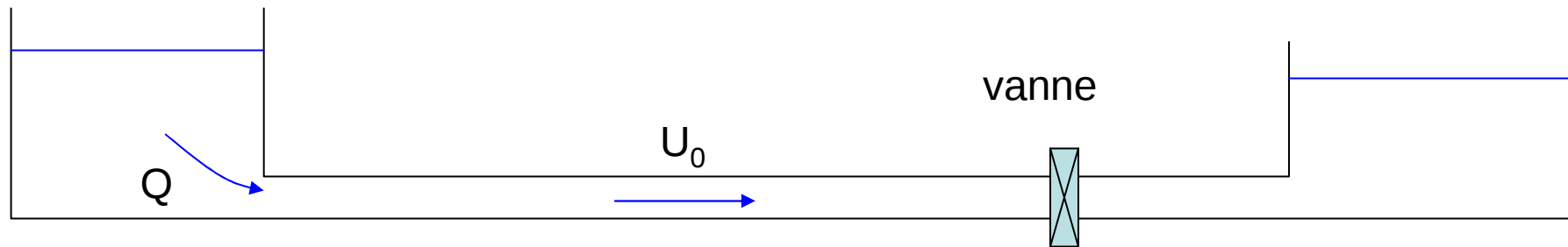

Coups de béliers dans les réseaux sous pression

Principe
Protections anti-béliers
Le bélier hydraulique
Equations



Principe

- Phénomènes transitoires
- Masse volumique de l'eau qui peut varier (un peu...)
- Se produit à la fermeture brusque d'une vanne



Q_0 et U_0 en régime permanent

fermeture instantanée de la vanne

⇒ ???

Principe

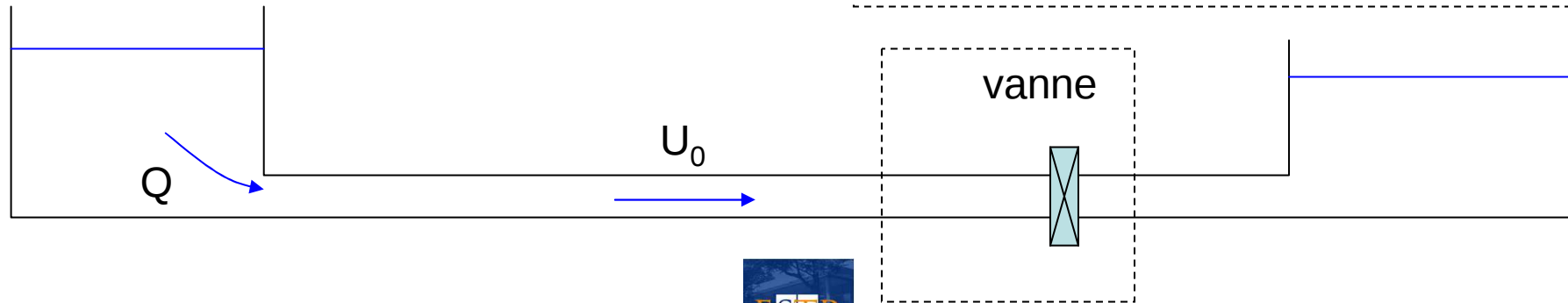
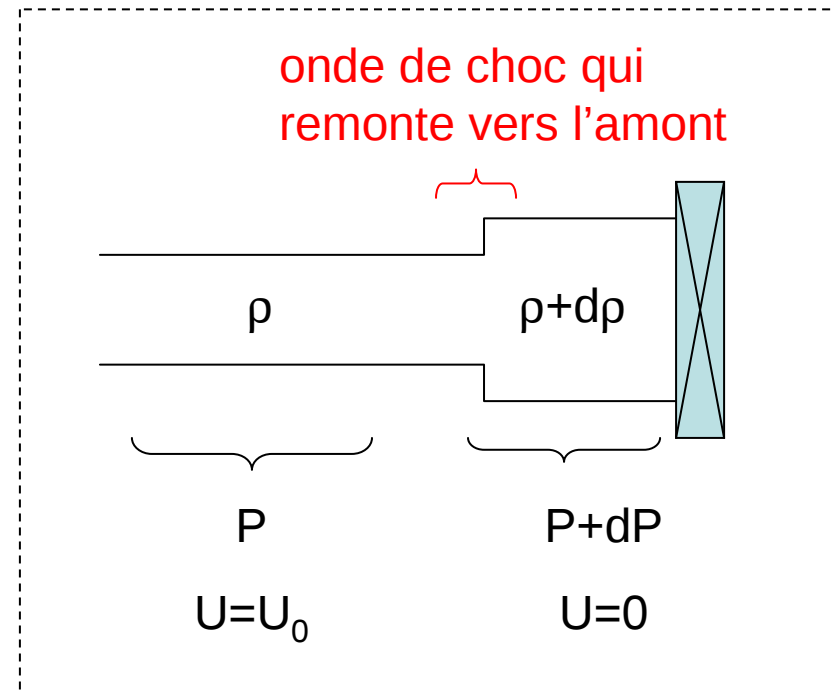
- La fermeture de la vanne produit 4 effets
 - annulation de la vitesse
 - augmentation de la pression
 - dilatation (allongement si possible) de la conduite
 - augmentation de la masse volumique du fluide
- Ces effets vont se propager très rapidement en amont dans la conduite sous forme d'onde de choc, on distingue 4 temps de propagation

Temps 1 de propagation du coup de bélier

Juste après la fermeture de la vanne

- annulation de la vitesse
- augmentation de la pression
- dilatation de la conduite
- augmentation de la masse volumique du fluide

On suppose pour cette description qu'il n'y a pas de perte d'énergie pdt la propagation et les réflexions

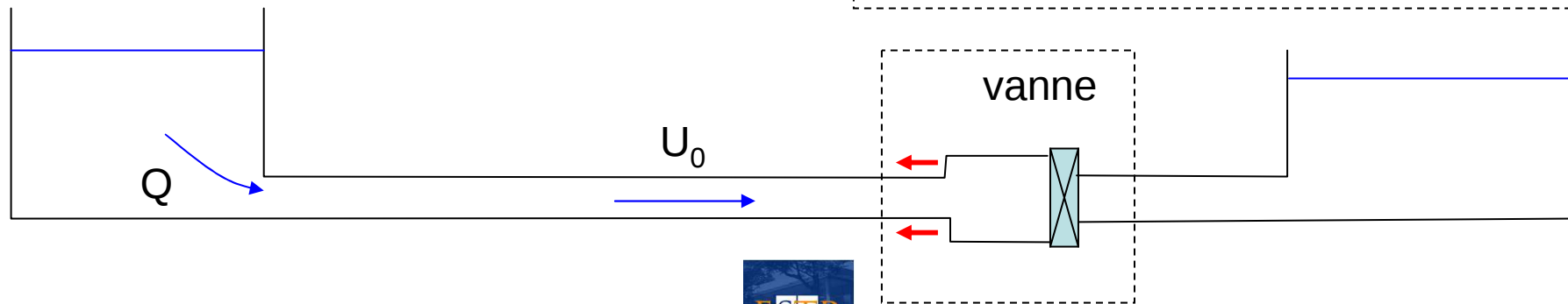
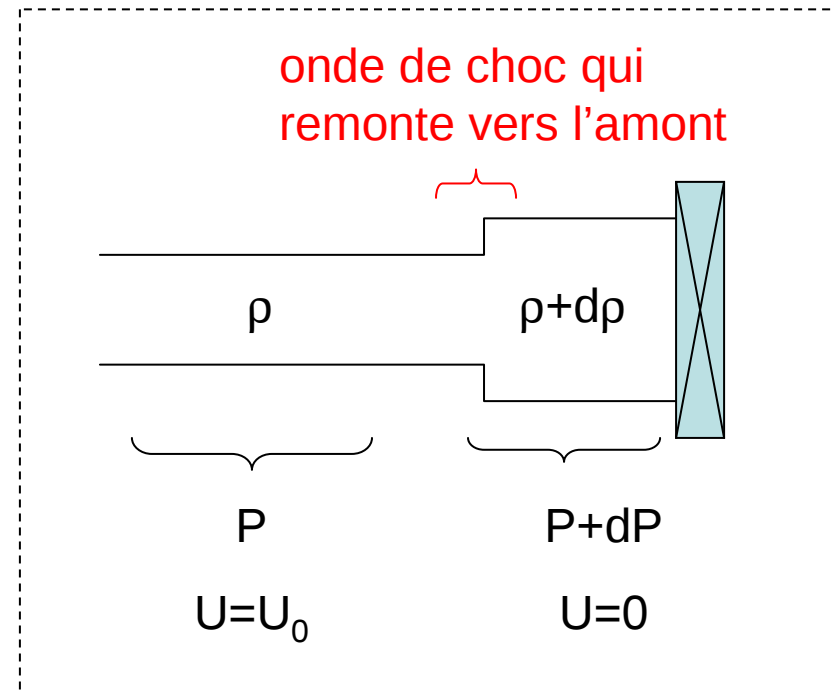


Temps 1 de propagation du coup de bélier

Juste après la fermeture de la vanne

- annulation de la vitesse
- augmentation de la pression
- dilatation de la conduite
- augmentation de la masse volumique du fluide

Propagation très rapide jusqu'au réservoir amont (plus la conduite est rigide plus la vitesse de propagation est rapide)



Temps 1 de propagation du coup de bélier

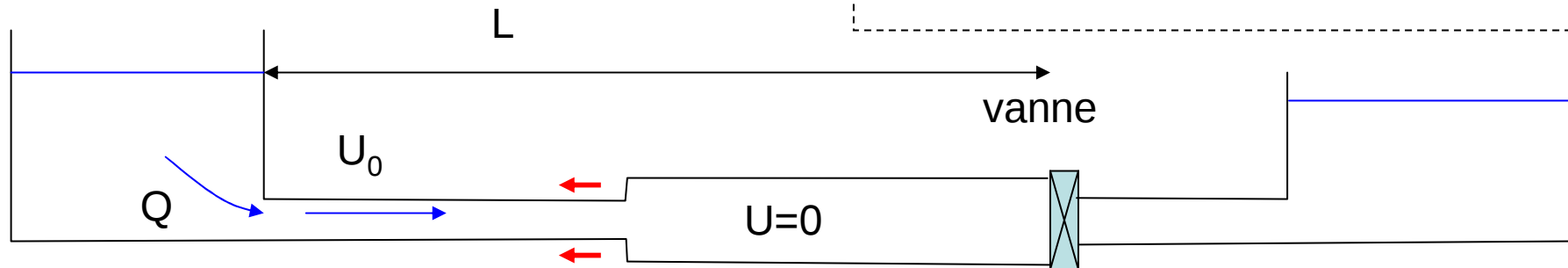
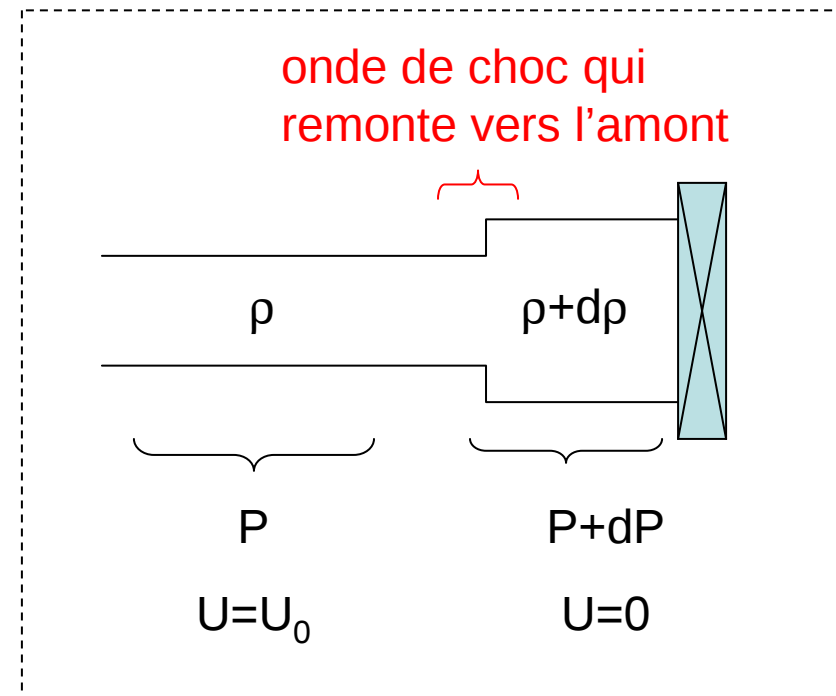
Juste après la fermeture de la vanne

- annulation de la vitesse
- augmentation de la pression
- dilatation de la conduite
- augmentation de la masse volumique du fluide

On appelle a la vitesse de l'onde de choc, L longueur de la vanne

$a \gg U$

Le temps 1 dure de $t = 0$,  $t = L/a$

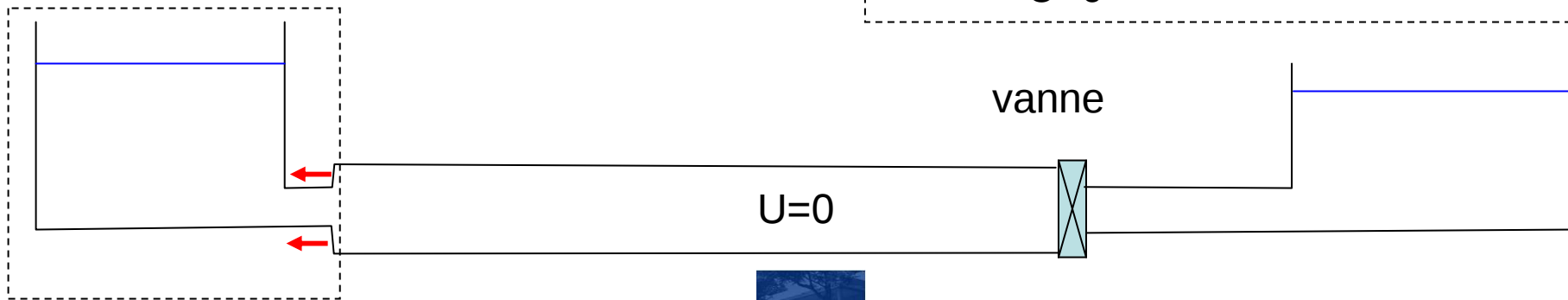
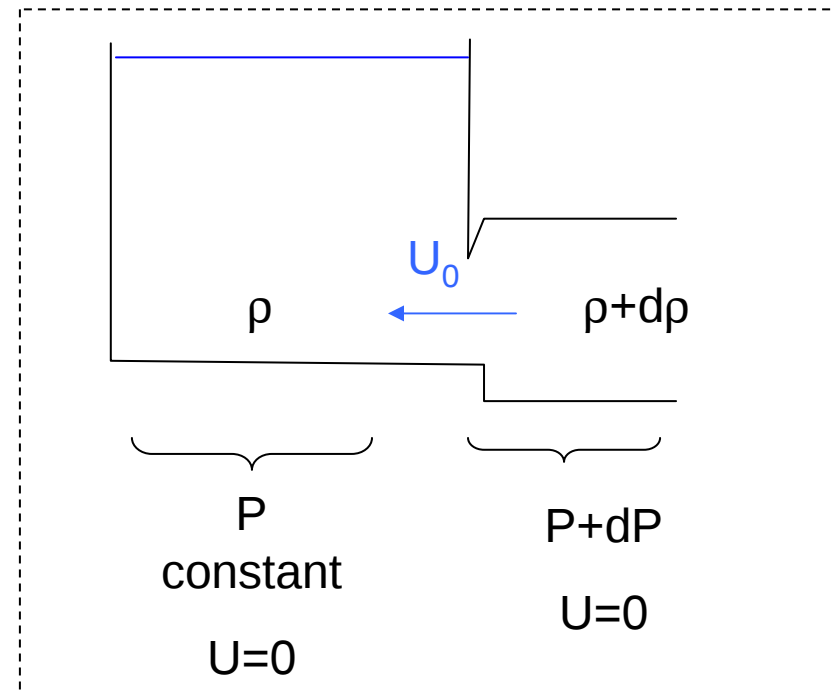


Temps 2 de propagation du coup de bélier

- Arrive de l'onde de choc en pression au réservoir amont

La pression de la conduite s'équilibre avec celle du réservoir

Cet équilibrage se produit en induisant une vitesse U_0 de la conduite vers le réservoir

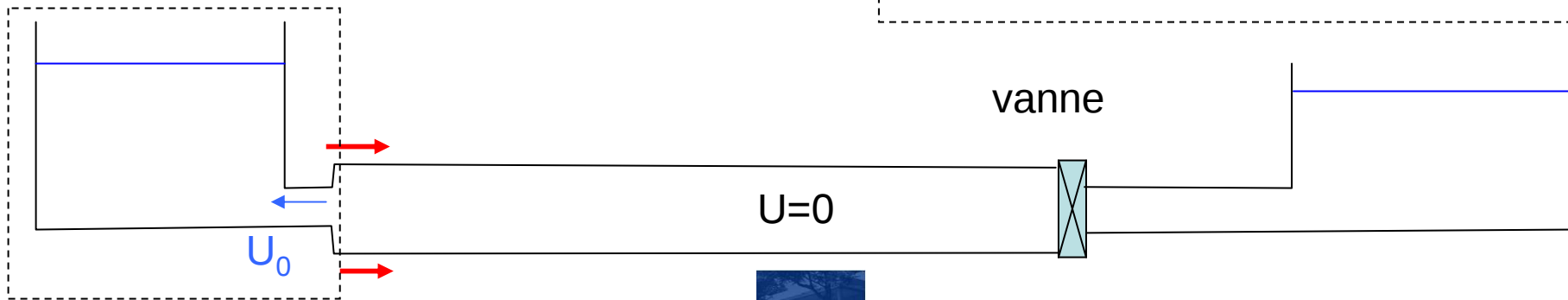
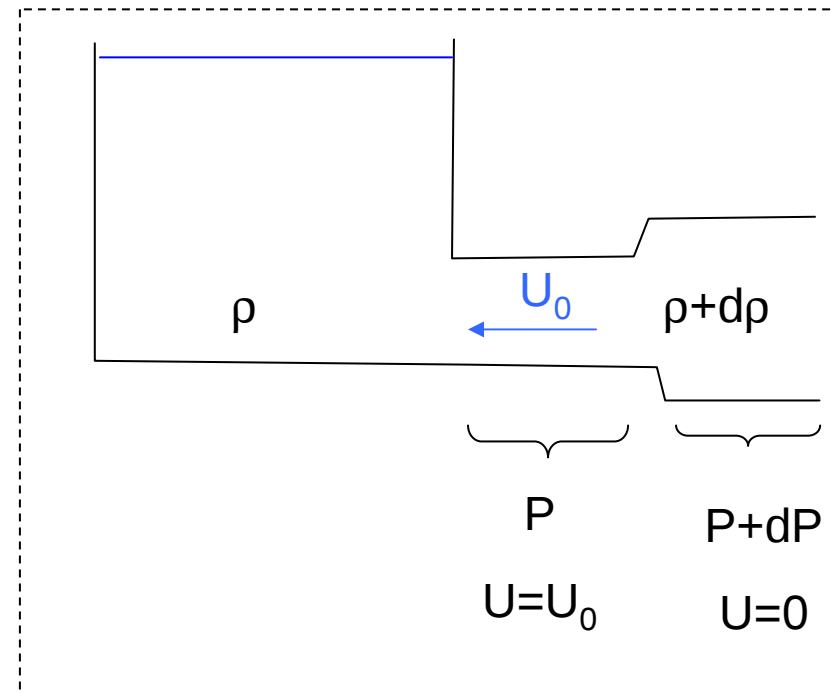


Temps 2 de propagation du coup de bélier

- Arrive de l'onde de choc en pression au réservoir amont

Ce r-équilibrage se propage dans la conduite vers la vanne  la vitesse a

- la pression redevient normale,
- la conduite, la masse volumique également,
- le fluide se déplace dans le sens inverse du sens initial



Temps 2 de propagation du coup de bélier

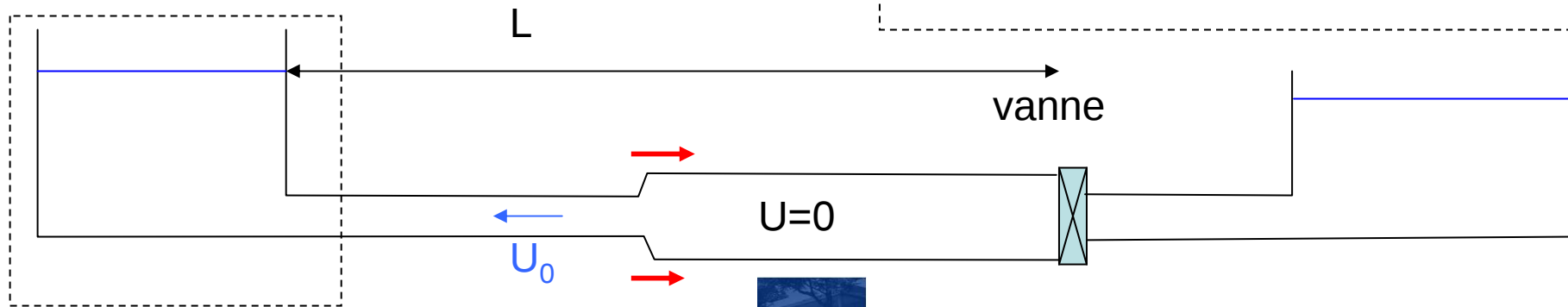
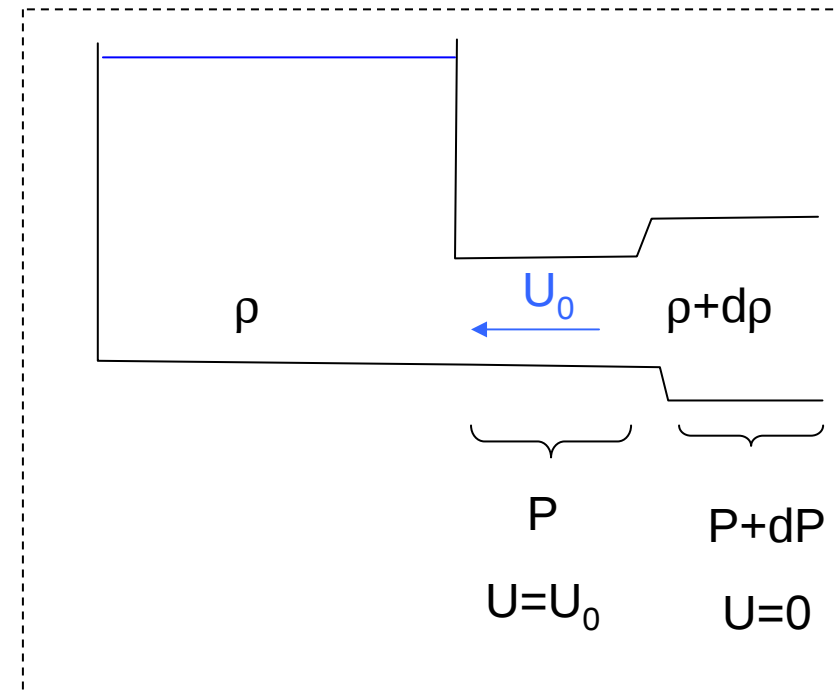
- Arrive de l'onde de choc en pression au réservoir amont

Cette propagation dure du temps

$$t = L/a$$

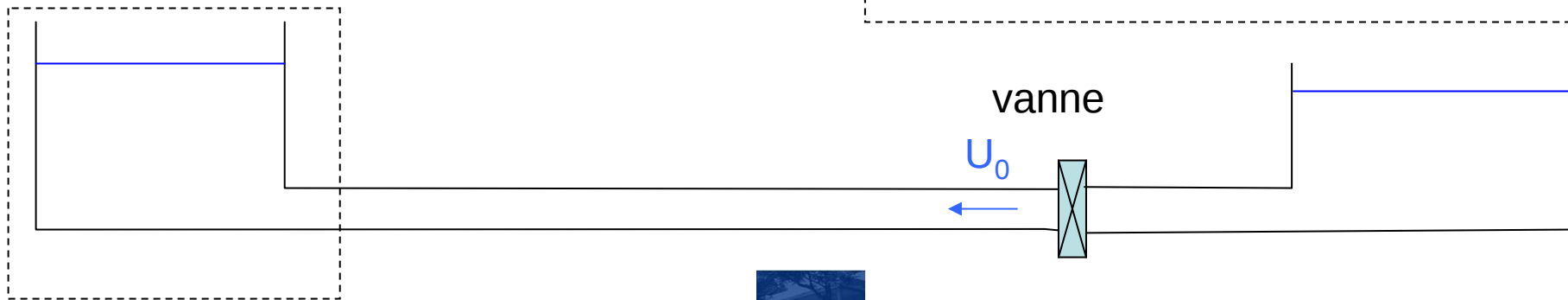
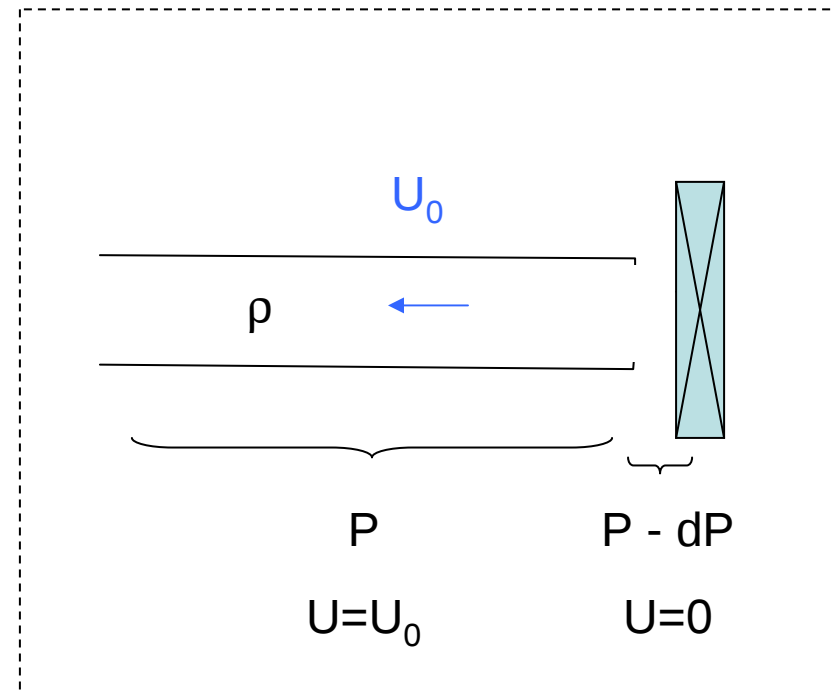
au temps

$$t = 2L/a$$



Temps 3 de propagation du coup de bélier

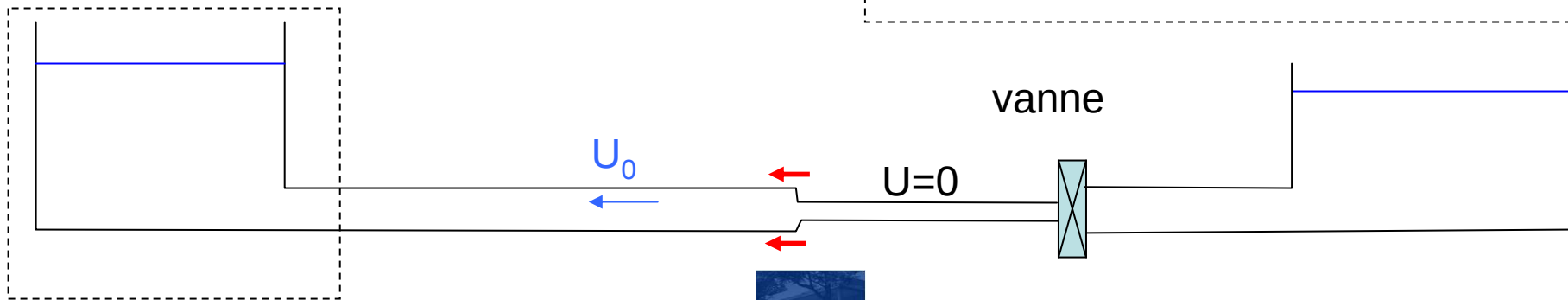
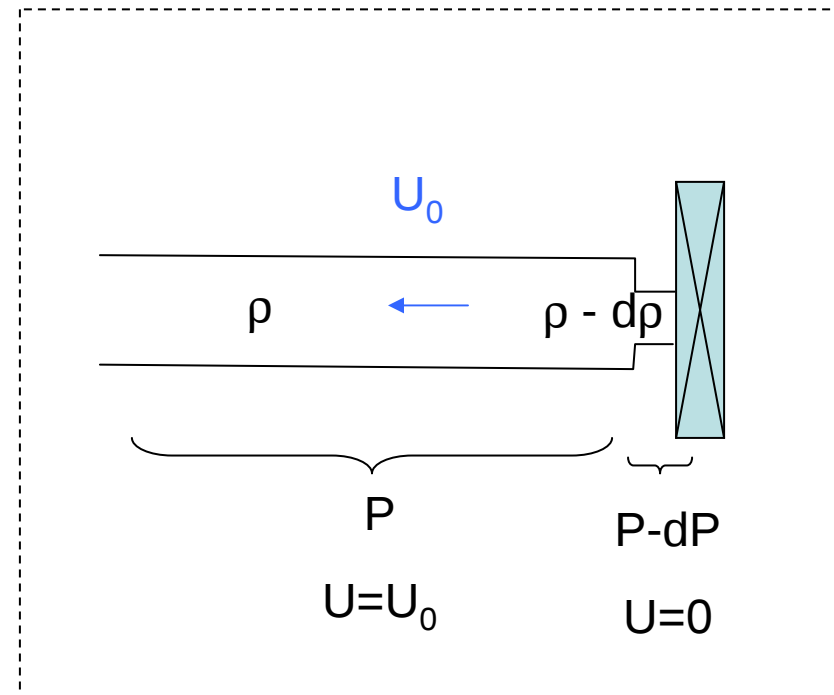
- débute lorsque l'onde de choc revient au niveau de la vanne
- appel de débit non satisfait
- la vitesse s'annule
- une dépression se forme
- contraction de la conduite



Temps 3 de propagation du coup de bélier

- débute lorsque l'onde de choc revient au niveau de la vanne

Cette onde de dépression se propage dans la conduite vers la vanne  la vitesse a
du temps $t = 2 L/a$
au temps $t = 3 L/a$

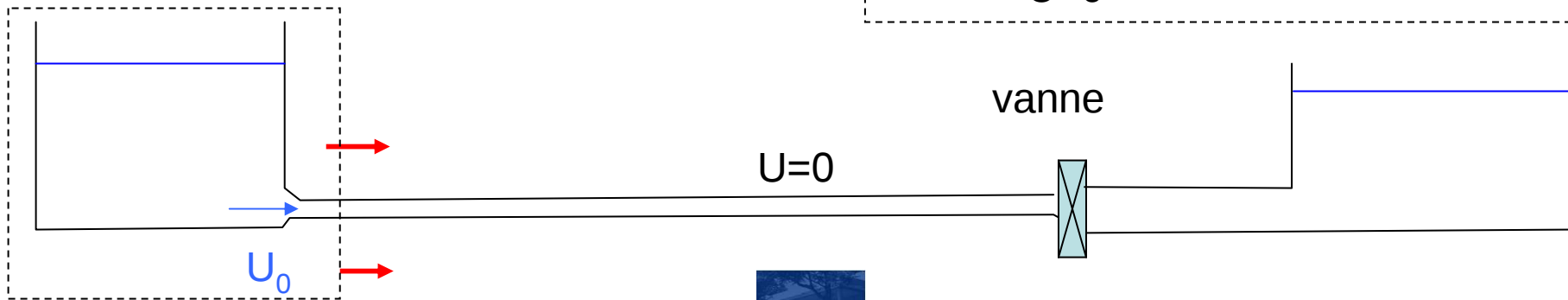
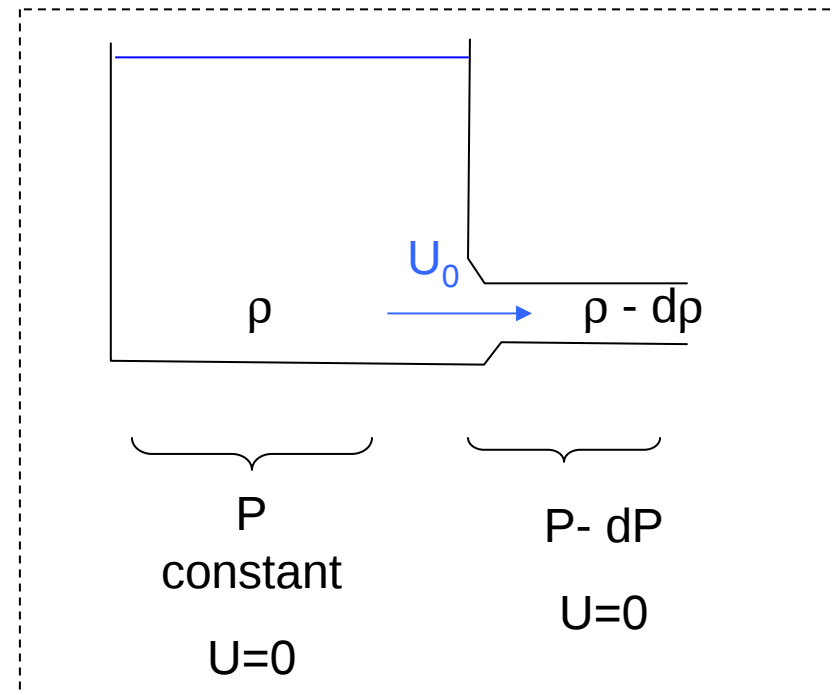


Temps 4 de propagation du coup de bélier

- Arrive de l'onde de choc en dépression au réservoir amont

La pression de la conduite s'équilibre avec celle du réservoir

Cet équilibrage se produit en induisant une vitesse U_0 du réservoir vers la conduite

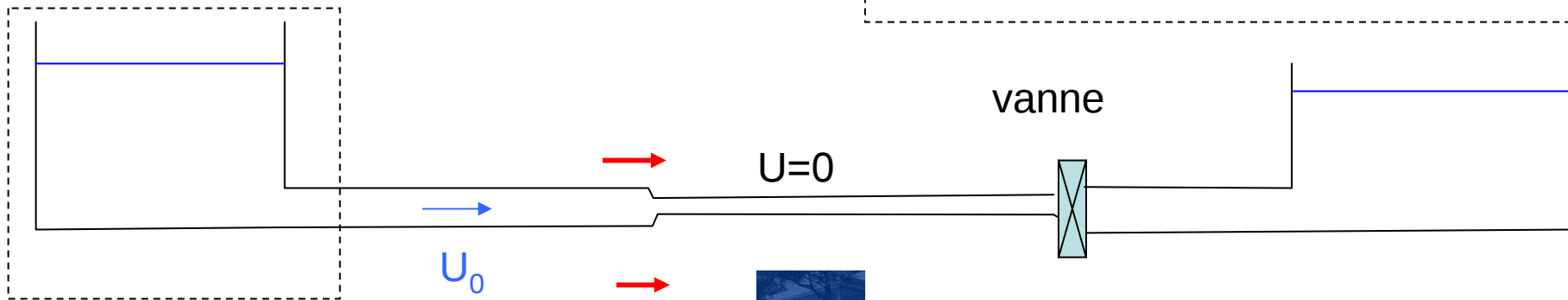
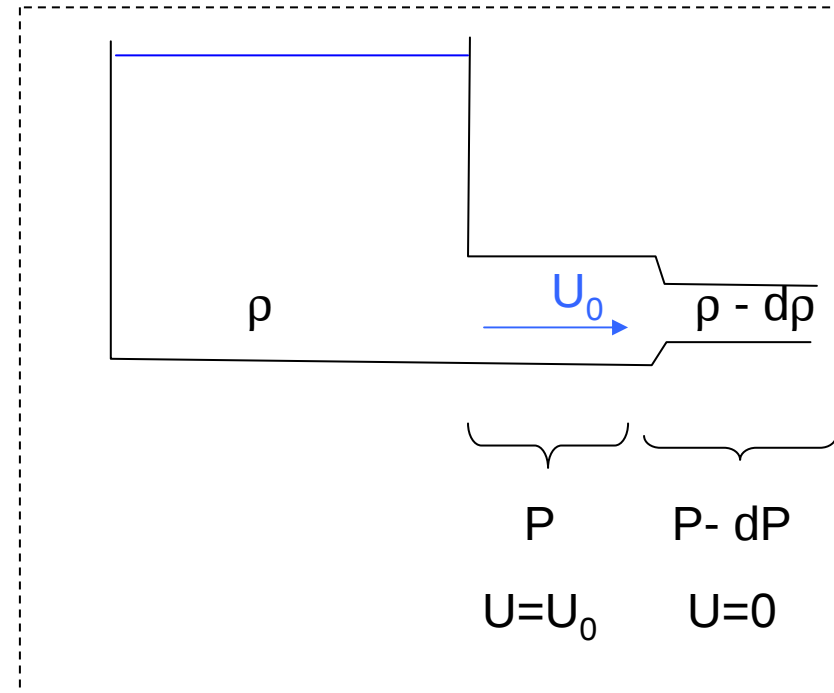


Temps 4 de propagation du coup de bédier

- Arrivée de l'onde de choc en dépression au réservoir amont

Cet équilibrage se propage dans la conduite vers la vanne à la vitesse a

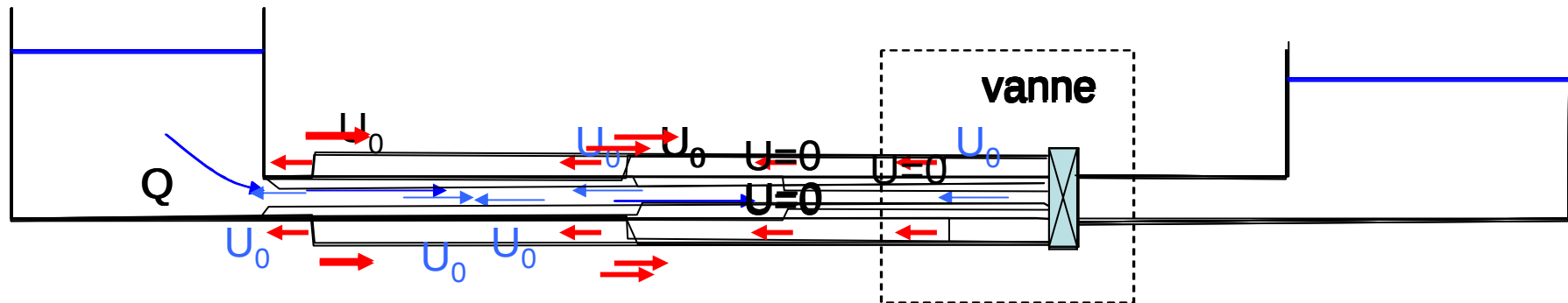
du temps $t = 3 L/a$
au temps $t = 4 L/a$



Les 4 temps du coup de bélier

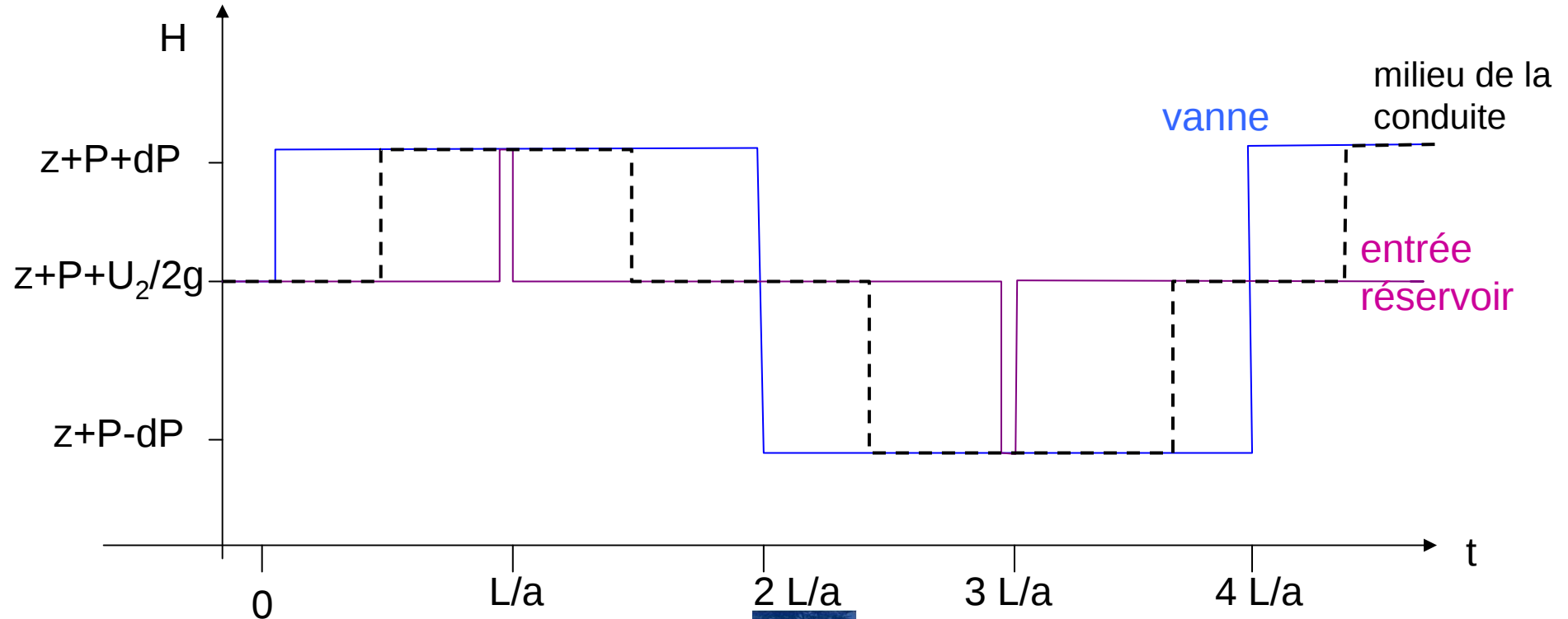
On se retrouve dans les conditions du début. L'onde de choc en pression se crée et se propage vers l'amont, on reprend le cycle.

Onde de pression puis onde de dépression qui passent dans la conduite,
périodicité : $4L/a$



Les 4 temps du coup de bélier

- A l'aval de la vanne, le phénomène est identique
- La charge dans la conduite est donc périodique
- Dessiner la charge au niveau de la vanne, à l'entrée du réservoir, au milieu de la conduite



Les problèmes liés aux coups de béliers

- Sensibilité des conduites aux pressions et aux dépressions, surtout au niveau des joints (fuite, rupture de la canalisation)
- Lorsque l'onde de dépression se forme, si la pression devient inférieure à la pression de vapeur saturante, le liquide cavite. La poche de cavitation augmente puis décroît et disparaît
- Lors du passage du changement de phase gaz $\rightarrow$ eau libération de chaleur qui peut poser problème

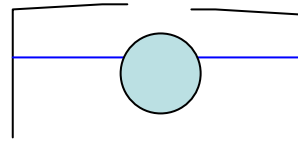
Protections anti bélier

Description
L'oscillation de masse



Dispositifs anti-bélier

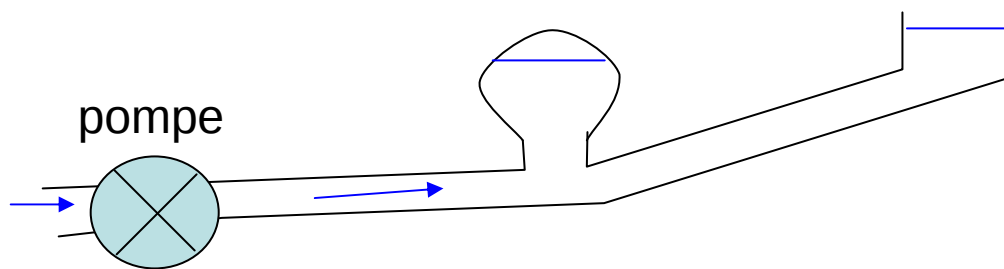
- Ventouses
 - un flotteur qui bouche son orifice lors de l'écoulement, appel d'air possible lors des ondes de dépressions



- Soupapes
 - permet d'écrêter les surpression en dérivant un certain débit lors des surpressions (p 65 poly)
- Ballons
- Cheminées
- ou fermeture lente de la vanne !!! ($T > 2L/a$, le temps d'aller retour de l'onde, qui ne repart pas avec la même intensité)

Le ballon anti-bélier

Exemple en conduite de refoulement d'une pompe centrifuge

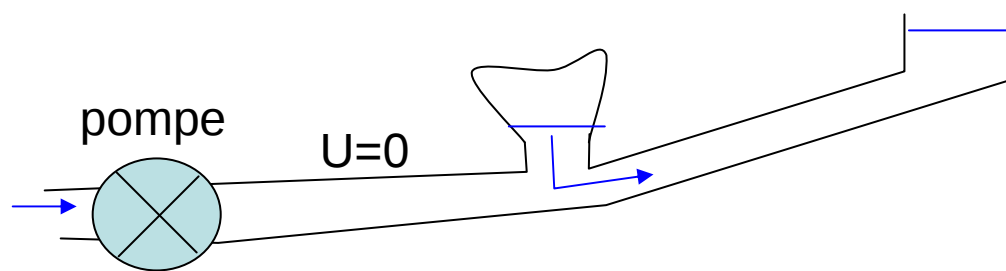


- L'arrêt brutal de la pompe va provoquer un coup de bélier dans la conduite de refoulement, une onde de choc en dépression se crée dans le temps 1
- On dispose le long de la conduite un ballon rempli d'air et d'eau
- Après l'arrêt de la pompe, l'eau du ballon vient combler en partie l'appel de débit lorsque l'onde de choc en dépression arrive, il contribue à garder un débit jusqu'au réservoir final



Le ballon anti-bélier

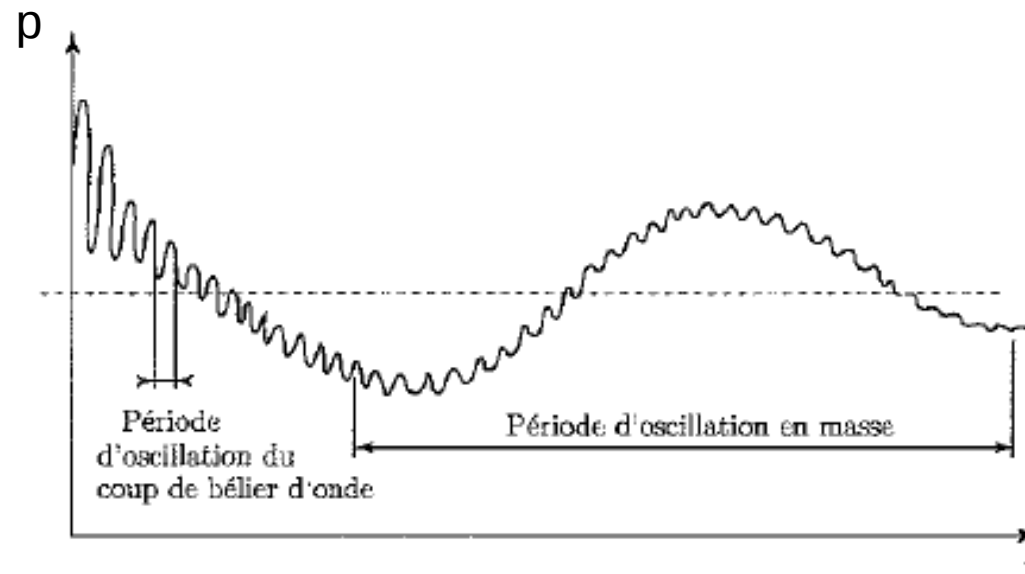
Exemple en conduite de refoulement d'une pompe centrifuge



- L'air contenu dans le ballon se met en dépression, le débit sortant du ballon diminue puis s'annule
- L'air étant en dépression dans le ballon, l'air dans le ballon va chercher à revenir à une pression initiale.
- Pour se gonfler, il va aspirer de l'eau, l'air se comprime, donc le ballon va évacuer de l'eau, puis se re-remplir... on a une **oscillation de masse**
- La période de l'oscillation est bien plus forte que celle du coup de bélier :
 - **oscillation de masse** quelques DIZAINES de secondes
 - **coup de bélier** quelques DIZIEMES de secondes

Evolution de la pression lors d'une oscillation de masse

- en réalité, l'oscillation de masse s'amortit assez vite avec les pertes de charge. Elle permet également d'amortir les effets des coups de béliers, on a donc la double oscillation suivante :

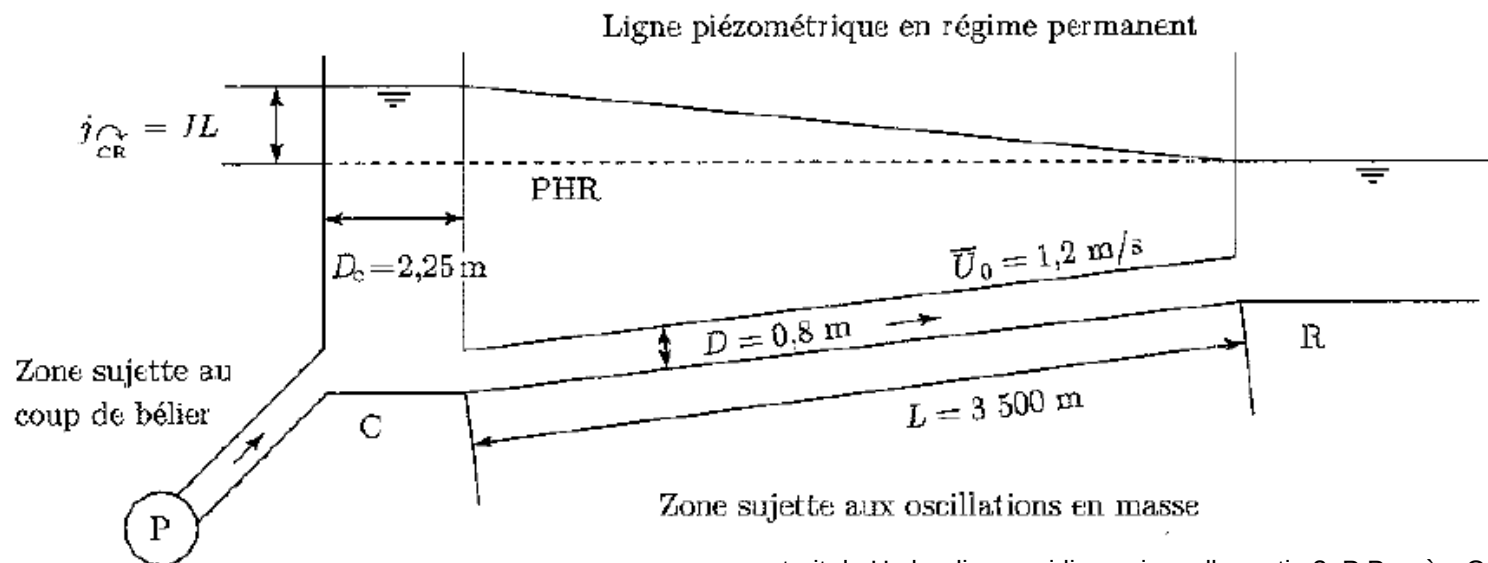


Limiter l'oscillation de masse

- De façon générale, on construit la connexion du ballon à la conduite pour avoir une vidange « facile » et une perte de charge forte au remplissage
 - clapet percé
 - tuyère
 - clapet plein et dérivation
- voir graphiques p 68 du poly

Autres dispositifs anti béliers

- La cheminée d'équilibre
 - utilisées pour la protection des conduites d'assainissement sous-pression (trop de pression dans les conduites d'eau potable en général)
 - principe : le volume d'eau comble les dépressions dans les conduites de refoulement lors de l'arrêt de la pompe, il y aura oscillation de masse



Le béliet hydraulique

Généralités

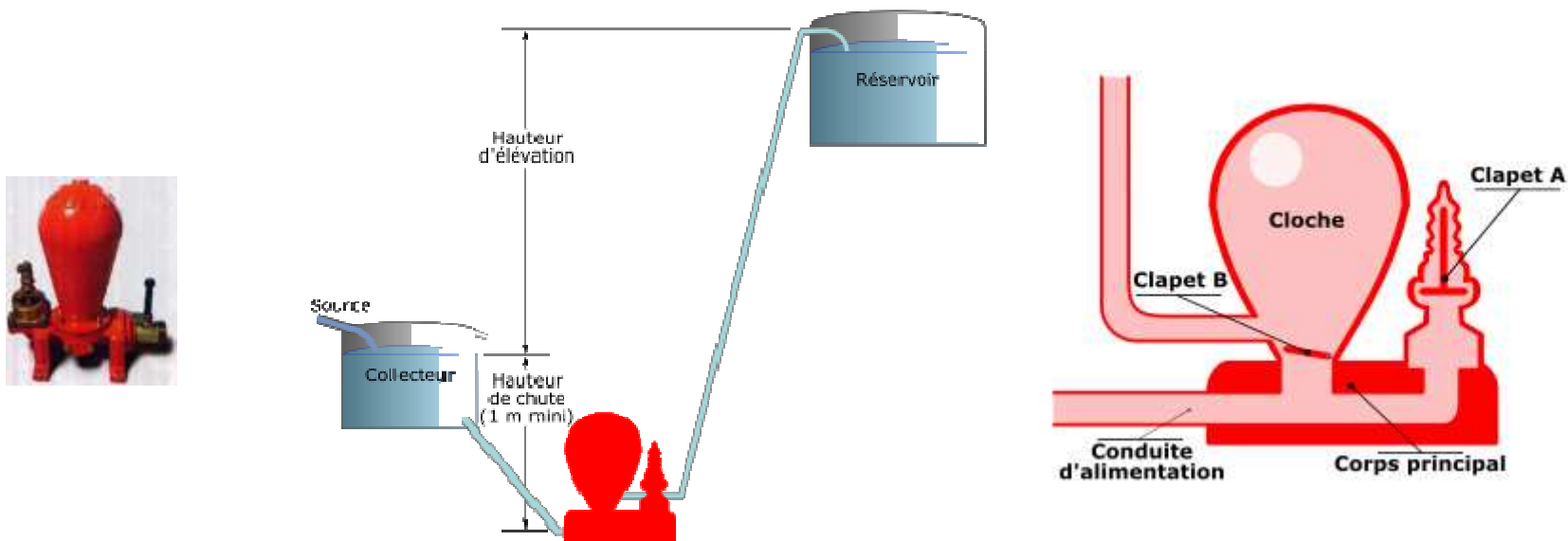
Principe de fonctionnement

Limites

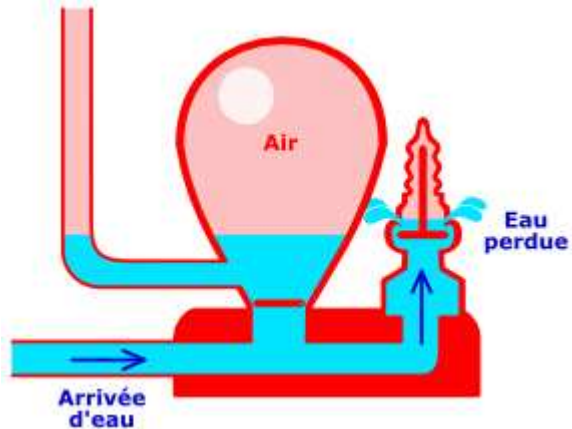


Utilisation du coup de bélier comme pompe : le bélier hydraulique

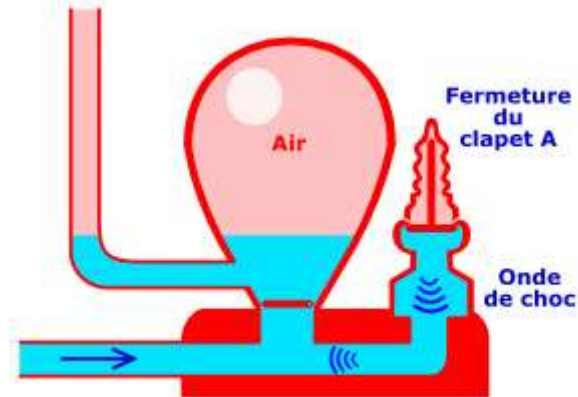
- Relever de l'eau jusqu'à plusieurs dizaines de mètres sans énergie autre que celle apportée par le courant ? Cela peut paraître incroyable, et pourtant, le bélier hydraulique le permet, et ce n'est pas de la magie.



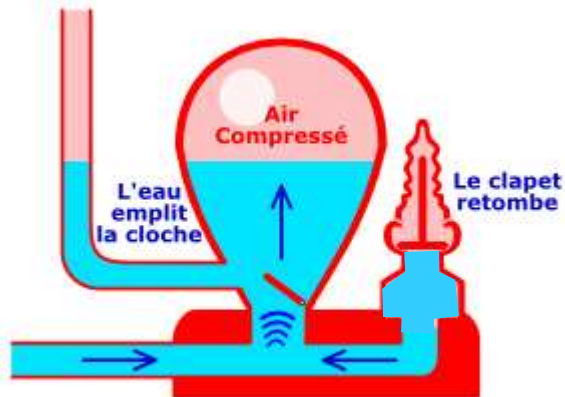
Fonctionnement



L'eau arrive et fait remonter le clapet, elle s'évacue du système

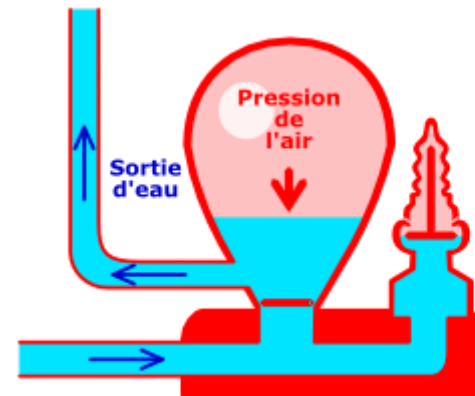


Le clapet arrive en bout de course, l'évacuation est bloquée : coup de béliet



l'onde de choc ouvre le clapet du ballon qui se remplit d'eau, l'air se comprime (début d'une oscillation de masse).

Le clapet de droite retombe



Le débit d'entrée s'annule, l'air comprimé se détend, le clapet du ballon se ferme, l'eau sort dans le réservoir. Le temps 1 peut reprendre

Limites du bélier hydraulique

- Le bélier hydraulique a un gros défaut, qui le rend inutilisable dans de nombreux cas : son rendement n'est que de 20 à 30 % selon les cas. C'est-à-dire qu'environ 70 à 80 % de l'eau arrivant dans le dispositif sera perdue.
- Le bélier constitue donc une solution idéale pour remonter de l'eau gratuite et abondante (une source, un ruisseau) mais non lorsque l'eau est rare

Mise en équation du coup de bélier

Généralités sur la méthode
1^{ère} équation de Saint Venant
2^{ème} équation de Saint Venant
Méthode des caractéristiques

Mise en équation du coup de bélier

- conservation de la masse  1^{ère} équation de Saint Venant
- bilan de quantité de mouvement  2^{ème} équation de Saint Venant

- Résolution des deux équations de Saint Venant par la méthode des caractéristiques, on trouve $U(x, t)$ et $p(x, t)$

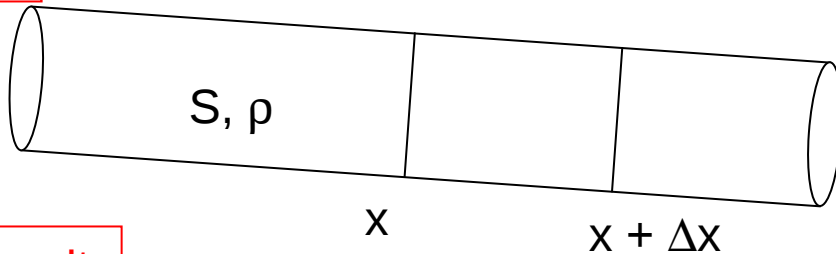
Rq : on définira la vitesse de propagation des ondes de choc en fonction de la propension de la canalisation à se déformer

-> besoin de qq notions de mécanique des milieux continus

Bilan de masse

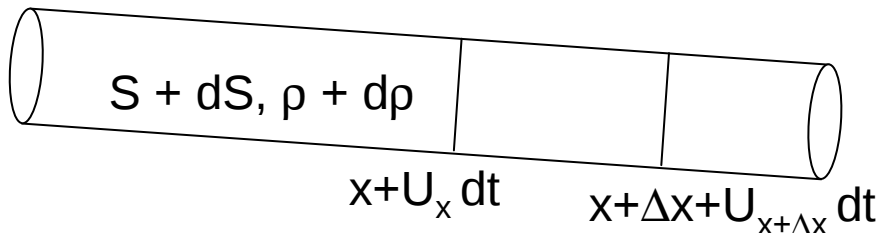
- on suit une masse élémentaire entre x et $x + \Delta x$ dans son mouvement dans la canalisation pdt dt,
 - son volume varie en fonction de la vitesse du fluide $U(x)$, des modifications de section et de masse volumique

t



$$dm(t) = \rho S \Delta x$$

$t + dt$



$$dm(t+dt) = (\rho + d\rho) (S + dS) (\Delta x + (U_{x+\Delta x} - U_x) dt)$$

au premier ordre

$$dm(t+dt) = \rho S \Delta x + d\rho S \Delta x + \rho dS \Delta x + \rho S (U_{x+\Delta x} - U_x) dt$$



Bilan de masse

$$dm(t) = \rho S \Delta x \quad = \quad dm(t+dt) = \rho S \Delta x + d\rho S \Delta x + \rho dS \Delta x + \rho S (U_{x+\Delta x} - U_x)dt$$

conservation de la masse

$$\Leftrightarrow \left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{\partial U}{\partial x} dt \right) = 0$$

Que se passe-t-il quand la pression varie ??

module de compressibilité du fluide ε défini par

$$\frac{\rho}{\varepsilon} = \frac{d\rho}{dP} \quad \rightarrow \quad \frac{d\rho}{\rho} = \frac{dP}{\varepsilon}$$

$\varepsilon = 2050 \text{ MPa}$ environ
pour l'eau

dépend de l'élasticité de la canalisation

$\sigma = E \varepsilon'$, σ contraintes, ε' déformation

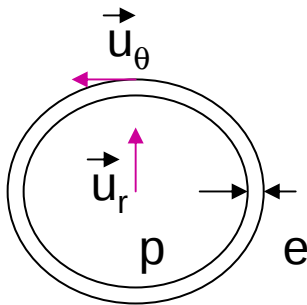
E module d'Young (Acier 210 GPa,
plastique 3 à 5 GPa)

Quelles contraintes et quelles déformation
 dS suivant la pression ??

Bilan de masse

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{\partial U}{\partial x} dt = 0$$

On doit considérer les contraintes imposées à la conduite suivant u_θ et on suppose la contrainte le long de la canalisation nulle



σ_θ sur l'épaisseur e permet de contenir les forces de pressions du fluide

$$2\pi R P = 2\pi \sigma_\theta e \quad \Rightarrow \quad d\sigma_\theta = R/e dP$$

Cette contrainte induit une déformation de la conduite

$$d\sigma_\theta = E d(2\pi R) / (2\pi R) = E dR/R$$

$$\text{Or } \frac{dS}{S} = \frac{2\pi dR}{\pi R} = \frac{2dR}{R} = \frac{2d\sigma_\theta}{E} = 2 \frac{R}{Ee} dP$$

$$\frac{dS}{S} = \frac{D}{Ee} dP$$

$D = \text{diamètre}$

Bilan de masse

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{\partial U}{\partial x} dt = 0 \quad \longleftrightarrow \quad \frac{dP}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee} dP + \frac{\partial U}{\partial x} dt = 0$$

on divise par dt et on fait apparaître la dérivée de la pression dans un écoulement

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x} \quad \longrightarrow \quad \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D}{Ee}\right) \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial U}{\partial x} = 0$$

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

première équation de Saint Venant :

$$\frac{1}{a^2} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x}\right) + \rho \frac{\partial U}{\partial x} = 0$$

Rq : on a exprimé la vitesse de propagation du coup de bélier !!!

Petit calcul pratique

la vitesse de propagation s'écrit donc :

$$a = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D\varepsilon}{Ee}}}$$

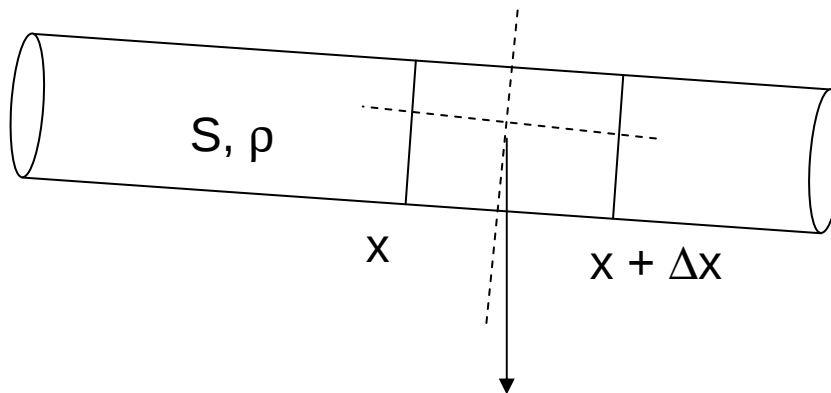
Donner sa valeur maximale : à quoi correspond-elle ?

Quel est l'ordre de grandeur pour l'eau dans une canalisation d'acier ?

valeur maximale $a = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}$ vitesse du son dans l'eau (1430 m/s environ)

Bilan de quantité de mouvement

- bilan de quantité de mouvement
– on reste au premier ordre (ρ constant) $\frac{d(\rho U)}{dt} = \rho \frac{dU}{dt} = \rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} \right)$
- Forces en présence projetée le long de la conduite:
 - gravité (pente notée i) $\rho S \Delta x g \sin i \sim \rho S \Delta x g i$
 - forces de pression $S p(x) - S p(x+\Delta x) = - S \Delta x dp/dx$
 - frottements (perte de charge notée j) $- \rho g S \Delta x j$



$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dx} = g(i - j)$$

deuxième équation de Saint Venant

La méthode des caractéristiques

première équation de Saint Venant :

$$a \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho a} \left(\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \quad (1)$$

deuxième équation de Saint Venant

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = g(i - j) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (1) + (2) & \quad \left\{ \left[\frac{\partial U}{\partial t} + (U + a) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho a} \left[\frac{\partial P}{\partial t} + (U + a) \frac{\partial P}{\partial x} \right] = g(i - j) \right. \\ (2) - (1) & \quad \left\{ \left[\frac{\partial U}{\partial t} + (U - a) \frac{\partial U}{\partial x} \right] - \frac{1}{\rho a} \left[\frac{\partial P}{\partial t} + (U - a) \frac{\partial P}{\partial x} \right] = g(i - j) \right. \end{aligned}$$

on reconnaît les dérivées particulières d'une particule de vitesse $U + a$ et $U - a$!!

La méthode des caractéristiques consiste à se placer sur une particule allant à cette vitesse !

Méthode des caractéristiques

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{DU}{Dt} + \frac{1}{\rho a} \frac{DP}{Dt} = g(i-j) \\ \frac{DU}{Dt} - \frac{1}{\rho a} \frac{DP}{Dt} = g(i-j) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{avec } dx/dt = U + a \\ \text{avec } dx/dt = U - a \end{array}$$

les équations aux caractéristiques s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = U \pm a \\ \frac{DU}{Dt} \pm \frac{1}{\rho a} \frac{DP}{Dt} = g(i-j) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{or, on sait que } U \ll a \quad Q = SU \quad \text{et} \quad i = -dz/dt \\ \text{on pose } Z = z + P/\rho g \text{ hauteur piézométrique} \\ \text{on suppose } j = 0 \text{ pas de perte de charge} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \pm a \\ dZ \pm a \frac{dQ}{Sg} = 0 \end{array} \right.$$

Le long de la trajectoire de l'onde de choc (vitesse a) la quantité $Z \pm aQ/gS$ se conserve (la pression se transforme en débit et vice versa)

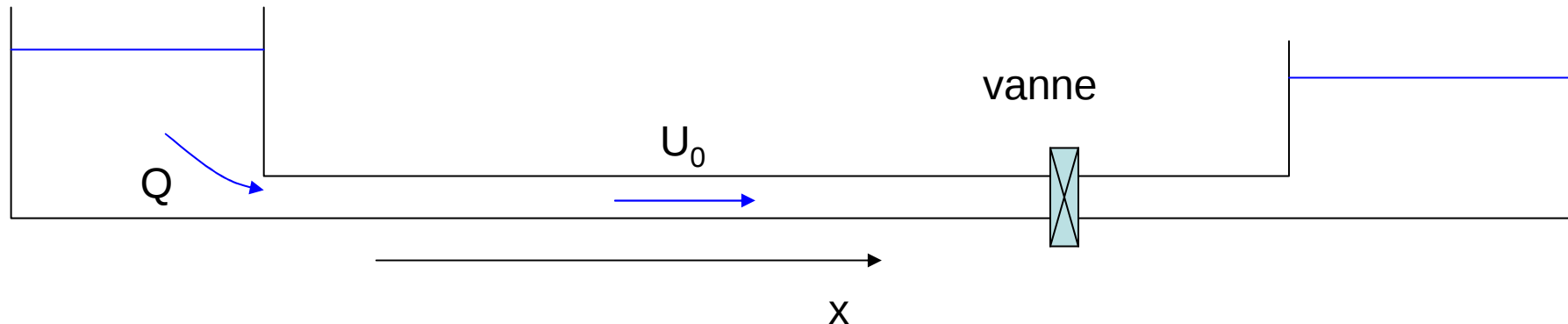
Application à l'exemple de la vanne fermée

- fermeture de la vanne $t=0$
- au niveau de la vanne, sens positif $Z + aQ/qS$ se conserve
 $Z(\text{initial}) + aQ(\text{initial})/gS = Z(0) + 0$

la surpression est de $\frac{aU_0}{g}$ mCE

de même on montre que

la dépression est de $-\frac{aU_0}{g}$ mCE



Exemple d'application

- Une canalisation en acier, diamètre intérieur 50 mm, épaisseur 2.5 mm, longueur 300 m, véhicule de l'eau ($d=1$) à 120 bars avec une vitesse de 2 m/s.
 - 1 – Calculer la vitesse d'une onde de choc dans ce tuyau
 - 2 – La vitesse de fermeture permet-elle d'éviter le coup de bélier si la canalisation est obturée par un robinet se fermant en 0,3 s ?
 - 3 - Quelle pression sera atteinte ?
 - 4 – quelle est le rapport de la surpression / pression initiale?

En général, un coup de bélier important se produit lorsque la pression totale de l'onde de choc atteint 150 % de la valeur de la pression normale dans la canalisation. Il est souvent indispensable de limiter cette pression à 110 ou 115 %.

Solution

- La vitesse v_p de l'onde de pression dans la canalisation est d'environ 1 297 m/s.
- Il faut donc à l'onde, environ 0,46 s pour effectuer le trajet aller et retour (600 m). Ce temps est plus lent que celui qui est nécessaire pour la fermeture du robinet, et par conséquent on a un coup de bélier.

$\Delta P = 264,4$ m de colonne d'eau, soit $\rho g \Delta P$ en Pa, avec $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ donc $\Delta P = 26,4 \text{ bar}$

- D'où : la pression initiale étant de 20 bars, la pression totale, atteinte lors du coup de bélier est de $20 + 26,44 = 46,44$ bars, hausse de 130 %.

Dans le cas considéré, il se produira donc un coup de bélier très important.