

1. Introduction :

L'étude du phénomène du coup de bélier a fait, depuis presque un siècle et demi, l'objet d'une succession de travaux tendant à dégager de la théorie mathématique, des formules pratiques pour ses divers effets. Ceci a pris, dans ces dernières années, un intérêt particulier en raison de l'importance exceptionnelle des conduites amenant les forces hydrauliques aux puissantes usines d'énergie électrique. Il paraît donc utile, au point de vue de l'art de l'ingénieur, de faire l'inventaire de ces travaux et d'en indiquer sommairement les résultats.

Un coup de bélier est une augmentation ou une diminution momentanée de la pression. Celle-ci ne dure que quelques fractions de seconde, mais les pointes de pression qui surviennent alors peuvent atteindre des valeurs représentant plusieurs fois la pression de service. Les pointes se produisant ainsi peuvent se manifester aussi bien sous la forme d'une surpression que sous celle d'une dépression (cavitation). La vitesse de propagation des ondes de pression peut atteindre jusqu'à 1400 m/s et dépend du matériau et de l'épaisseur de la paroi du tuyau.

Les coups de bélier dans les conduites surviennent à l'occasion de changements soudains dans l'écoulement du fluide soit par :

- Accélération de la masse liquide lors de la mise en marche de pompes .
- Interruption du débit de fluide à l'arrêt des pompes .
- Arrêt brusque d'un fluide en mouvement par une vanne à fermeture rapide .
- Modification soudain de la direction du fluide par des électrovannes .
- Modification brutale de la section de la conduite due à des rétrécissements et à des étranglements .

Avec pour conséquences :

- Endommagement des appareils et de la robinetterie montés sur l'installation .
- Ruptures de conduites, bruits et vibrations .
- Desserrage ou perte d'étanchéité des raccords .



Figure 1 Conséquences du coup de bélier

2. l'aspect qualitatif :

Dans le cas d'une pompe alimentant un réservoir par l'intermédiaire d'une conduite, si le débit à travers la pompe est brusquement interrompu, la vanne clapet placée immédiatement en aval se ferme et, l'écoulement de la couche liquide en aval cesse. Cependant les couches voisines ont tendance à poursuivre leur mouvement et s'écartent de la pompe, provoquant une réduction locale de la pression, ce qui entraîne la décompression du fluide, en conséquence la contraction de la conduite.

Ce phénomène crée une disponibilité temporaire de masse liquide qui permet de maintenir en mouvement, durant quelques instants encore la couche de fluide immédiatement en amont ; puis le mouvement cesse . la couche de fluide se décomprime et fournit un volume qui permet le mouvement de la couche suivante et ainsi de suite (Lencastre,2002).

Nous avons 4 phases physiques du coup de bélier qui sont comme suit:

➤ Phase1

l'eau poursuit son ascension, mais la conduite n'est plus alimentée ,ainsi est engendrée une onde de dépression qui se propage dans la conduite à la vitesse des ondes élastiques , jusqu'à

ce que toute la conduite soit à la dépression . Cette dernière atteindra le réservoir au bout d'un temps $\theta = L/c$, au bout de ce temps , la conduite est totalement en dépression et l'eau est immobile.

La pression dans la section b , au passage de la conduite dans le réservoir , est inférieure à la pression dans le réservoir , ce qui provoque un écoulement au sens inverse (du réservoir à la pompe) comme c'est montré dans la figure 3-1.a.

➤ Phase 2

La conduite déformée dans les limites élastiques, prend son état initial et l'eau redescend dans la conduite. Cet écoulement rétablit la pression dans les couches successives de fluide antérieurement décomprimées, rétablissant l'état initial dans la section de la conduite . Cette onde d'équilibre se propage du réservoir à la vanne à la vitesse ($-c$), et atteint la vanne dans le temps 2θ , à compter du début du phénomène .

Toute l'eau redescendue se trouvera arrêtée par le clapet de protection de la pompe qui est fermé. figure 3-1 .b.

➤ Phase 3

Etant donné que le mouvement du fluide s'opérait du réservoir à la pompe , la couche du fluide près de la pompe est obligée de s'arrêter . Donc la première tranche de fluide en contact avec le clapet va être comprimée par les tranches suivantes . Cette réduction d'énergie cinétique a pour effet une augmentation locale de la pression , ce qui provoque une compression du fluide et une distension de la conduite est transmise au long de cette dernière jusqu'au réservoir, où il arrive au bout du temps 3θ . figure 3-1.c.

➤ Phase 4

Quand cette onde de surpression atteint le réservoir , comme la pression dans ce dernier est maintenue inférieure à la pression de la conduite , l'écoulement est inversé ce qui permet de revenir aux conditions initiales de pression et de vitesse , jusqu'à ce que , dans le temps 4θ , cette onde atteigne la section de la pompe , et que soient créées les conditions pour que recommence tout le processus , avec une nouvelle onde de pression, comme c'est montré dans la figure 3-1.d . Durant cette phase l'élasticité permet à la conduite de prendre de proche en proche du réservoir à la pompe , son diamètre initial .

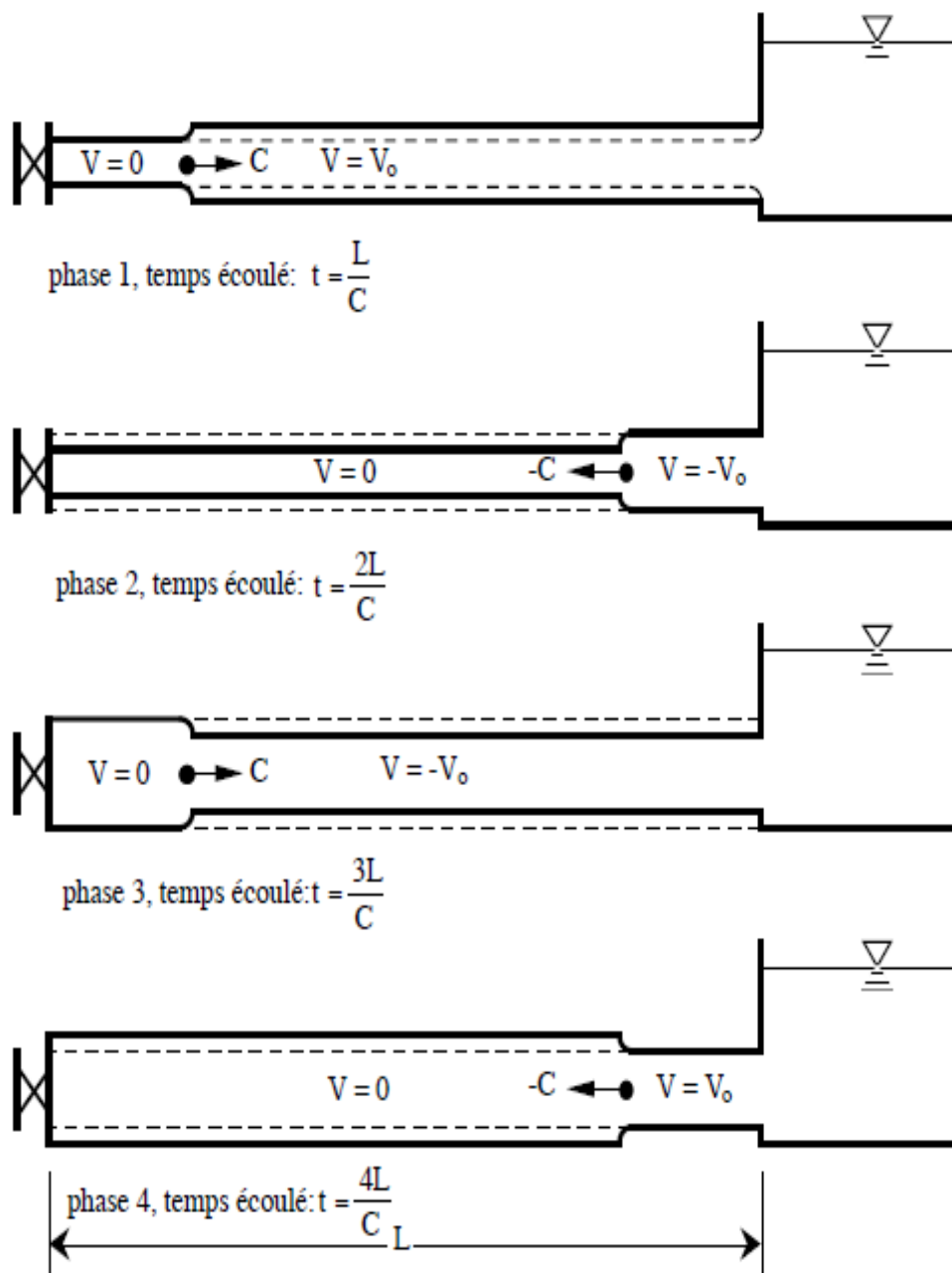


Figure 2 Schéma d'illustration des variations de pressions.

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

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K D / e}} \quad (1)$$

- D : diamètre intérieur de la conduite (m).
- a : vitesse (m/s).
- e : épaisseur du tuyau (m).
- K : coefficient dépendant du matériau constituant la canalisation.

<i>Matériaux</i>	<i>K</i>
- Fonte grise	1
- Fonte ductile	0.6
- Acier	0.5
- PVC	33
- Amiante ciment	4 ou 4.4
- Polyéthylène haute densité	83
- Polyéthylène basse densité	500
- Béton	5
- Plomb	5

3. Les moyens de protection contre le phénomène du coup de bélier :

La cause de la variation des pressions c'est le changement des vitesses du fluide. En conséquence, une façon de diminuer l'effet des régimes transitoires sera d'empêcher leurs accroissements.

Une option est de dimensionner les canalisations avec une résistance mécanique qui permettra de subir les surpressions pendant le régime transitoire, cette option, engendre un risque de surdimensionnement du réseau et augmente du cout.

Nous pouvons aussi ajouter des dispositifs pour réduire la cause des oscillations, les variations de la vitesse du fluide. Cette mesure de protection directe est toujours en série avec la canalisation, ça permet de réduire l'effet des que le régime transitoire commence. Par contre, quand il n'est pas possible de modifier la cause directement, nous pourrons aussi modifier non la cause mais l'effet, en les diminuant. Ces dispositifs indirects, sont mis en

parallèle avec la canalisation. Ils procèdent seulement quand le coup de bélier est produit autour.

Nous avons deux types de dispositifs d'action directe et indirecte ;

➤ 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

A. Volant d'inertie :

Il y a longtemps, les volants d'inertie mécaniques servaient uniquement à maintenir les machines dans le bon fonctionnement de cycle en cycle, facilitant ainsi la tâche de la révolution industrielle. Au cours de cette période, plusieurs formes ont été conçues et mises en œuvre, mais il a fallu attendre au début du XXème siècle pour que les formes du volant et les contraintes de rotation aient été analysées en profondeur.

Plus tard, dans les années 70, le stockage d'énergie dans les volants d'inertie a été proposé comme un objectif prioritaire pour les véhicules électriques et générateurs de secours fixes. A la même époque, des rotors ont été construits en fibres composites, et dans les années 80, des paliers magnétiques ont commencé à apparaître (Domingo ,2011).

Il est monté sur l'arbre du groupe électropompe, peut renforcer l'effet de l'inertie du groupe et cela en assurant L'augmentation de l'inertie dans le groupe de pression permet d'allonger le temps d'arrêt, donc de diminuer les effets du coup de bélier. Toute fois la possibilité de l'utilisation des volants est assez limitée en effet, si la longueur de la conduite dépasse quelque centaines de mètres. Nous arriverons rapidement à des poids exagérés pour le volant et le système cesse d'être économique, d'autre part, plus le volant sera lourd, plus grande devra être la puissance du moteur pour vaincre, au démarrage, l'inertie de ce volant. Cette situation peut conduire à des appels d'intensité de courant impraticable, qui risquent de compromettre le démarrage des moteurs dans des conditions satisfaisantes (Lencastre , 2002).



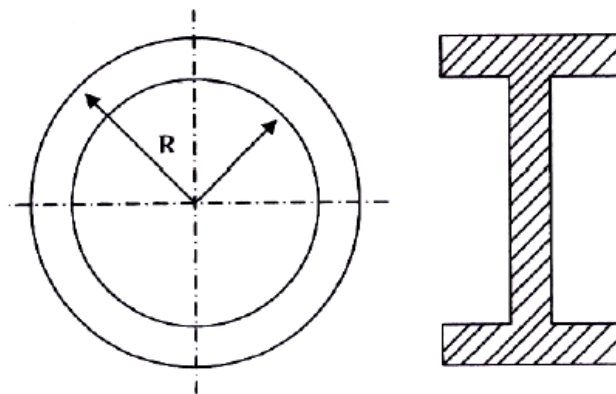
Figure 3 Station de pompage

L'inertie du groupe lui-même, renforcée éventuellement par l'inertie du volant, peut cependant être un moyen simple pour résoudre le problème dans quelques cas l'énergie cinétique E_c (J-Joule) dont le groupe est animé au moment du déclanchement est:

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (5.01)$$

ou I est le moment d'inertie du groupe (kg. m²) et ω la vitesse angulaire (rad/s)

$$I = \frac{PD^2}{4} \quad (5.02)$$



Volant d'inertie

Figure 4 volant d'inertie

La puissance P (W-Watt) absorbé par le groupe est donnée par

$$P = \frac{\varpi QH}{n} \quad (5.03)$$

ou; ϖ est le poid spécifique (N/m^3) ; H la hauteur manométrique totale (m) ;

Q le débit (m^3/s) et n est le rendement correspondant au point de fonctionnement du groupe .a partir de la puissance, nous aurons le couple T (N.m):

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{\varpi QH}{\omega n} \quad (5.04)$$

Le travail réalisé durant le temps (dt) sera donc($T \omega dt$) .qui sera égal à la variation de l'énergie cinétique dE_c

c'est-à-dire : $T \omega dt = d(I\omega^2/2)$

nous aurons : $T \omega dt = I \omega d\omega$,

d'où les différences finies

$$\Delta\omega = \frac{P}{I} \Delta t \quad (5.05)$$

ces équations permettent de calculer le coup de bélier à partir de la méthode des caractéristiques, ou de Bergeron (Lencastre, 2002).

Ce que nous pouvons conclure ici c'est que Le volant d'inertie est essentiellement un système ou un dispositif pour stocker l'énergie cinétique dans une masse en rotation. Sa principale caractéristique, par rapport à d'autres systèmes, est la capacité d'absorber et de transférer l'énergie dans des périodes de temps très courts. Il est convenable pour des systèmes mécaniques de cycle d'énergie discontinu où la période est très courte. C'est pour ça que les volants d'inertie ont traditionnellement été utilisés dans les moteurs et les compresseurs à pistons, presses, découpeuses, etc (Lencastre ,2002).

B. Les réservoirs d'air

Le réservoir d'air est l'appareil le plus utilisé pour la protection contre le coup de bélier. C'est un récipient contenant de l'air comprimé dans sa partie supérieure et de l'eau dans sa partie inférieure. Ces appareils sont aussi appelés "accumulateur, cloche à air, ballon d'air, réservoir anti-bélier,...etc." (Figure 4). Par ailleurs, un compresseur d'air est habituellement utilisé pour garder le volume d'air dans certaines limites (à cause des fuites) d'une part, et d'autre part, un clapet anti-retour est souvent prévu entre la pompe et le ballon d'air. Ce dispositif est très simple et protégera l'installation aussi bien contre les dépressions que contre les surpressions.



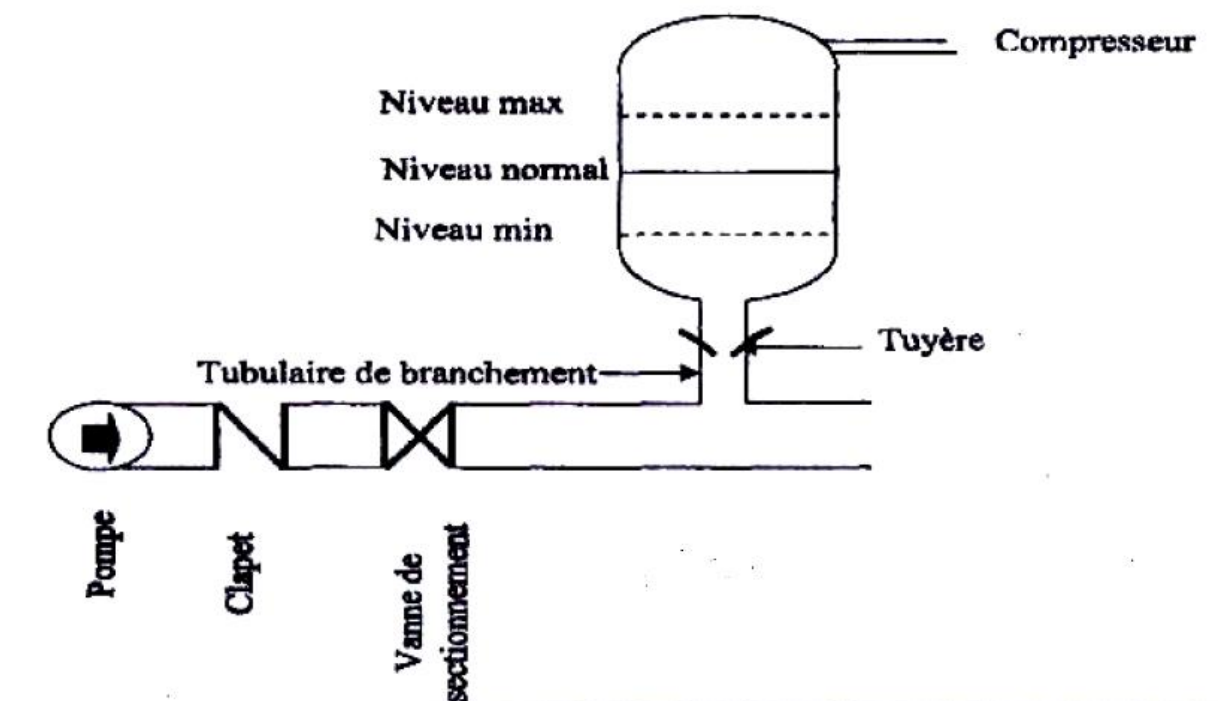
(a)



(b)

Figure 5 réservoir d'air (a) vertical (b) horizontal

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



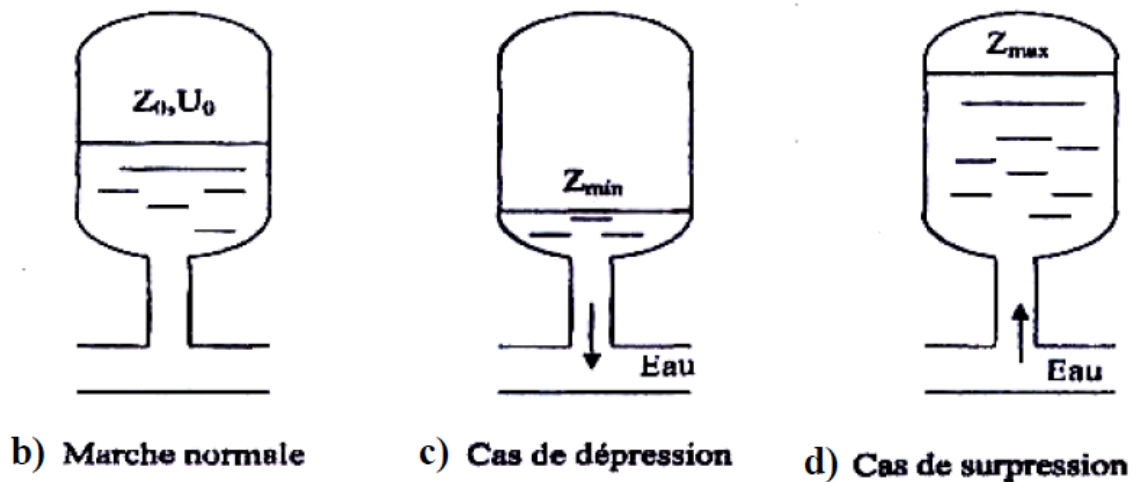


Figure 6 Ballon d'air et ses accessoires

Dimensionnement des réservoirs d'air

Calcul simplifié d'un réservoir d'air

Dans ce cas, on considère le phénomène comme une oscillation en masse, c'est-à-dire :

- On néglige l'élasticité de la conduite et la compressibilité de l'eau (mouvement en bloc).
- Les pertes de charge ne sont pas prises en considération dans la conduite de refoulement.
- Le dispositif ne comporte pas d'organe d'étranglement.

Suite à ces hypothèses, on aura à faire le calcul simplifié d'un réservoir d'air qui peut largement suffire pour des petites installations d'environ 30 l/s et de 1000 à 1200 m de longueur de refoulement.

VIBERT a donné une expression relativement simple qui permet d'avoir le volume U_0 de l'air contenu dans la cloche sous un régime de marche à la vitesse V_0 . Les caractéristiques de l'air dans le réservoir d'air en marche normale sont Z_0 et U_0 (Figure (6)).

Z_0 est la pression absolue exprimée en mètres d'eau. Si on néglige la hauteur de l'eau dans le réservoir d'air au-dessus de l'axe de la conduite, la pression absolue Z_0 est telle que :

$$Z_0 = H_r + 10$$

Où : H_r correspond à la hauteur géométrique de refoulement.

On distingue ici deux phases :

- ⌚ **1ère phase :** A la fin de la dépression, l'air occupe un volume plus grand (Figure (6c)) et sa pression sera donc plus faible ; ainsi la pression absolue est Z_{\min} .
- ⌚ **2ème phase :** A la fin de la surpression, l'air occupe un volume plus petit qu'en marche normale (Figure (6.d)) et sa pression sera dans ce cas Z_{\max} .

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

$$\frac{U_0}{LS} = \frac{h_0}{Z_0} \cdot \frac{1}{f\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

Dans laquelle, S/LU_0 , h_0/Z_0 et $1/f(Z/Z_0)$ se trouvent sur les trois échelles de l'abaque (Figure (7)). Avec :

- U_0 : Volume d'air en m^3 .
- L : Longueur de la conduite en m.
- S : Section de la conduite en m^2 .
- $h_0 = V_0^2 / 2g$

Avantages des réservoirs d'air

- Dimensions réduites par rapport à d'autres dispositifs comme la cheminée d'équilibre.
- Ils sont préconisés comme solutions dans les régions froides, car ils sont faciles à chauffer pour éviter les effets du gel.
- Ils sont installés parallèlement au sol, cela offre une meilleure résistance aux vents et aux tremblements de terre.

Inconvénients des réservoirs d'air

- La nécessité de fournir de l'air comprimé constamment.
- La nécessité de prévoir plusieurs équipements auxiliaires qui demandent une maintenance constante et des frais élevés.

C. La cheminée d'équilibre

Une cheminée d'équilibre est constituée d'un réservoir cylindrique à l'air libre et à axe vertical.

Elle joue le même rôle que les réservoirs d'air, mais malheureusement on arrive à des ouvrages de dimensions assez considérables dans le cas des hauteurs de refoulement moyennes et grandes.

Une cheminée d'équilibre est généralement aménagée en dérivation à la jonction d'une galerie d'amenée en charge et d'une condition forcée dans le but de réduire la valeur des surpressions produites par le coup de bélier.

La cheminée d'équilibre est aussi utilisée sur le tracé de refoulement qui comporte des points hauts où peut survenir une cavitation en régime transitoire.

Les cheminées d'équilibre doivent être établies de façon à remplir les conditions suivantes :

- L'amortissement des oscillations doit être aussi important et aussi rapide que possible.
- Leur volume doit être aussi petit que possible pour préserver le coté économique





Figure 8 la cheminée d'équilibre

Types de cheminées d'équilibre

1. Cheminée déversante

Elle comporte en sa partie supérieure un déversoir qui évacue une partie de l'eau mise en oscillation. Il en résulte une réduction de la surpression due à l'oscillation en masse dans la galerie.

2. Cheminée à épanouissement

Appelée aussi cheminée à sections multiples (Figure (9)), elle présente quelques avantages dont : une réduction de la montée lors de la fermeture et un amortissement des oscillations par les pertes de charge dues aux changements de sections.

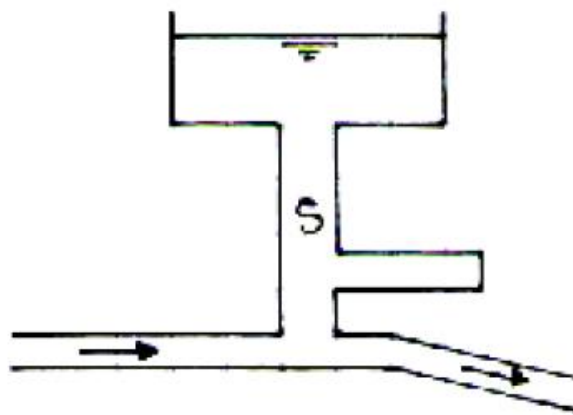


Figure 9 Cheminée à épanouissement

3. Cheminée à étranglement

L'étranglement à la base de la cheminée produit des pertes de charge importantes (Figure 10), il en résulte d'une part, une réduction de l'amplitude des oscillations et par suite, de la hauteur atteinte par l'eau dans la cheminée ; et d'autre part, un accroissement de l'amortissement des oscillations qui s'ajoute à celui créé par les pertes de charge dans la galerie d'amenée.

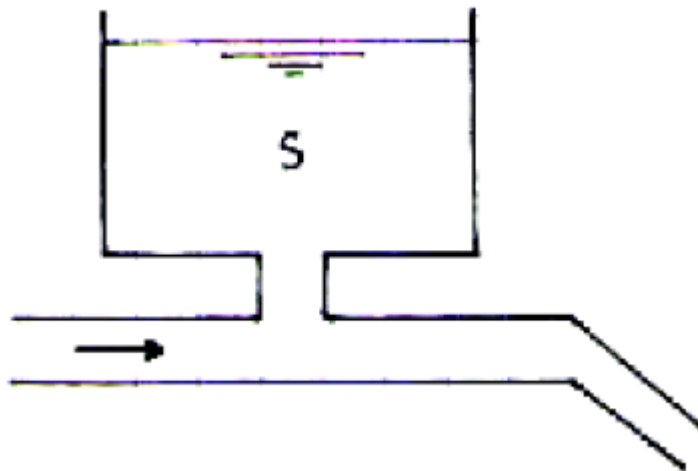


Figure 10 Cheminée à étranglement

4. Cheminée différentielle

Elle comporte deux chambres C_1 et C_2 de sections différentes S_1 et S_2 (Figure 11). Les périodes d'oscillations des deux chambres sont différentes, il se produit ainsi un courant d'eau qui circule d'une chambre à une autre, ceci entraînera des pertes de charge supplémentaires qui accroissent l'amortissement.

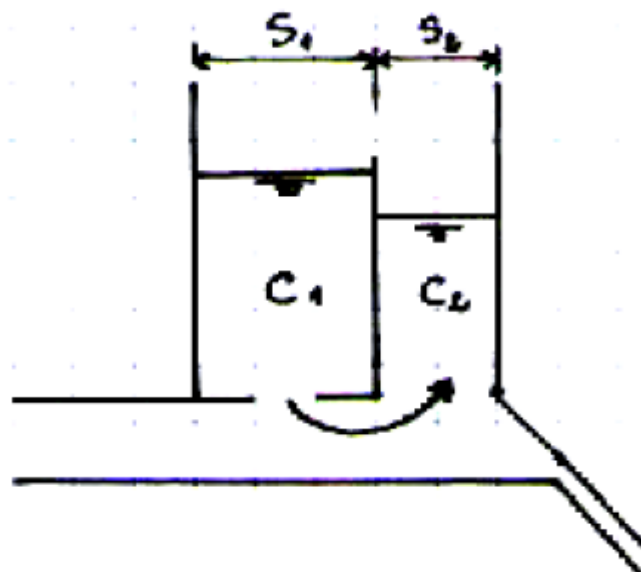


Figure 11 Cheminée différentielle

Etude qualitative

Considérons une conduite de section S_1 et de longueur L entre un réservoir de grandes dimensions et une cheminée d'équilibre de section S_2 (Figure 12). On appelle Z la cote du niveau instantané de la cheminée par rapport au niveau statique. Supposons que la vanne (V) de la conduite forcée soit brusquement fermée ; le débit à travers la conduite s'annule, engendrant l'apparition du phénomène du coup de bélier. L'eau en mouvement dans la galerie ne trouve pas d'autre exutoire que la cheminée d'équilibre, et elle pénètre dans celle-ci en faisant monter le niveau de N_0 (niveau correspondant à la ligne de charge relative au débit Q_0) jusqu'à N_2 , d'où une transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle. Lorsque le niveau N_2 est atteint, cette énergie potentielle se transforme en énergie cinétique : l'eau contenue dans la galerie est mise en mouvement en sens contraire du sens initial, et ainsi de suite. Le système "Réservoir-Galerie-Cheminée" est le siège d'une oscillation en masse.

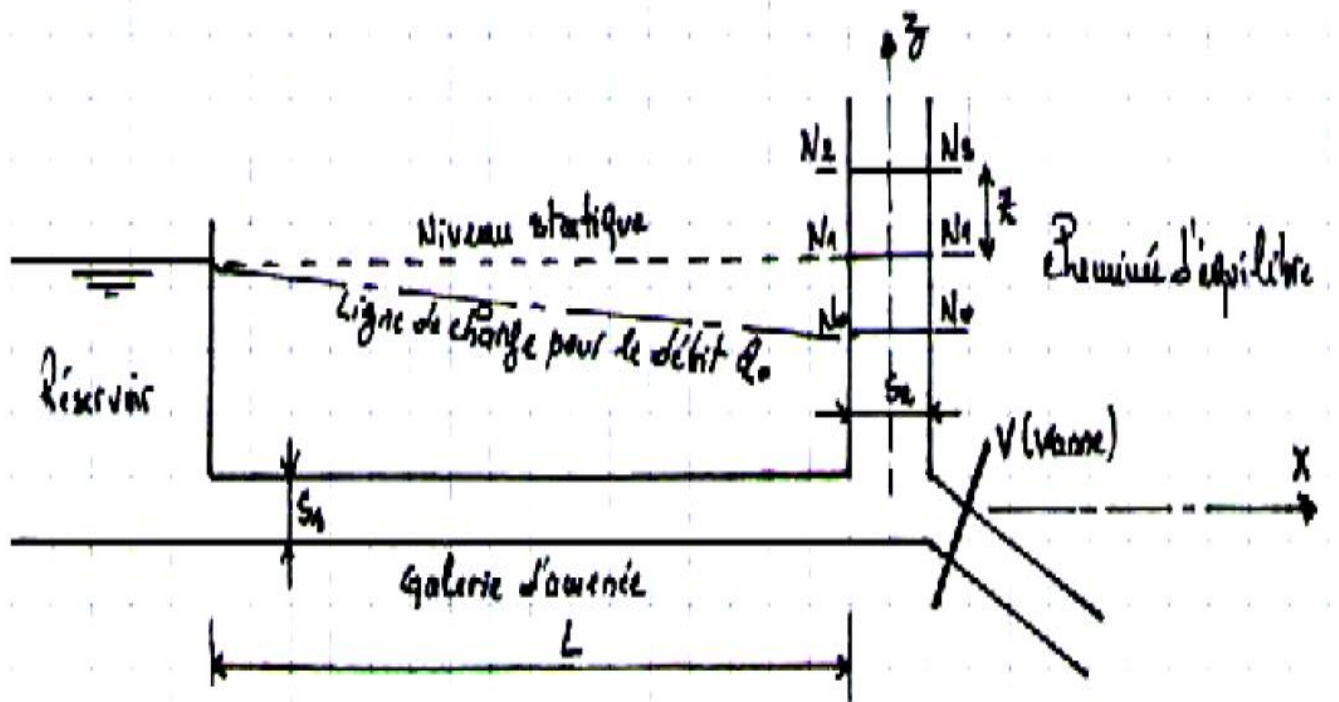


Figure 12 Cheminée d'équilibre en conduite forcée (Gravitaire)

Etude quantitative

On considère un système idéal, dont les hypothèses de base sont les suivantes :

- La section de la cheminée est constante.
- Le réservoir est de très grandes dimensions (niveau invariable).
- Les pertes de charge dans la conduite et la cheminée sont négligeables (le niveau $N_0 \approx N_1$).
- La fermeture de la vanne est supposée complète et instantanée.

L'amplitude Z est donnée par l'expression suivante :

$$Z = u_0 \sqrt{\frac{L}{g} \frac{S_1}{S_2}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$$

Où : u_0 est la vitesse initiale dans la conduite ; L est la longueur de la conduite ; g est l'accélération de la gravité ; S_1 est la section de la conduite ; S_2 est la section de la cheminée ; T est la période des oscillations, telle que :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g} \frac{S_2}{S_1}}$$

Soit alors :

$$Z = u_0 \sqrt{\frac{L}{g} \frac{S_1}{S_2}} \sin\left(\sqrt{\frac{g}{L} \frac{S_1}{S_2}} t\right)$$

L'amplitude maximale est :

$$Z = u_0 \sqrt{\frac{L}{g} \frac{S_1}{S_2}}$$