive des couches avant avec les couches arrière déjà au repos. Il s'agit d'une manière discrète et macroscopique de comprendre le phénomène. [2]

On constate alors qu'à tout instant après la fermeture de la vanne, mais avant l'arrêt du liquide, il existe une discontinuité dans la conduite dans les conditions de la **figure 09**, qui est chargée de transmettre les perturbations de l'état dynamique depuis le voisinage de la vanne au fluide en amont jusqu'à ce qu'il atteigne le réservoir d'alimentation. Évidemment, en raison de la compressibilité du fluide, cela se fait à une vitesse finie correspondant à celle de l'onde de propagation. Les études considèrent que la vitesse de transmission de l'état dynamique correspond à une perturbation sonore dans le milieu de travail. Le phénomène ci-dessus est connu sous le nom de rebond. [2]

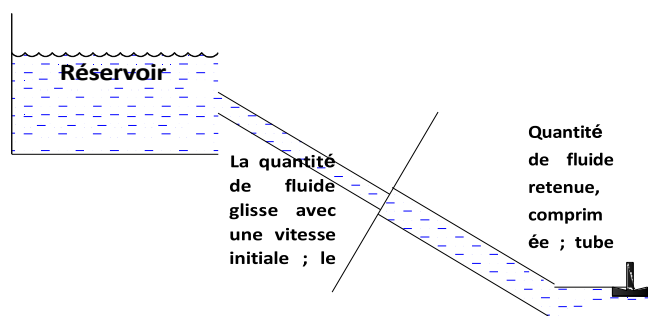


Figure 9: Représentation discrète des phénomènes se produisant dans le tuyau d'alimentation.

Le comportement de l'onde peut être parfaitement déterminé par deux concepts, la quantité de mouvement et l'énergie. D'autre part, les fluides sont capables de transmettre des perturbations produites uniquement par des phénomènes de compression et d'extension, mais par la flexion ou le cisaillement ; par conséquent, dans les fluides, les conditions ne sont transmises que longitudinalement, et ce jusqu'à ce que la viscosité dissipe l'énergie intrinsèque de l'onde. [2]

Pour les raisons susmentionnées, l'élasticité ou la compressibilité de l'eau doit être prise en compte lorsque des variations soudaines de pression se produisent ; en outre, dans le vérin hydraulique, il y a la superposition d'autres phénomènes particuliers, en raison de la présence d'une autre vanne appelée vanne de service, ainsi que d'autres éléments tels que : chambre d'air, vanne d'air, dans lesquels différents types de phénomènes se produisent ; ce qui complique le choix du modèle mathématique. [2]

Malgré le nombre de variables et de phénomènes simultanés impliqués, une interprétation correcte des phénomènes se produisant dans un bélier spécialement conçu, comme l'a fait Krol, offre la possibilité de créer un modèle mathématique qui rassemble les résultats expérimentaux et théoriques. Il a ainsi été possible de formuler des descriptions qualitatives assez complètes du fonctionnement de la pompe à coup de Bélier hydraulique. Cependant, pour obtenir des résultats quantitatifs, les modèles mathématiques proposés aboutissent à des résultats qui ne coïncident pas, notamment parce qu'il n'y a pas d'uniformité dans les hypothèses, Ils ne tiennent pas en compte tous les éléments de la pompe utilisent des valeurs moyennes des variables et, en général, elles entraînent de nombreuses simplifications pour faciliter la résolution. [2]

Des recherches approfondies ont été menées pour comprendre le fonctionnement caractéristique du vérin, en obtenant des variables dépendantes et indépendantes qui, sous certaines hypothèses, peuvent être réduites à huit. Cinq paramètres adimensionnels sont nécessaires pour décrire les variables dépendantes : le nombre de Reynolds, le nombre de Froude, le nombre de Mach, le rapport entre les têtes d'alimentation et de refoulement et le coefficient de frottement du fluide. [2]

Le nombre de Reynolds sans dimension où une comparaison entre les termes convectifs et visqueux, utilisé pour caractériser le type et le mouvement du fluide :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

ρ : Densité du fluide

v : Vitesse caractéristique du fluide

D : Diamètre du tuyau dans lequel circule le fluide ou longueur caractéristique du système.

μ : viscosité dynamique du fluide

Les conditions suivantes sont remplies dans les tuyaux :

- ◆ Pour des valeurs de $Re \leq 2000$, l'écoulement reste stationnaire et se comporte comme s'il était constitué de films minces.
- ◆ Pour des valeurs de $2000 \leq Re \leq 4000$, la ligne fluide perd de sa stabilité en formant de petites ondulations variables dans le temps, mais reste mince. Ce régime est appelé régime de transition.
- ◆ Pour des valeurs de $Re \geq 4000$, après une petite section initiale avec des oscillations variables, le fluide tend à se diffuser dans l'ensemble de l'écoulement. Ce régime est appelé turbulent, c'est-à-dire caractérisé par un mouvement tridimensionnel désordonné et non stationnaire.

Le nombre de Froude sans dimension - relie l'effet des forces d'inertie aux forces de gravité agissant sur un fluide. L'expression mathématique de ce nombre est la suivante

$$Fr = \frac{V}{gl}$$

v : Paramètre de vitesse

g : Gravité

l : Paramètre de longueur

Le nombre de Mach sans dimension compare la vitesse maximale des perturbations mécaniques dans l'écoulement à celle du son. Cette relation peut être exprimée par l'équation suivante :

$$Fr = \frac{V}{V_s}$$

V_s : équivaut à 1224 km/h, soit 340 m/s.

Coefficient de frottement des fluides - perte de pression qui se produit dans une conduite, représentant la perte d'énergie d'un débit hydraulique le long de la conduite en raison du frottement.

Krol, a établi qu'il était possible de prévoir le comportement de n'importe quel vérin hydraulique automatique, à condition que les propriétés suivantes d'une installation aient été déterminées séparément :

- ◆ Perte de charge due à la soupape d'impulsion
- ◆ Coefficient de traînée de la valve à impulsion
- ◆ Chute de pression dans la canalisation
- ◆ Perte de charge pendant la période de sauvegarde

1.4. Le Comportement des Vagues dans le cadre de l'opération Béliér

L'étude des coups de bélier est basée sur la "théorie de l'onde élastique", qui implique le déplacement à une vitesse donnée des variations de pression le long d'une conduite. [2]

La vitesse de l'onde est la vitesse du son dans le système analysé, conditionnée par le diamètre, l'épaisseur et l'élasticité de la conduite, ainsi que par les propriétés physiques inhérentes au fluide, telles que la densité et la compressibilité. La période critique d'une conduite est le temps nécessaire à une onde pour aller de la source de la perturbation à l'extrémité libre et vice-versa. En outre, le temps d'arrêt [T] est l'intervalle entre le début et la fin de la perturbation (durée du cycle du coup de bélier) dans le débit de liquide. Les facteurs les plus importants impliqués dans le coup de bélier sont : l'énergie cinétique, l'accélération de la gravité, les pertes de charge et le mouvement inertiel de l'unité de pompage. [2]

La **figure 10** montre le comportement, la séquence d'événements pour un cycle de fermeture rapide de la vanne.

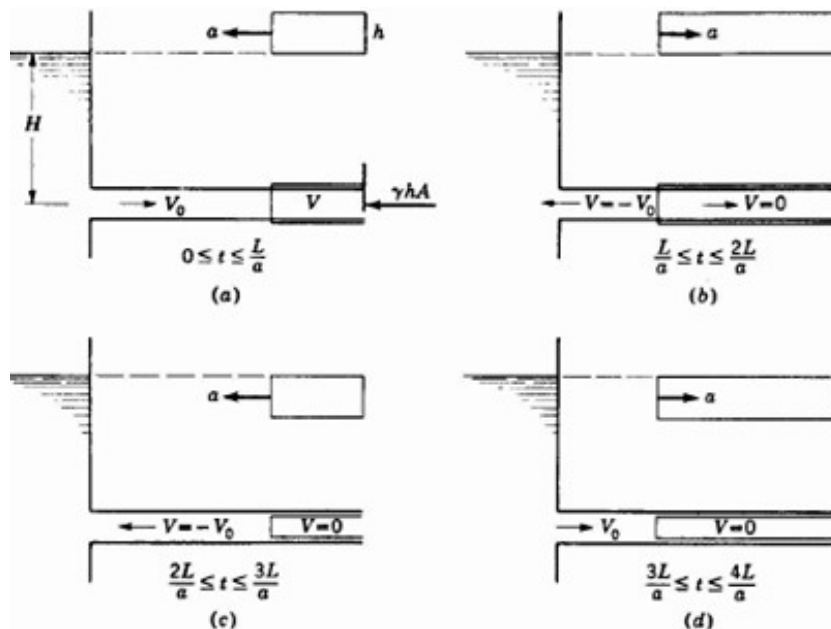


Figure 10: Séquence de propagation des ondes.

1. Période de $0 \leq t \leq l/c$

A l'instant où la vanne d'impulsion se ferme, le front de la colonne d'eau se comprime, en même temps que sa vitesse s'annule. La haute pression qui se développe se déplace vers l'amont. Puisque l'onde atteint le sommet de la conduite d'alimentation à l'instant $t=L/c$, tout le liquide est sous la charge supplémentaire H , la quantité de mouvement s'est transformée en énergie élastique. Fig.10(a)

2. Période de $l/c \leq t \leq 2l/c$

La quantité de liquide contenue dans le tube expansé commence à s'écouler avec une vitesse en sens inverse. La pression dans le liquide revient à celle d'avant la fermeture de la vanne, la paroi du tube reprend ses dimensions d'origine et le liquide acquiert une vitesse V_0 , dans le sens opposé à l'origine, maintenant il va de la vanne au réservoir en raison de la pression restante. A l'instant $2L/c$.

3. Période de $2l/c \leq t \leq 3l/c$

A l'instant où l'onde de pression négative atteint l'extrémité supérieure de la conduite, soit $3L/c$, le liquide est au repos mais uniformément à une hauteur de chute inférieure, en H , à ce qu'il était avant la fermeture, Dans ces conditions, encore une fois, il y a un déséquilibre dans le réservoir d'alimentation, ce qui fait que le fluide commence à se déplacer du réservoir vers la vanne, en acquérant une vitesse V . [2]. Figure 10 (c).

1. Période de $3l/c \leq t \leq 4l/c$

Au moment où la perturbation atteint la vanne, les conditions dans le système sont Exactly les mêmes qu'elles étaient à l'instant où la vanne s'est fermée, ce qui s'est Produit à un instant $4L/c$ auparavant [2]. Fig.10(d)

Le processus décrit ci-dessus est répété avec une période de $4L/c$. Les effets de frottement ou de frottement et d'élasticité imparfaite tant dans le fluide que dans les parois du conduit, négligés dans la considération précédente, font que les oscillations s'amortissent et que le fluide atteint finalement un état de repos permanent. Si l'interruption de la vanne s'effectue dans un temps inférieur à $2L/c$, on parle de fermeture rapide, au contraire, si elle s'effectue dans un temps Supérieur à $2L/c$, on parle de fermeture lente. [2]

1.5. Des exemples vivant de pompes à Béliers utilisées pour pomper l'eau dans une station de pompage

Le béliers hydraulique du parc du château de "La Ménardière" à Mazières-en-Gâtine (Deux-Sèvres), datant des années 1880 et devenu maison de retraite, a été restauré vers 2000 avec l'appui technique de la maison Walton [5] (Gironde).

Chapitre II : Partie théorique

Dans le pavillon de Manse, construit pour assurer l'alimentation en eau du château de Chantilly, on peut voir en fonctionnement un modèle réduit de bélier hydraulique [7] [8] .

En Sologne, dans le parc du château de La Ferté-Imbault à proximité de la Sauldre, une construction en brique abrite deux anciens béliers hydraulique Bollée installés en 1884, et qui ne fonctionnent plus actuellement. Ces béliers étaient vraisemblablement alimentés par l'eau des moulins situés en dessous du château [9] .

Dans l'Hérault, on voit encore deux béliers hydrauliques de marque Douglas [10], [11] dans le parc départemental de Restinclières [12]. L'un dans une petite construction [13], l'autre à moitié enterré à proximité du Lez.

Dans la maison de David et son frère à Micaville, Caroline du Nord 28755 à installer une grande pompe à bélier dans son ruisseau pour apporter de l'eau à sa baignoire froide, La conduite d'alimentation est en pvc de 1-1/4" amener l'eau à 3 pieds de tête dans un seau de filtre. Ce seau permet au limon et aux débris de se déposer sur le fond et de ne pas entrer dans la pompe. Le tuyau d'entraînement mesure environ 30 pieds de long. La pompe fonctionne sur 3 pieds de pression de refoulement et soulève l'eau à 15 à 20 pieds.

Les images suivantes montrent comment installer et utiliser la pompe à Bélier :



Figure 13 : Le réservoir qui alimente la pompe



Figure 11 : une prise grillagée de PVC de 3pouces



Figure 14 : La pompe à Béliet



Figure 15 : La conduite de sortie



Figure 16 :baignoire froide

2. La pompe à coups de bélier

2.1. Historique de la pompe à coup de bélier

Les pompes font partie des machines les plus anciennes. Elles étaient utilisées dans l'Égypte ancienne, en Chine, en Inde, en Grèce et à Rome. Aujourd'hui, elles sont le deuxième type d'équipement industriel le plus utilisé après les moteurs électriques. Le bélier hydraulique est entré dans l'histoire au début de l'ère des grandes inventions et a atteint sa maturité parallèlement aux machines à vapeur et au moteur à combustion interne. L'un des plus anciens dispositifs connus a été utilisé par les Grecs en 300 av. J.-C. L'utilisation de ce dispositif a été abandonnée, puis relancée au XVI^e siècle, lorsqu'une traduction allemande d'un mot grec décrivant la pompe a été publiée.

Il y a eu de nombreux désaccords sur le véritable créateur empirique de cette pompe, mais l'un des récits les plus largement acceptés attribue son invention à l'Anglais John Whitehurst en 1775, qui "*a fait fermenter son ingéniosité pour construire une bombe*".

Le principe de fonctionnement de l'appareil était original : il s'agissait d'actionner manuellement un robinet sur un tuyau relié à un réservoir d'alimentation, situé à un niveau

supérieur, afin de provoquer le phénomène physique connu sous le nom de coup de bélier, qui permettait d'élever l'eau à un niveau plus élevé.

Liquide vers un réservoir de stockage situé à une altitude plus élevée" **figure 17** bien que son application ne soit pas très souhaitable en raison du bruit et des vibrations élevés de ce type d'équipement ; en outre, il était manuel. C'est la pompe à Bélier était capable de soulever de l'eau jusqu'à une hauteur de 4,9 m.

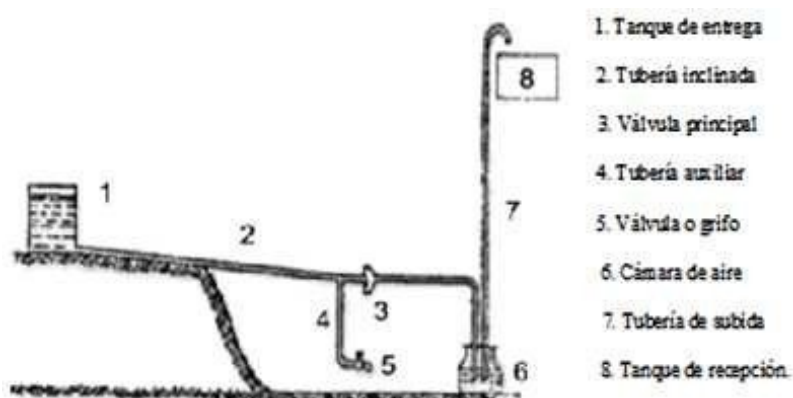


Figure 17. Schéma du bélier conçu par John Whitehurst

L'invention, reconnue en 1776, et la mort subséquente de l'illustre Anglais ont été précédées par des chercheurs qui s'employaient à enrichir l'appareil et à découvrir les secrets de son apparente magie. La sagacité humaine ajouta des éléments à l'invention du brassage, et six ans avant que les deux célèbres frères français, Joseph Montgolfier et son frère Étienne, n'inventent la montgolfière, il conçut un bélier à déclenchement automatique, semblable dans son principe aux béliers contemporains, bien qu'il l'appelât alors "le bélier hydraulique" **figure 18**. L'amélioration par rapport au précédent est qu'aucune force extérieure n'est utilisée

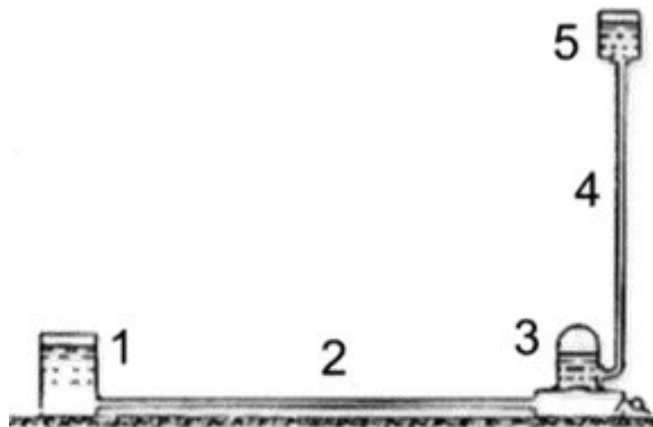


Figure 18 : Pompe à Bélier conçu par Joseph Michael Montgolfier

pour ouvrir la valve d'impulsion, mais la force inhérente de l'eau en mouvement remplit cette tâche Parallèlement .[2]

Le béliet hydraulique a été breveté en 1796, par Joseph Montgolfier, qui comme aujourd'hui consistait en une machine qui n'exploitait que l'énergie d'une petite chute d'eau pour élever une partie de son débit à une plus grande hauteur. Son travail a été amélioré par Pierre François Montgolfier, son fils (1816), qui a conçu une valve pour introduire de l'air dans la chambre de la pompe à Béliet , ce qui a permis d'améliorer les performances de l'appareil, qui aurait pompé jusqu'à une hauteur de 48 m.

Depuis son invention, la pompe acoups béliet hydraulique a été largement utilisé dans le monde entier, par exemple dans les fontaines du Taj Mahal en Inde ou dans l'Ameer en Afghanistan. L'intérêt pour les pompes à Béliet a diminué dans les années 1950 et 1960 à la suite du boom pétrolier et leur utilisation a été abandonnée en raison de l'avance écrasante de la pompe centrifuge.

2.2. Définition de la pompe à coup de Béliet :

La pompe à coup de béliet, également appelée béliet hydraulique, est un dispositif mécanique qui utilise l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement pour pomper de l'eau ou un autre liquide à une hauteur supérieure à celle de la source d'alimentation. [4]

Le fonctionnement d'une pompe à coup de béliet repose sur le principe de l'onde de choc hydraulique. Voici comment cela fonctionne :

- a. **Alimentation en eau :** La pompe à coup de béliet est installée sur une source d'eau, telle qu'une rivière ou un ruisseau. L'eau est dirigée vers une conduite d'amenée qui conduit à la pompe.
- b. **Vanne d'admission :** Une vanne d'admission permet à l'eau de pénétrer dans la pompe. Lorsque l'eau s'écoule dans la conduite d'amenée, elle atteint une vitesse suffisante pour fermer la vanne d'admission brusquement.
- c. **Onde de choc :** Lorsque la vanne d'admission se ferme, l'énergie cinétique de l'eau en mouvement crée une onde de choc hydraulique à l'intérieur de la pompe. Cette onde de choc génère une augmentation de pression qui pousse

l'eau dans le sens opposé, à travers une soupape de refoulement et vers une sortie plus élevée.

d. Soupape de refoulement : Une soupape de refoulement permet à l'eau de quitter la pompe et de monter jusqu'à une hauteur supérieure. La soupape de refoulement se ferme également brusquement lorsque l'onde de choc se produit, emprisonnant l'eau dans la pompe.

Onde de débit : Une fois que la soupape de refoulement est fermée, l'onde de choc se dissipe, créant une onde de débit qui entraîne l'ouverture de la vanne d'admission. L'eau est ensuite aspirée de nouveau dans la pompe, répétant ainsi le cycle.

La pompe à coup de bélier est un dispositif simple, qui ne nécessite pas d'énergie externe, comme l'électricité ou les carburants, pour fonctionner. Elle peut être utilisée dans des zones éloignées ou rurales où l'alimentation en énergie est limitée. Cependant, elle présente des limitations, notamment en termes de débit et de pression, et son efficacité dépend des conditions du site et des caractéristiques du fluide.

2.3. Configuration typique d'une pompe à bélier

La configuration généralisée est celle de la **figure 19**. Bien entendu, cette disposition varie en fonction de la conception et de la fabrication de chaque élément, mais le principe reste le même.

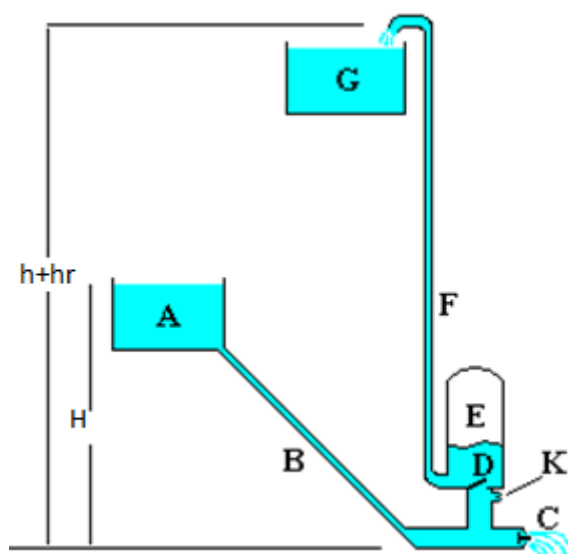


Figure 19 : Configuration typique d'une pompe à bélier

- ✓ h : hauteur à laquelle l'eau monte, en prenant le réservoir d'alimentation comme référence.
- ✓ H : hauteur de chute, distance verticale entre la prise d'eau et le point le plus bas du bélier.
- ✓ A : réservoir d'alimentation.
- ✓ B : tube d'alimentation ou d'impulsion.
- ✓ C : soupape d'évacuation, de décharge, d'impulsion ou de sûreté.
- ✓ D : soupape de retenue, de refoulement, de décharge ou de service.
- ✓ E : pot de pression ou chambre à air.
- ✓ F : tuyau d'évacuation.
- ✓ G : réservoir de décharge.
- ✓ K : soupape d'admission d'air.

2.4. Principe de fonctionnement

La mécanique des fluides reconnaît le phénomène connu sous le nom de coup de bélier, qui se produit en raison des pressions alternées d'un fluide en mouvement dans une conduite, causées par la fermeture ou l'ouverture brusque d'une vanne. Pendant la fluctuation soudaine de la pression, le fluide s'écoule le long de la conduite à une vitesse définie correspondant à la vitesse de propagation d'une onde sonore dans le milieu de travail. Sous l'effet de cette surpression, le tuyau se dilate et le fluide est comprimé, revenant à sa position initiale par élasticité. Cet effet se répète, établissant un mouvement oscillatoire de pression de moins en moins intense, jusqu'à ce qu'il s'annule. [2]

Le vérin hydraulique utilise l'énergie potentielle d'un volume d'eau relativement important à une petite hauteur de chute pour la convertir en énergie de pression, qui est utilisée pour pomper une plus petite quantité de fluide à une hauteur de chute plus importante en générant une onde de haute pression. [2]

La pompe à Bélier peut également être comparé à un transformateur électrique, puisqu'il reçoit une faible tension (en volts), avec un courant électrique relativement élevé (en ampères)

Chapitre II : Partie théorique

et obtient une tension plus élevée et un ampérage plus faible. Dans le cas du béliet, un processus similaire se produit au niveau hydraulique : il reçoit un débit élevé (en ampères), et il reçoit une faible tension (en volts), avec un courant relativement élevé (en ampères) et obtient une tension plus élevée et un ampérage plus faible. [2]

($Q + q$) avec une faible charge (H) et obtient un régime de hauteur de charge plus élevée (h) avec un débit plus faible (q).

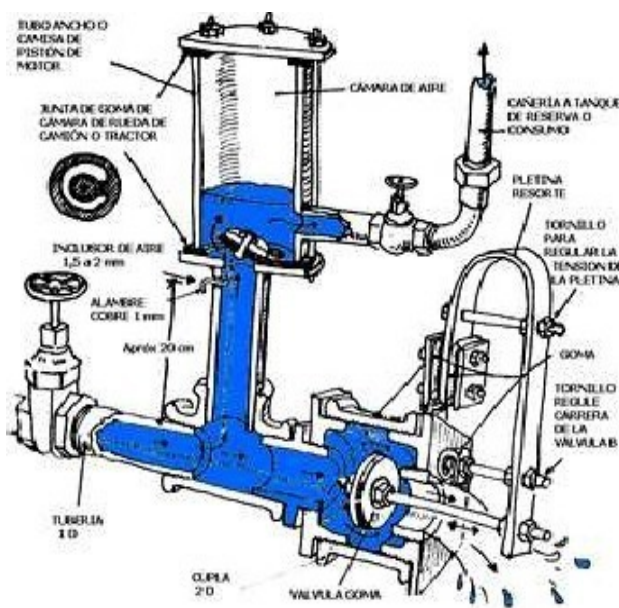


Figure 20 : Présentation en coupe d'un modèle de béliet typique

La **figure 20** ci-dessous montre un modèle typique en coupe du béliet avec tous ses composants.

Le fonctionnement des pompes à béliet est régi par un cycle hydraulique, qui produit un rythme caractéristique pendant le fonctionnement, que l'on peut diviser en trois phases à des fins didactiques et illustratives : accélération, refoulement et retour. Le cycle peut être divisé en trois phases à des fins didactiques et illustratives: l'accélération, le refoulement et le retour. Nous verrons par la suite que le processus hydraulique est complexe en raison de la rapidité et de la simultanéité des phénomènes. [2]

2.4.1. Cycle Hydraulique de la pompe à coup de bélier

Accélération : Lorsque le système est rempli, la vanne d'impulsion se ferme sous l'effet de la pression de la charge initiale du barrage et l'eau s'écoule dans la chambre d'air, jusqu'au niveau du barrage par le principe des vases communicants. [2]

L'écoulement de l'eau à travers la soupape d'impulsion s'arrête brusquement lorsque la soupape d'impulsion est fermée. La quantité d'eau qui est descendue par le tuyau d'impulsion B a une pression et une énergie considérables qui doivent être dissipées. L'égalisation des forces permet l'ouverture momentanée de la soupape de sortie lorsque la pression est plus élevée que dans la chambre à air. [2]

La vanne de sortie reste ouverte jusqu'à ce que l'eau dans le tuyau de refoulement ait pratiquement diminué et que la pression dans le corps de la pompe soit inférieure à la pression de refoulement. [2]

Contre-pression - Le débit restant dans la conduite de refoulement conserve

Une certaine pression résiduelle. Celle-ci fait chuter la pression dans le corps de la pompe à un niveau si bas que la soupape d'impulsion se rouvre automatiquement. Le refoulement aspire également une petite quantité d'air à travers la valve de la tasse K. L'air reste sous la valve de sortie D jusqu'à la prochaine ouverture de la valve. L'air reste sous la soupape de sortie D jusqu'au prochain cycle de pompage de l'eau. Cela permet de s'assurer que le réservoir d'air E reste plein d'air pour garantir l'amortissement. Lorsque l'énergie de recul prend fin, l'eau commence à s'accélérer dans le tube d'entraînement B et, à travers la soupape d'évacuation C, dans l'air libre, ce qui permet de recommencer le cycle.

Tout au long du cycle, la pression dans le réservoir ou la chambre ainsi que les forces de l'eau vers le tuyau de refoulement sont idéalement considérées comme constantes en raison de l'air dans la chambre elle-même qui agit comme un coussin pour atténuer les chocs soudains. Le cycle de pompage est très rapide, généralement de 40 à 120 fois par minute.

Au cours de chaque cycle, seule une petite quantité d'eau est pompée. Cependant, cycle après cycle continu et indéfini, une quantité importante d'eau est soulevée. Les éclaboussures de la vanne d'impulsion dans le débit d'eau sont connues sous le nom d'"eaux usées". Ce terme

doit être compris comme la seule ressource gaspillée par l'équipement, c'est pourquoi l'efficacité de l'équipement est donnée par le rapport entre l'eau soulevée et les "eaux usées". On dit donc que ces pompes ont un faible rendement, généralement de l'ordre de 40 %.[2]

En raison de la nature du bélier, son installation est pratique lorsqu'il y a suffisamment d'eau disponible. Dans le cadre de cette approche, le bélier est destiné à développer la puissance maximale possible sans pour autant impliquer une performance maximale. [2]

2.5. Caractéristiques de la pompe à coup de bélier

Ses caractéristiques générales sont les suivantes : il ne nécessite ni combustible fossile, ni électricité, ni aucune roue à l'extérieur du fluide, il ne nécessite pas d'entretien permanent. Ce système est plus économique que les autres systèmes motorisés conventionnels, il ne pollue pas, son fonctionnement est sûr, il ne nécessite pas de main d'œuvre pendant son fonctionnement et son coût d'exploitation est théoriquement nul ; comme ce dispositif n'a que deux pièces mobiles, la durée de vie utile de l'équipement est longue, il fonctionne en continu 24 heures sur 24. Idéal pour les terrains escarpés où l'irrigation technicisée peut être réalisée, il peut également répondre à d'autres besoins tels que l'eau potable et les besoins de l'agriculture et de l'élevage.

En revanche, les inconvénients de ce type d'équipement sont présentés ; l'un des principaux est la faible efficacité, son fonctionnement est limité à l'air libre où il y a la capacité de réutiliser les eaux usées ; le débit d'alimentation doit être constant et fiable. L'accès à la technologie et à l'information, étant donné qu'il s'agit d'un équipement qui s'est retrouvé au chômage, il n'est pas facile de trouver des innovations. Dans la prise d'eau, il ne doit pas y avoir d'entrée d'air, il est donc nécessaire de réaliser un réservoir d'eau d'une certaine capacité volumétrique qui permette un débit continu et conserve les conditions de stabilité, et le site où se trouve le bélier doit disposer d'un drain pour l'eau qui s'écoule.

Un autre problème est le bruit généré pendant le fonctionnement, qui peut être contrôlé et réduit en utilisant certains dispositifs d'absorption des vibrations à des endroits stratégiques tels que la soupape d'impulsion et la jonction de la chambre d'air avec le tuyau de refoulement,

Chapitre II : Partie théorique

où le bruit est le plus important. Le vérinhydraulique, dans sa version conventionnelle, est un équipement lourd, encombrant et relativement coûteux par rapport à d'autres.

Par rapport à d'autres moyens de relever l'eau, la pompe à coup de bélier peut être une option appropriée présentant de nombreux avantages par rapport aux autres, mais dans d'autres scénarios, elle peut être totalement inappropriée.

La diffusion limitée des béliers peut être attribuée au fait que leur sélection, leur installation et leur étalonnage nécessitent des équipements et des essais spécialisés, que leur fonctionnement n'est pas entièrement compris et que leur conception hydraulique est difficile.

Le tableau ci-dessous présente les rapports avantages/inconvénients du vérin hydraulique dans les domaines les plus importants par rapport aux pompes les plus couramment utilisées sur le terrain.

Tableau 1 : Comparaison du vérin hydraulique avec d'autres pompes

Description	Moteur-pompe	Pompe Électrique	Ram
Énergie externe	Oui	Oui	Non
Lubrifiants	Oui	Oui	Non
Investissement initial	Haut	Sous	Moyen
Maintenance	Oui	Oui	Non
Fiabilité	Haut	Les médias	Haut
Bruit	Haut	Moyen	Moyenne-élevée

Chapitre III :

Partie pratique

1. Conception, construction et mise en service de la pompe à coup de bélier

Dans ce chapitre présente en détail les différents aspects pris en compte lors de la conception, de la construction et de la mise en service de la pompe. La pompe finement construite, la structure de support de la pompe à bélier, les essais de pompage, la courbe de la pompe seront présentés.

1.1. La pompe à coups de bélier enfin construite

La pompe à coup de bélier dispose d'un support en béton afin que l'impact sur la vanne de la tête de puits ne se dissipe pas et ne génère pas des pressions et des dépressions plus extrêmes dans l'ensemble du système. En outre, la pompe a été assemblée en Plastic afin d'éviter que l'énergie du coup de bélier ne soit perdue.

Le vérin est fixé à la structure en béton. La configuration de la pompe finalement construite est présentée dans les Figure 21 et 22, 23, 24, 25.

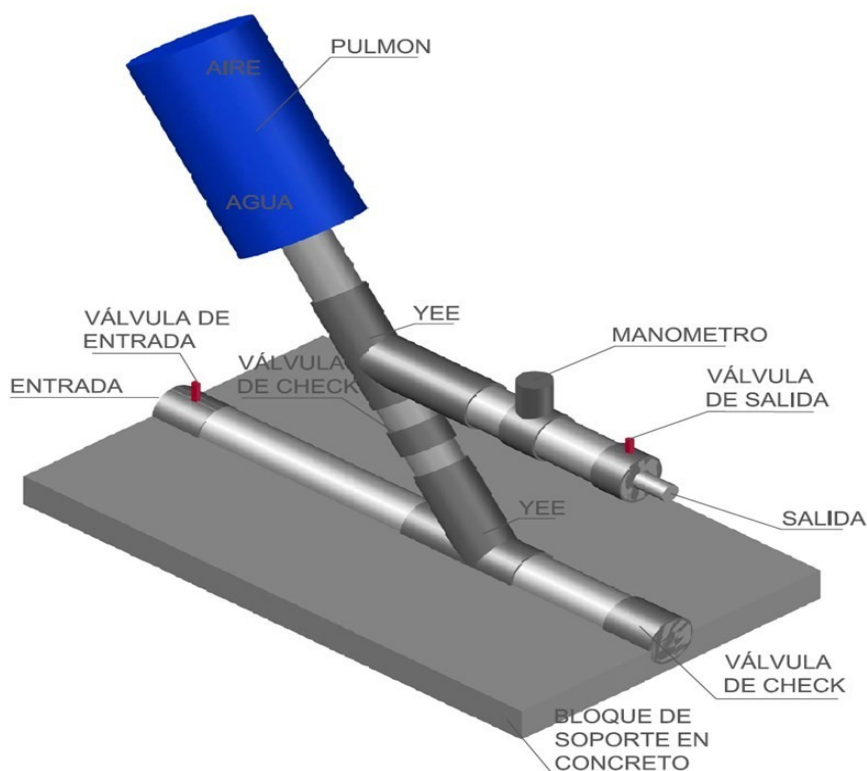


Figure 21 : Proposition finale pour la pompe à bélier. Conception du professeur Jorge Alberto Valero Fandiño.



Figure 22 : Pompe à bélière

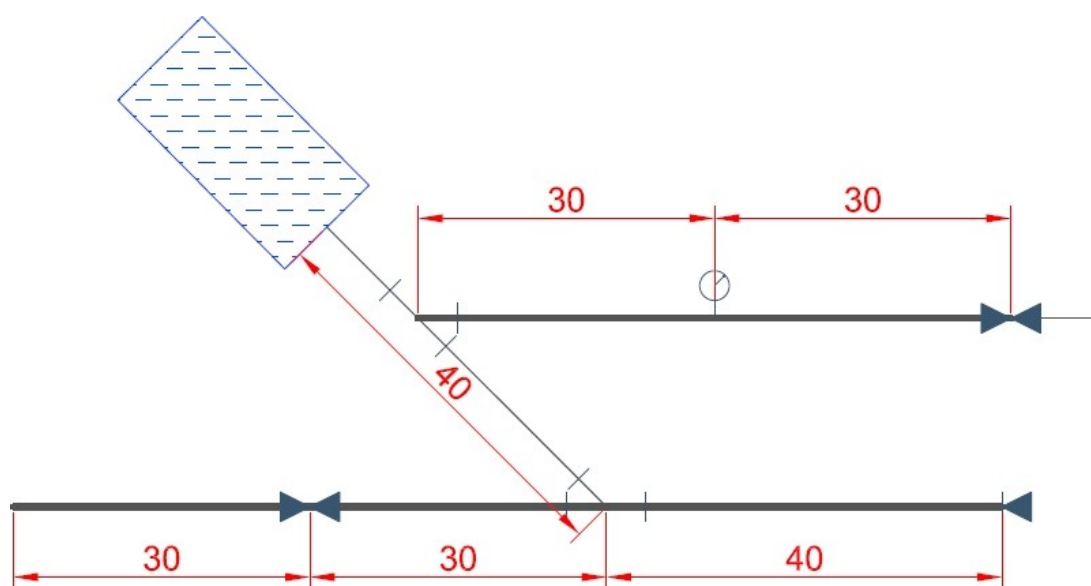


Figure 23 : Dimensions de la pompe à bélière finalement construite

1.2. Structure de support de la pompe à coup de bélière

Il a été décidé de construire une structure de support en béton pour accueillir tous les mécanismes de la pompe, en maximisant l'impact du bélière afin de ne pas dissiper l'énergie. Les dimensions de la base sont les suivantes : 40 cm de long, 30 cm de large et 6 cm d'épaisseur, comme le montre l'image suivante.

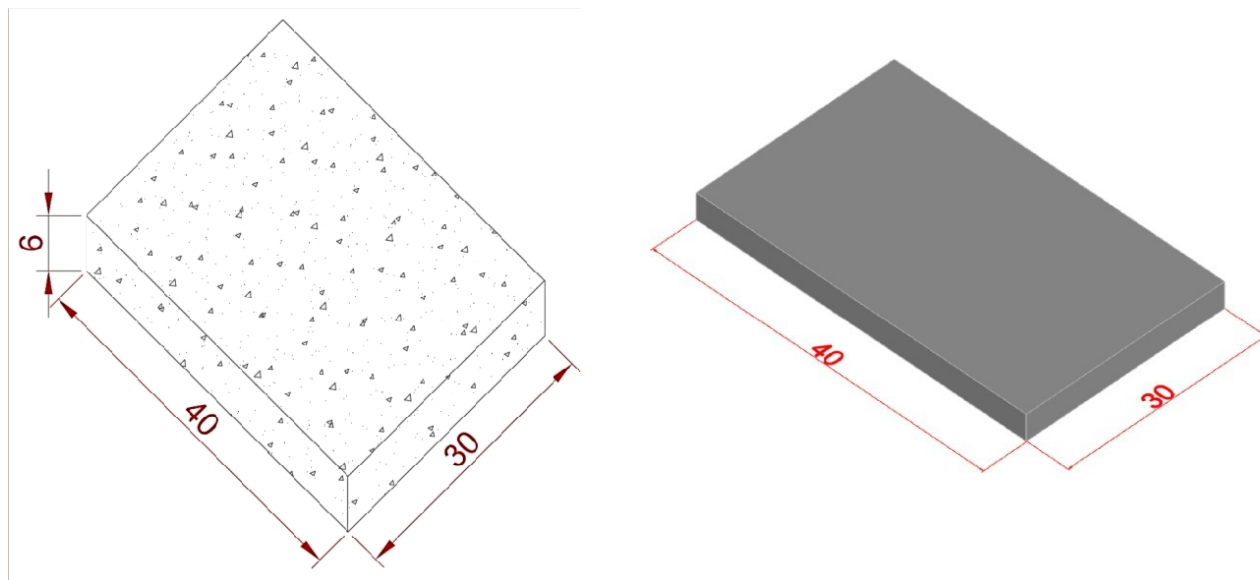


Figure 24 : Fabrication de la base pour l'ancrage du vérin



Figure 25 : Base du bélier en béton

1.3. Essais de pompage

Une fois la pompe à coup de bélier construite, il était nécessaire de comprendre son comportement et, à cette fin, une expérience a été conçue pour déterminer quantitativement la capacité de pompage du bélier. Pour ce faire, différentes hauteurs d'entrée ($H_e = 1\text{m}, 1,5\text{m}$ et 2m) et différentes hauteurs de sortie ($H_s = 2\text{m}, 3\text{m}, 4\text{m}$ et 5m) ont été établies. Le diagramme des essais de pompage est illustré ci-dessous.

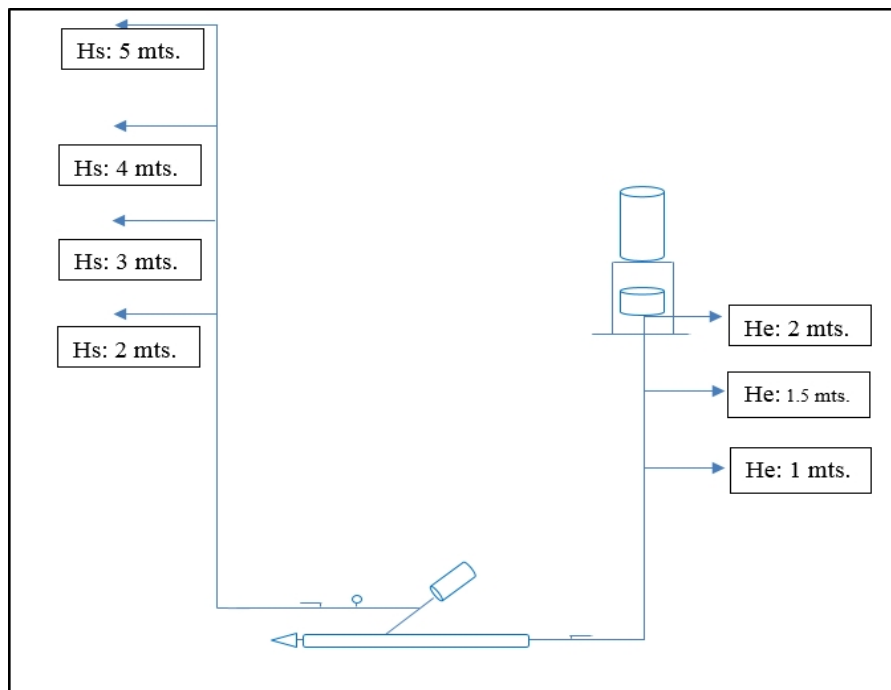


Figure 26 : Dispositif d'essai de pompage mis en place par les auteurs de la présente étude

1.4. Assemblage effectué pour les essais de pompage

Un petit réservoir d'alimentation a été installé à l'entrée du système, ce qui sera discuté dans la section 6.2.2, ce qui a permis d'assurer une hauteur d'entrée constante H_e .

Lors des essais de pompage, nous avons commencé par la hauteur maximale d'entrée (H_e), à 2 mètres, et à une hauteur maximale de sortie (H_s) de 5 mètres, à cette sortie et avec la pompe en fonctionnement, un jaugeage de type volumétrique a été effectué à l'aide d'une éprouvette de 500 ml et d'un chronomètre, en effectuant 5 jaugeages pour chacune des hauteurs de sortie. Par la suite, la même séquence d'activités a été réalisée à la hauteur de sortie à 2m, 3m et 4m.

Chapitre III : Partie pratique

A la fin de la hauteur maximale d'entrée (2 mètres), le tuyau est coupé.

La même dynamique de l'expérience est poursuivie, les détails du schéma d'assemblage sont montrés dans l'image suivante.

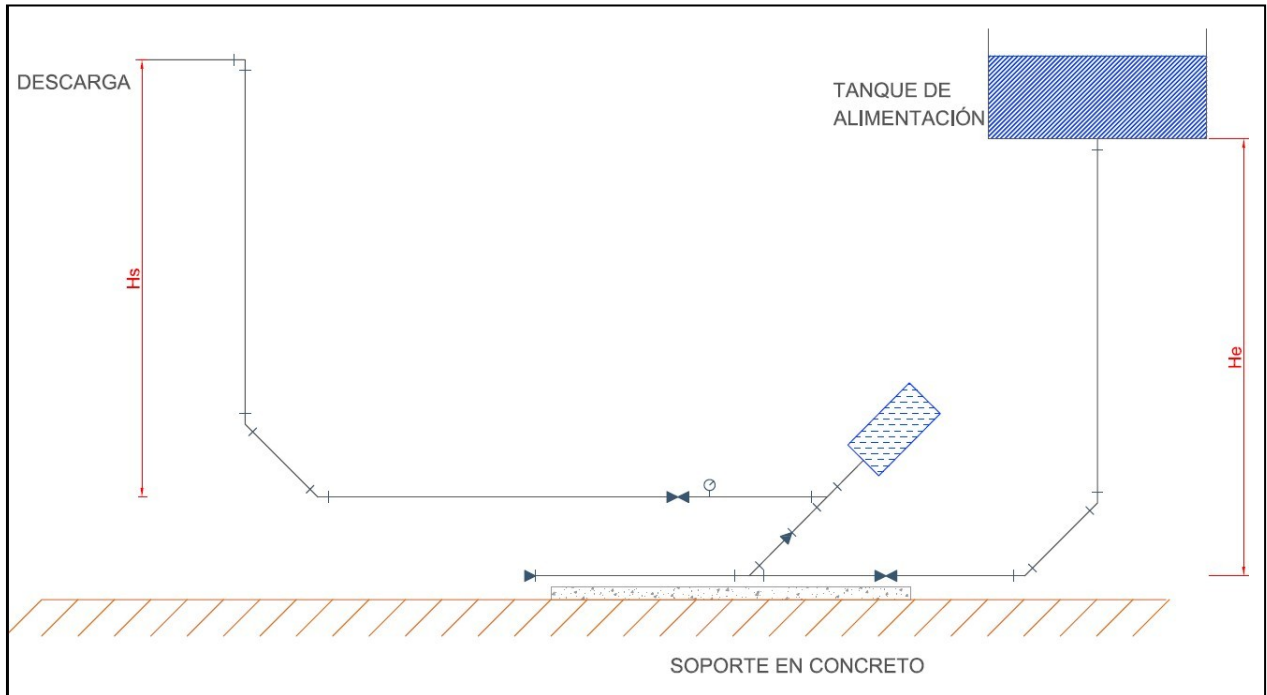


Figure 27 :Assemblage pour les tests de pompage

Chapitre IV :
Résultats et discussion

1. Résultats obtenus lors des essais de pompage

Les essais effectués permettent d'obtenir des analyses décrivant le comportement général du béliet finalement construit. Le tableau suivant indique les valeurs des collecteurs d'entrée et de sortie, ainsi que les débits de refoulement. Rappelons que les débits indiqués dans le tableau suivant sont le résultat de cinq mesures pour chaque combinaison de hauteurs d'entrée et de sortie, qui ont été systématiquement régulées pour donner les informations suivantes :

Tableau 2 : Débits de He (hauteur d'entrée 1m) VS Hs(2m)

Hauteur d'entrée (1m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
1m	1	0,5	0,57	0 ,877
1m	2	0,5	0,57	0 ,877
1m	3	0,5	0,56	0 ,892
1m	4	0,5	0,56	0 ,892
1m	5	0,5	0,56	0 ,892

Tableau 3: Débits de He (hauteur d'entrée 1m) VS Hs(3m)

Hauteur d'entrée(1m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
2m	1	0,5	1,07	0,467
2m	2	0,5	1,07	0,467
2m	3	0,5	1,07	0,467
2m	4	0,5	1,07	0,467
2m	5	0,5	1,07	0,467

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau 4: Débits de He (hauteur d'entrée 1m) VS Hs(4m)

Hauteur d'entrée(1m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
3m	1	0,5	1,26	0,396
3m	2	0,5	1,26	0,396
3m	3	0,5	1,27	0,393
3m	4	0,5	1,27	0,393
3m	5	0,5	1,26	0,396

Tableau 5: Débits de He (hauteur d'entrée 1m) VS Hs(5m)

Hauteur d'entrée(1m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
4m	1	0,5	2	0,25
4m	2	0,5	2	0,25
4m	3	0,5	2	0,25
4m	4	0,5	2	0,25
4m	5	0,5	2	0,25

Chapitre IV : Résultats et discussion

Tableau 6: Débits de He (hauteur d'entrée 1.5m) VS Hs(2m)

Hauteur d'entrée (1.5m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
1m	1	0,5	0,3	1,66
1m	2	0,5	0,3	1,66
1m	3	0,5	0,3	1,66
1m	4	0,5	0,3	1,66
1m	5	0,5	0,3	1,66

Tableau 7: Débits de He (hauteur d'entrée 1.5m) VS Hs(3m)

Hauteur d'entrée (1.5m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
2m	1	0,5	0,34	1,470
2m	2	0,5	0,34	1,470
2m	3	0,5	0,35	1,428
2m	4	0,5	0,35	1,428
2m	5	0,5	0,34	1,470

Tableau 8: Débits de He (hauteur d'entrée 1.5m) VS Hs(4m)

Hauteur d'entrée (1.5m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
3m	1	0,5	0,44	1,136
3m	2	0,5	0,44	1,136
3m	3	0,5	0,44	1,136
3m	4	0,5	0,45	1,1
3m	5	0,5	0,45	1,1

Tableau 9: Débits de He (hauteur d'entrée 1.5m) VS Hs(5m)

Hauteur d'entrée (1.5m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
4m	1	0,5	0,52	0,961
4m	2	0,5	0,52	0,961
4m	3	0,5	0,53	0,943
4m	4	0,5	0,52	0,961
4m	5	0,5	0,52	0,961

Tableau 10: Débits de He (hauteur d'entrée 2m) VS Hs(2m)

Hauteur d'entrée(2m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
1m	1	0,5	0,24	2,083
1m	2	0,5	0,24	2,083
1m	3	0,5	0,25	2
1m	4	0,5	0,24	2,083
1m	5	0,5	0,24	2,083

Tableau 11: Débits de He (hauteur d'entrée 2m) VS Hs(3m)

Hauteur d'entrée(2m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
2m	1	0,5	0,29	1,724
2m	2	0,5	0,28	1,785
2m	3	0,5	0,28	1,785
2m	4	0,5	0,28	1,785
2m	5	0,5	0,28	1,785

Tableau 12: Débits de He (hauteur d'entrée 2m) VS Hs(4m)

Hauteur d'entrée(2m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V /T (L/min)
3m	1	0,5	0,33	1,515
3m	2	0,5	0,33	1,515
3m	3	0,5	0,32	1,562
3m	4	0,5	0,32	1,562
3m	5	0,5	0,32	1,562

Tableau 13: Débits de He (hauteur d'entrée 2m) VS Hs(5m)

Hauteur d'entrée(2m)				
H _s	Test	V(L)	T(min)	Q=V/T (L/min)
4m	1	0,5	0,38	1,315
4m	2	0,5	0,38	1,315
4m	3	0,5	0,38	1,315
4m	4	0,5	0,38	1,315
4m	5	0,5	0,38	1,315

1.1. L'analyse respective du graphique obtenu permet de déterminer :

- Il existe une relation directe entre la hauteur d'aspiration (H_e) et l'efficacité de la pompe, car plus la hauteur d'aspiration est élevée, plus il y a d'énergie potentielle disponible à l'aspiration, qui est convertie en énergie cinétique et qui a donc une influence significative sur le débit de sortie.
- Il a été observé que les performances de haut débit diminuent avec l'augmentation des hauteurs de sortie.
- Les données de débit à une hauteur d'entrée de 2 mètres varient par rapport aux hauteurs d'entrée précédentes, enregistrant un débit de sortie plus élevé.

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, le bélier hydraulique est une solution efficace et écologique pour le pompage de l'eau. Ce système présente plusieurs avantages significatifs, notamment des performances améliorées et une portée accrue grâce à des modifications apportées à son entraînement et à sa conception. De plus, le bélier hydraulique fonctionne de manière autonome, ne nécessitant ni combustible fossile ni électricité, ce qui réduit les coûts d'exploitation et contribue à la préservation de l'environnement.

L'utilisation de sources d'alimentation alternatives telles que l'eau de pluie et les eaux grises permet d'économiser les ressources en eau potable, favorisant ainsi une utilisation plus efficace et durable de cette ressource précieuse. Dans les endroits où les conditions d'approvisionnement, de conduction et de réutilisation de l'eau sont adéquates, le bélier hydraulique offre une solution pratique, réduisant les coûts et la consommation d'eau.

En résumé, le bélier hydraulique représente une option prometteuse pour les systèmes de pompage, offrant des performances améliorées, une autonomie énergétique, une utilisation efficace des ressources en eau et des avantages environnementaux. Son utilisation peut contribuer à la préservation de l'eau, à la réduction des coûts opérationnels et à la promotion d'une approche plus durable de l'approvisionnement en eau.

Références bibliographiques

Les ouvrages :

- [1] Hafied, Y., "INFLUENCE DES TURBINES ETAT D'ARRET DANS UNE STATION HYDROELECTRIQUE, SUR LA VALEUR INITIALE DU COUP DE BELIER ,OU 'UNE SEULE TURBINE EN SERVICE PEUT ENGENDRER AU COURS DE SON ARRET BRUSQUE OU INSTANTANE ," MEMOIRE DE MAGISTER EN HYDRAULIQUE, 06 FEVRIER 2014 .
- [2] NAPOLEON, C ET NARTURO, D, "LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION D'UN POMPE A BELIER," MÉMOIRE DE FINE DES ÉTUDES EN MÉCANIQUE, JUILLET 2011.
- [3] DAGOBERTO, G ET RICARDO, D, "LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION D'UN POMPE A BELIER POUR USAGE RESIDENTIEL,"PROJET DE DIPLÔME POUR OBTENIR LE TITRE DE TECHNOLOGUE EN ASSAINISSEMENT L'ENVIRONNEMENT À FACULTÉ DE L'ENVIRONNEMENT ET DES RESSOURCES NATURELLES. COLOMBIE, 2015.
- [6] PAVILLON DE MANSE : LE BÉLIER HYDRAULIQUE
- [7] FÉDÉRATION PATRIMOINE ENVIRONNEMNT : LE PAVILLON DE MANS
- [8] BULLETIN DE L'ASSOCIATION DE SAUVEGARDE DES MOULINS À EAU DE LOIR-ET-CHER ET DÉPARTEMENTS LIMITROPHES, 2009, P. 12
- [9]« BÉLIER DOUGLA SAUMUSÉE - POMPEBÉLIER HYDRAULIQUE_» .
- [10] «_AUDIOGUIDE DU PARCOURS N°2 DU DOMAINE DÉPARTEMENTAL DE RESTINCLIÈRES (HÉRAULT, FRANCE)._» .

Références bibliographiques

- [11] « LE PARAGRAPHE "LE RÉSEAU HYDRAULIQUE" DANS LA PAGE "LES CIRCUITS DE RANDONNÉES ET BALADES" » .
- [12] « LES POINTS D'INTÉRÊTS PÉDAGOGIQUES DU DOMAINE DE RESTINCLIÈRES » .

Webographie :

- 🔗 [4] CHAT. OPEN AI [HTTPS://CHAT.OPENAI.COM](https://chat.openai.com)
- 🔗 [5] SUR LE SITE [HTTP://WWW.FR/HYDRAULIC-RAM/FRENCH/LE-BELIER.HTML](http://www.fr/hydraulic-ram/french/le-belier.html)