

PCPI – 1 TS CIRA Contrôle Industriel et Régulation Automatique	Chapitre 5 VISCOSITE	Physique
---	--	--------------------------------------

Dans tout procédé industriel, de nombreux fluides circulent :

- comme matière première (pétrole, lait ...)
- comme produit à fabriquer (ammoniac utilisé comme matière première dans la fabrication des engrais ...)
- pour refroidir (eau dans les centrales nucléaires...)
- pour réchauffer (eau dans le chauffage urbain ...)

Les propriétés des fluides en générale, sont l'ensemble des caractères physiques qui conditionnent leurs comportements (au repos ou en mouvement), dans ce qui suit, on s'intéressera principalement aux propriétés des liquides.

Par exemple, quelle propriété des fluides justifie l'utilisation de plusieurs pompes dans la description du procédé de fabrication du beurre ?

1 Oil clarifier

2 To the storage tank

3 Hydrocyclone

4 Cooking vessel

5 Butter oil pump

6 Transfer pump

7 Steam

8 Heat exchanger

9 Melting vessel

10 Hot water pump

Ce sera l'occasion de réviser ce qu'est un fluide, sa masse volumique et sa densité.
 Puis on détaillera plus particulièrement :

- La viscosité d'un fluide
- Les conséquences de la viscosité d'un fluide sur son écoulement

CAPACITES EXIGIBLES	BILAN 5	- Distinguer les liquides par leur viscosité (les viscosités cinématique et dynamique seront présentées conjointement et les unités pratiques Pa.s et $m^2.s^{-1}$ devront être connues) - Enoncer les phénomènes liés à la viscosité (pertes de charge, vitesse d'écoulement)	
	TP 5	Mettre en œuvre un protocole expérimental de mesure de la viscosité	
	BILAN 5	Caractériser le régime d'un écoulement avec le nombre de Reynolds	https://www.youtube.com/watch?v=2Jr_dBTf8s74
	BILAN 5	Evaluer les pertes de charges régulières et singulières par le calcul ou en utilisant des abaques (les expressions des pertes de charge régulières pour les différents types d'écoulement et les expressions des pertes de charge singulières seront fournies)	https://www.youtube.com/watch?v=BU_LfxjCHHFq https://www.youtube.com/watch?v=IfW49AnslDA

Données valables pour tous les exercices

$Re < 3000$	Ecoulement laminaire	$\lambda = \frac{64}{Re}$
$3000 < Re < 10^5$	Ecoulement turbulent lisse	$\lambda = (100Re)^{-0,25}$
$Re > 10^5$	Ecoulement turbulent rugueux	$\lambda = 3,5 \cdot 10^{-2}$, indépendant de Re

EXERCICE 1 : VISCOSIMETRE d'OSTWALD

Voici le principe du viscosimètre à écoulement laminaire (viscosimètre d'Ostwald) :

Il s'agit de mesurer le temps d'écoulement noté t d'un volume donné de fluide à travers un tube de faible diamètre, maintenu à température constante.

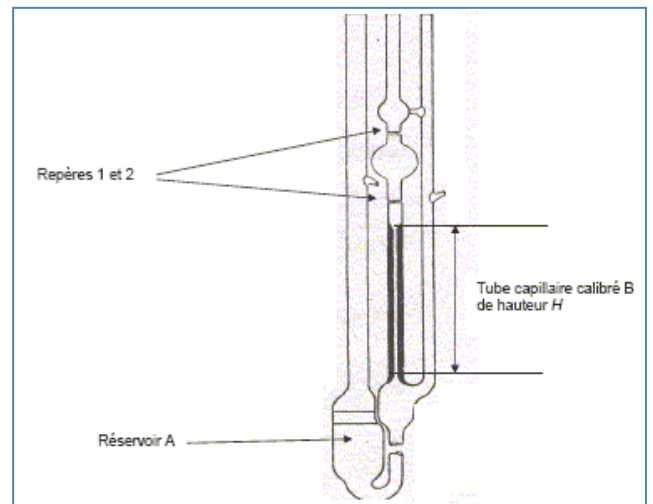
Le tube étant vertical, une étude théorique montrerait que la viscosité cinématique est donnée par la relation :

$$\nu = K \times t$$

K est une constante qui dépend de l'appareil utilisé. Dans notre cas, la notice constructeur indique $K = 1,12 \times 10^{-8}$.

On mesure la descente de l'eau à 0°C et on obtient $t = 1\text{min}38\text{ s}$. A la température de 30°C , cette durée de chute n'est plus que de 59 s.

Calculer la viscosité cinématique ν de l'eau à ces 2 températures.



EXERCICE 2 : VISCOSIMETRE à CHUTE de BILLE

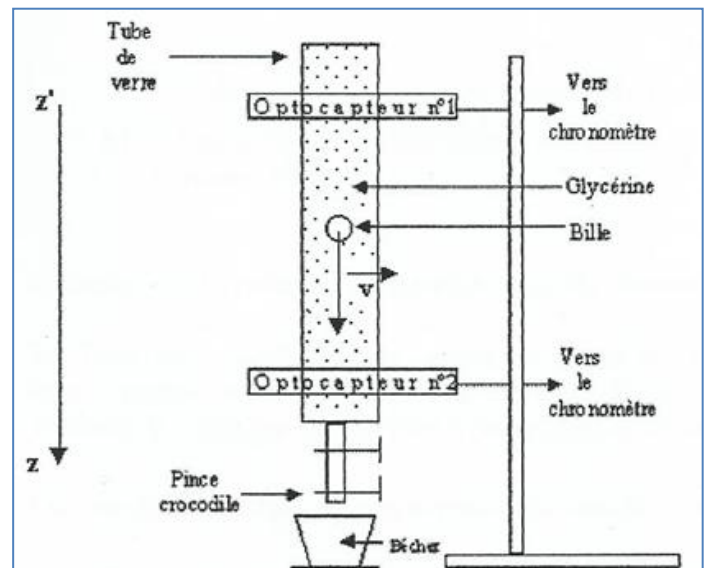
DONNEES

- Volume de la bille d'acier : $V = (4/3) \times \pi \times R^3$
- Intensité de pesanteur : $g = 9,81\text{ N/kg}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho_{\text{eau}} = 1\,000\text{ kg.m}^{-3}$

Pour déterminer la viscosité η du glycérol (glycérine), on mesure la vitesse v de chute d'une bille sphérique, de masse m , dans un tube vertical, rempli de glycérol, pendant la phase du mouvement rectiligne uniforme qui débute quelques instants après la chute de la bille.

On admet que la bille est soumise à :

- son poids $\vec{P} = m\vec{g}$,
- la poussée d'Archimède $\vec{F}_A = -\rho_1 V \vec{g}$
- la force de viscosité $\vec{T}$ exercée par le fluide qui s'oppose au déplacement de la bille et qui est donnée par $\vec{T} = -6\pi\eta R \vec{v}$, où R est le rayon de la bille.

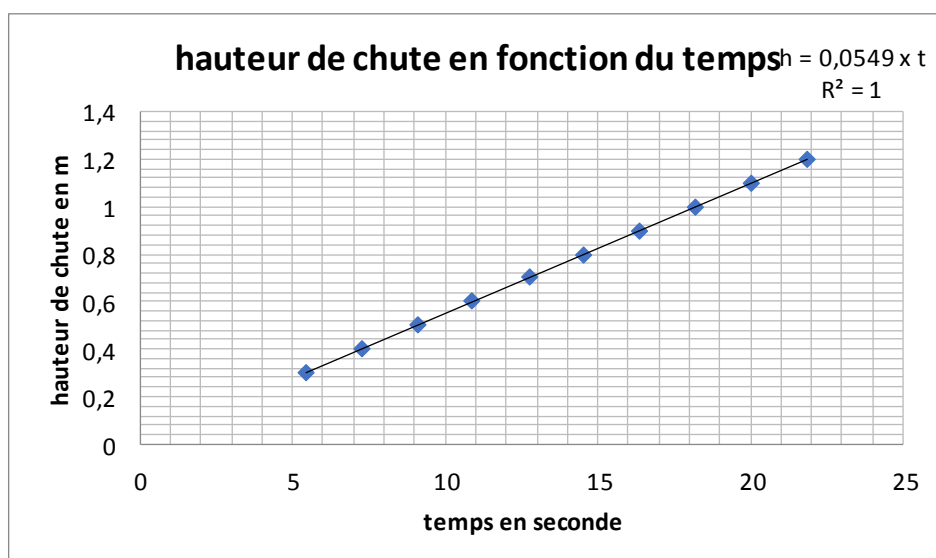


On chronomètre la chute de la bille pour différentes hauteurs de chute dans le glycérol, selon le dispositif précédent. On obtient le tableau de mesures suivant :

h (m)	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20
t (s)	5,45	7,25	9,10	10,90	12,75	14,55	16,35	18,20	20,05	21,85

La température du glycérol est constante et égale à 20 °C.

- 1- **Expliquer** ce qu'est la viscosité d'un fluide.
- 2- Sachant que la densité du glycérol est $d_1 = 1,26$, en **déduire** sa masse volumique notée ρ_1 .
- 3- La bille a une masse $m = 2,54 \times 10^{-4} \text{ kg}$ et un rayon $R = 2,0 \times 10^{-3} \text{ m}$.
Calculer la masse volumique de la bille notée ρ_2 .
- 4- On donne la courbe représentant la hauteur de chute en fonction du temps de chute.



Quelle est la nature de cette courbe ?

En **déduire** la vitesse limite de la bille.

- 5- Un développement théorique permettrait d'obtenir la formule suivante : $\eta = \frac{0,05g}{9v_{lim}}$

En **déduire** la valeur de la viscosité dynamique du glycérol η en l'exprimant dans les unités du système international.

- 6- La valeur théorique est $\eta = 1,069 \text{ Pa.s}$.
En **déduire** la précision de la mesure réalisée en calculant le pourcentage d'erreur.

EXERCICE 3 : Ecoulement d'une huile

Une huile a une masse volumique $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ et une viscosité dynamique $\eta = 1,2 \text{ Pa.s}$. Cette huile transite par une canalisation de diamètre $D = 48 \text{ mm}$ à une vitesse $v = 0,7 \text{ m/s}$.

- 1- **Calculer** le coefficient de viscosité cinématique ν .
- 2- **Calculer** le nombre de Reynolds et en **déduire** la nature de l'écoulement.

EXERCICE 4 : STATION de pompage

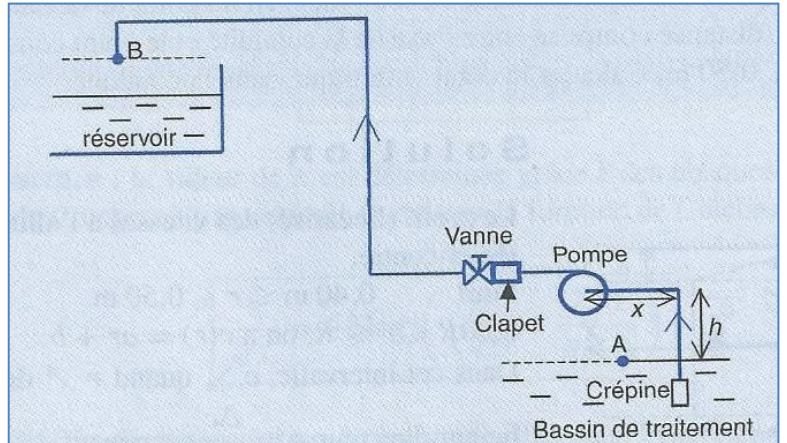
Le schéma d'une installation de pompage permettant la constitution d'une réserve d'eau prélevée dans un bassin de traitement dont le niveau reste constant est représenté ci-après.

L'installation est capable de débiter 57 m^3 d'eau à l'heure.

Le diamètre intérieur de la conduite est $D = 100 \text{ mm}$ et la rugosité ε est évaluée à $\varepsilon = 1,0 \text{ mm}$.

Sa longueur totale vaut $80,0 \text{ m}$.

On donne $z_A = 0 \text{ m}$ et $z_B = 30 \text{ m}$.



Données :

- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- Viscosité cinématique de l'eau : $\nu = 1,0 \times 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
- Pression atmosphérique : $P_0 = 1,0 \text{ bar}$

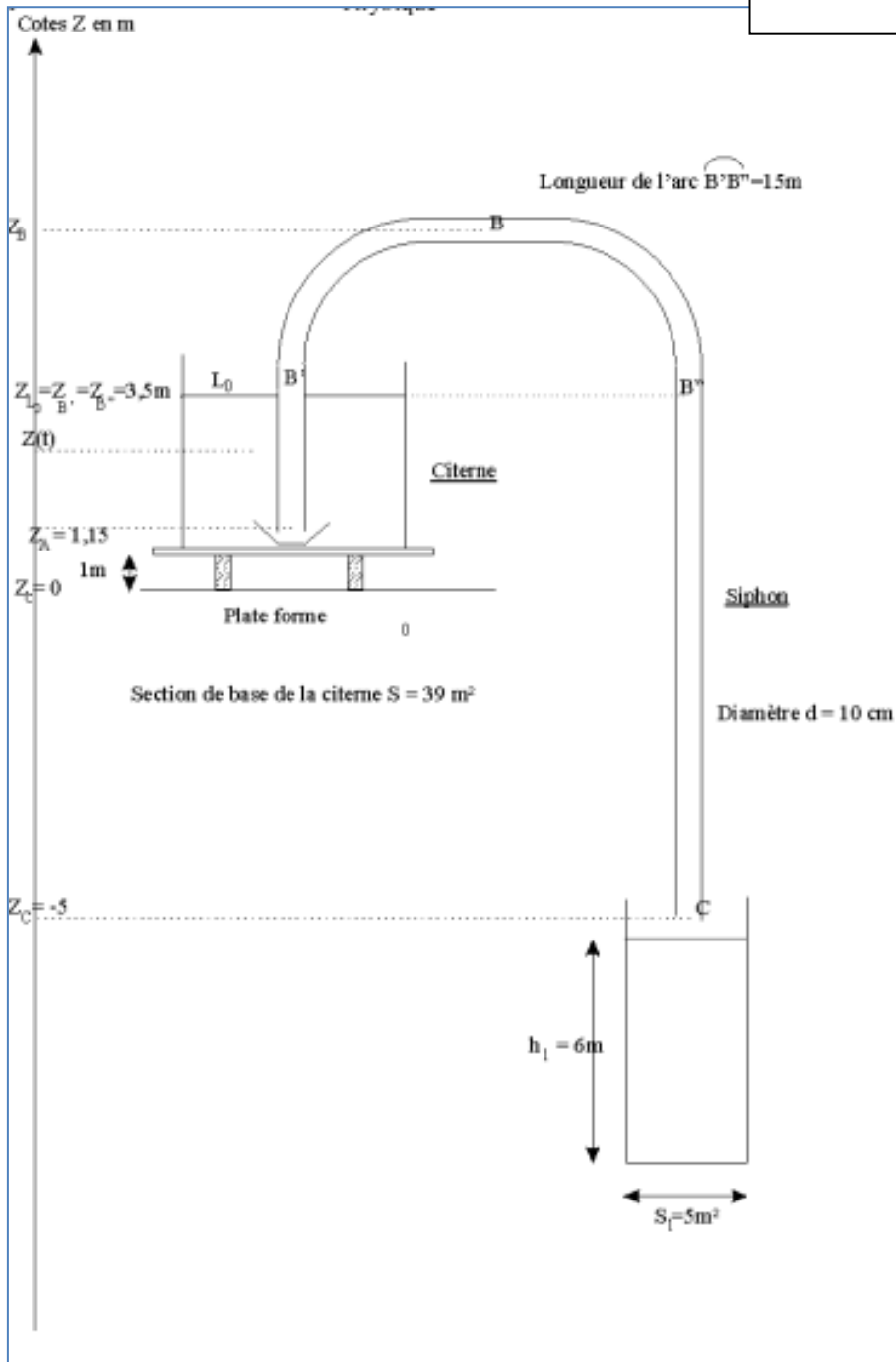
- 1- **Calculer** la vitesse moyenne d'éjection V_B de l'eau à l'extrémité de la conduite.
- 2- **Calculer** le nombre de Reynolds et **déterminer** le type d'écoulement.
- 3- **Trouver** le coefficient de pertes de charge linéaire grâce à l'abaque de Colebrook.
- 4- **Calculer** les pertes de charge régulières.
- 5- En ce qui concerne les pertes de charges singulières, on adoptera les coefficients ξ suivants :
 - Crépine : $\xi = 4$
 - Clapet de retenue : $\xi = 2$
 - Vanne ouverte : $\xi = 0,25$
 - Coude 90° : $\xi = 0,6$
 - a- **Calculer** les pertes de charge dues à chaque type d'accident sur la canalisation.
 - b- **Calculer** la longueur droite équivalente à chaque type d'accident sur la canalisation.
- 6- **Calculer** les pertes de charge globales dans l'installation.
- 7- **Calculer** la proportion de pertes de charge régulières et celles de pertes de charge singulières (en %).

EXERCICE 5 : Citerne

Une citerne destinée au transport permet d'alimenter un réservoir R_1 par l'intermédiaire d'une canalisation.

Données :

- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
- Intensité du champ de pesanteur : $g = 10 \text{ m/s}^2$
- Pression atmosphérique : $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$
- Viscosité dynamique de l'eau : $\eta = 10^{-3} \text{ Pa.s}$
- Débit volumique $Q_v = 0,0314 \text{ m}^3/\text{s}$



1- Calcul de pertes de charge régulières

a- **Calculer** le nombre de Reynolds et **déduire** la nature de l'écoulement de l'eau dans la canalisation.

b- La hauteur moyenne des aspérités est $\epsilon = 0,01 \text{ mm}$.

A l'aide des abaques de Colebrook, déterminer le coefficient de pertes de charge régulières dans la canalisation.

c- En **déduire** la valeur des pertes de charges régulières notée J_{reg} en m.

2- Calcul des pertes de charge singulières

Pour réaliser l'installation et protéger le réservoir, on a été amené à introduire des singularités, dont les coefficients K sont donnés ci-dessous :

- Crépine à l'altitude Z_A : $K = 4$
- Section contractée à l'altitude Z_A : $K = 0,4$
- 2 coudes légers en B' et B'' : $K = 0,2$

Calculer les pertes de charge singulières totale J_{sing} .

3- Calcul des pertes de charge totales

- Evaluer** les pertes de charge totales perdues par l'installation.
- Calculer** la puissance perdue de ce fait.

EXERCICE 6 : Centrale nucléaire

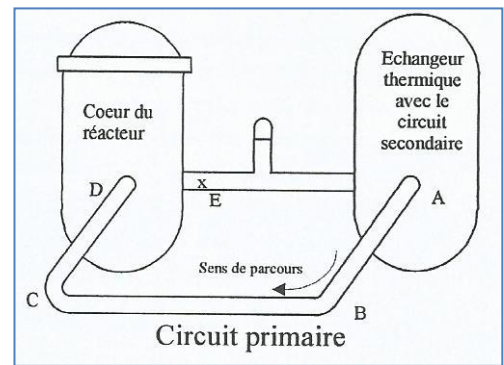
On se propose d'étudier le circuit primaire de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine.

De l'eau sous pression circule dans ce circuit en parcours fermé (voir schéma).

Elle s'échauffe lors de son passage dans le cœur du réacteur grâce à l'énergie produite par les éléments combustibles.

Cette énergie calorifique, transportée par l'eau sous pression, est utilisée, via l'échangeur, par le circuit secondaire (non représenté) pour produire de l'énergie électrique.

Pour l'étude qui suit, on considère que tous les points du circuit primaire sont à la même altitude.



Données :

- Intensité de pesanteur : $g = 10 \text{ N/kg}$
- Débit massique de l'eau : $Q_m = 13,2 \times 10^3 \text{ kg.s}^{-1}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1,0 \times 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
- Viscosité cinématique de l'eau : $\nu = 5,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
- Diamètre de la conduite du circuit primaire : $D = 600 \text{ mm}$
- Longueurs de la conduite : $L_{AB} = L_{CD} = 2,0 \text{ m}$ et $L_{BC} = 5,0 \text{ m}$
- Chaque coude, en B et C, équivaut pour les pertes de charge à une longueur supplémentaire de $1,0 \text{ m}$

- 1- **Calculer** le débit volumique Q_v de l'eau dans le circuit primaire.
- 2- **Calculer** la vitesse de l'eau dans la conduite ABCD.
- 3- **Calculer** le nombre de Reynolds dans cette conduite et définir le type d'écoulement.
- 4- En **déduire** le coefficient de pertes de charge linéaires λ dans la conduite.
- 5- **Calculer** les pertes de charge linéaires J_{AD} dans la conduite entre les points A et D.
- 6- **Calculer** les pertes de charges dues aux 2 coudes.
- 7- **Calculer** les pertes de charge globales.
- 8- En **déduire** la variation de pression correspondante.
- 9- **Calculer** la puissance ainsi perdue.

$Re < 3000$	Écoulement laminaire	$\lambda = \frac{64}{Re}$
$3000 < Re < 10^5$	Écoulement turbulent lisse	$\lambda = (100 Re)^{-0,25}$
$Re > 10^5$	Écoulement turbulent rugueux	$\lambda = 3,5 \cdot 10^{-2}$, indépendant de Re

EXERCICE 7 : Écoulement d'une lessive liquide

Le régime d'écoulement d'une lessive dans une canalisation dépend de sa viscosité cinématique ν .

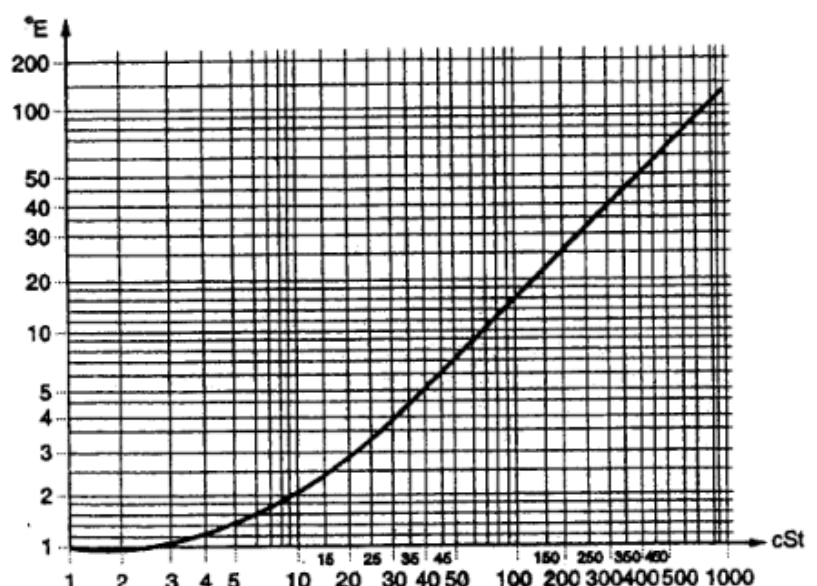
Pour la déterminer, on utilise le viscosimètre Engler qui permet de mesurer le temps t_{fluide} que mettent 200 mL du liquide étudié pour s'écouler à travers un tube calibré à 50°C et le temps t_{eau} que mettent 200 mL dans les mêmes conditions.

La viscosité ν exprimée en degré Engler (E°)

est donnée par la relation $\nu = t_{\text{fluide}} / t_{\text{eau}}$.

Le diagramme ci-dessous permet de passer du degré Engler à l'unité de viscosité en centistokes (cSt).

$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



Le type du régime d'écoulement est caractérisé par :

- Si $Re \leq 1600$ le régime est laminaire et le coefficient de pertes est $K = 64 / Re$
- Si $1600 \leq Re \leq$ le régime est transitoire
- Si $Re \geq 2400$, le régime est turbulent et le coefficient de pertes est $K = \frac{0,316}{4\sqrt{Re}}$

1- Le viscosimètre Engler fournit les mesures suivantes : $T_{\text{fluide}} = 229 \text{ s}$ et $t_{\text{eau}} = 51 \text{ s}$

Calculer la viscosité cinématique ν de la lessive dans les unités du système international.

2- L'écoulement de la lessive se fait dans les conditions suivantes :

- Vitesse d'écoulement $V_1 = 5 \text{ m/s}$
- Masse volumique de la lessive : $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$
- Diamètre de la canalisation : $d_1 = 8 \text{ mm}$

Caractériser le type d'écoulement.

3- Pour des raisons pratiques, on prend un nombre de Reynolds $Re = 1150$.
L'écoulement se fait dans les mêmes conditions qu'à la question précédente.

- a- **Calculer** le coefficient K de pertes de charge arrondi à 10^{-4} près.
- b- **Calculer** les pertes de charge ΔP pour une conduite de 20 cm de long.

EXERCICE 8 : Ecoulement d'une huile

Dans un tuyau lisse rectiligne de diamètre intérieur $D = 15 \text{ mm}$ circule une huile à la vitesse $v = 2,5 \text{ m/s}$.

- 1- **Calculer** le nombre de Reynolds et indiquer le régime de l'écoulement.
- 2- **Calculer** le débit volumique de cet écoulement.
- 3- **Calculer** les pertes de charges Δp par mètre de longueur de tuyau.

Données

- viscosité cinématique de l'huile : $\nu = 25.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- masse volumique de l'huile : $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$
- Utiliser l'exercice précédent pour le coefficient de frottement

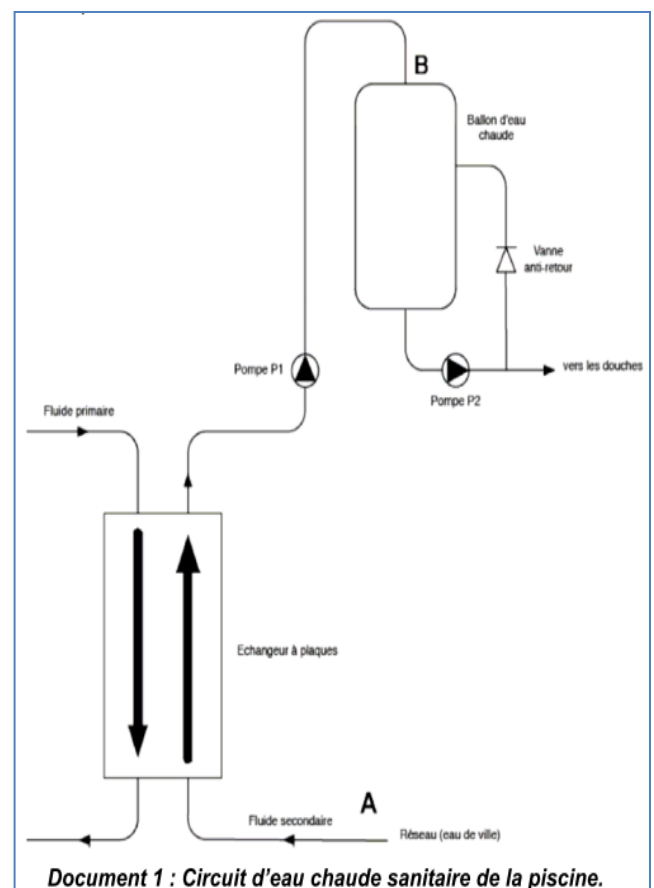
EXERCICE 9 : Circuit d'eau chaude sanitaire d'une piscine

On veut étudier le circuit d'eau chaude sanitaire d'une piscine.
L'eau chaude sanitaire de la piscine provient du réseau d'eau de ville.

L'eau est amenée à 55°C par l'intermédiaire d'un échangeur à plaques, puis stockée dans un ballon d'eau chaude.

Ce réservoir de stockage permet d'alimenter les différents points de puisage de la piscine (douches ...).

Le branchement au réseau d'eau de ville se fait au point A et lorsque le volume d'eau du réservoir de stockage (ballon d'eau chaude) atteint une valeur minimum, la pompe P_1 se met en marche jusqu'à un volume maximum où elle s'arrête.



Lorsque la pompe P_1 est active, le débit volumique Q_s est égal à 100 L.min^{-1} .

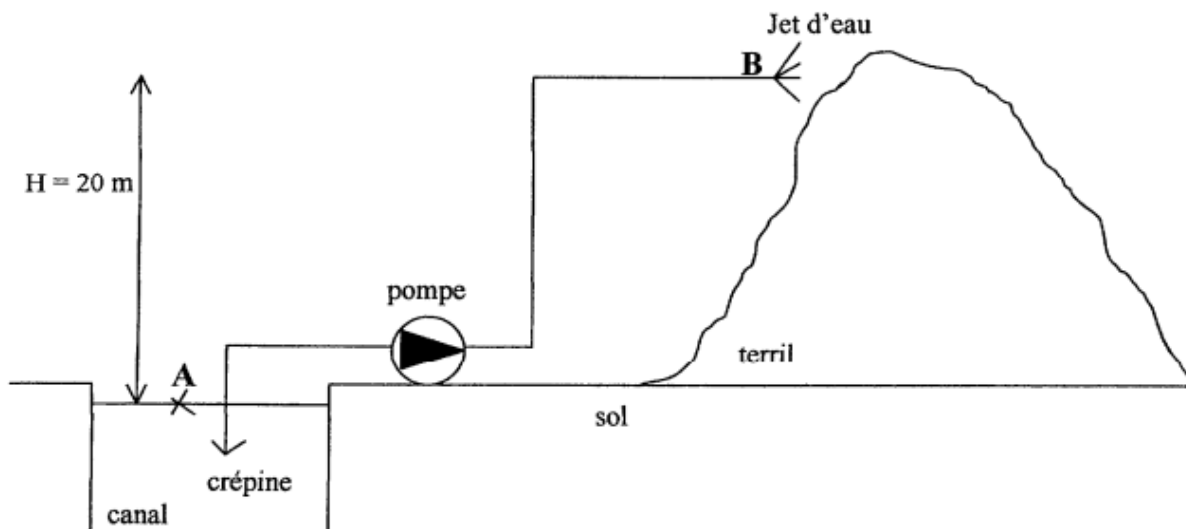
- 1- La canalisation du circuit secondaire a pour diamètre $D = 5 \text{ cm}$.
Calculer la vitesse de l'eau dans cette canalisation.
- 2- **Calculer** le nombre de Reynolds Re associé à cet écoulement.
- 3- En **déduire** la nature de l'écoulement.
- 4- Sachant que la rugosité de la canalisation est $\epsilon = 0,5 \text{ mm}$, **déterminer** graphiquement le coefficient de perte de charge λ pour cet écoulement en utilisant les abaques de Colebrook.
- 5- **Calculer** les pertes de charge totales sachant que :
 - $L_{AB} = 50 \text{ m}$
 - L'échangeur crée une perte de charge égale à une longueur équivalente $L_1 = 100 \text{ m}$
 - Chaque coude crée une perte de charge équivalente à une longueur équivalente $L_2 = 2 \text{ m}$

Données :

- Accélération de la pesanteur : $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$
- Pression atmosphérique : $P_0 = 1,0.10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho = 1\,000 \text{ kg.m}^{-3}$
- Viscosité dynamique de l'eau : $\eta = 1,0.10^{-3} \text{ Pa.s}$
- Capacité calorifique de l'eau : $C = 4\,180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
- Nombre de Reynolds : $Re = \frac{\rho v D}{\eta}$
- Perte de charge dans une conduite d'extrémités A et B : $\Delta H_{AB} = \frac{\lambda (L + \Sigma L_{eq}) v^2}{D \cdot 2g}$
- Puissance utile communiquée au fluide par une pompe : $P_{utile} = \rho g Q_v H_{pompe}$

EXERCICE 10 : Terril

Pour dissoudre un terril, on pompe de l'eau dans un canal dont le niveau est constant. L'eau pompée doit être amenée au sommet du terril, à une altitude de 20 mètres par rapport au niveau du canal. La longueur totale de la conduite est de 100 m ; le circuit comprend trois coudes. Une crépine est installée en début de circuit pour filtrer l'eau.



Caractéristiques de la conduite :

- diamètre intérieur : $D = 100 \text{ mm}$
- longueur : $L = 100 \text{ m}$

Caractéristiques du fluide :

- débit volumique : $Q_V = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- masse volumique : $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- viscosité dynamique : $\eta = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

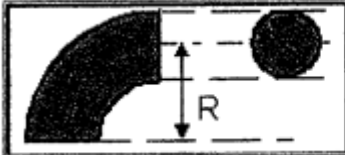
On prendra $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ et on considèrera que $P_A = P_B = P_{\text{atm}}$

On prendra :

$$\lambda = \frac{64}{R_e} \quad \text{en régime laminaire} \quad \lambda = \frac{0,316}{R_e^{0,25}} \quad \text{et en régime turbulent lisse.}$$

Tableau :

Pour un coude à 90° , les valeurs du coefficient de pertes de charge K sont données en fonction du rapport R/D , où R est le rayon de courbure et D le diamètre intérieur de la conduite.

	R/D	0,5	0,75	1	1,5	2
	K	1	0,45	0,30	0,20	0,20

- 1- **Calculer** la vitesse moyenne du fluide.
- 2- **Montrer** que le nombre de Reynolds Re vaut 35 000 environ. Le régime d'écoulement est-il laminaire ou turbulent ?
- 3- Calcul des pertes de charges totales J_{tot} dans la conduite. Pour cela :
 - a- **Calculer** le coefficient de pertes de charge linéaire λ , pour cet écoulement.
 - b- À partir du tableau 1, **déterminer** le coefficient de pertes de charge K_{coude} associé à un coude à 90° , de rayon de courbure 200 mm.
 - c- Le coefficient de pertes de charge $K_{\text{crépine}}$ associé à la crépine vaut 0,40 **calculer**, en mètres, les pertes de charge totales associées à la circulation du fluide.

