



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Laboratoire de Recherches des Sciences de l'Eau

Département hydraulique

Mémoire de Master

Thème :

Méthode de calcul aux écoulements transitoires-application au coup de béliet

Dirigé par :

S.BENZIADA

Réalisé et présenté par :

REZIG Omar

Soutenu le 15/06/2015 devant le jury suivant :

Pr. BENMAMAR
Dr.M.NAKIB
N. NEBACHE
S.BENZIADA

Président
Examineur
Examineur
Promoteur

Promotion 2015

ENP, 10 Avenue Hassan Badi BP. 186 EL HARRACH, ALGER

Remerciements

Merci à notre bon Dieu, notre guide, notre force, notre bonheur, et la raison de notre existante. C'est lui qui nous a fait comprendre le but de cette vie, et qui nous a donné le pouvoir d'aimer les gens et d'apprécier les choses. Merci d'être là dans les moments les plus difficiles.

Tout d'abord, je remercie Monsieur S.BENZIADA mon promoteur et surtout de travailler avec lui. Je suis très reconnaissant pour sa disponibilité, pour son écoute, ainsi que pour sa confiance pour bien mener ce travail.

et aussi mademoiselle S.Benmamar d'avoir été disponible pour les difficultés rencontrées ainsi que son encouragement dans le travail et surtout les moments d'écoutes et de besoins.

Je tiens aussi à remercier tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation particulièrement ceux du département d'Hydraulique de l'école polytechnique, de m'avoir donné la chance d'apprendre, et de nous faire partager leurs savoirs, sans eux je ne serai jamais arrivé à ce stade.

Je remercie toutes personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail de près ou de loin.

Dédicaces

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut. . .
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect,
la reconnaissance. Aussi, c'est tout simplement que je dédie ce projet de
fin d'étude....*

À mes chers parents

*Autant de phrases et d'expressions aussi éloquents soient-elles ne
sauraient exprimer ma gratitude et ma reconnaissance. Vous avez su
m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la
confiance en soi face aux difficultés de la vie.*

*Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je
ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous
décevoir. Que Dieu, le Tout-Puissant, vous préserve, vous accorde
santé, et bonheur.*

*À mes sœurs : Warda et Melissa et mes frères : Oussama et Nazim
Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour
dévoué et votre tendresse.*

À tous les membres de la famille Rezig et Derouel

*Et à tout ceux qui on collaboré de près ou de loin a l'élaboration de ce
travail*

*REZIG
omar*

المخلص

المنشآت المكونة لنظام التزويد بالماء الشروب للمنطقة المدروسة متنوعة و تتطلب تحكماً جيداً في جريان الماء تحت الضغط و خاصة جريان الماء الانتقالي (ظاهرة نطحة الكبش) اثناء الاستغلال. ولهذا تطرقنا في البداية للتعريف بالظاهرة و من ثمة النمذجة الرياضية و عرض مختلف الطرق و في النهاية تطبيقها على وضعية حقيقية من المنطقة المدروسة (محطة الضخ) و كذا تحليل النتائج.

الكلمات المفتاحية

ضربة المطرقة, جريان, المرحلة الانتقالية.

Résumé

Les ouvrages constituant le système d'adduction d'eau potable de la zone d'étude sont divers et nécessite une maîtrise parfaite de l'écoulement en charge, particulièrement l'écoulement transitoire « phénomène du coup de bélier » lors de l'exploitation. Donc, c'est pourquoi on s'est penché au premier lieu à la présentation du phénomène du coup de bélier ensuite la modélisation mathématique du phénomène et la présentation de différentes méthodes, et finalement l'application de ces méthodes sur un cas de notre zone d'étude « station de pompage meghnia 3 » et d'interpréter les résultats.

Mots clés :

Coup de bélier, écoulement, régime transitoire.

Abstract

The works constituting the drinking water supply system of the study area are diverse and requires a perfect mastery of the flow load, particularly the transient flow "water hammer phenomenon" during the operation. So that's why we looked at the first place was the presentation of the phenomenon of water hammer after mathematical modeling and presentation of different methods, and finally the application of these methods on a case of our zone study "pumping station meghnia 3" and interpret the results.

Key words :

Water hammer, flow, transitional régime.

SOMMAIRE

Chapitre I :

Présentation du phénomène du coup de bélier

Introduction	1
1. Classification des écoulements en charge	1
1.1. Ecoulement permanent	1
1.2. Ecoulement non permanent ou transitoire	1
2. Le phénomène du coup de bélier	2
3. Causes du coup de bélier	2
4. Les risques du coup de bélier	3
4.1. Risque de surpression	3
4.2. Pression négative	3
4.3. Fatigues des conduites.....	3
5. Moyens de protection contre le coup de bélier	3
5.1. Les volants d'inertie.....	4
5.2. Les cheminées d'équilibre	4
5.3. Les soupapes de décharge	4
5.4. Clapets	5
5.5. Ventouse	5
5.6. Les réservoirs d'air	6
6. Analyse physique du phénomène	6
6.1. Fermeture brusque ou instantané d'une vanne	6
6.2. Cas d'une conduite de refoulement	12
Conclusion.....	15

Chapitre II :

Modélisation mathématique des écoulements transitoires

Introduction	16
1. Hypothèse de base – intervention de la compressibilité de l'eau et de l'élasticité des canalisations	16
2. Equations fondamentales de l'écoulement transitoire en charge.....	17
2.1. Equation de continuité, compte tenu de la compressibilité de l'eau et de l'élasticité de la conduite	17
2.1.1. Compressibilité de l'eau	18
2.1.2. Dilatation de la conduite	18
2.2. Le théorème de la conservation de quantité de mouvement (Equation dynamique)	20
3. Les méthodes de résolution	22
3.1. Méthode graphique de Schnyder – Bergeron.....	22
3.1.1. Intérêt pratique de la méthode graphique	22
3.1.2. Principe de la méthode.....	23
3.2. Méthode des caractéristiques	26
3.3. Méthode de VIBERT.....	28
Conclusion.....	30

Chapitre III :

Présentation du logiciel (CEBELMAIL)

1. Historique de CEBELMAIL	31
2. cebelmail	31
2.1. CEBEL Educ	32
2.1.1. Caractéristiques.....	32
2.2. CEBEL Standard	32
2.2.1. Caractéristiques.....	32
2.3. CEBEL Pro	33
2.3.1. Caractéristiques.....	33
2.4. CEBEL Expert.....	33
2.4.1. Caractéristiques.....	33
2.5. Salto	33

Caractéristiques.....	33
3. L'interface de CEBELMAIL	33
4. Le moteur de calcul de CABELMAIL	34
5. L'évolution de CEBELMAIL	35
6. Modélisation.....	35
6.1. Les étapes de la modélisation sur CEBELMAIL.....	35
7. Domaines d'application	36
Conclusion.....	36

Chapitre IV :

Application sur les différentes méthodes

Introduction.....	37
1. Méthode de VIBERT.....	37
Calcul de la célérité d'ondes :	37
2. Méthode de Bergeron	40
3. Le logiciel Cebel-pro	41
3.1. Données de bases :	41
3.2. Calcul du régime transitoire.....	43
4. Interprétation des résultats	44
Conclusion.....	44
Conclusion générale.....	45
Références bibliographiques.....	46

Liste des figures

Figure I. 1 : cheminée d'équilibre	4
Figure I. 2 : soupape de décharge	5
Figure I. 3 : ventouse	5
Figure I. 4 : réservoir d'air	6
Figure I. 5 : système en fonctionnement normal	7
Figure I. 6 : dilatation (gonflement) partiel de la conduite	8
Figure I. 7 : dilatation (gonflement) totale de la conduite	8
Figure I. 8 : retour partiel de la conduite à l'état initial	9
Figure I. 9 : retour total de la conduite à l'état initial	9
Figure I. 10 : rétrécissement partiel de la conduite	10
Figure I. 11 : rétrécissement total de la conduite	10
Figure I. 12 : retour partiel de la conduite à l'état initial	11
Figure I. 13 : retour total de la conduite à l'état initial	11
Figure I. 14 : système en fonctionnement normal	12
Figure I. 15 : arrêt brusque de la pompe et contraction de la conduite	13
Figure I. 16 : retour de la conduite à l'état initial	13
Figure I. 17 : Dilatation de la conduite	14
Figure I. 18 : retour de la conduite à l'état initial	14
Figure II. 1 : schéma d'adduction gravitaire	16
Figure II. 2 : Elément élémentaire d'une conduite (Equation de continuité)	18
Figure II. 3 : dilatation de la conduite	19
Figure II. 4 : élément élémentaire d'une conduite (équation dynamique)	21
Figure II. 5 : sens des ondes F et f	24
Figure II. 6 : droites caractéristiques	25
Figure II. 7 : schéma utilisé pour la méthode des caractéristiques	27
Figure II. 8 : Abaque de M.VIBERT	29
Figure III. 1 : interface de CEBELMAIL	34
Figure IV. 1 : utilisation de l'Abaque de VIBERT	39
Figure IV. 2 : graph de Bergeron de la station de pompage meghnia 3	41
Figure IV. 3 : courbe caractéristique de la pompe	42
Figure IV. 4 : tracé du tronçon avec différents éléments	42
Figure IV. 5 : analyse des pressions le long de la conduite	43
Figure IV. 6 : optimisation du réservoir	44
Figure IV. 7 : résultats de l'optimisation	44

Liste des tableaux

Tableau IV. 1 : les valeurs de la courbe caractéristique	42
Tableau IV. 2 : récapitulatif des résultats	44

Introduction générale

Introduction générale

Dans notre projet on a une multitude d'ouvrages (station de pompage, réservoir, conduite d'adduction, etc.), cette multitude d'ouvrage demande une maîtrise parfaite des écoulements en charge.

Très particulièrement les écoulements transitoires dans les conduites d'adduction, malgré ces conduites fonctionnent généralement en régime permanent, mais il faut qu'elles résistent aux conséquences dues aux écoulements transitoires suite à l'arrêt des groupes électropompes pour les conduites de refoulement ou lors de la fermeture d'une vanne sur des conduites d'adduction gravitaire.

Nous savons que tout changement du régime permanent de l'écoulement dans un réseau en charge, suite à une modification de vitesse ou du débit, provoqué par une manœuvre d'une vanne ou par un arrêt brusque de pompage, génère un écoulement transitoire « coup de bélier ». Ceci entraîne souvent de brusque variation de pression. Les écarts de pression peuvent être très importants, si la modification du débit a été brusque. Par rapport au régime permanent, les pressions peuvent atteindre des valeurs excessives et causer des dégâts importants aux installations hydrauliques existantes (rupture de canalisations détérioration des équipements hydrauliques).

Chapitre I

Présentation du phénomène du coup de bélier

Chapitre I

Présentation du phénomène du coup de bélier

Introduction

L'importance technique des coups de bélier est extrêmement grande. L'amplitude et la soudaineté des surpressions et dépressions qui sont mises en jeu peuvent détériorer facilement la conduite ou les organes qui y sont branchés. Il est nécessaire par conséquent d'empêcher la production de telles perturbations ou du moins de les atténuer par les différents moyens de protection existants.

1. Classification des écoulements en charge

1.1. Ecoulement permanent

L'écoulement du liquide est dit permanent lorsque, en tout point de la conduite, les propriétés du fluide et les caractéristiques hydrauliques de celui-ci telles que masse volumique, débit, vitesse, charge, pression (ρ , Q , V , H , p) restent invariables dans le temps, c'est-à-dire:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; \frac{\partial Q}{\partial t} = 0; \frac{\partial H}{\partial t} = 0; \frac{\partial V}{\partial t} = 0; \frac{\partial p}{\partial t} = 0;$$

Ainsi les équations de mouvement se réduisent à une seule, qui peut être obtenue en écrivant pour un volume élémentaire quelconque du liquide l'équilibre des forces de pression, de pesanteur et d'inertie, soit :

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} + g \frac{dZ}{dx} + V \frac{dV}{dx} = 0$$

Avec, x : Abscisse compté horizontalement ; Z : altitude du volume élémentaire ; V : vitesse du volume élémentaire.

1.2. Ecoulement non permanent ou transitoire

L'écoulement du liquide est dit non permanent ou transitoire ou encore non stationnaire lorsque les paramètres hydrauliques et les propriétés du fluides, en un point donné de l'espace, varient dans le temps (t); autrement dit, les paramètres hydrauliques en écoulement transitoires sont les fonctions de quatre variables indépendantes à savoir les coordonnées (x , y , z) du point examiné et le temps (t), c'est-à-dire [1]:

$$V = f_1(x, y, z, t); p = f_2(x, y, z, t)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0; \quad \frac{\partial V}{\partial t} \neq 0; \quad \frac{\partial p}{\partial t} \neq 0$$

2. Le phénomène du coup de bélier

Le coup de bélier étant un cas particulier du régime transitoire [A.DUPONT, 1979], c'est un phénomène oscillatoire qui se manifeste dans les conduites en charge à écoulement gravitaire ou par refoulement et qui peut engendrer des dégâts considérables dans le réseau.

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 devenir dangereuses pour la tuyauterie. Ces variations résultent d'une perturbation des conditions permanentes d'écoulement.

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.

3. Causes du coup de bélier

Le coup de bélier est un phénomène oscillatoire dont les causes les plus fréquentes sont les suivantes [A.DUPONT, 1979] :

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

4. Les risques du coup de bélier

4.1. Risque de surpression

C'est l'une des conséquences du coup de bélier, qui génère une pression très importante suite à une fermeture rapide ou instantanée d'une vanne ou l'arrêt brusque d'une pompe. Si la somme de cette surpression avec la pression initiale (en régime permanent) dépasse la pression maximale admissible des canalisations, il peut y avoir fissuration de ce dernier et dislocation des joints [A.DUPONT, 1979].

4.2. Pression négative

C'est une autre conséquence du coup de bélier, l'apparition de cette pression négative est due aux soit à une forte surpression ou suite à l'arrêt instantané d'une pompe si cette pression devient inférieure à 10 m.c.e il se produit une poche de cavitation. Des conséquences néfastes peuvent être créées dans la conduite à la suite de cette pression négative, tel qu'aplatissement de la conduite par implosion, l'aspiration des joints et même le décollement de l'enduit de protection interne[A.DUPONT, 1979].

4.3. Fatigues des conduites

Le passage successif d'une surpression à une dépression et inversement même si ces perturbations sont minimales, elles ont une conséquence directe sur le matériau de la canalisation ce qui provoque leurs fatigues.

5. Moyens de protection contre le coup de bélier

Les moyens ou les appareils anti bélier ont un rôle essentiel c'est :

- De limiter la dépression.
- De limiter la surpression.

Les appareils utilisés sont les suivants :

❖ Dispositifs d'action directe :

- Volant d'inertie
- Clapet anti retour
- Vanne à fermeture automatique
- Amortisseurs en ligne

❖ Dispositifs d'action indirecte :

- Ballon anti bélier
- Cheminées d'équilibre
- Réservoir unidirectionnel
- Soupape de décharge
- By-pass
- Ventouses
- Déversoir

Dans ce qui suit, on va développer que les appareils les plus utilisés

5.1. Les volants d'inertie

Le volant d'inertie calé sur l'arbre du groupe constitue l'un de ces moyens grâce à l'énergie qu'il accumule pendant la marche normale. Le volant d'inertie la restitue au moment de la disjonction et permet ainsi d'allonger le temps d'arrêt de l'ensemble donc de diminuer l'intensité du coup de bélier. Les volants d'inertie interviennent dans la protection contre les dépressions.

5.2. Les cheminées d'équilibre

Une manière de réduire les surpressions dans une conduite consécutives à la fermeture d'une vanne de pied consiste à transformer les ondes de pression dans la conduite par des oscillations en masse dans un dispositif connecté à la conduite. C'est la fonction de la cheminée d'équilibre: colonne verticale ouverte, avec une surface libre, connectée en dérivation à la conduite, en amont de la vanne de pied .

Les cheminées d'équilibre assurent une protection contre les dépressions ainsi que les surpressions.



Figure I. 1 : cheminée d'équilibre

5.3. Les soupapes de décharge

Ce sont des dispositifs qui font dériver un certain débit hors du conduit principal lorsque la pression dans celui-ci dépasse la valeur de tarage. De cette façon, la pression se réduit à l'intérieur de la tuyauterie ou de l'équipement en question



Figure I. 2 : soupape de décharge

5.4. Clapets

Il existe différentes technologies de clapets : à battant à double battant, à disques concentriques, à boule, à membrane, etc. Le rôle commun à tous les clapets est d'empêcher l'écoulement du fluide dans un sens. Dans le cadre de l'étude des régimes transitoires, il faut connaître la caractéristique dynamique d'un clapet c'est-à-dire les différents degrés de fermeture en fonction de la décroissance du débit dans la conduite.

5.5. Ventouse

Ce type de dispositif se trouve généralement dans les points hauts du réseau, elle permet de protéger les canalisations :

- contre la difficulté de remplissage avec l'évacuation d'air à grand débit
- contre la mise en dépression lors de la vidange avec l'admission d'air à grand débit

Elles permettent aussi l'évacuation par la tuyère des petites quantités d'air accumulées aux points hauts des réseaux pendant l'exploitation du réseau



Figure I. 3 : ventouse

5.6. Les réservoirs d'air

L'alimentation continue de veine liquide après disjonction du groupe peut être effectuée à l'aide d'une réserve d'eau accumulée sous pression dans une capacité métallique disposée à la station de pompage et raccordée au refoulement.

Immédiatement à l'aval du clapet cette capacité contient de l'eau et de l'air en marche normale, la pression de cet air équilibre la pression dans la conduite au point considéré.

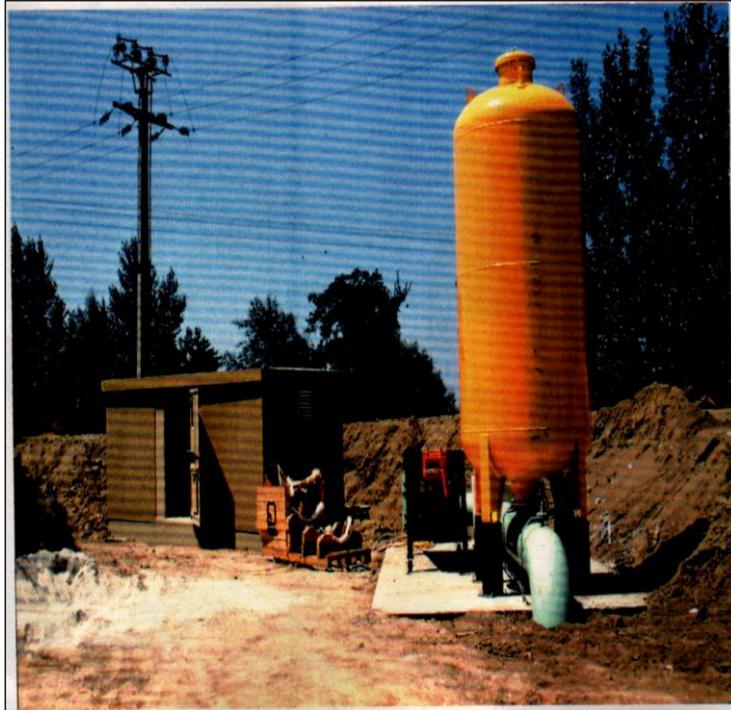


Figure I. 4 : réservoir d'air

6. Analyse physique du phénomène

De cette analyse on peut voir et comprendre les différentes phases engendrées par l'ouverture, fermeture d'une vanne ou l'arrêt brusque d'une pompe.

La fermeture d'une vanne placée sur une conduite entraîne la naissance d'une onde de surpression qui se propage à une grande vitesse (célérité d'onde) vers l'amont ou se trouve le réservoir, par contre l'ouverture de la même vanne donne naissance à une onde de dépression qui se propage à la même célérité vers le réservoir.

Un phénomène semblable, commençant par une dépression, se produira sur une conduite de refoulement, si le débit n'est plus fourni, suite à un arrêt brusque de la pompe.

6.1. Fermeture brusque ou instantané d'une vanne

D'après la fermeture brusque ou instantanée d'une vanne quatre phases peuvent être envisagées:

❖ Avant la fermeture

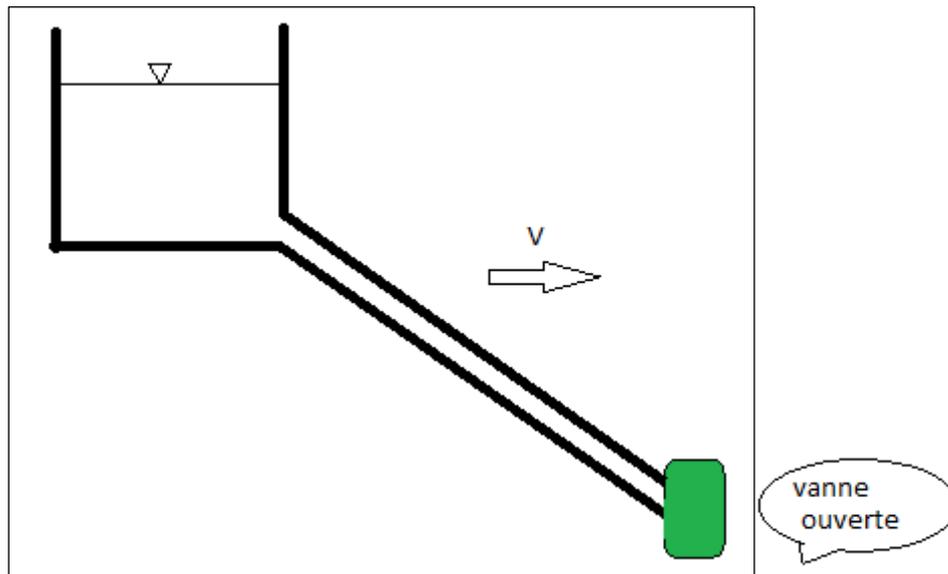


Figure I. 5 : système en fonctionnement normal

❖ Après la fermeture

Dans une conduite d'adduction gravitaire de nature donnée, munie à l'extrémité aval par une vanne, si on ferme cette vanne, une variation de la pression et de la vitesse en fonction de temps sera provoquée, c'est-à-dire qu'un régime variable se substituera au régime permanent initial. Ceci aura pour effet à l'endroit de la vanne :

- Annulation de la vitesse.
- Augmentation de la pression.
- Dilatation (éventuellement allongement) de la conduite dans les limites élastique.
- Compressibilité du liquide.

➤ Phase 01 :

On ferme instantanément la vanne, la couche de fluide à son contact est brusquement arrêtée en provoquant une surpression qui donne naissance à une onde qui va se propager vers le réservoir avec une célérité C

Le fluide devant l'onde continue d'arriver du réservoir à la vitesse V correspond au débit initial. Dernière l'onde, le fluide est stoppé et son accroissement de pression a occasionné la dilatation de la conduite.

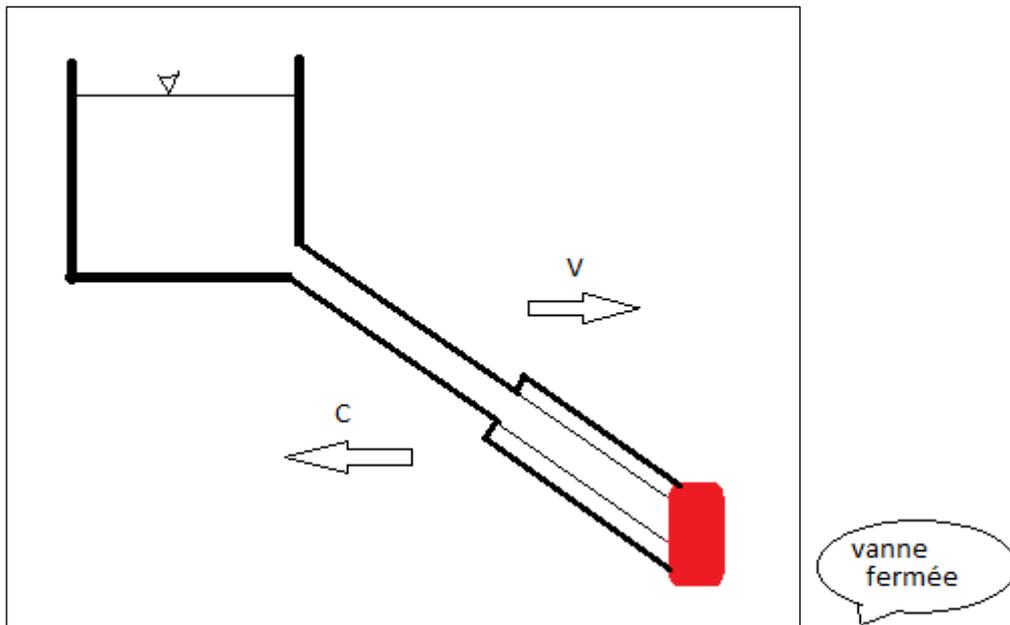


Figure I. 6 : dilatation (gonflement) partiel de la conduite

L'onde arrive au réservoir, tout le fluide est comprimé et immobilisé, l'équilibre est instable et la conduite est totalement délattée.

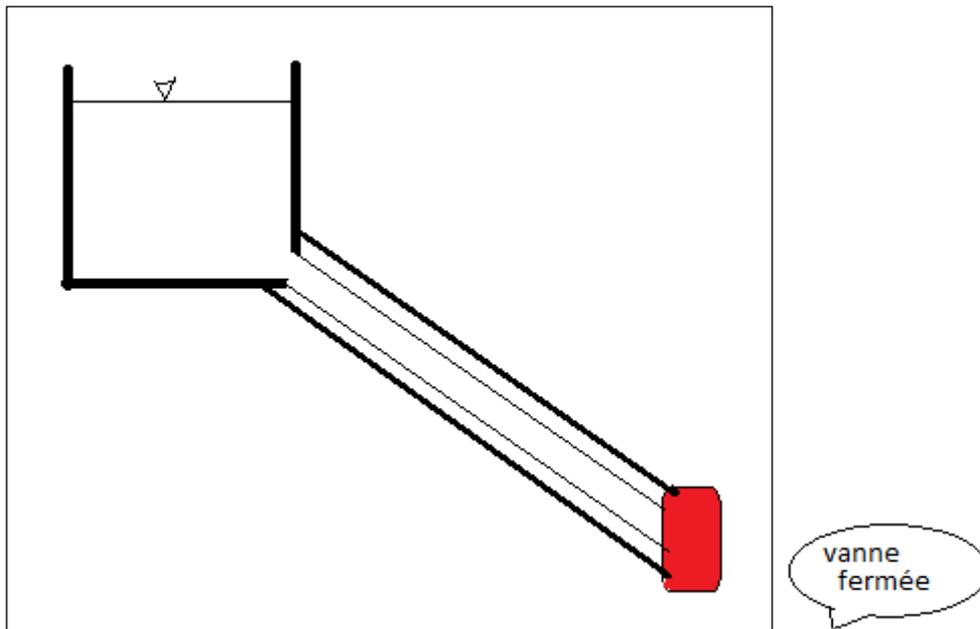


Figure I. 7 : dilatation (gonflement) totale de la conduite

➤ **Phase 2 :**

L'équilibre est instable et puisque la pression est plus faible à l'entrée du réservoir que dans la conduite et une onde repartira vers la vanne .on peut également dire que l'entrée du réservoir constitue une extrémité ouverte donc l'onde de pression se réfléchit en une onde de nature différente.

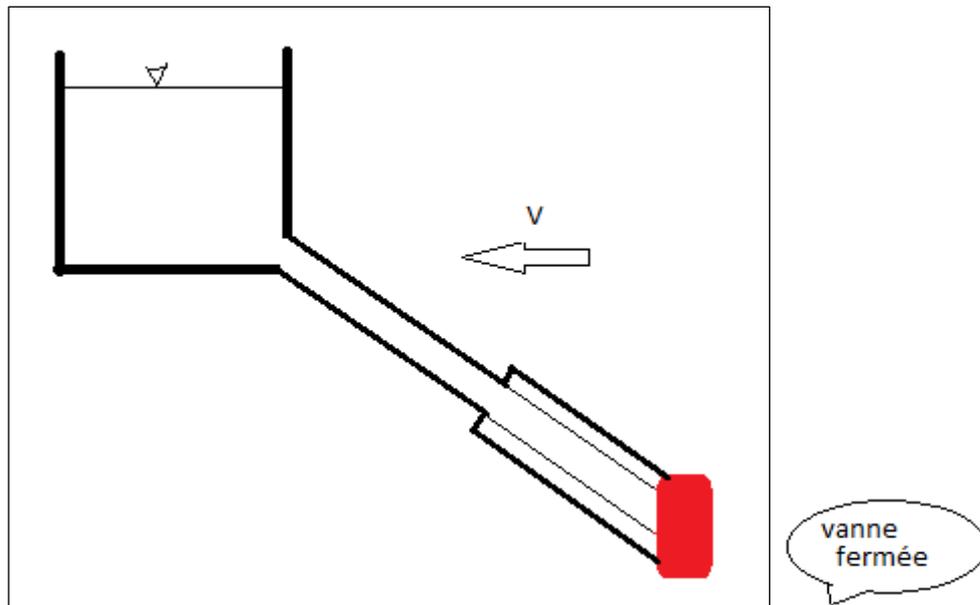


Figure I. 8 : retour partiel de la conduite à l'état initial

Dernière l'onde, la tuyauterie retrouve sa forme initiale en chassant à la vitesse V le fluide vers le réservoir.

La conduite reprend sa forme initiale et la pression sa valeur primitive.

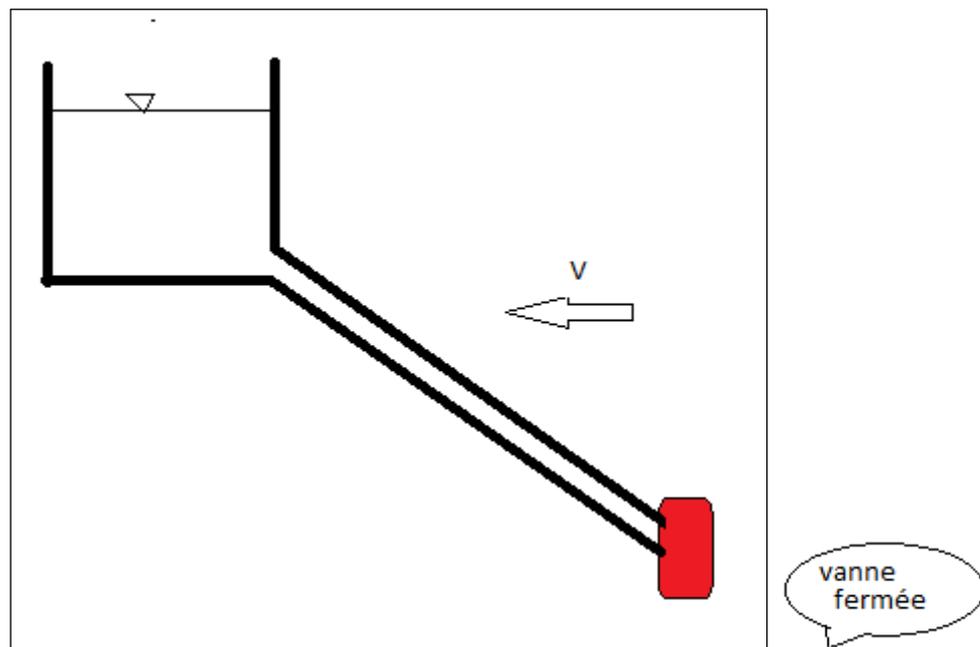


Figure I. 9 : retour total de la conduite à l'état initial

➤ **Phase 3 :**

La vitesse V du fluide est inversée dans toute la canalisation la vanne étant une extrémité fermée, il y'a réflexion d'une onde de même nature vis-à-vis de la pression, une onde de dépression retourne vers le réservoir.

Dernière l'onde la tuyauterie s'est contractée et la vitesse du fluide s'est annulée.

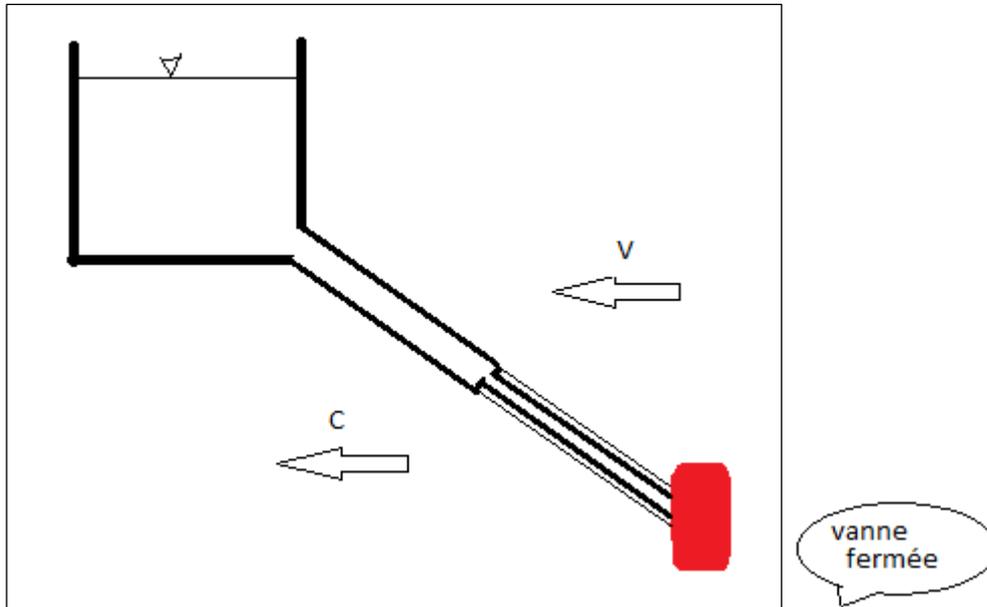


Figure I. 10 : rétrécissement partiel de la conduite

L'onde arrive au réservoir toute la conduite est en dépression et l'équilibre est instable.

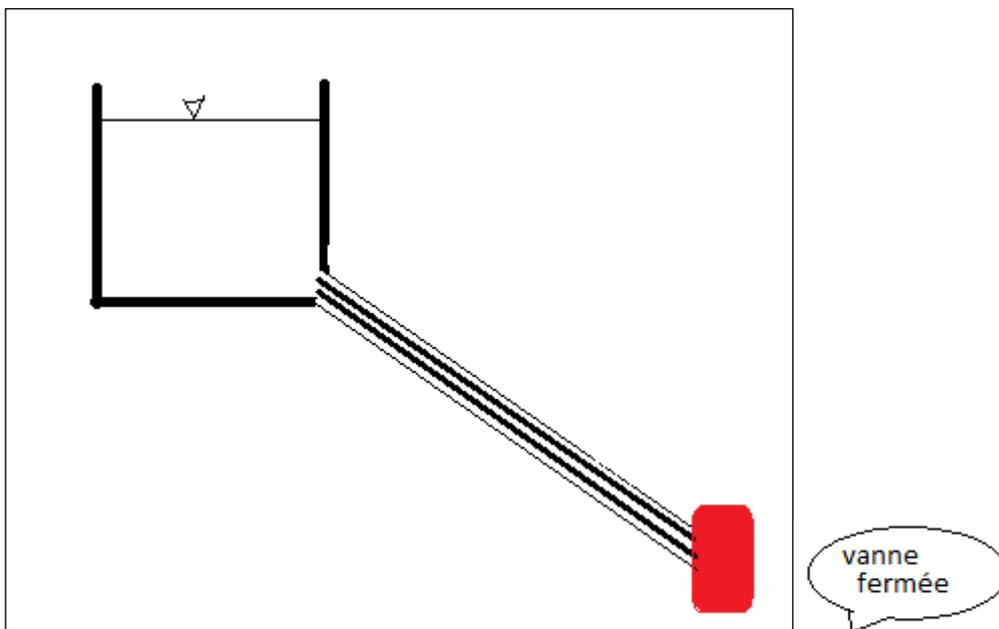


Figure I. 11 : rétrécissement total de la conduite

➤ **Phase 4 :**

l'équilibre est instable cette fois ,la pression est plus grande à l'entrée du réservoir que dans la conduite ,sur cette extrémité ouverte l'onde de dépression se réfléchit en une onde de nature différente.

Derrière l'onde ,la tuyauterie retrouve sa forme initiale et par conséquent le réservoir alimente de nouveau la conduite .

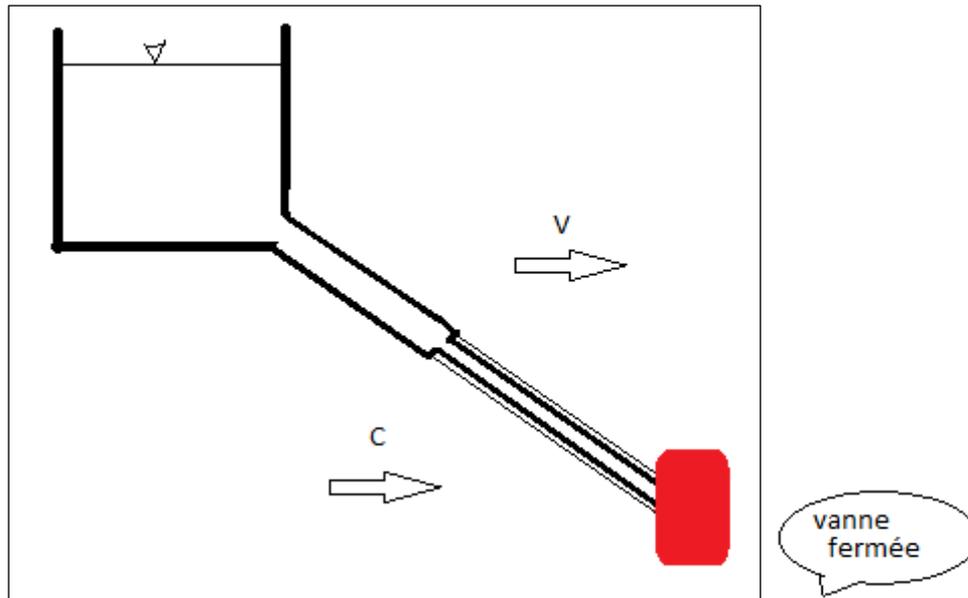


Figure I. 12 : retour partiel de la conduite à l'état initial

Le fluide et la conduite se retrouvent dans les conditions initiales.

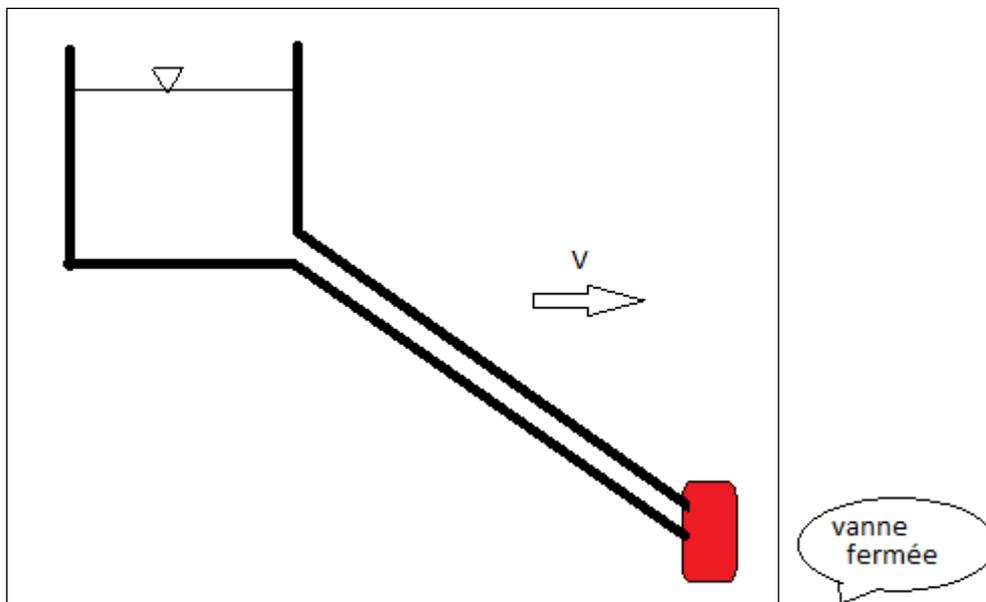


Figure I. 13 : retour total de la conduite à l'état initial

6.2. Cas d'une conduite de refoulement

Suite à une disjonction du moteur électrique, le débit ne soit brusquement plus fourni.

Ceci entraînera:

- La diminution de la pression au début de la conduite de refoulement.
- L'eau se déprime et la conduite se contracte.

Pour examiner ce cas, on considère une conduite de refoulement de diamètre D et de longueur L , dont le débit Q_0 se trouve brusquement arrêté à la suite d'une disjonction. On admettra une élasticité de la conduite et une compressibilité de l'eau. Quatre phases peuvent alors être envisagées après cet arrêt [PFE, A.ZEGRAR, 2012].

❖ Avant l'arrêt :

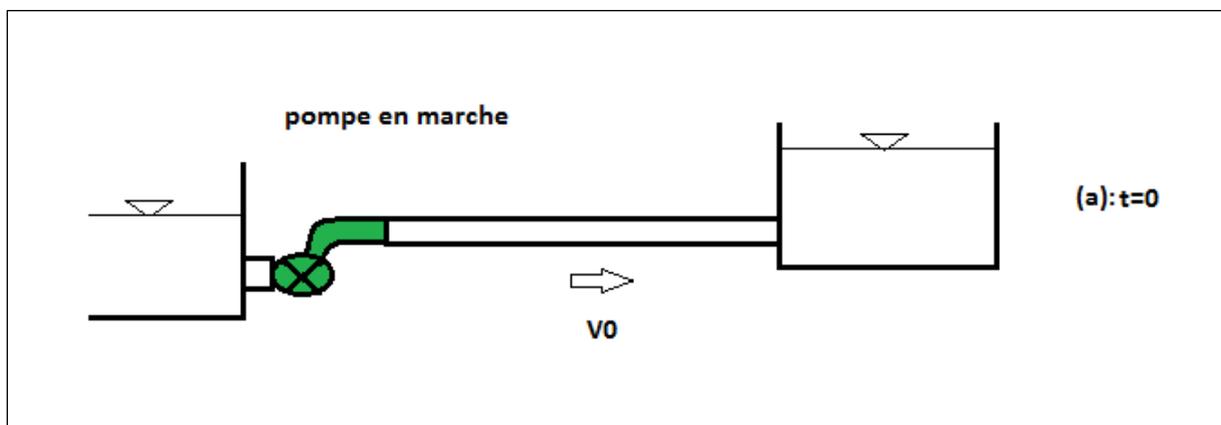


Figure I. 14 : système en fonctionnement normal

❖ Après l'arrêt :

➤ Phase 01 :

Par suite de son inertie, la colonne d'eau va poursuivre son chemin ascendant, mais la conduite n'est plus alimentée, il va donc se produire à partir de la pompe une dépression, de tranche en tranche l'eau se déprime et la conduite se contracte successivement par diminution élastique de son diamètre. L'onde de dépression se propage jusqu'au réservoir à une vitesse, ou célérité " a ". Le temps mis par cette onde pour atteindre le réservoir est $\frac{L}{a}$. Au bout de ce temps, la conduite est totalement en dépression et l'eau est immobile.

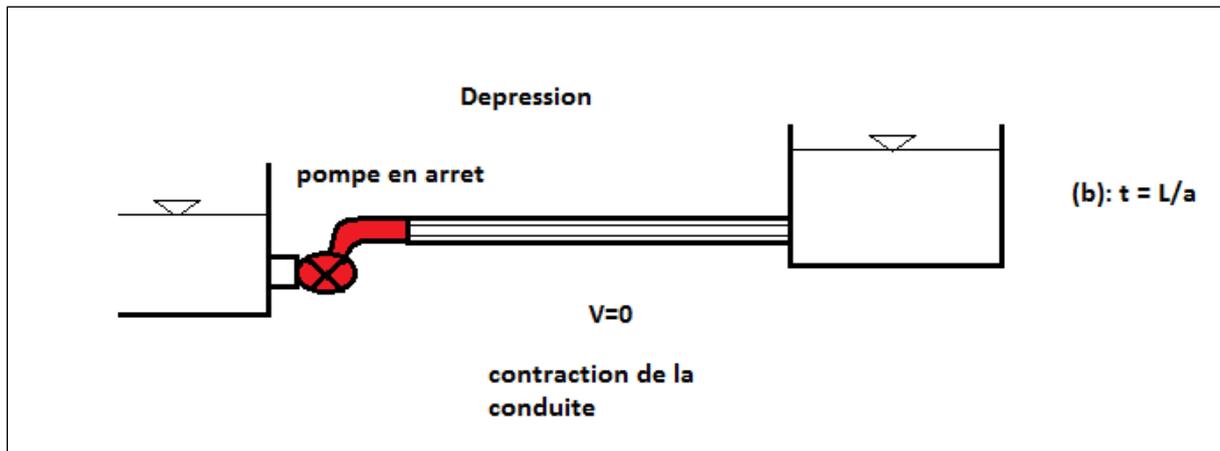


Figure I. 15 : arrêt brusque de la pompe et contraction de la conduite

➤ Phase 02 :

Lorsque l'onde de dépression atteint le réservoir, celle-ci se dissipe puisqu'il règne à cet endroit une pression constante. A ce moment précis, plus rien ne retient la mise en compression la conduite et par son élasticité, elle commence à reprendre sa forme initiale (diamètre initial) et cela de proche en proche, en considérant les tranches successives à partir du réservoir. L'eau revient alors dans la conduite et au bout d'un nouveau temps $\frac{L}{a}$, c'est-à-dire à $\frac{2L}{a}$ depuis l'origine du phénomène, tout l'eau redescendue mais va se trouver arrêtée par le clapet de la pompe qui entre temps s'est fermé.

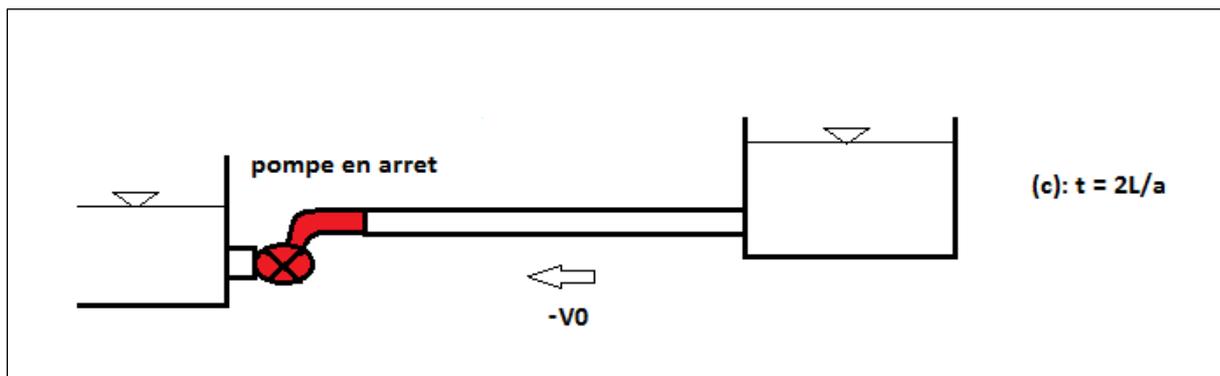


Figure I. 16 : retour de la conduite à l'état initial

➤ Phase 03 :

Au moment où toute la conduite a repris sa forme, la vitesse de l'eau doit s'annuler en frappant le clapet fermé. Encore une fois, on doit avoir transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle. Cette fois, l'énergie de pression est positive (surpression), puisque l'inertie de l'eau tend à comprimer la partie immobile de la colonne d'eau par les tranches suivantes provoquant une

dilatation de la conduite dans le sens pompe réservoir. Au bout d'un nouveau temps $\frac{L}{a}$ (c'est-à-dire à $\frac{3L}{a}$ depuis l'origine) toute la conduite sera dilatée avec une eau sur pressée, immobile (Fig. II-6-d).

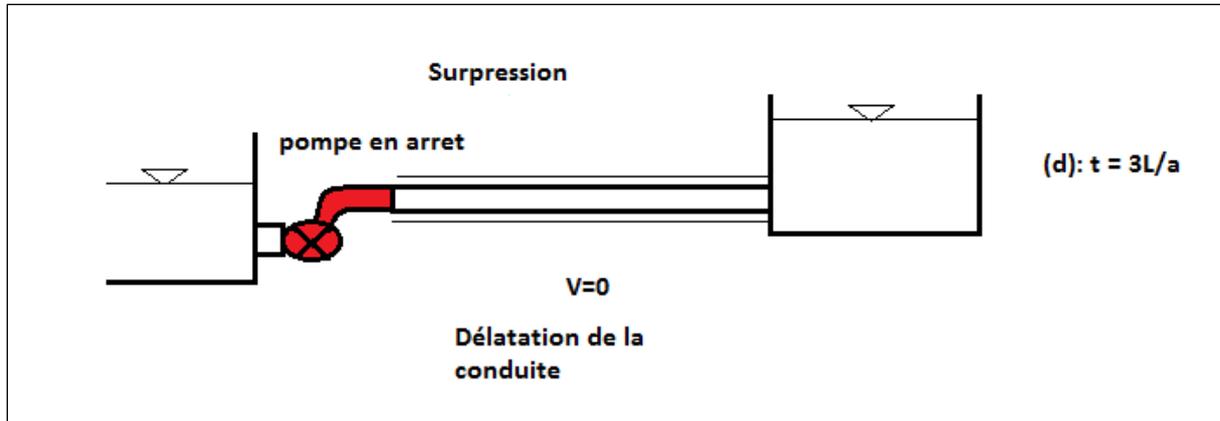


Figure I. 17 : Dilatation de la conduite

➤ Phase 04 :

Le surplus d'eau dû à l'augmentation du volume de la conduite commence à s'évacuer près du réservoir à une vitesse V_0 de façon à ce que la conduite, par son élasticité reprenne, de poche en poche du réservoir à la pompe son diamètre initial. A la fin de cette étape, c'est-à-dire à $\frac{4L}{a}$ depuis l'origine, toute la conduite aura retrouvé les conditions initiales et on se retrouve dans la même situation qu'au moment de l'arrêt brusque de la pompe et l'étape 1 pourra recommencer. Ce cycle de période $\frac{4L}{a}$ se répéterait indéfiniment, s'il n'y avait pas de frottement.

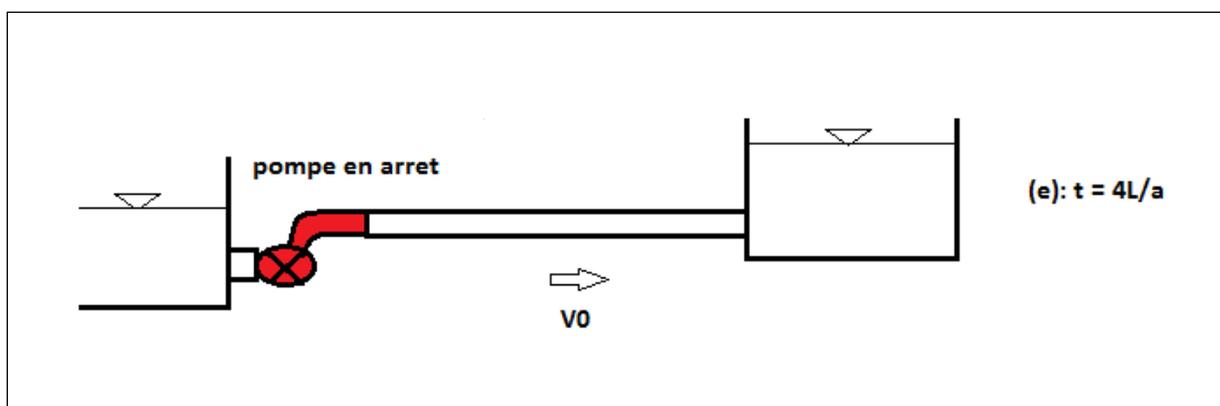


Figure I. 18 : retour de la conduite à l'état initial

Conclusion

Les écoulements transitoires en charge génèrent des ondes élastiques « coup de bélier ». Ces ondes peuvent créer des surpressions et des dépressions excessives. Ceci peut entraîner respectivement la rupture et l'aplatissement des canalisations en plus de la détérioration des installations hydrauliques. C'est pourquoi il est nécessaire de modéliser mathématiquement le coup de bélier et trouvé des résolutions à ces équations.

Chapitre II

Modélisation mathématique des écoulements transitoires

Chapitre II

Modélisation mathématique des écoulements transitoires**- Cas du coup de bélier****Introduction****1. Hypothèse de base – intervention de la compressibilité de l'eau et de l'élasticité des canalisations**

Soit la figure ci-dessous (Figure II.1) représentant une conduite d'adduction gravitaire AB alimentée en A par un réservoir, dont la surface libre est à la pression atmosphérique et terminée en B par une vanne.

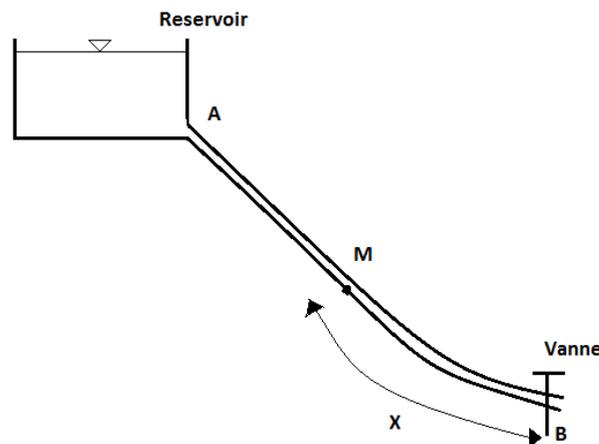


Figure II. 1 : schéma d'adduction gravitaire [M.CARLIER, 1980]

On suppose que la conduite est à caractéristique unique (le diamètre D , la nature et l'épaisseur e des parois de la canalisation AB soient constants).

Dans une section quelconque M de la canalisation, la vitesse et la pression sont représentées par les valeurs moyennes V et p qui sont fonctions de x et t . Par conséquent, il faudra deux équations pour résoudre le problème.

Dans le cas du coup de bélier, les hypothèses d'un liquide incompressible et d'un tuyau indéformable entraînera obligatoirement la rupture de la canalisation.

En fait, l'expérience montre que dans ce phénomène spécial, caractérisé par de rapides accroissements de pression, la compressibilité de l'eau et l'élasticité des parois de la canalisation ne peuvent être négligées. Ici, il s'agit d'un régime transitoire, créant des ondes élastiques où la pression, la vitesse et le débit varient à la fois dans le temps et en chaque point de la conduite.

2. Equations fondamentales de l'écoulement transitoire en charge

Dans le présent chapitre, on aborde l'aspect théorique des problèmes posés par les mouvements transitoires. Nous allons y établir les équations de base qui permettent de quantifier le phénomène du coup de bélier, et par conséquent de calculer et de dimensionner une protection anti-bélier.

Ces équations seront obtenues en appliquant à une tranche de la canalisation les deux lois principales à savoir :

- La loi de la conservation de la masse (équation de continuité),
- La loi de la conservation de la quantité de mouvement (équation dynamique).

Les dites équations différentielles ont été établies en 1901 par l'Italien LORENZO ALLIEVI.

2.1. Equation de continuité, compte tenu de la compressibilité de l'eau et de l'élasticité de la conduite [M.CARLIER, 1980]

Soit un élément élémentaire de la conduite d'une longueur dx (Figure II.2). La vitesse moyenne à travers la section amont (**S**) est v . A travers la section aval (**S'**), la vitesse est $V + \frac{\partial V}{\partial x} dx$. Pendant le temps dt , il entre par la face amont de la tranche considérée un volume $Sv dt$. Pendant le même temps, il sort par la face aval un volume $S \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} dx \right) dt$.

La quantité d'eau emmagasinée est donc:

$$\Delta W = -S \frac{\partial V}{\partial x} dx dt \quad \text{II-1}$$

Cet accroissement du volume est dû à la compressibilité de l'eau et à la dilatation de la conduite.

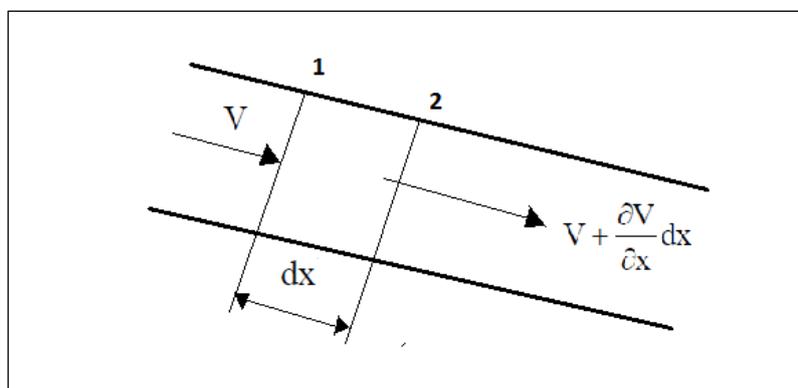


Figure II. 2 : Élément élémentaire d'une conduite (Equation de continuité)

2.1.1. Compressibilité de l'eau

Conformément à la loi de Hooke, la variation de pression dp (variation de la contrainte) entraîne une diminution de volume dW (déformation) de la masse d'eau dans la conduite telle que :

$$dp = -\varepsilon \frac{dW}{W} \text{ ou : } dW = -W \frac{dp}{\varepsilon} \quad \text{II-2}$$

ε : étant la compressibilité volumique de l'eau.

Mais :
$$p = \rho g h = \rho g (H - Z)$$

$$dp = \rho g \frac{\partial h}{\partial t} dt \text{ et } W = S dx$$

Donc :
$$dW = -\frac{1}{\varepsilon} S \rho g dx \frac{\partial h}{\partial t} dt \quad \text{II-3}$$

Cette diminution du volume dW correspond au volume supplémentaire d'eau qui a remplacé l'espace correspondant et qui s'est donc introduit dans la tranche considérée du fait de la compressibilité du liquide. Soit dW_1 ce volume supplémentaire, il est évidemment égal et opposé à dW , soit:

$$dW_1 = \frac{1}{\varepsilon} S \rho g dx \frac{\partial h}{\partial t} dt \quad \text{II-4}$$

2.1.2. Dilatation de la conduite [M.CARLIER, 1980]

Sous l'action de la pression p , la matière de la canalisation est soumise à une contrainte σ . Soit une conduite de longueur L et d'épaisseur e soumise à la pression p .

On considère l'équilibre de la moitié de la conduite (Figure II.3), on trouve :

$$\sigma = \frac{pD}{2e} \quad \text{II-5}$$

Avec ; D : diamètre intérieur de la conduite et e : épaisseur de la paroi.

La variation de pression dp entraîne une variation $d\sigma$ de la contrainte et on a :

$$d\sigma = \frac{D}{2} dp \quad \text{II-6}$$

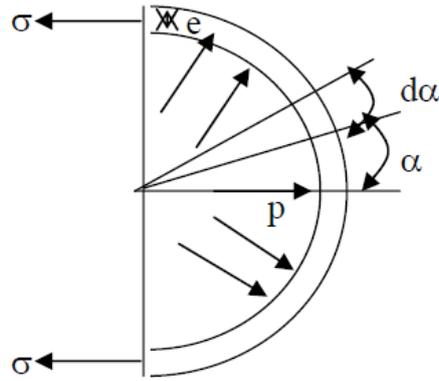


Figure II. 3 : dilatation de la conduite

L'augmentation de la contrainte $d\sigma$ (effort) entraîne un accroissement du diamètre dD (déformation) donné par la loi de Hooke :

$$d\sigma = E \frac{dD}{D} \quad \text{II-7}$$

Avec ; E : module d'Young ou module d'élasticité de la paroi de la conduite.

Des relations précédentes, on déduit:

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\sigma}{E} = \frac{Ddp}{2Ee} \quad \text{II-8}$$

L'accroissement du diamètre dD entraîne un accroissement de la section dS tel que :

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dD}{D} \quad \text{II-9}$$

Donc :

$$dS = 2S \frac{dD}{D} = \frac{SDdp}{Ee} \quad \text{II-10}$$

La tranche considérée emmagasine, de ce fait, un volume d'eau supplémentaire:

$$dW_2 = dSdx = \frac{SDdp}{Ee} dx \frac{SD}{Ee} dx \rho g \frac{\partial h}{\partial t} dt \quad \text{II-11}$$

L'équation de continuité s'obtiendra en écrivant que l'accroissement du volume d'eau dW dû à la variation de la vitesse (Equation II.1) est égal à la somme de l'accroissement du volume dW_1 et dW_2 , soit:

$$-S \frac{\partial v}{\partial x} dx dt = \frac{1}{\varepsilon} S \rho g dx \frac{\partial h}{\partial t} dt + \frac{SD}{Ee} \rho g dx \frac{\partial h}{\partial t} dt \quad \text{II-12}$$

Ou en simplifiant par $Sdxdt$:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\rho g \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right) \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{II-13}$$

On pose :

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\rho g}{g} \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right) = \rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right)$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} \right)}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\rho}}}{\sqrt{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee}}} \quad \text{II-14}$$

La constante "a" a les dimensions d'une vitesse et représente la vitesse de propagation des ondes de vitesse et de pression dans le liquide.

La vitesse de l'onde "a" augmente avec toute augmentation de ε , E et e et elle diminue avec toute augmentation de D et de ρ .

L'équation de continuité s'écrit donc :

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{a^2} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad \text{II-15}$$

Sachant que : $dp = \rho g \frac{\partial h}{\partial t} dt$, par conséquent $\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dt}$ et l'équation de continuité

$$\text{s'écrit :} \quad \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho a^2} \frac{dp}{dt} = 0, \text{ ou : } \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{II-16}$$

Etant donné que la variation de p en fonction de x est négligeable par rapport aux variations avec t.

En exprimant $\frac{dp}{dt}$ en fonction de ses dérivées partielles, on obtient:

$$\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} \right] + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{II-17}$$

2.2. Le théorème de la conservation de quantité de mouvement (Equation dynamique)

On applique à un petit élément de la conduite le théorème de la quantité de mouvement qui stipule que la dérivée de la quantité de mouvement est égale à la somme des forces extérieures appliquées à l'élément fluide.

Les projections des forces extérieures sur l'axe de la conduite sont le poids, la force de pression et les forces de frottement.

$$\frac{d(mV)}{dt} = m \frac{dV}{dt} = \rho S dx \frac{dV}{dt} = \sum F_{ext} \quad \text{II-18}$$

Avec, $\sum F_{ext}$: la somme des forces extérieures ; m : la masse du petit élément et v : la vitesse moyenne d'écoulement.

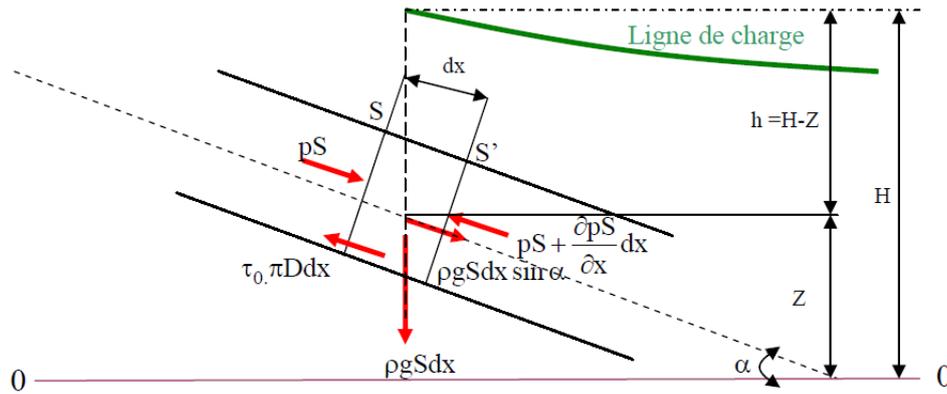


Figure II. 4 : élément élémentaire d'une conduite (équation dynamique)

$$\Sigma F_{ext} = pS - \left(pS + \frac{\partial pS}{\partial x} dx \right) + \rho g S dx \sin \alpha - \tau_0 \pi D dx \quad \text{II-19}$$

Donc :

$$-p \frac{\partial S}{\partial x} dx - S \frac{\partial p}{\partial x} dx + \rho g S dx \sin \alpha - \tau_0 \pi D dx = \rho S dx \frac{dV}{dt} \quad \text{II-20}$$

En négligeant le terme contenant $\frac{\partial S}{\partial x}$ et en divisant par $\rho S dx$, on obtient :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \alpha - \frac{\tau_0 \pi D}{\rho S} = \frac{dV}{dt} \quad \text{II-21}$$

On détermine d'abord le terme $\tau_0 \pi D$. Les pertes de charge étant représentées par Δp donnée par la formule suivante : $\Delta p = \rho g \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$

On peut écrire alors que la force de frottement F_r se calcule par l'une des deux formules suivantes :

$$F_r = \tau_0 \pi D L \text{ ou } F_r = \Delta p \frac{\pi D^2}{4}$$

D'où l'on déduit facilement :

$$\tau_0 \pi D = \rho g \frac{\lambda V^2 \pi D^2}{D 2g 4} = \rho g j S \quad \text{II-22}$$

Avec,

$$j = \frac{\lambda V^2}{D 2g} : \text{représente le gradient hydraulique.}$$

On porte l'expression de $\tau_0 \pi D$ dans la formule (II-21), on aura :

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \sin \alpha + gj = 0 \quad \text{II-23}$$

En exprimant $\frac{dV}{dt}$ en fonction de ses dérivées partielles, on obtient en définitif :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = g(\sin \alpha - j) \quad \text{II-24}$$

Comme : $p = \rho gh = \rho g(H - Z)$ et $\frac{dZ}{dx} = -\sin \alpha$

Donc :

$$\frac{dV}{dt} + g \frac{\partial H}{\partial x} + gj = 0 \quad \text{II-25}$$

En remplaçant j par sa formule, on aura définitivement l'équation dynamique suivante :

$$\frac{dV}{dt} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\lambda V^2}{2D} = 0 \quad \text{II-26}$$

Les relations (II.17) et (II.24) sont les équations de l'écoulement transitoire monophasique sous pression, elles ont été établies par Saint Venant et pour cette cause qu'elles portent son nom.

Donc le système de Saint Venant régissant les écoulements transitoires en charge est le suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = g(\sin \alpha - j) \\ \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} \right] + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad \text{II-27}$$

3. Les méthodes de résolution

3.1. Méthode graphique de Schnyder – Bergeron

3.1.1. Intérêt pratique de la méthode graphique

La méthode graphique a été proposée en 1929 par Othmar Schnyder pour le calcul des coups de bélier dans les conduites de refoulement des pompes, qu'il a ensuite étendue aux systèmes en charge quelconques en particulier aux conduites forcées (1932). Indépendamment de Schnyder, Louis Bergeron a proposé la même méthode en 1931.

La méthode graphique est exactement une traduction graphique des équations aux caractéristiques établies précédemment et permet de résoudre tous les problèmes, aussi complexes soient-ils, mais c'est alors au prix d'un travail long et délicat. La méthode graphique peut s'adapter aux problèmes les plus divers, de sorte qu'elle est devenue un moyen auxiliaire indispensable pour les ingénieurs concepteurs. Elle permet d'aboutir d'une manière élégante et relativement simple à une solution générale des problèmes qui à première vue, paraissent les plus compliqués.

Le plus grand avantage de la méthode graphique est en effet de suivre le phénomène étudié avec une rigueur et une fidélité absolue, d'en être même l'exacte reconstitution qui s'accomplit en fait sous les yeux du calculateur, comme au ralenti, de sorte qu'il lui est loisible, à chaque instant de l'analyser et de le discuter. Ce qui justifie et motive cette opinion, c'est que, à chaque instant, on connaît à la fois la pression et le débit, et non la pression seule, comme cela est le cas dans les méthodes algébrique de calcul de propagation d'ondes. Plus encore, elle permet de connaître le changement d'état : pression – débit qui, provoqué en un lieu à un instant donné, se propage en se reproduisant identiquement en chaque lieu où il passe.

Grâce à cette loi simple, il suffit en partant du régime permanent initial, de parcourir à la célérité des ondes le milieu où se produit le phénomène, pour que celui-ci se traduise sur une épure qui est en

quelque sorte à quatre dimensions, les coordonnées de chaque point du plan donnant la pression et le débit, et chaque point recevant une cote qui indique le temps et le lieu où ce régime existe.

Enfin, à tous ces avantages, il faut encore ajouter la rapidité d'établissement d'une épure, l'impossibilité de commettre des erreurs et l'exactitude numérique des résultats ainsi obtenus [L.BERGERON, 1950].

3.1.2. Principe de la méthode

La surpression ou la dépression due au coup de bélier, en un point quelconque d'une conduite à caractéristique unique à un instant déterminé, résulte de la superposition à la pression statique de deux ondes F et f se déplaçant, le long de la conduite, en sens inverse l'une de l'autre avec une même vitesse a. On a les équations d'Alliévi:

$$H - H_0 = F \left(t - \frac{x}{a} \right) + f \left(t + \frac{x}{a} \right) \quad \text{II-28}$$

$$-\frac{a}{g}(V - V_0) = F \left(t - \frac{x}{a} \right) - f \left(t + \frac{x}{a} \right) \quad \text{II-29}$$

En introduisant le débit $Q = Sv$ et en additionnant et en retranchant membre à membre les équations, on obtient:

$$H - H_0 - \frac{a}{gS}(Q - Q_0) = 2F \quad \text{II-30}$$

$$H - H_0 + \frac{a}{gS}(Q - Q_0) = 2f \quad \text{II-31}$$

Imaginons un observateur se déplaçant à la vitesse "a" selon la loi $x + at = \text{Cte}$, soit :

$x = -at + \text{Cte}$ (Caractéristique C-),

C'est-à-dire que cet observateur remonte le courant de N vers M. Supposons qu'à l'instant t_1 , cet observateur se trouve au point N (Figure II.5), d'abscisse $x_1 = -at_1 + \text{Cte}$ de la conduite et dont les paramètres Q_1 et H_1 sont connus à l'instant t_1 .

A l'instant $t = t_1 + \Delta t$, cet observateur se trouve en un point C d'abscisse $x = x_1 - a\Delta t + \text{Cte}$.

On remarque que pour cet observateur, l'onde $F \left(t - \frac{x}{a} \right)$ est constante.

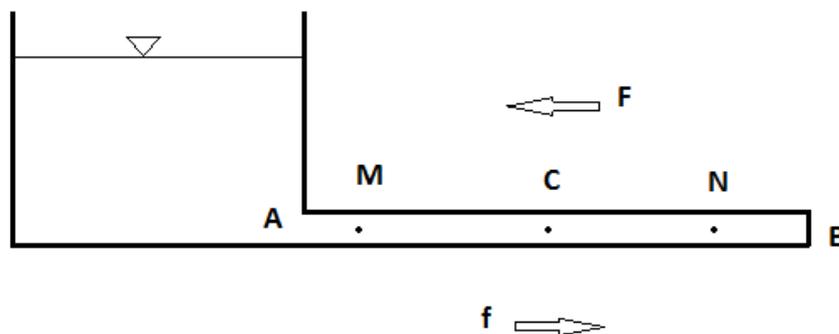


Figure II. 5 : sens des ondes F et f

En conséquence, si l'on applique l'expression (II.30) pour les deux instants t et t_1 , on obtient:

$$H - H_0 - \frac{a}{gS}(Q - Q_0) = 2F \quad \text{II-32}$$

$$H_1 - H_0 - \frac{a}{gS}(Q_1 - Q_0) = 2F \quad \text{II-33}$$

D'où :
$$H - H_1 = \frac{a}{gS}(Q - Q_1) \quad \text{II-34}$$

La fonction $H(Q)$ définie par l'équation (II-34) est une droite ϕ dans le plan (Q,H) passant par un point de coordonnées (Q_1, H_1) qui n'est autre que le point représentatif, dans le plan (Q,H) , des caractéristiques Q et H que trouvera l'observateur dans son déplacement le long de la conduite selon la loi $x = -at + Cte$ et ce au temps t_1 , c'est-à-dire au point N . Cette droite est dite de coefficient angulaire (pente) $+\frac{a}{gS}$ (figure II.6.a). Dans le plan (x, t) , l'observateur même se déplaçant à la même vitesse "a" dans le sens contraire d'écoulement parcourra une droite dite caractéristique C- de pente "-a" (figure II.6.a).

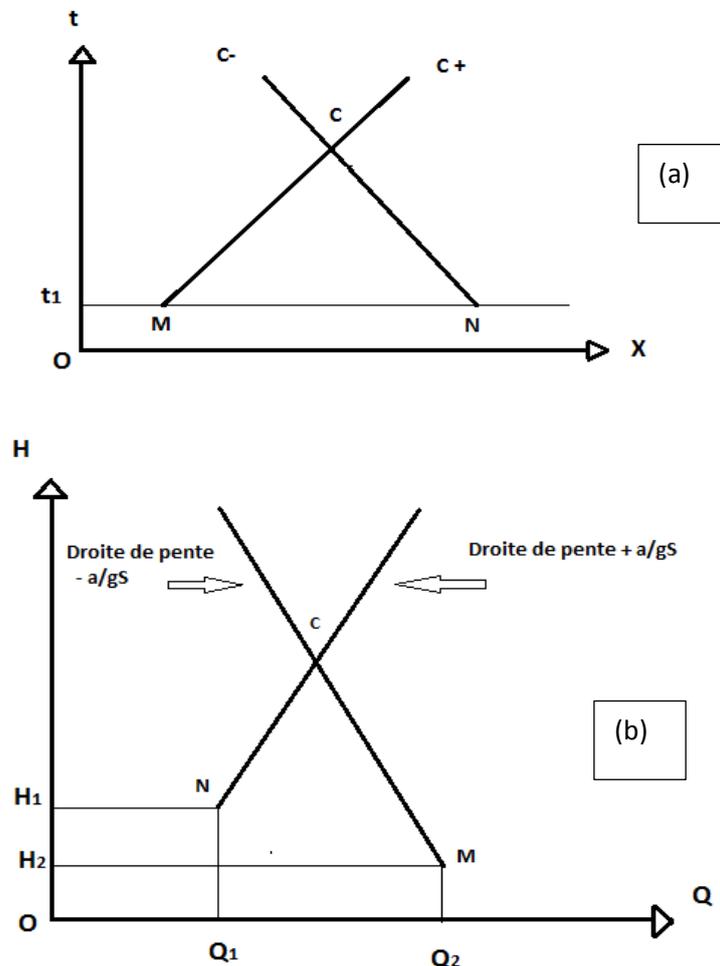


Figure II. 6 : droites caractéristiques

Si l'on imagine un autre observateur qui descend dans le sens du courant, suivant la loi $x = at + C_{te}$, il parcourra une droite dite caractéristique $C+$ de pente "a" dans le plan (x, t) . Pour cet observateur partant du point M vers le point N au temps t_2 , la fonction $f\left(t + \frac{x}{a}\right)$ reste constante.

En conséquence, si l'on applique l'expression (II.28) pour les deux instants t et t_1 , on obtient:

$$H - H_0 + \frac{a}{gS}(Q - Q_0) = 2f \quad \text{II-35}$$

$$H_2 - H_0 + \frac{a}{gS}(Q_2 - Q_0) = 2f \quad \text{II-36}$$

D'où:
$$H - H_2 = -\frac{a}{gS}(Q - Q_2) \quad \text{II-37}$$

L'équation (II.37) a pour représentation dans le plan (Q, H) une droite φ de pente $-\frac{a}{gS}$.

Cette droite passe par le point de coordonnées (Q_2, H_2) , qui n'est autre que la représentation graphique des caractéristiques que laissera au point M le second observateur à son départ du point M au temps t_1 .

Ainsi, on a obtenu deux équations (II-34) et (II-37) avec deux inconnues Q et H . Pour résoudre ce système, il suffit de tracer les deux droites représentatives et au point d'intersection de ces deux droites seront définies les inconnues Q et H (coordonnées du point C dans le plan (Q, H)). Ce point d'intersection traduit en réalité le fait que les deux bonhommes de Bergeron constateront exactement les mêmes paramètres Q et H à leur point d'intersection. C'est le principe fondamental de la construction graphique de Bergeron.

❖ En définitive le principe de base de la méthode graphique peut s'énoncer comme suit:

« Si un observateur part d'un lieu M au temps t, où le régime est (H_M, Q_M) (point figuratif t_M) et s'il se déplace le long de la conduite avec la vitesse « a », il constate qu'en tout lieu au moment où il passe, la pression H et le débit Q sont liés l'un à l'autre par la même loi linéaire qui ne dépend que des constantes a et S de la conduite, du régime (H_M, Q_M) existant à l'instant et au lieu de son départ et du sens de son déplacement » .

3.2. Méthode des caractéristiques

La méthode des caractéristiques consiste à écrire les deux équations aux dérivées partielles du mouvement dans les axes liés aux trajectoires des perturbations. Ces équations sont exprimées en forme de différences finies en utilisant un intervalle de temps dt bien spécifié. Les solutions sont obtenues à l'aide d'un calculateur. La méthode présente certains avantages dont on citera :

- Les conditions aux limites sont facilement programmables.
- La stabilité de la solution est assurée.
- Les systèmes les plus complexes peuvent être manipulés facilement.
- La programmation des équations est très aisée.

En effet lorsqu'un réseau multi branches est composé de plusieurs conduites avec des propriétés différentes, de termes non linéaires des équations principales sont importants, ou encore dans le cas des écoulements di-phasiques, ce qui nécessite d'utiliser autres méthodes qui peuvent résoudre ce genre de problème (schémas explicites ou implicites).

Considérons l'équation de continuité et l'équation de mouvement sans frottement que nous multiplions par c/gS :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gS} \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad \text{II-38}$$

$$\frac{a}{gS} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + g S \frac{\partial H}{\partial x} \right) = 0 \quad \text{II-39}$$

En combinant ces deux équations par addition et soustraction, nous obtenons :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[H \pm \frac{aQ}{gS} \right] \pm a \frac{\partial}{\partial x} \left[H \pm \frac{aQ}{gS} \right] = 0 \quad \text{II-40}$$

Cette forme est égale à la dérivée totale par rapport au temps :

$$\frac{d}{dt} \left[H \pm \frac{aQ}{gS} \right] = 0 \quad \text{II-41}$$

$$\text{Si : } \frac{dx}{dt} = \pm a \quad \text{II-42}$$

Dans un plan x, t , l'équation (II.42) représente des courbes (ici des droites) sur lesquelles le système (II.41) est vérifié. L'intersection de deux de ces droites définit donc une solution de ce système d'équations (Figure II.7).

Avec, $C+$: caractéristique positive et $C-$: caractéristique négative.

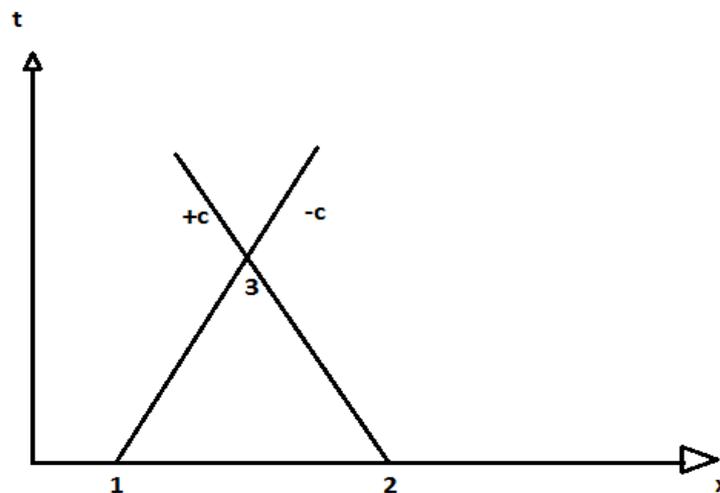


Figure II. 7 : schéma utilisé pour la méthode des caractéristiques

Ainsi, si les points 1 et 2, situés au temps initial, représentent des positions où les valeurs des pressions et débits sont connus, alors il sera possible de calculer les valeurs au point 3, situé en $\Delta x/2$ et $\Delta t/2$ en considérant une forme différentielle du système (II.42) .

$$\frac{\Delta}{\Delta t} \left[H \pm \frac{aQ}{gS} \right] = 0 \quad \text{II-43}$$

Ce qui donne :

Entre 1 et 3 :

$$H_3 + \frac{aQ_3}{gS} = H_1 + \frac{aQ_1}{gS} \quad \text{II .44}$$

Entre 2 et 3 :

$$H_3 - \frac{aQ_3}{gS} = H_2 - \frac{aQ_2}{gS} \quad \text{II-45}$$

d'où :

$$H_3 = \frac{1}{2} \left[H_1 + H_2 + \frac{a}{gS} (Q_1 - Q_2) \right] \quad \text{II-46}$$

et

$$Q_3 = \frac{1}{2} \left[\frac{gS}{a} (H_1 + H_2) + (Q_1 + Q_2) \right] \quad \text{II-47}$$

Remarque :

La méthode des caractéristiques transforme les deux équations de ST-VENANT aux dérivées partielles en quatre équations différentielles totales. Ces équations sont exprimées en forme de différences finies.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \pm a \\ d \left(\frac{a}{gS} Q \pm H \right) + j dx = 0 \end{array} \right. \quad \text{II-48}$$

Ces dernières équations différentielles totales peuvent être intégrées formant ainsi des équations de différences finies qui peuvent être facilement manipulées numériquement.

3.3. Méthode de VIBERT

En faisant abstraction des pertes de charges dans la conduite de refoulement et en considérant le phénomène comme une oscillation en masse, on arrive à un calcul simplifié.

En plus il est supposé que le dispositif, ne comporte pas d'organe d'étranglement, VIBERT arrive à une expression qui donne le volume d'air (U_0) continu dans le réservoir sous un régime de marche à la vitesse (v_0).

L'expression donnant le volume d'air U_0 est la suivante :

$$U_0 = \frac{v_0}{2gH_0} \times \frac{LS}{f\left(\frac{H}{H_0}\right)} \quad \text{II-49}$$

Avec , 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) ; H_0 : hauteur de pression absolue dans le réservoir en régime normal (permanent) (m) **et** H : hauteur de pression dans le réservoir après fonctionnement de phénomène transitoire (m).

L'expression donnant U_0 a fait l'objet d'un abaque, la formule a été mise sous la forme :

$$\frac{U_0}{LS} = \frac{v_0^2}{2G} \frac{1}{z_0} \frac{1}{f\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{II-50}$$

En posant :
$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g} \quad \text{II-51}$$

On obtient :
$$U_0 = \frac{h_0}{z_0} \frac{LS}{f\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{II-52}$$

Ces expressions se retrouvent sur les trois échelles de l'abaque de VIBERT.

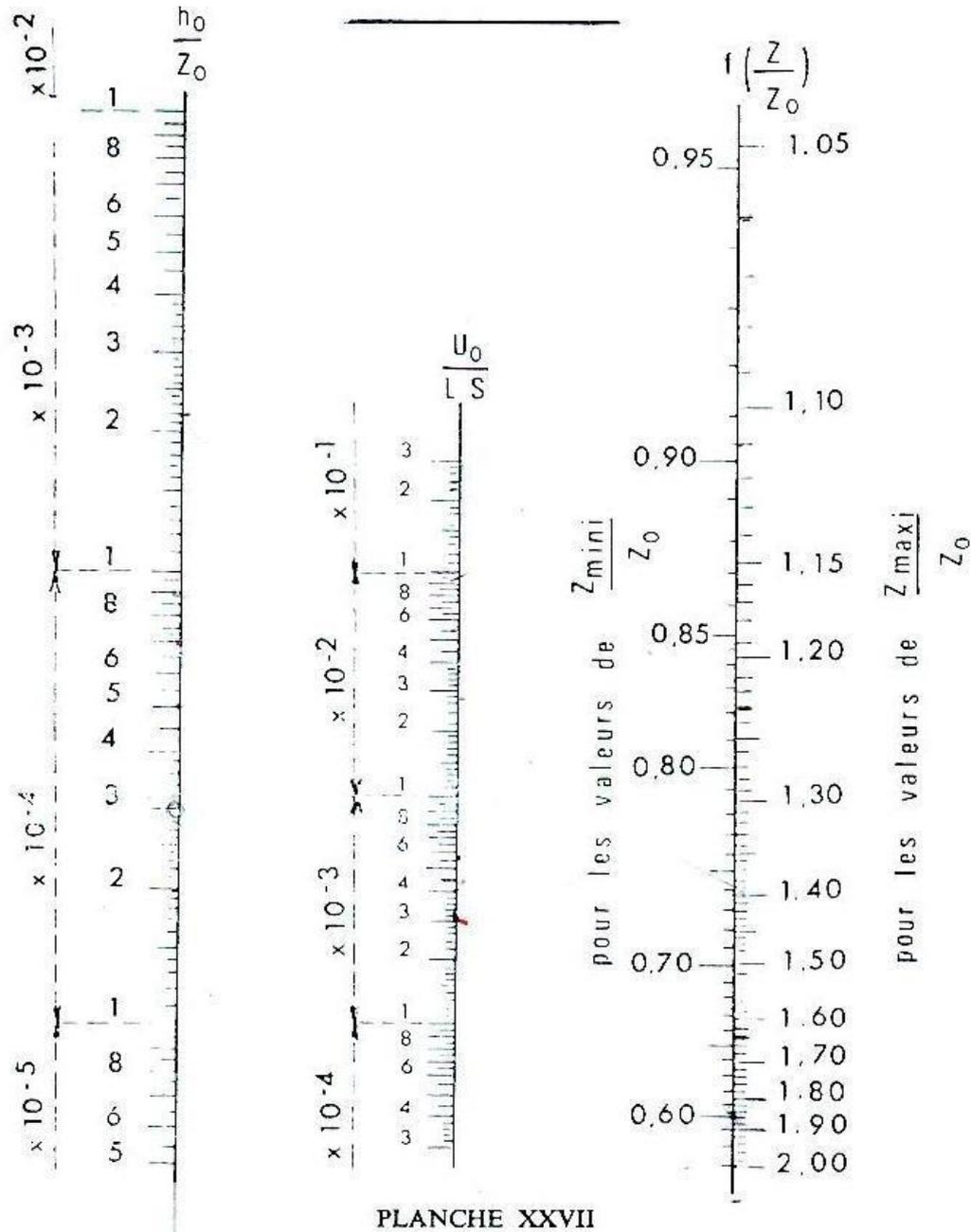


Figure II. 8 : Abaque de M.VIBERT

Remarque :

La méthode VIBERT est utilisée que pour les installations modestes (1000 à 1200 mètre de longueur de conduite).

Conclusion

Les méthodes de résolution sont très nombreuses, mais actuellement avec le développement informatique la majorité de ces méthodes sont soit programmées sur Excel ou d'autre programme, ou carrément des logiciels qui calculent avec un temps très courts et avec des excellents résultats.

Chapitre III
Présentation du logiciel
(CEBELMAIL)

Chapitre III

Présentation du logiciel CEBELMAIL

1. Historique de CEBELMAIL

Les toutes premières versions de **CEBELMAIL** datent des années 80. Elles ont été réalisées par une équipe du CEMAGREF, notamment par Monsieur Meunier, auteur de l'ouvrage "*Les coups de béliers et la protection des réseaux d'eau sous pression*". Il est d'ailleurs intéressant de retrouver des références à **CEBELMAIL** dans ce livre très connu dans le monde de l'eau et de l'assainissement.

En 1993, **CEBELMAIL** est traduit du FORTRAN au C++ par l'équipe de DIADEME. Le logiciel, sorti des tiroirs de l'oubli, correspond aux besoins d'un fabricant de pompes. Cette nouvelle version fonctionne sur le système d'exploitation Windows, avec une interface graphique de pré-processeur fort agréable pour l'époque (à cette époque, de nombreux logiciels scientifiques utilisent des fichiers textes pour décrire les modèles). Les résultats du moteur de calcul sont exploités graphiquement sous Excel, ce qui, pour l'époque, est aussi novateur.

Très rapidement, une version permettant des calculs de réseaux maillés est créée.

Par la suite, et jusqu'à nos jours, **CEBELMAIL** va continuer d'évoluer :

- informatiquement : Le programme est passé d'un programme 16 bits à un programme 32 bits, utilisant les dernières versions du C++ disponible (aujourd'hui **CEBELMAIL** est compilé à l'aide d'une version du C++ datant de 2010).
- Ergonomiquement : Ajout d'éléments tels qu'une aide en ligne, une construction graphique du réseau.
- Conceptuellement : En améliorant version après version les algorithmes traités et leurs méthodes de résolution.

Toutes ces évolutions naissent des besoins et de l'expérience des utilisateurs, toujours plus nombreux.

CEBELMAIL est ainsi une compilation. La compilation de son utilisation par de nombreux hydrauliciens et du travail d'une équipe de développement fière de son produit.

2. Cebelmail

CEBELMAIL est une gamme de logiciels de calcul des coups de bélier dans des réseaux en charge, linéaires ou ramifiés et éventuellement maillés (version CEBEL Expert et SALTO).

Aux premières versions de CEBELMAIL écrites en Fortran succède aujourd'hui une version écrite en langage objets C++.

L'utilisation de CEBELMAIL est particulièrement souple. Comme pour tout logiciel de simulation, un certain nombre de limites ont dû être définies. Ces limites définissent les versions de CEBELMAIL :

- CEBEL Educ,
- CEBEL Standard,
- CEBEL Pro,
- CEBEL Expert,
- SALTO.

2.1. CEBEL Educ

CEBEL Educ est destiné à l'enseignement et présente toutes les caractéristiques de CEBEL Expert. Cependant, les rugosités et diamètres des conduites sont fixés à 1 mm et 200 mm respectivement, et ne peuvent être modifiés.

Les caractéristiques du logiciel sont :

- Nombre d'éléments : illimité aux contraintes de mémoire près ;
- Nombre d'éléments (nœuds ou tronçons) liés à un même point : 10 ;
- Nombre maximal de pas de temps imprimés ($t_{fin}/(\text{pas de temps} \cdot \text{fréquence d'impression})$) : 65500 ;
- Rugosité des conduites : ne peut être modifiée ;
- Diamètre des conduites : ne peut être modifié ;
- Zêta des conduites industrielles : ne peut être modifié ;
- Alpha des conduites industrielles : ne peut être modifié.

2.2. CEBEL Standard

Il permet de réaliser sur des réseaux linéaires. Ces caractéristiques sont :

- Nombre d'éléments : 30 ;
- Diamètre maximum des conduites : 250 mm ;
- Nombre d'éléments (nœuds ou tronçons) liés à un même point : 10 ;
- Types d'éléments : certains éléments ne figurent que dans la version Expert. Ces éléments ne sont jamais indispensables à la modélisation des réseaux, mais sont des représentations plus fines.

2.3. CEBEL Pro

CEBEL Pro est destiné aux bureaux d'études et à l'industrie, permet de mener l'ensemble des calculs sur des réseaux linéaires ou ramifiés. Ces caractéristiques sont :

- Nombre d'éléments : 50
- Nombre d'éléments (nœuds ou tronçons) liés à un même point : 10
- Nombre maximal de pas de temps imprimés ($t_{fin}/(\text{pas de temps} \cdot \text{fréquence d'impression})$) : 65500.
- Types d'éléments : certains éléments ne figurent que dans la version Expert. Ces éléments ne sont jamais indispensables à la modélisation des réseaux, mais sont des représentations plus fines.

2.4. CEBEL Expert

CEBEL Expert permet à ceux qui désirent traiter les réseaux maillés ou qui souhaitent une description très détaillée de certains éléments du réseau, de pousser encore plus loin leurs investigations. Ces caractéristiques sont :

- Nombre d'éléments : illimité aux contraintes de mémoire près
- Nombre d'éléments (nœuds ou tronçons) liés à un même point : 10
- Possibilité de crypter les fichiers

2.5. Salto

Salto permet à ceux qui désirent traiter les réseaux maillés ou qui souhaitent une description très détaillée de certains éléments du réseau, de pousser encore plus loin leurs investigations. L'interface est en anglais ou en français. Ces caractéristiques sont :

- Nombre d'éléments : illimité aux contraintes de mémoire près,
- Nombre d'éléments (nœuds ou tronçons) liés à un même point : 10,
- Nombre maximal de pas de temps imprimés ($t_{fin}/(\text{pas de temps} \cdot \text{fréquence d'impression})$) : 65500,
- Possibilité de crypter les fichiers.

3. L'interface de CEBELMAIL

L'interface de ce logiciel est simple, il permet à l'hydraulicien de se concentrer sur les aspects de modélisation.

Les accessoires inclus (conditions aux limites) sont nombreux :

- Conduite,
- Pompe centrifuge,
- Clapet anti-retour,
- Stabilisateurs de pression amont ou aval,
- Vanne,
- Perte de charge singulière,
- Réservoir,
- Ballon anti-bélier,

- ARAA,
- Cheminée,
- Soupape,
- Ventouse,
- Point de consommation.

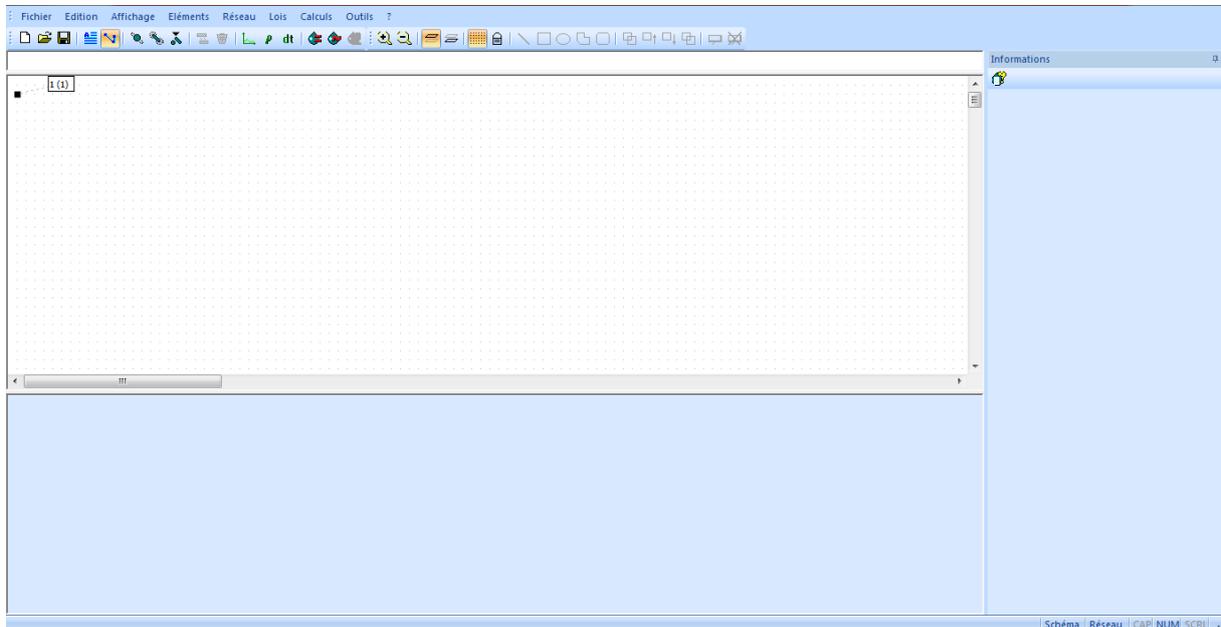


Figure III. 1 : interface de CEBELMAIL

4. Le moteur de calcul de CEBELMAIL

Le moteur de calcul est basé sur les équations de Saint-Venant avec une résolution par la méthode des caractéristiques de Bergeron.

Les pertes de charges dans les conduites sont calculées à partir de la formule de Colebrook et discrétisées selon le pas de temps et les célérités choisies.

Les pompes centrifuges, tout en étant simple d'interface, intègrent une expression de la HMT et du couple résistant dans les quatre quadrants (extrapolation raisonnable à partir des valeurs nominales). Les équations permettent ainsi, dans une certaine mesure, de représenter une inversion de la vitesse de rotation (fonctionnement en turbine ou dévirage de la pompe).

5. L'évolution de CEBELMAIL

CEBELMAIL évolue une à deux fois chaque année.

Ces évolutions sont de différents types :

- Amélioration de l'algorithmique et création de nouveaux éléments pour des études particulières,
- Amélioration de l'interface et ajout d'outils annexes utiles,
- Evolution par rapport aux systèmes d'exploitation, aux matériels et aux versions de Microsoft Office.

Le numéro de la version actuelle de **CEBELMAIL** est la **version 4.21 - février 2015**.

6. Modélisation

CEBELMAIL est un logiciel de simulation des régimes transitoires dans des réseaux hydrauliques en charge.

CEBELMAIL permet de décrire un modèle, principalement constitué d'un réseau.

Ce modèle est enregistrable dans un fichier.

- ❖ Trois types de calcul sont intégrés à CEBELMAIL :
 - Simulation en régime permanent ;
 - Simulation en régime transitoire ;
 - Optimisation d'un ballon anti-bélier.

Les étapes de la modélisation sur CEBELMAIL décrites ci-après sont nécessaires pour l'étude du coup de bélier et de la protection à mettre en œuvre avec le logiciel CEBELMAIL :

- Recueil des données décrivant le réseau et ses équipements ;
- Détermination des cas de fonctionnement normaux (à divers débits, voire à l'arrêt) ;
- Inventaire des manœuvres (volontaires ou accidentelles) pouvant provoquer des coups de bélier ;
- Schématisation du réseau ;
- Préparation des données selon le format compris par CEBELMAIL ;
- Simulation du coup de bélier avec CEBELMAIL ;
- Définition d'une protection, au besoin en utilisant l'option de CEBELMAIL qui optimise le volume d'un ballon anti-bélier ;
- Simulation du réseau protégé et dépouillement des résultats ; la barre d'outils d'Excel, livrée avec CEBELMAIL, permet d'examiner le profil en long des piézométries *instant par instant*, et de le comparer à l'enveloppe (des pressions) des minima et maxima atteints, ainsi qu'au profil en long de la conduite.

7. Domaines d'application

CEBELMAIL peut être utilisé à différentes fins.

Son objet principal est l'étude des coups de bélier et des équipements anti-bélier, dans les réseaux sous pression.

CEBELMAIL est donc utile en phase de projet comme en phase d'analyse d'un réseau existant. Il aide à tester un équipement anti-bélier et même à le choisir.

Accessoirement, CEBELMAIL peut calculer la répartition des débits dans un réseau, en régime permanent.

Conclusion

Le logiciel proposé par l'entreprise **STUKY ENHYD** c'est le cebel-pro, comme on l'a signalé auparavant cebel-pro est fait pour les entreprises.

L'utilisation du logiciel CEBELMAIL dans le calcul des anti bélier nous a permis de gagner un temps considérable dans les calculs. En plus, il aide à bien comprendre le phénomène par les différents graphes visualisé après calcul (évolution de la pression, débit dans la conduite).

Chapitre IV

Application sur les différentes méthodes

Chapitre IV

Application sur les différentes méthodes

Introduction

Dans ce chapitre, le réservoir anti béliet sera dimensionner via trois méthodes citées dans le chapitre précédent (VIBERT, BERGERON et Logiciel CEBEL-PRO) .le calcul va être appliqué sur la station de pompage de meghnia 3 qui alimente le réservoir de meghnia 3.

1. Méthode de VIBERT

Les données de base sont :

- Longueur : 1184 m
- Diamètre : 0,5 m
- Section : 0,1963 m²
- Débit : 0,308 m³/s
- Vitesse d'écoulement : 1,57 m/s
- Hauteur géométrique de refoulement : 103 m
- Conduite en fonte d'épaisseur : 7,4 mm

La célérité d'onde est donnée par :

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + K \frac{D}{e}}}$$

Avec ,

D : diamètre intérieur de la conduite en (m).

E : épaisseur du tuyau en (m).

K : coefficient dépendant du matériau constituant la canalisation.

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + 1 \frac{0,5}{0,0074}}}$$

$$C=1334,22 \text{ m/s}$$

Donc la célérité $C=1334,22 \text{ m/s}$, montre que le coup de bélier peut atteindre la valeur :

$$\frac{CV_0}{g} = 1334,22 * \frac{1,57}{9,81}$$

$$\frac{CV_0}{g} = 213,53 \text{ m d'eau}$$

De sorte qu'au moment du retour de l'onde, la pression peut atteindre :

$$H_g + \frac{cV_0}{g}$$

$$103 + 213,53 = 316,53 \text{ m soit } 31,7 \text{ bars .}$$

Si l'on s'impose de ne pas dépasser pour la conduite une pression de 25 bars ou 250 m d'eau, le calcul du réservoir d'air s'effectuera comme suit :

$$Z_0 = 103 + 10$$

$$Z_0 = 113\text{m}$$

$$Z_{max} = 250 + 10$$

$$Z_{max} = 260 \text{ m}$$

D'où :

$$\frac{Z_{max}}{Z_0} = \frac{260}{113}$$

$$\frac{Z_{max}}{Z_0} = 2,30$$

$$h_0 = \frac{v_0^2}{2g}$$

$$h_0 = \frac{1,57^2}{2 * 9,81}$$

$$h_0 = 0,125\text{m}$$

Et

$$\frac{h_0}{Z_0} = \frac{0,125}{113}$$

$$\frac{h_0}{Z_0} = 0,00106$$

Après le calcul de $\frac{h_0}{Z_0}$ et $\frac{Z_{max}}{Z_0}$, on utilise l'abaque de VIBERT pour avoir $\frac{U_0}{LS}$ et $\frac{Z_{min}}{Z_0}$

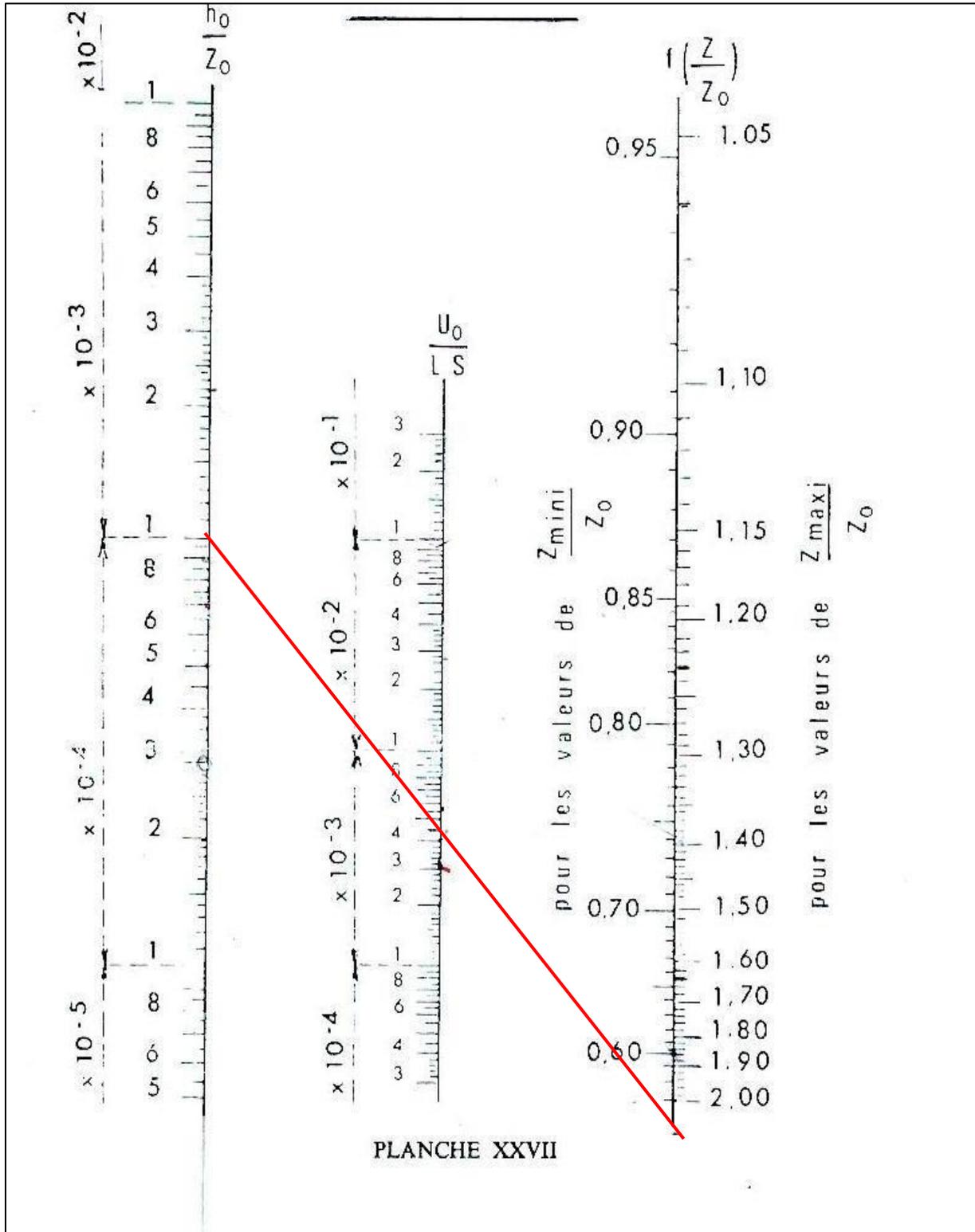


Figure IV. 1 : utilisation de l'Abaque de VIBERT

$$\frac{U_0}{LS} = 0,0045$$

$$\frac{Z_{min}}{Z_0} = 0,55$$

Comme $LS = 232,8 \text{ m}^3$, on a :

$$U_0 = 0,0045 * 232,8$$

$$U_0 = 1,05 \text{ m}^3$$

On tire :

$$U_{max} = U_0 * \frac{Z_0}{Z_{min}}$$

$$U_{max} = 1,05 * 0,55 : \text{car } (U_0 Z_0 = U_{max} Z_{max})$$

$$U_{max} = 1,90 \text{ m}^3$$

Afin qu'il reste encore de l'eau dans ce réservoir, même quand U aura atteint sa valeur maximale, le réservoir sera calculé pour une capacité d'environ **2,48 m³ (1.3* U_{max})**.

2. Méthode de Bergeron

Les données de base par la méthode de Bergeron sont :

- Longueur : 1184 m
- Diamètre : 0,5 m
- Section : 0,1963 m²
- Débit : 0,308 m³/s
- Vitesse d'écoulement : 1,57 m/s
- Hauteur géométrique de refoulement : 103 m
- Conduite en fonte d'épaisseur : 7,4 mm

La célérité est calculée avec :

$$c = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + 1 \frac{0,5}{0,0074}}}$$

$$C=1334,22 \text{ m/s}$$

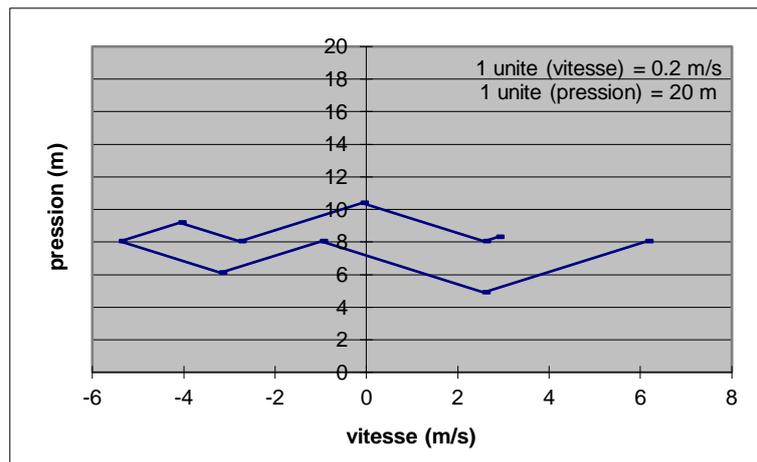


Figure IV. 2 : graph de Bergeron de la station de pompage meghnia 3

- Le volume d'air nécessaire dans le réservoir anti béliers après calcul vaut **1,81 m³**

Remarque

Afin qu'il reste encore de l'eau dans ce réservoir, même quand U aura atteint sa valeur maximale, il sera calculé pour une capacité d'environ **2,36 m³ (1.3 * U_{max})**.

3. Le logiciel Cebel-pro

3.1. Données de bases :

- Longueur : 1184 m
- Diamètre : 0,5 m
- Section : 0,1963 m²
- Débit : 0,308 m³/s
- Vitesse d'écoulement : 1,57 m/s
- Hauteur géométrique de refoulement : 103 m
- Conduite en fonte d'épaisseur : 7,4 mm
- La courbe caractéristique de la pompe

3.1.1. La courbe caractéristique de la pompe

Tableau IV. 1 : les valeurs de la courbe caractéristique

Débit (l/s)	0	200	400	450
-------------	---	-----	-----	-----

Hauteur (m)	123,0	117,5	105,0	100,0
-------------	-------	-------	-------	-------

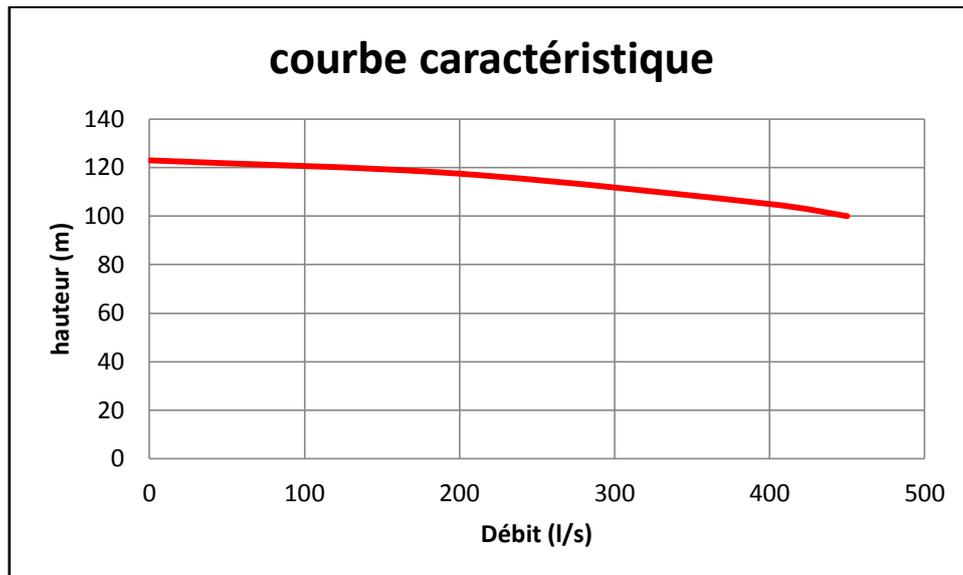


Figure IV. 3 : courbe caractéristique de la pompe

Dans le logiciel, il faut rentrer les paramètres de base pour chaque élément (réservoir, pompe, anti bélier ...etc.)

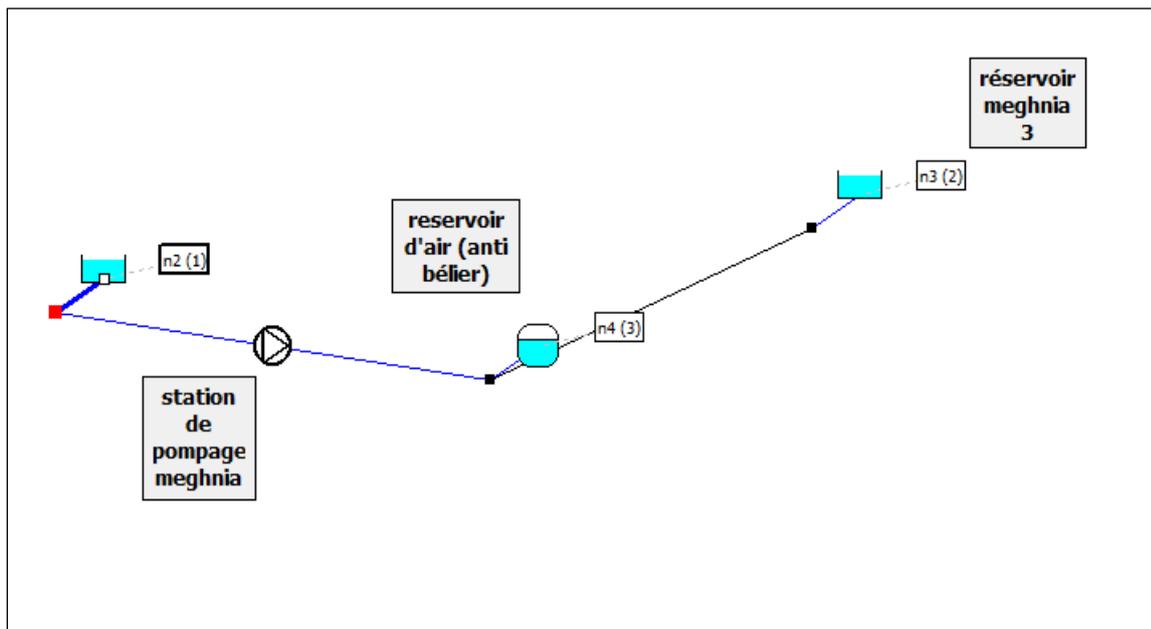


Figure IV. 4 : tracé du tronçon avec différents éléments

Calcul du régime transitoire

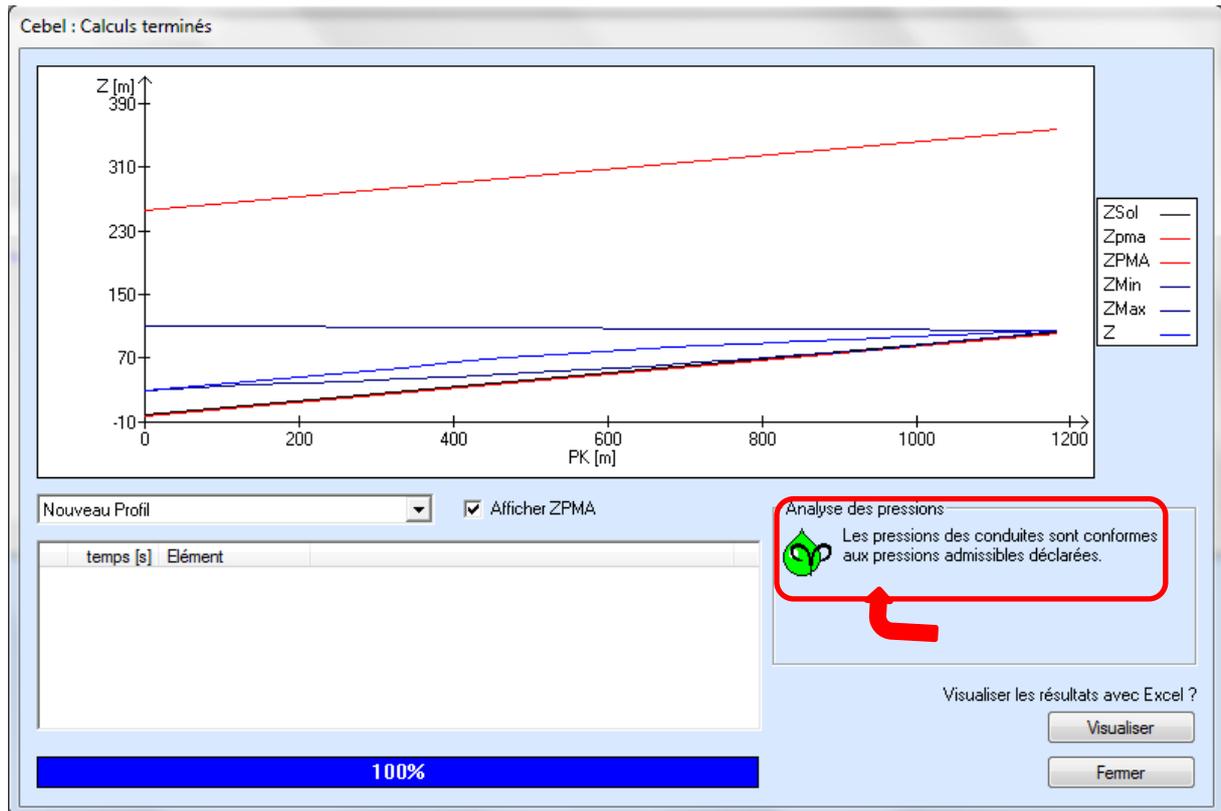


Figure IV. 5 : analyse des pressions le long de la conduite

Remarque

D’après l’analyse des pressions, la pression dans la conduite est dans l’intervalle des pressions admissibles.

Optimisation les dimensions du réservoir anti bélier

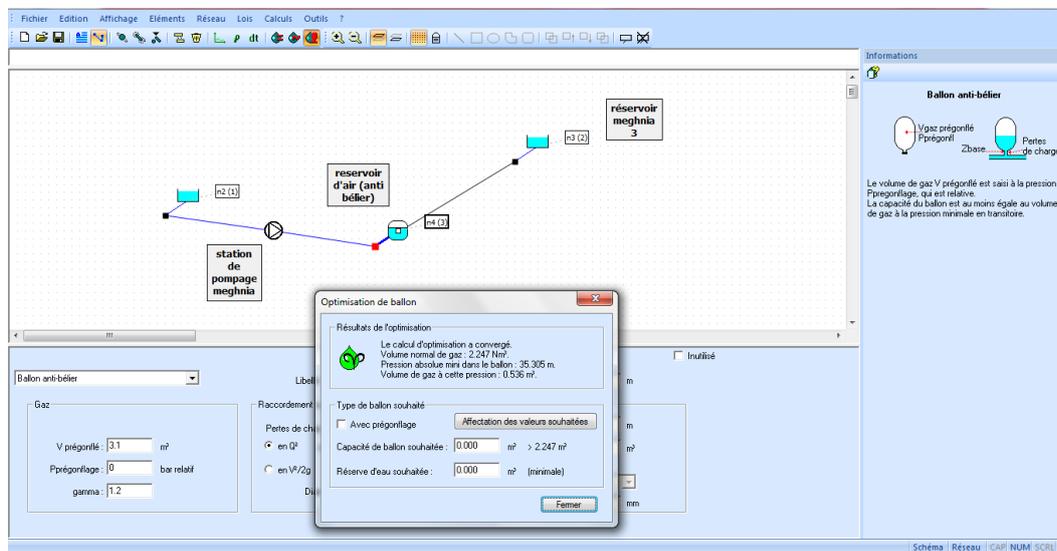


Figure IV. 6 : optimisation du réservoir

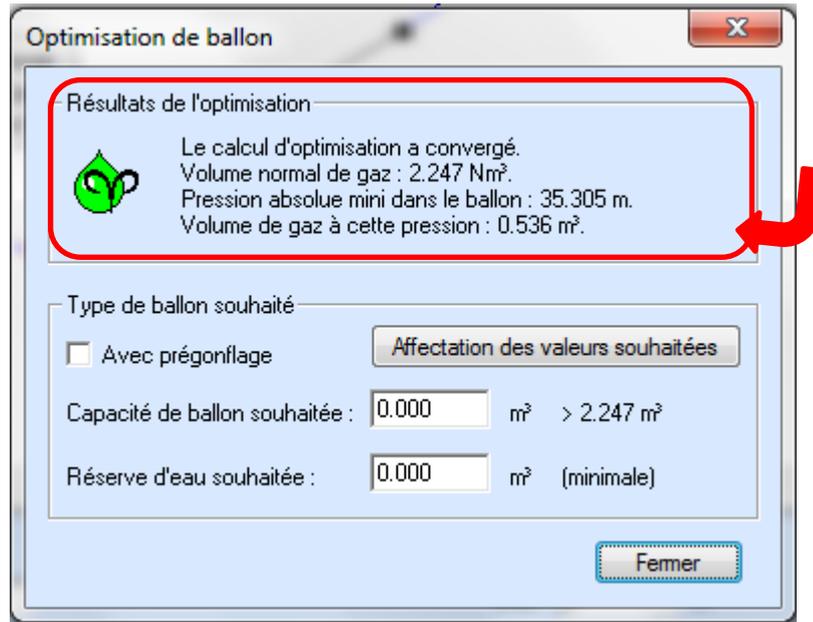


Figure IV. 7 : résultats de l'optimisation

Remarque

D'après les résultats de l'optimisation le réservoir d'air doit être supérieur à $2,247\text{m}^3$
Afin qu'il reste encore de l'eau dans ce réservoir, même quand U aura atteint sa valeur maximale, il sera calculé pour une capacité $2,92\text{ m}^3$ ($1.3 * U_{\max}$).

4. Interprétation des résultats

Tableau IV. 2 : récapitulatif des résultats

la méthode	VIBERT	BERGERON	CEBEL-Pro
volume (m3)	2,48	2,36	2,92

D'après le calcul de l'anti bélier de la station de pompage de Maghnia 3 on a constaté que les trois méthodes donnent des résultats proches.

La méthode de VIBERT et BERGERON donne des résultats similaires parce qu'elle intègre les mêmes données de base tandis que le logiciel CEBEL-Pro prend en compte la courbe caractéristique et vitesse de rotation de la pompe ce qui est la cause de la petite différence.

Conclusion

Malgré le développement des logiciels, les méthodes anciennes qu'elles soient analytiques ou graphiques, donnent de bons résultats. Néanmoins, les logiciels nous permettent de gagner du temps et avoir plus de précision.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail on a expliqué le phénomène transitoire « coup de bélier » ou dans le premier chapitre on a détaillé le coup de bélier (les causes, les moyens de protection, etc.). Le deuxième chapitre on a modélisé mathématiquement le phénomène par les différentes équations avec la présentation de plusieurs méthodes pour lutter contre le coup du bélier ensuite dans le chapitre trois on a présenté un logiciel « CEBELMAIL » pour dimensionner les artis béliers et finalement dans le chapitre quatre on a appliqué les méthodes « BERGERON et VIBERT » et le logiciel CEBELMAIL sur un cas de notre projet et arrivé à un résultat après comparaison.

Références bibliographiques

[1] **ZEGRAR,A.**(2012). « Etude du phénomène du coup de bélier dans le système d'adduction d'eau potable de la ville de MEROUANA » Projet de fin d'étude, Université Colonel Hadj Lakhdar – Batna, 184 Pages.

[2] **DUPONT, A.** (1979). « Hydraulique urbaine ».Tome II, édition Eyrolles, 484 pages.

[3] **CARLIER,M.** (1980). « Hydraulique Générale et Appliquée » édition Eyrolles, 565 pages.

[4] **OURAGH,Y.**(1994) . « Ecoulement forcé en hydraulique ». Tome 2, Edition O.P.U., 420 pages.

[5] **BERGERON,L.** (1950). « Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité » , édition Dunod, 336 pages.