

Travaux Pratiques : Coup de bélier

Eléments de Mécanique des Fluides
Prof. PIROTTON

2009-2010

KOCH Pierre-Henri
MARCK Nicolas
SCHAERLAEKEN Maxime
2^{ème} Bachelier Ingénieur Civil

1 Description du phénomène

Le *coup de bélier* est un phénomène instationnaire de transport d'information liant les champs de vitesse et de pression au sein d'un écoulement en conduite.

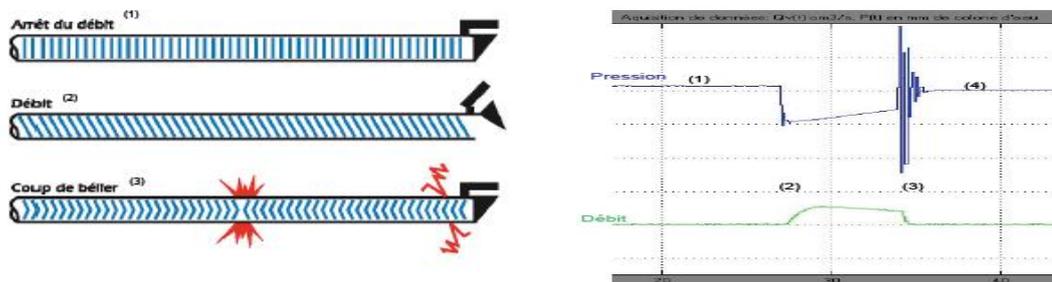
On peut observer cet incident lors de la fermeture ou l'ouverture brusque d'une vanne, d'un robinet, ou de l'arrêt d'une pompe. Ce choc violent se traduit la plupart du temps par un bruit caractéristique et peut provoquer des ruptures de conduites dans les larges installations à cause de la grande quantité d'eau en mouvement et des ondes de surpression et de dépression successives.

Lorsqu'une onde de compression ou de dépression se propage dans la conduite (rappelez-vous qu'elle le fait perpendiculairement à l'axe de celle-ci), il y a compression d'une tranche verticale infinitésimale de liquide à un endroit de la conduite (la pression va augmenter très rapidement avant d'osciller et de se stabiliser). Ceci implique qu'en se relaxant, cette tranche comprimera la tranche directement voisine, dans le sens de propagation de l'onde, laissant la pression inchangée dans le reste de la conduite. Le phénomène va se propager, de proche en proche, vers la fin de la conduite pour repartir alors en sens inverse (avec inversion du signe de la pression).

Ce phénomène de transport d'énergie est directement lié à la compressibilité. Dans le cas de la fermeture par exemple, on peut le comparer dans une certaine mesure à un ressort horizontal en déplacement à vitesse constante qui est arrêté brusquement. La constante de raideur k du ressort jouant le rôle de la compressibilité du fluide pour le coup de bélier. De la même façon, une onde matérielle de compression se déplacera le long du ressort, transportant de l'information à une vitesse déterminée. On verra également que le frottement permet une dissipation d'énergie, laissant le système tendre vers un nouvel état d'équilibre.

1.1 Sens physique

Dans ce phénomène, nous prendrons en compte, d'une part, la compressibilité du fluide (ainsi que son élasticité, car une fois l'onde passée, le fluide comprimé se détendra pour revenir à son état initial, d'autre part la déformabilité de la conduite, qui permettront d'accumuler l'eau.



Sur ce schéma nous avons trois représentation d'une conduite à des moments différents. Le premier dessin nous montre le système au repos, quand l'eau ne circule pas. Dans le

second dessin, nous ouvrons le robinet, et le fluide se met progressivement en mouvement. Enfin, dans le troisième dessin, on ferme brusquement le robinet, la pression se met alors à grimper rapidement et à osciller avant de se stabiliser.

Le graphique suivant nous montre l'évolution de la pression (en bleu) et du débit (en vert) lors du coup de Bélier.

Nous allons détailler le mécanisme du coup de Bélier.

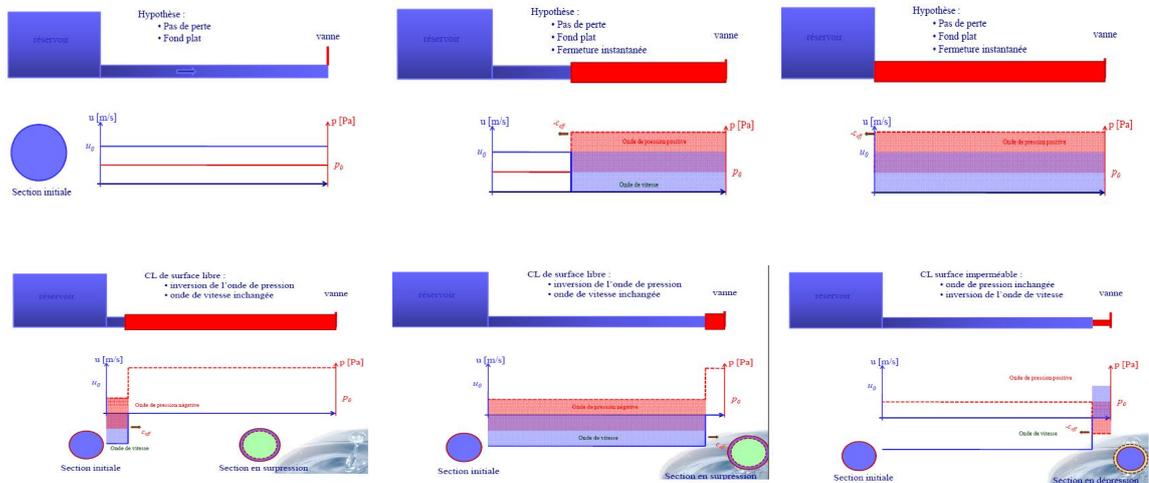
Au départ, on peut observer une quantité d'eau qui s'écoule dans la conduite avec un certain débit et une certaine vitesse.

Remarque : sur le graphe, on ne regardera pas l'évolution de la vitesse pour le débit puisque la section est constante.

On procède à la fermeture "instantanée" de la vanne (en pratique, le temps de fermeture doit être très court en comparaison avec les grandeurs caractéristiques de l'écoulement), ce qui va créer une onde de pression positive (surpression) allant en sens inverse de l'onde de vitesse (du débit). Cette onde de surpression progresse jusqu'à arriver à proximité de la paroi : l'entrée du réservoir à surface libre. L'onde repart alors dans l'autre sens avec une onde de pression négative (une sous-pression étant créée par l'effet de succion exercé par le réservoir) mais une onde de vitesse inchangée.

Lorsque l'onde arrive à nouveau sur la vanne, elle rencontre cette fois une surface imperméable, ce qui va avoir pour effet d'inverser l'onde de vitesse et de laisser l'onde de pression inchangée. Le phénomène se répète alors tant qu'il n'y a pas de perte liées au frottement.

Les différentes étapes du coup de Bélier sont représentées sur les six schémas ci-dessous.



Ce phénomène est essentiel à comprendre afin de pouvoir l'éviter et ne pas soumettre les structures mécaniques à des phénomènes violents pouvant causer de l'usure, des fractures et des vibrations.

2 Différents cas

Nous allons maintenant expérimenter le programme qui mesure l'évolution du débit et de la pression au cours du temps au sein de la conduite. Dans chaque cas, nous aurons à faire des hypothèses. Celles-ci sont supposées licites pour l'ensemble des manipulations :

- la manipulation se fait avec de l'eau, de $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ et de $\varepsilon \simeq 2 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ (cette dernière donnée est appelée K dans le programme fourni)
- niveau du réservoir constant et de hauteur d'eau égale à 150 m
- absence de pertes locales, sauf à la vanne (elles ne seront pas prises en compte)
- $n = 1,5$, paramètre constant de la loi de manipulation de la vanne (voir énoncé)
- coefficient de contraction à la vanne = $0,009$
- le diamètre de la conduite vaut $\phi = 0,5 \text{ m}$.

2.1 Cas de base

Dans ce cas, nous ferons les hypothèses suivantes :

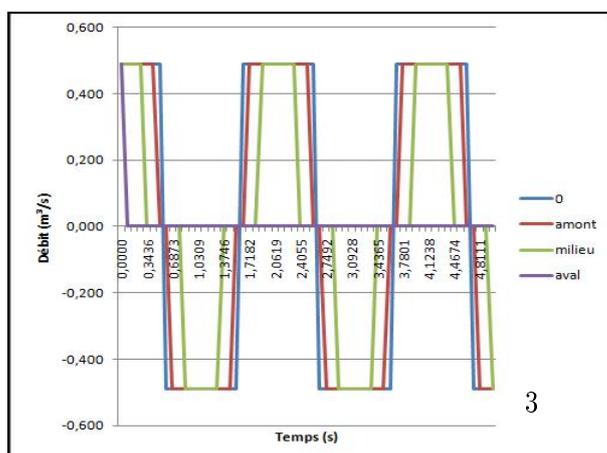
- Le champ de vitesse est uniforme sur la section de la conduite.
- Le niveau d'eau du réservoir est constant.
- Il n'y a pas de pertes locales sauf à la vanne.

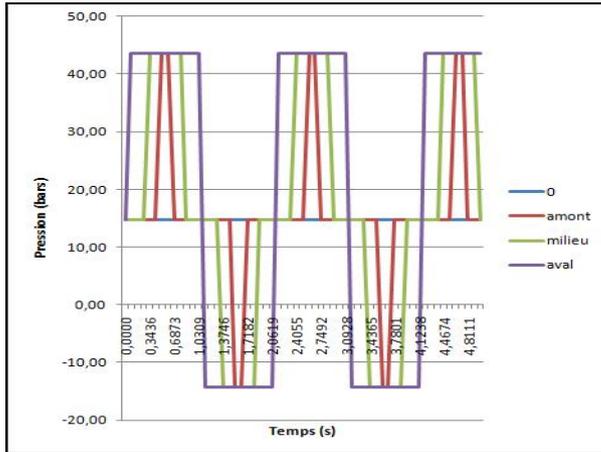
La configuration de départ est la suivante :

- la conduite, de longueur égale à 600 m est parfaitement lisse (on a $f = 0$)
- son épaisseur vaut $e = 1 \text{ cm}$
- le module d'élasticité de Young de la conduite est égal à $E = 210000 \text{ MPa}$ (acier)
- on mesure l'impact du phénomène (vitesse de propagation, pression dans la conduite) tous les 100 m (pas spatial donné).

Après quelques premiers tests du programme, on remarque que, selon que la masse volumique de l'eau ρ est considérée comme variable ou pas (cela a son importance du point de vue des termes de dérivée de ρ dans les différentes équations utilisées), les résultats obtenus ne changent pas de manière significative. On peut donc considérer que l'hypothèse selon laquelle ρ est constant est bel et bien licite.

Observons la portée du phénomène sur 5 secondes, pour un cas de fermeture brusque de vanne ($\tau = 0.01\text{s}$). Si l'on mesure l'impact pour chaque pas spatial (100m), on obtient les graphiques suivants (Q_tout_1.jpg et H_tout_1.jpg) :





Attardons-nous tout d'abord sur le graphique du débit en fonction du temps. A l'aval, on observe une chute brusque du débit : en quelques centièmes de seconde, il passe de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ à 0, valeur qu'il conserve (la vanne reste fermée). Ceci est dû à la rapidité de la fermeture de la vanne. Aux autres endroits, un coup de bélier est mis en évidence. En effet, on peut observer en ces points des oscillations de la valeur du débit, et donc de la vitesse.

Aux endroits non singuliers, on peut aussi observer des paliers pour les valeurs maxima, minima et nulles du débit. Ceci est caractéristique du mouvement de va-et-vient de l'onde qui parcourt l'intérieur de la conduite : en "passant", elle modifie la valeur du débit en le point considéré, puis cette valeur est maintenue jusqu'au passage suivant. Cette onde est créée, rappelons-le, par la fermeture de la vanne. ainsi, son premier passage induira une diminution du débit en la section considérée, l'amenant à zéro, le second le diminuera jusqu'à sa valeur maximale négative, le troisième le ramène à une valeur nulle etc. Notons encore que les paliers ont des durées plus différentes lorsque l'on s'éloigne du milieu de la conduite, où ils sont égaux. Ceci est dû à la fréquence variable de passage de l'onde (et constante au milieu). A l'amont, l'onde change directement le signe de la vitesse d'écoulement, d'où l'absence de palier.

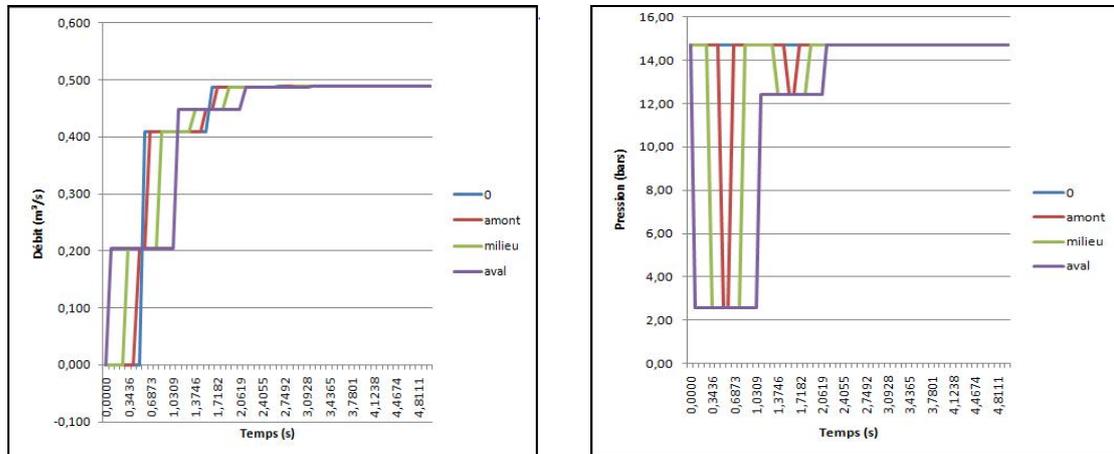
Enfin, remarquons l'absence de frottement. Elle est figurée par le fait que la fonction de débit n'est pas du tout amortie : les oscillations gardent la même amplitude infiniment longtemps. Aucune perte d'énergie ne pourrait en effet justifier une telle diminution.

Analysons à présent la figure des pressions. Celle-ci est semblable à la précédente, dans le sens où l'on observe le même genre d'oscillations et de paliers, dus aux mêmes causes. La valeur initiale de la pression est, en pression hydrostatique relative, égale à

$$\rho gh = (1000 \text{ kg/m}^3) \cdot (10 \text{ m/s}^2) \cdot (150 \text{ m}) = 150000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 15000 \text{ Pa} = 15 \text{ bar}$$

valeur que l'on peut lire sur le graphique. La différence avec le cas précédent réside dans le fait que c'est maintenant l'aval qui subit le changement de signe direct de pression observé à l'amont précédemment. Cette fois, les variations sont plus brèves coté amont, d'ailleurs la pression reste constante à l'entrée de la conduite. ceci est dû au fait que la surface libre du réservoir est à pression constante.

A présent, observons l'impact du phénomène sur l'ouverture de la vanne plutôt que la fermeture. Les résultats sont reportés dans les deux graphiques suivants (Q_1_ouv.jpg et H_1_ouv.jpg) :



Les résultats sont sensiblement différents. Dans ce cas, le débit augmente par paliers jusqu'à atteindre une valeur finale, qui est le débit normal de la vanne (valeur initiale pour le cas de fermeture) alors que la pression subit des variations fortes et brèves avant de se stabiliser également, à 15 bars (attention, les graphiques sont gradués en bars!).

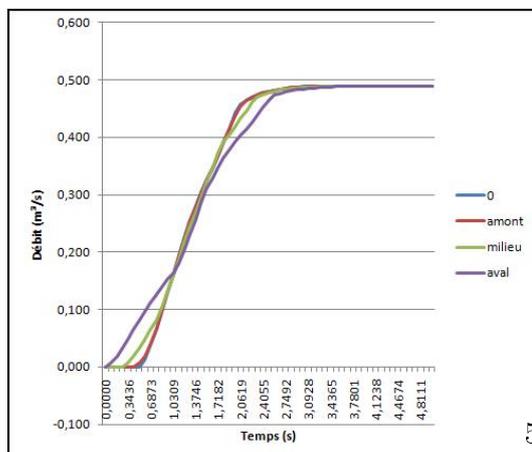
Pour le débit, le rôle joué par l'onde créée est d'augmenter sa valeur quel que soit le sens de son passage. Elle réalise néanmoins le procédé en deux passages, d'où le palier (palier qui n'est bien sûr pas observé à l'amont). Pour la pression, l'onde se manifeste par une diminution brusque de celle-ci, puis une réaugmentation au passage suivant. Cette réduction de valeur est de plus en plus petite, à cause de la stabilisation. Il n'y a pas de palier en aval, où la pression se stabilise directement à l'ouverture de la vanne.

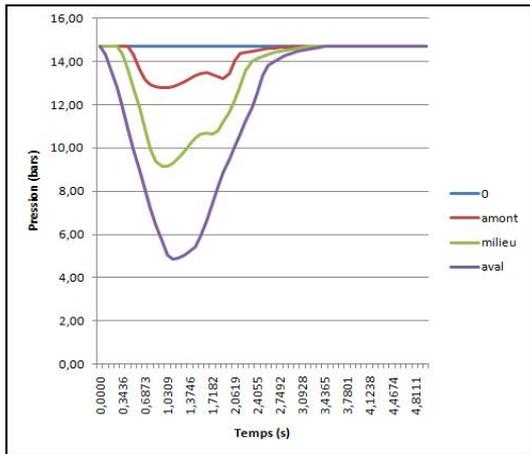
2.2 Influence du temps de manipulation

Dans cette section, nous conservons les paramètres de départ, et nous imposons

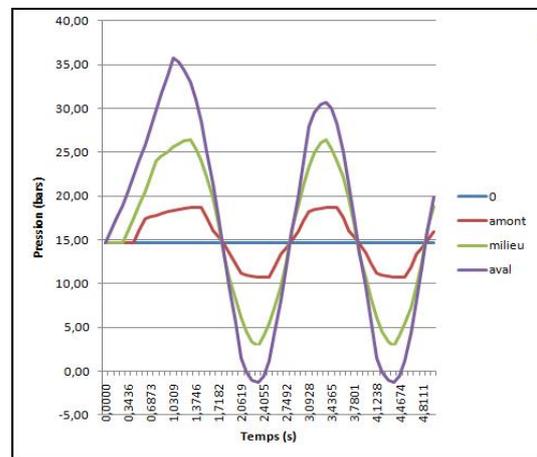
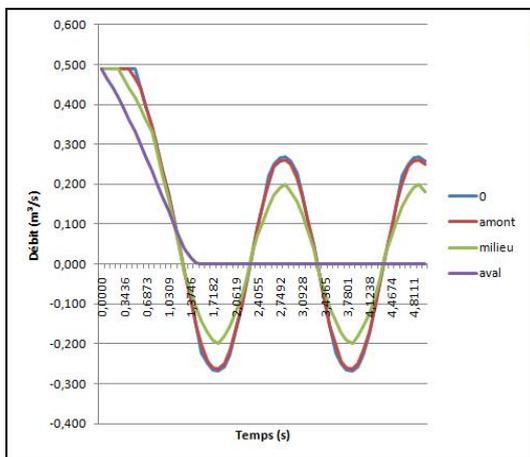
- Temps d'ouverture et de fermeture de 1.5s

Les résultats obtenus dans le cas de l'ouverture sont représentés sur les figures suivantes (Qouv_vit.jpg et Houv_vit.jpg) :



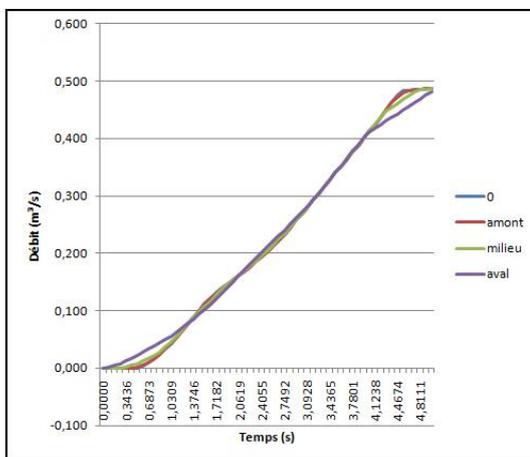


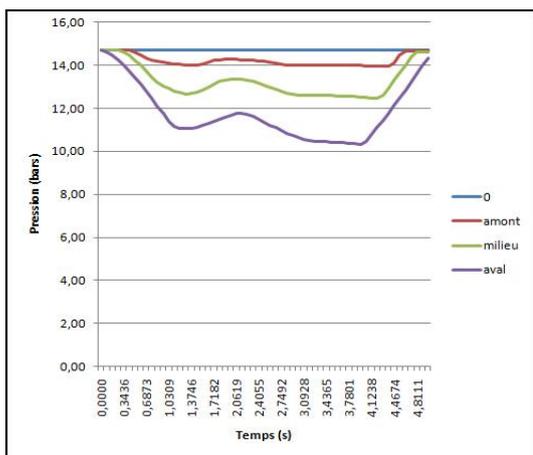
Dans le cas de la fermeture :



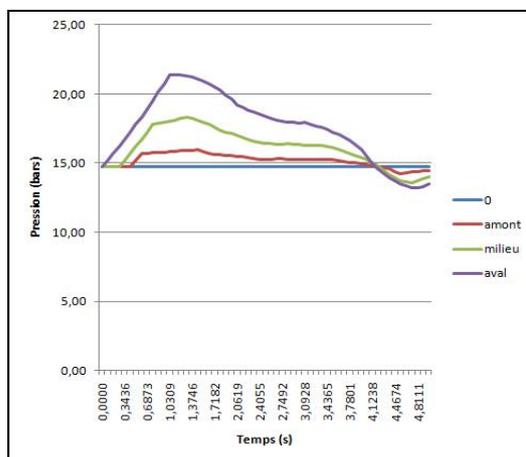
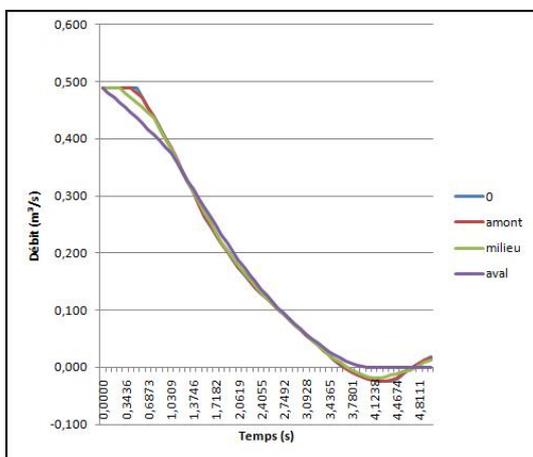
- Temps d'ouverture et de fermeture de 4s

Les résultats obtenus dans le cas de l'ouverture sont représentés sur les figures suivantes (Qouv_4s.jpg et Houv_4s.jpg) :





Dans le cas de la fermeture :



Nous constatons une différence flagrante : le coup de Béliér disparaît presque totalement lorsque le temps de manipulation passe à 4s ! . Lors d'une ouverture lente, le débit a le temps de se stabiliser, contrairement à une ouverture rapide.

Pour les pressions, le même raisonnement est d'application, ainsi nous remarquons que les pics de dépression sont atténués, car la pression varie moins brusquement dans le second cas (on observe une différence de dépression de presque 5 bars entre les deux situations).

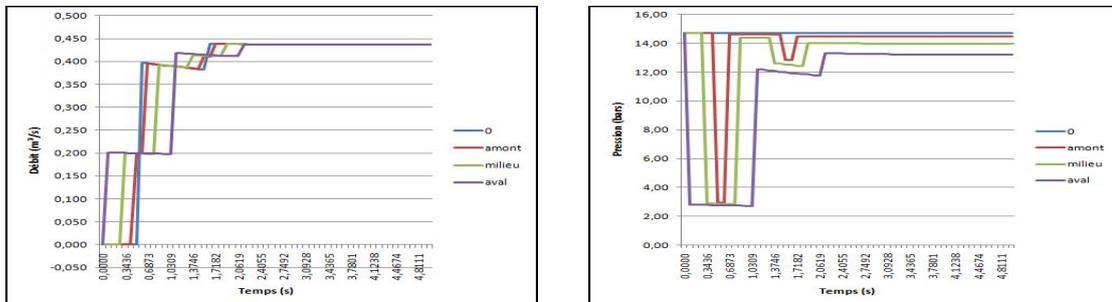
Dans le cadre de la fermeture, les différences sont plus grandes encore : soit on considère que le phénomène de transport a vraiment disparu dans le cas de l'ouverture longue, soit on considère que l'amplitude et la fréquence des ondes de pression se sont considérablement réduites. On voit ici un moyen d'éviter presque totalement le coup de bélier : allonger les temps de manipulation des vannes ou pompes. C'est donc un compromis qu'il faut trouver entre rapidité d'opération (qui peut être importante suivant l'application) et coup de bélier que les structures peuvent supporter.

2.3 Influence du frottement

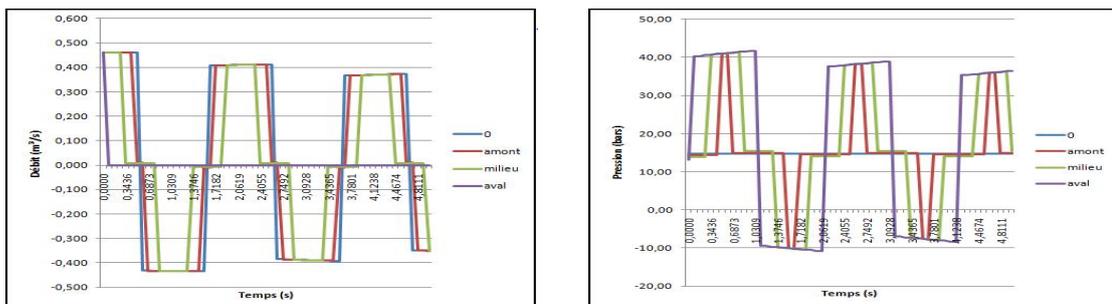
Dans cette section, nous utiliserons les hypothèses du cas de base, avec

- Coefficient de frottement $f = 0.05$

Observons tout d'abord une ouverture de la vanne



Observons à présent les résultats obtenus pour le cas de la fermeture de la vanne



Nous observons que le frottement provoque une stabilisation plus rapide des débits et des pressions dans le cas d'une ouverture.

Dans le cas d'une fermeture, l'onde de pression et de débit diminue en amplitude au cours du temps.

Ce sont des résultats tout à fait logiques physiquement, car le frottement de l'eau contre les parois provoque des pertes, et donc atténue l'amplitude des ondes.

Le frottement semble donc causer des pertes d'énergie qui font que le mouvement est amorti et non plus périodique à l'infini. On remarque également que la fréquence des ondes semble inchangée.

2.4 Influence du matériau utilisé et de la dimension

Ici nous analyserons les effets du matériau utilisé sur le débit et la pression exercés dans la conduite, ainsi que les changements qu'induisent une modification de l'épaisseur de la conduite.

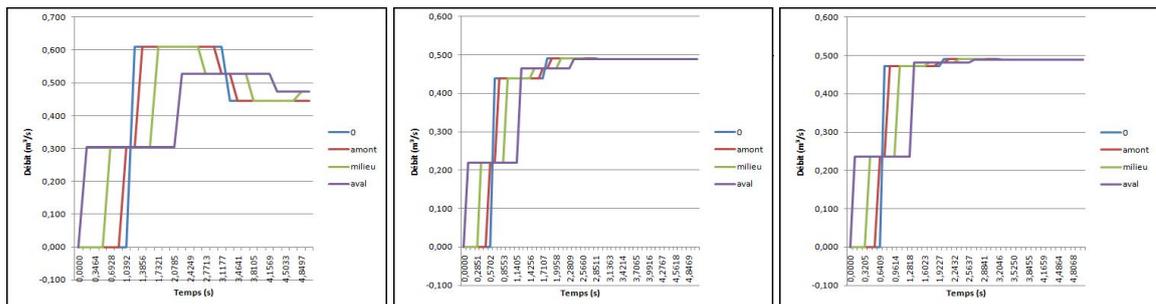
2.4.1 Matériau

Nous distinguons à nouveau le cas de l'ouverture et de la fermeture, pour différents matériaux.

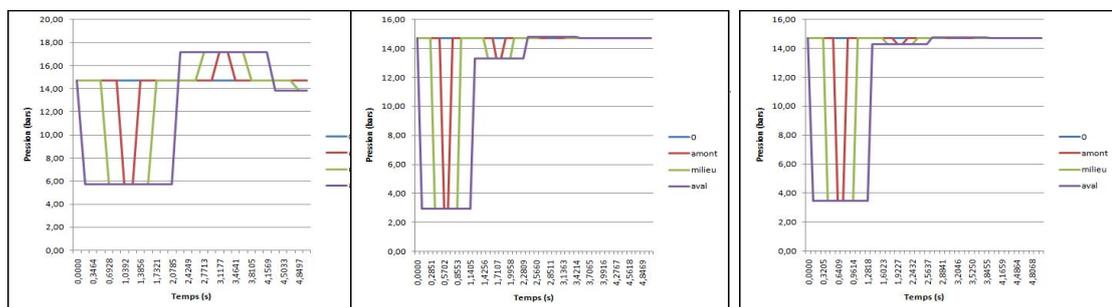
Nous ne considérerons respectivement trois matériaux, le béton, le cuivre et le zinc, car leur module de Young sont les plus extrêmes. Nous avons déjà fait l'analyse du cas de l'acier dans le modèle de base.

Ouverture :

Nous observons d'abord les graphiques de débits pour les différents matériaux (images en taille réelle : Qouv_*.jpg où * = béton ou cuivre ou zinc).



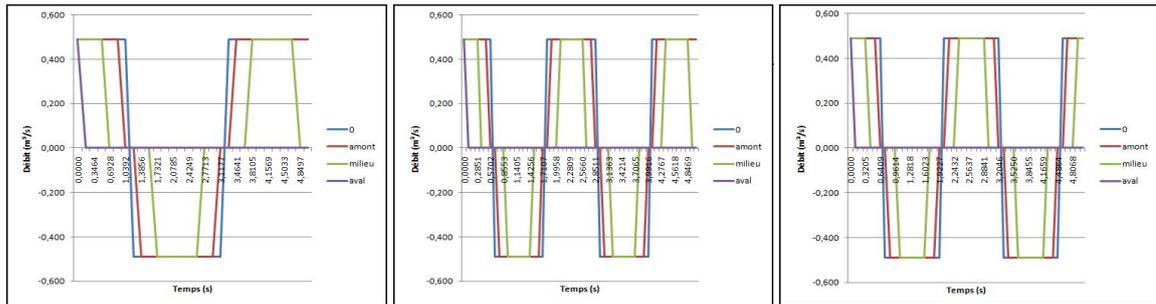
À présent observons les graphiques de pression (images en taille réelle : Houv_*.jpg où * = béton ou cuivre ou zinc) :



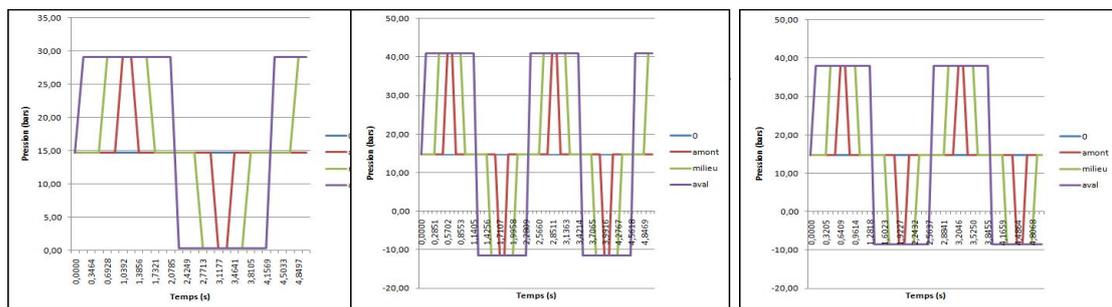
Fermeture :

Nous reproduisons le même schéma pour la fermeture de la vanne.

Ainsi, les graphiques de débit sont (images en taille réelle : Qferm_*.jpg où * = béton ou cuivre ou zinc) :



Les graphiques de pression sont les suivants (images en taille réelle : Hferm_*.jpg où * = béton ou cuivre ou zinc) :



L'étude de l'influence du module de Young E sur le phénomène du coup de Bélier, nous amène à observer qu'une augmentation du module de Young conduit à une célérité croissante, ce qui semble logique si l'on regarde les formules.

Ainsi, suivant que la conduite soit en béton ($E=20000$), en zinc ($E=78000$), en acier ($E=210000$) ou en cuivre ($E=214000$), on pourra observer sur les graphiques de leur débit/pression une augmentation de la vitesse du phénomène. En effet, on a :

- Acier : 1163,97539 m/s
- Béton : 577,3502692 m/s
- Cuivre : 1052,208562 m/s
- Zinc : 936,1647795 m/s

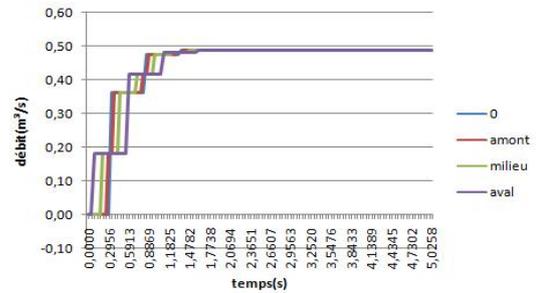
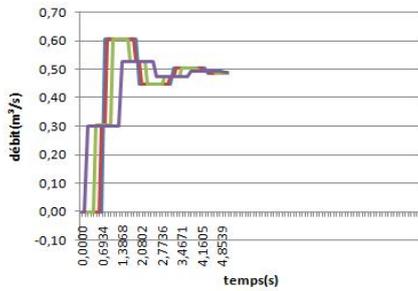
Le module de Young caractérisant la rigidité du matériau (l'acier et le cuivre étant donc considéré comme beaucoup plus rigide que le béton et le zinc), il est donc logique d'observer un phénomène de coup de Bélier très accentué par une onde accélérée dans le cas de l'acier ou du cuivre, les parois de ces matériaux étant très peu déformables. Nous remarquons ainsi que la fermeture de la vanne pour un matériau de plus en plus rigide induira une diminution de la période du mouvement oscillatoire, tandis que son ouverture induira l'accélération de l'augmentation du débit par paliers (pour le débit) et l'accélération des variations par pics (pour la pression) pour atteindre leur valeur finale respective stabilisée.

2.4.2 Epaisseur

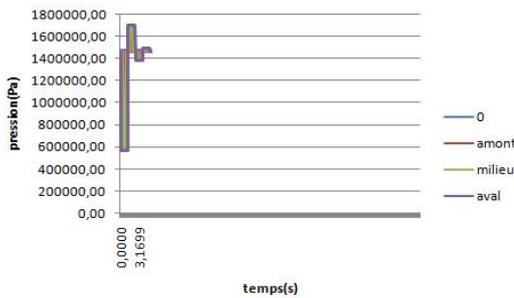
Ici nous modifierons l'épaisseur de la conduite, pour un seul matériau, l'acier.

Ouverture :

Graphiques des débits :

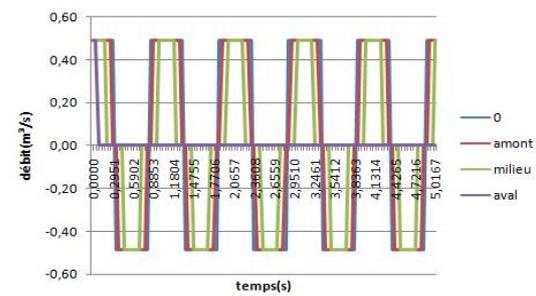
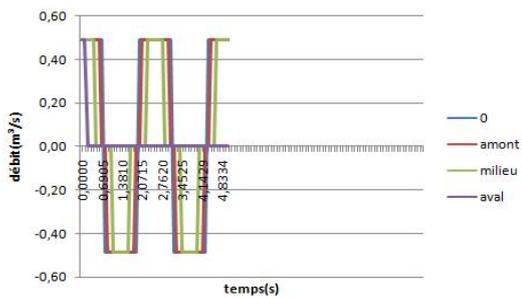


Graphiques des pressions :

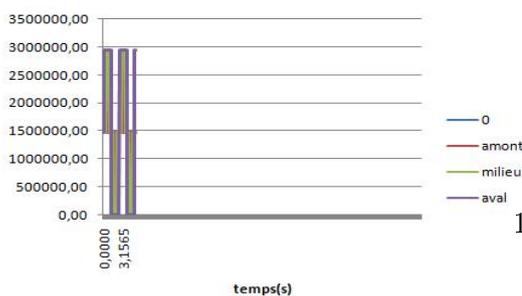


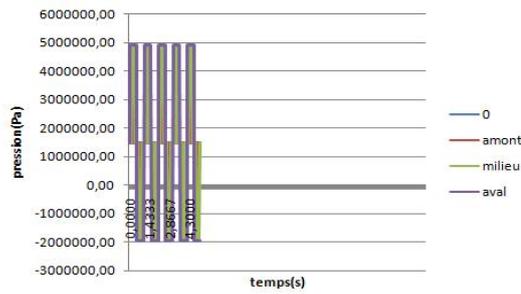
Fermeture :

Graphiques des débits :



Graphiques des pressions :





Nous constatons des résultats similaires à la modification du module de Young. L'onde est accélérée lorsque la conduite s'agrandi. En effet, d'après la formule 2.1, le module de Young E et l'épaisseur e sont sous la même fraction. Lorsque l'épaisseur augmente, la célérité de l'onde augmente aussi. Il est donc normal qu'une modification de l'épaisseur induise les même résultats qu'une modification du module de Young

2.5 Influence de la compressibilité du fluide

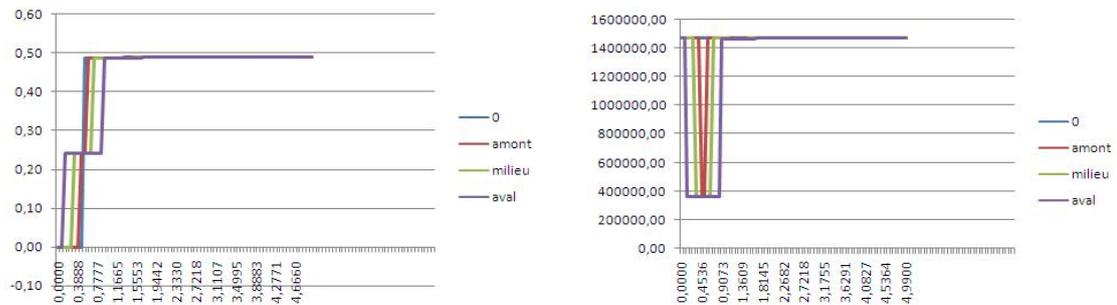
Dans cette section, nous modifierons uniquement le paramètre K , en gardant les configurations initiales pour le reste des paramètres. Ainsi, nous avons

- Coefficient de compressibilité $K = 10^9$ ou $K = 3(10^9)$

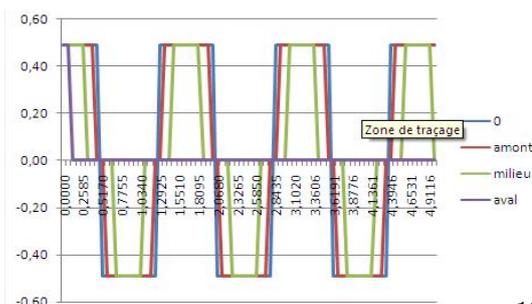
Nous allons donc présenter deux cas, un où le coefficient est augmenté, et un où il est diminué.

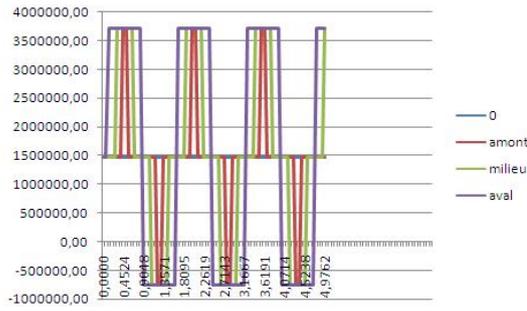
2.5.1 Diminution de K

Une ouverture de vanne nous donne les graphiques suivants :



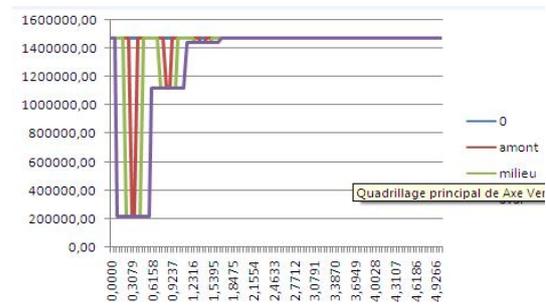
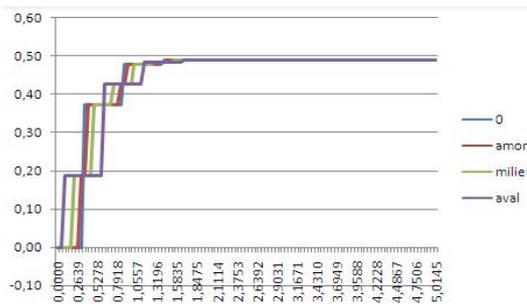
Une fermeture de vanne nous donne les résultats suivants :



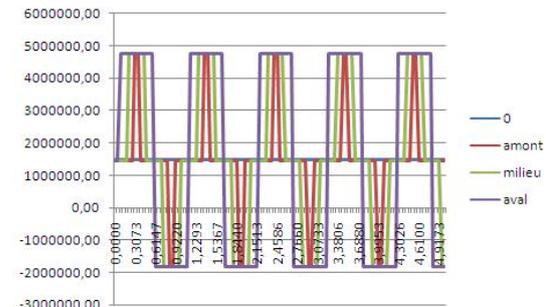
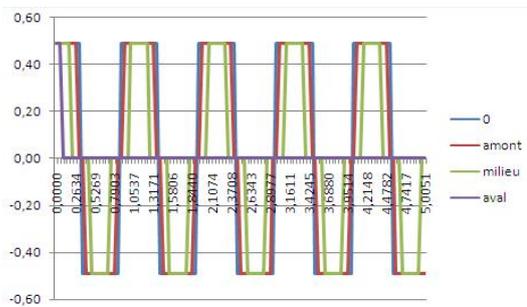


2.5.2 Augmentation de K

Ici nous considérerons le cas où K augmente.
 Nous obtenons donc, pour une ouverture de vanne :



Et une fermeture de vanne nous donne :



Nous remarquons que l'augmentation de la compressibilité du liquide accélère le phénomène du coup de Bélier (les vitesses observées sur les graphes du débit étant plus grandes) et que la diminution de la compressibilité aura l'effet inverse.

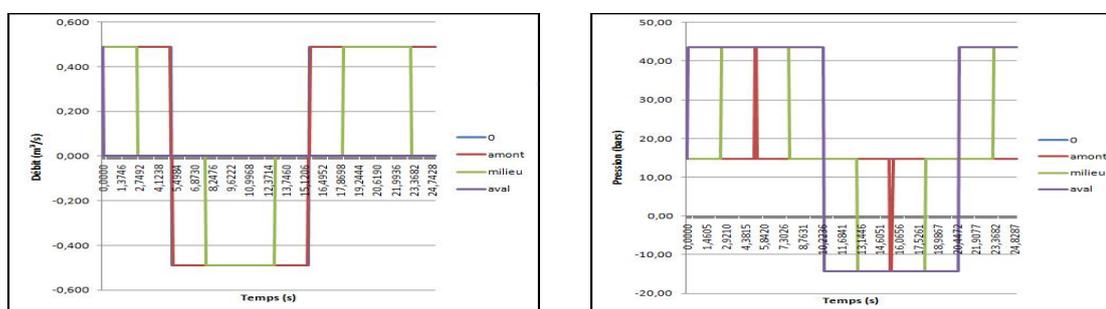
Pour les graphes du débit lors de la fermeture, la période du phénomène diminue en effet avec l'augmentation de la compressibilité tandis que pour ceux réalisés lors de l'ouverture de la vanne, on constate une accélération de la configuration en palier du graphe pour une augmentation de la compressibilité également.

Pour les graphes des pressions, on constate l'apparition accélérée de paliers avec l'augmentation de compressibilité lors de l'ouverture et une accélération de la vitesse du mouvement périodique de l'onde de pression lors de la fermeture de la vanne.

Ces résultats semblent logiques puisque conformément à la formule 2.1 nous voyons que la célérité d'une onde est directement proportionnelle à la compressibilité du fluide.

2.6 Analyse du phénomène sur une conduite dix fois plus longue

Comparons à présent l'effet obtenu pour une conduite de 6000 m de long. Nous n'analyserons que le cas de fermeture de vanne, l'ouverture lui étant en tout point similaire. On a observé le phénomène avec le même pas de temps, afin de ne pas manquer de données, mais sur une durée cinq fois plus longue, afin de pouvoir observer la physique du phénomène (on passe à 25s de temps d'observation). Les résultats sont repris dans les graphiques qui suivent. Les données amont sont toujours mesurées à 100 m de l'entrée de la conduite, on gagne donc une précision de 10% sur l'approximation « amont » puisque la conduite est dix fois plus longue.



La différence avec les graphiques de départ est la longueur des différents paliers détaillés pour le cas de base. En effet, on peut constater que ceux-ci sont exactement dix fois plus grands. Ceci est simplement dû au fait que l'onde met 10 fois plus de temps à parcourir toute la conduite avant de revenir en un même point de celle-ci. Ainsi, avant de voir les données changer en un point, il y a un palier 10 fois plus long. La célérité de l'onde n'a pas changé, comme prévu par l'équation vue en théorie.

3 Conclusion

A travers l'étude de ces différents paramètres, on a remarqué ceux qui influençaient vraiment le phénomène et donc déterminé certaines méthodes pour minimiser ou supprimer l'effet du coup de bélier dans les écoulements en conduite. Certaines autres mesures peuvent être mises en place comme la pose d'une cheminée.