OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

RESUME THEORIQUE & GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES

MODULE

APPLICATION DES PRINCIPES FONDAMENTAUX EN MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE

SECTEUR : FABRICATION MECANIQUE

SPECIALITE : TSMFM

NIVEAU : TS

Document élaboré par :

Nom et prénom

NICA DORINA ***CDC Génie Mécanique***

<u>Révision linguistique</u>

-
-
-

<u>Validation</u>

-
-
-

SOMMAIRE

APPLICATION DES PRINCIPES FONDAMENTAUX EN MECANIQUE DES FLUIDES ET TERMIQUE

THERMIQUE

OBJECTIF DU MODULE

MODULE 24 : APPLICATION DES PRINCIPES FONDAMENTAUX EN MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE

Code : **Durée : 30 heures**

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT

COMPORTEMENT ATTENDU

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit
appliquer les principes fondamentaux en mécanique des fluides et thermique
selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

CONDITIONS D'EVALUATION

- Travail individuel.
- À partir :
  - de plan, de croquis ou des schémas;
  - d'un cahier des charges ;
  - de documents et données techniques ;
  - de simulation et de l'étude de cas ;
- À l'aide :
  - Formulaires, abaques et diagramme ;
  - Calculatrice ;

CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE

- Démarche de résolution des problèmes
- Application des principes fondamentaux de la mécanique des fluides
- Utilisation correcte des formulaires
- Précision et exactitude des calculs
- Argumentation et justification des réponses
- Traçabilité du travail et notes de calculs
- Travail soigné et propre

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT (SUITE)

PRECISIONS SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU	CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Dimensionner un circuit de fluides pneumatiques ou hydraulique	- **Application des lois fondamentales régissant les fluides non compressibles** - **Exactitude et précision des calculs** - **Utilisation adéquate des formulaires** - **Souci de la sécurité des utilisateurs du produit dimensionné**
B. Calculer les puissances et rendements mis en jeu dans une machine thermique	- **Application des principes fondamentaux régissant les échanges calorifiques** - **Exactitude et précision des calculs** - **Utilisation adéquate des formulaires**

OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

LE STAGIAIRE DOIT MAÎTRISER LES SAVOIRS, SAVOIR-FAIRE, SAVOIR - PERCEVOIR OU SAVOIR - ÊTRE JUGES PRÉALABLES AUX APPRENTISSAGES DIRECTEMENT REQUIS POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF OPÉRATIONNEL DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :

Avant d'apprendre dimensionner un circuit pneumatique ou hydraulique (A) :

1. Appliquer les principes de la mécanique des fluides non compressibles
2. Appliquer la relation « PV/T = Constante » pour les fluides compressibles
3. Se soucier de la sécurité des utilisateurs de produit

Avant d'apprendre calculer les puissances et rendements mis en jeux dans une machine thermique (B) :

4. Avoir des connaissances en calorimétrie et transfert de chaleur
5. Se soucier de l'influence de la chaleur sur les structures

APPLICATION DES PRINCIPES FONDAMENTAUX EN MECANIQUE DES FLUIDES ET THERMIQUE

CHAPITRE 1 GÉNÉRALITÉS

1.1 Définition

Un fluide peut être considéré comme étant formé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. Un fluide est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler. Parmi les fluides, on fait souvent la distinction entre liquides et gaz.

1.2 Liquides et gaz

Les liquides et gaz habituellement étudiés sont isotropes, mobiles et visqueux. La propriété physique qui permet de faire la différence entre les deux est la compressibilité.

- ***l'isotropie*** assure que les propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace.
- ***la mobilité*** fait qu'ils n'ont pas de forme propre et qu'ils prennent la forme du récipient qui les contient.
- ***la viscosité*** caractérise le fait que tout changement de forme d'un fluide réel s'accompagne d'une résistance (frottements).

1.3 Forces de volume et forces de surface

Comme tout problème de mécanique, la résolution d'un problème de mécanique des fluides passe par la définition du système matériel S, particules de fluide à l'intérieur d'une surface fermée limitant S. À ce système on applique les principes et théorèmes généraux de mécanique et thermodynamique :

- principe de la conservation de la masse.
- principe fondamental de la dynamique.
- principe de la conservation de l'énergie.

CHAPITRE 2 DYNAMIQUE DES FLUIDES INCOMPRESSIBLES

2.1 Définitions

*Le **débit** est le quotient de la quantité de fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement.*

2.1.1 Débit-masse

Si **Δm** est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps **Δt**, par définition le débit-masse est :

$$\boxed{q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}}$$

Unité : [kg·s^{-1}].

2.1.2. Débit-volume

Si **ΔV** est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps **Δt**, par définition le débit-volume est :

$$\boxed{q_V = \frac{\Delta V}{\Delta t}}$$

[unité : m^3·s^{-1}].

2.1.3 Relation entre q_m et q_V

La masse volumique ρ est donnée par la relation :

$$\boxed{\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}} \quad \text{d'où :} \quad \boxed{q_m = \rho\, q_V}$$

***Remarques* :**

Les liquides sont incompressibles et peu dilatables (masse volumique constante) ; on parle alors *d'**écoulements isovolumes***.

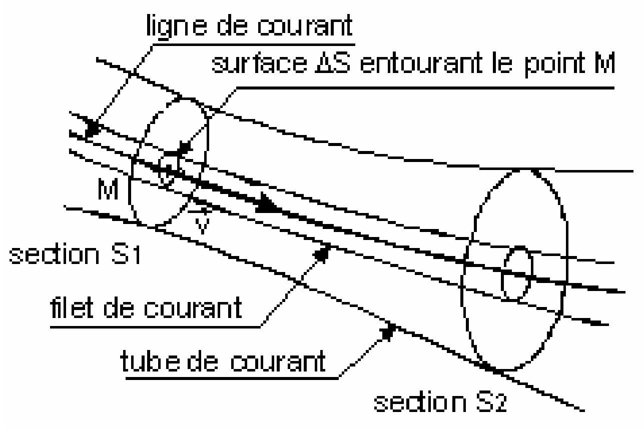
Pour les ***gaz***, la masse volumique dépend de la température et de la pression. Pour des vitesses faibles (variation de pression limitée) et pour des températures constantes on retrouve le cas d'un écoulement isovolume.

2.1.4 Écoulements permanents ou stationnaires

Un régime d'écoulement est dit ***permanent*** ou ***stationnaire*** si les paramètres qui le caractérisent (pression, température, vitesse, masse volumique, ...), ont une valeur constante au cours du temps.

2.2 Équation de conservation de la masse ou équation de continuité

2.2.1 Définitions



- ***Ligne de courant*** : En régime stationnaire, on appelle ligne de courant la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide. Une ligne de courant est tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse du fluide en ce point.
- ***Tube de courant*** : Ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.
- ***Filet de courant*** : Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de surface ΔS.

La section de base ΔS du tube ainsi définie est suffisamment petite pour que la vitesse du fluide soit la même en tous ses points (répartition uniforme).

2.2.2 Conservation du débit

Considérons un tube de courant entre deux sections S_1 et S_2. Pendant l'intervalle de temps Δt, infiniment petit, la masse Δm_1 de fluide ayant traversé la section S_1 est la même que la masse Δm_2 ayant traversé la section S_2 :

$$\boxed{q_{m1} = q_{m2}}$$

➢ ***En régime stationnaire, le débit-masse est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant.***

Dans le cas d'un **écoulement isovolume** (ρ = Cte) :

$$\boxed{q_{v1} = q_{v2}}$$

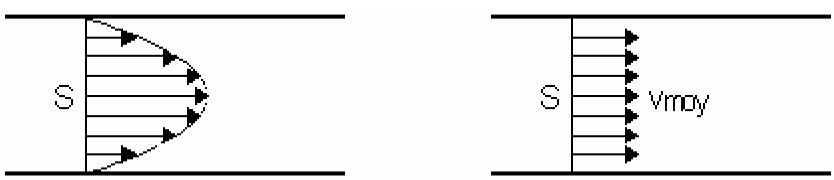
➢ ***En régime stationnaire, le débit-volume est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant.***

2.2.3 Expression du débit en fonction de la vitesse v

Le débit-volume est aussi la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base S et de longueur égale à v, correspondant à la longueur du trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant S.

Il en résulte la relation importante : $\boxed{q_v = v\,S}$

2.2.4 Vitesse moyenne



En général la vitesse v n'est pas constante sur la section S d'un tube de courant ; on dit qu'il existe un **profil de vitesse** (à cause des forces de frottement).

Le débit-masse ou le débit-volume s'obtient en intégrant la relation précédente.

Dans une section droite S de la canalisation, on appelle **vitesse moyenne v_m** la vitesse telle que :

$$\boxed{v_{moy} = \frac{q_V}{S}}$$

La vitesse moyenne v_{moy} apparaît comme la vitesse uniforme à travers la section S qui assurerait le même débit que la répartition réelle des vitesses.

Si l'écoulement est isovolume, cette vitesse moyenne est inversement proportionnelle à l'aire de la section droite.

$\boxed{q_V = v_{1moy} S_1 = v_{2moy} S_2 = Cte}$ C'est **l'équation de continuité**.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

La vitesse moyenne est d'autant plus grande que la section est faible.

2.3 Théorème de BERNOULLI

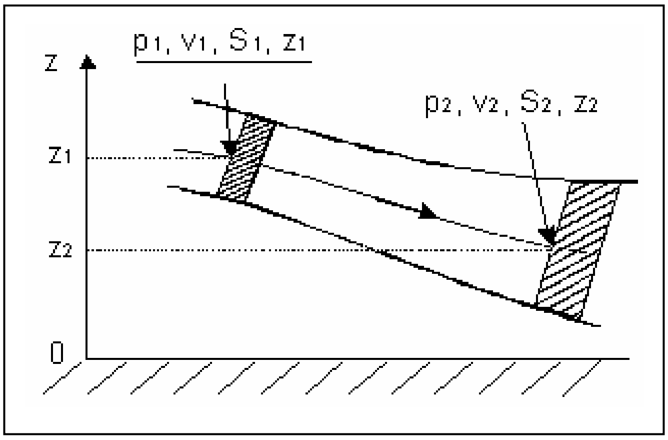
2.3.1 Le phénomène

OBSERVATION

- Une balle de ping-pong peut rester en suspension dans un jet d'air incliné.
- Une feuille de papier est aspirée lorsqu'on souffle dessus.

CONCLUSION : La pression d'un fluide diminue lorsque sa vitesse augmente.

2.3.2 Théorème de Bernoulli pour un écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible



Un ***fluide parfait*** est un fluide dont l'écoulement se fait ***sans frottement***.

On considère un écoulement permanent isovolume d'un fluide parfait, entre les sections S_1 et S_2, entre lesquelles il n'y a aucune machine hydraulique, (pas de pompe, ni de turbine).

Soit m la masse et V le volume du fluide qui passe à travers la section S_1 entre les instants t et t+Δt. Pendant ce temps la même masse et le même volume de fluide passe à travers la section S_2. Tout se passe comme si ce fluide était passé de la position (1) à la position (2).

En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à ce fluide entre les instants t et t+Δt (la variation d'énergie cinétique est égale à la somme des travaux des forces extérieures : poids et forces pressantes), on obtient :

$$\boxed{\rho\frac{v^2}{2} + \rho g z + p = Cte}$$

où :

- p est la <u>pression statique</u> ;

- ρgz est la pression de pesanteur ;
- $\rho \frac{v^2}{2}$ est la pression cinétique.

Tous les termes s'expriment en pascal [Pa].

En divisant tous les termes de la relation précédente par le produit ρg, on écrit tous les termes dans la dimension d'une hauteur (pressions exprimées en mètres de colonne de fluide) :

$$\boxed{\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} = H = Cte}$$

où :

- H est la Hauteur totale ;
- $\frac{P}{\rho g}$ est la Hauteur de Pression ;
- z est la cote ;
- $\frac{v^2}{2g}$ est la Hauteur cinétique ;
- $z + \frac{P}{\rho g}$ est la Hauteur piézomètrique.

2.3.3 Cas d'un écoulement (1) → (2) sans échange de travail

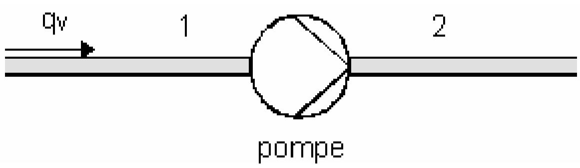
Lorsque, dans un écoulement d'un fluide parfait, il n'y a aucune machine (ni pompe ni turbine) entre les points **(1)** et **(2)** d'une même ligne de courant, la relation de Bernoulli peut s'écrire sous l'une ou l'autre des formes suivantes :

$$\boxed{\frac{1}{2}\rho\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \rho g\left(z_2 - z_1\right) + \left(p_2 - p_1\right) = 0}$$

ou :

$$\boxed{\frac{1}{2g}\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \left(z_2 - z_1\right) + \frac{\left(p_2 - p_1\right)}{\rho g} = 0}$$

2.3.4 Cas d'un écoulement (1) → (2) avec échange d'énergie



Lorsque le fluide traverse une machine hydraulique, il échange de l'énergie avec cette machine sous forme de travail ΔW pendant une durée Δt.

La puissance P échangée est : $$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

Unités : P en watt [W], W en joule [J], t en seconde [s].

- P > 0 si l'énergie est reçue par le fluide (ex. : pompe) ;
- P < 0 si l'énergie est fournie par le fluide (ex. : turbine).

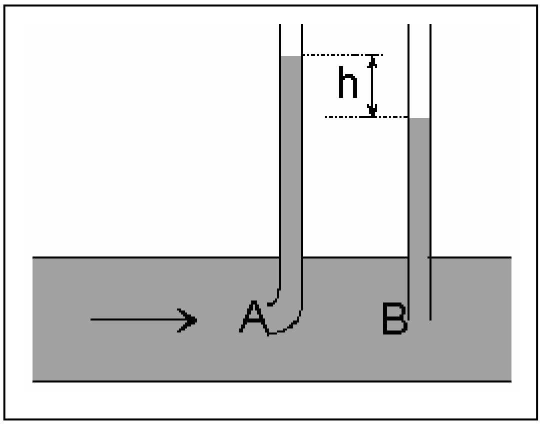
Si le débit-volume est q_v, la relation de Bernoulli s'écrit alors :

$$\boxed{\frac{1}{2}\rho\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \rho g\left(z_2 - z_1\right) + \left(p_2 - p_1\right) = \frac{P}{q_v}}$$

2.4 Application du Théorème de Bernoulli :

2.4.1 Tube de Pitot

On considère un liquide en écoulement permanent dans une canalisation et deux tubes plongeant dans le liquide, l'un débouchant en A face au courant, et l'autre en B est le long des lignes de courant, les deux extrémités étant à la même hauteur. Au point B, le liquide a la même vitesse v que dans la canalisation et la pression est la même que celle du liquide $p_B = p$.



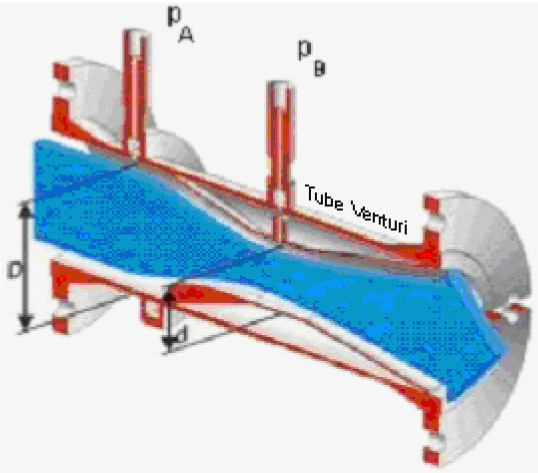
En A, point d'arrêt, la vitesse est nulle et la pression est p_A.

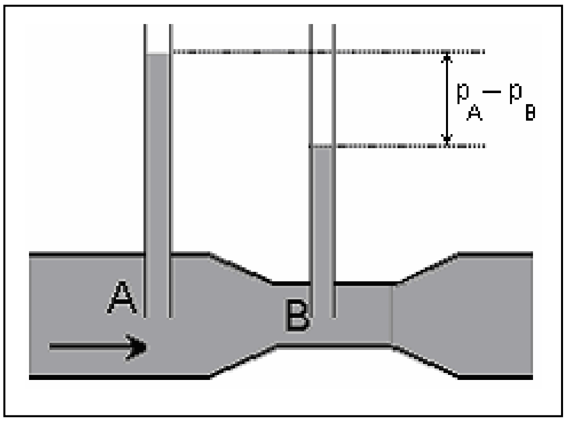
D'après le théorème de Bernoulli,

$$p_B + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_A \quad \text{soit} \quad \frac{1}{2}\rho v^2 = \rho g h$$

En mesurant la dénivellation h du liquide dans les deux tubes, on peut en déduire la vitesse v d'écoulement du fluide.

2.4.2 Phénomène de Venturi





Un conduit de section principale S_A subit un étranglement en B où sa section est S_B. La vitesse d'un fluide augmente dans l'étranglement, donc sa pression y diminue : $v_B > v_A \Rightarrow p_B < p_A$

Le théorème de Bernoulli s'écrit ici :

$$p_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 = p_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 = p_C + \frac{1}{2}\rho v_C^2$$

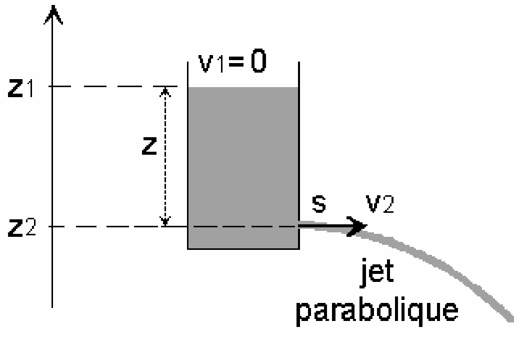
D'après l'équation de continuité :

$$v_B S_B = v_A S_A = q_v \text{ et } v_B > v_A \text{ donc } p_A > p_B$$

$$p_A - p_B = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{1}{S_B^2} - \frac{1}{S_A^2}\right) q^2 = k\, q^2$$

La différence de pression aux bornes aux extrémités du tube de Venturi est proportionnelle au carré du débit.

2.4.3 Écoulement d'un liquide contenu dans un réservoir - Théorème de Torricelli



Considérons un réservoir muni d'un petit orifice à sa base, de section s et une ligne de courant partant de la surface au point (1) et arrivant à l'orifice au point (2). En appliquant le théorème de Bernoulli entre les points (1) et (2),

$$\rho\frac{v_1^2}{2}+\rho g z_1+p_1=\rho\frac{v_2^2}{2}+\rho g z_2+p_2$$

Or p_1 = p_2 = pression atmosphérique et $v_1 << v_2$ d'où :

$$v_2=\sqrt{2gz}$$

La vitesse d'écoulement est la même que la vitesse de chute libre entre la surface libre et l'orifice, quelle que soit la masse volumique du liquide.

CHAPITRE 3 VISCOSITE

3.1 Le phénomène

3.1.1 Observations

- L'eau, l'huile, le miel coulent différemment : l'eau coule vite, mais avec des tourbillons ; le miel coule lentement, mais de façon bien régulière.
- La chute d'un parachutiste se fait à vitesse constante, contrairement à la loi de la chute libre.
- La pression d'un liquide réel diminue tout au long d'une canalisation dans laquelle il s'écoule, même si elle est horizontale et de section uniforme, contrairement au théorème de Bernoulli.

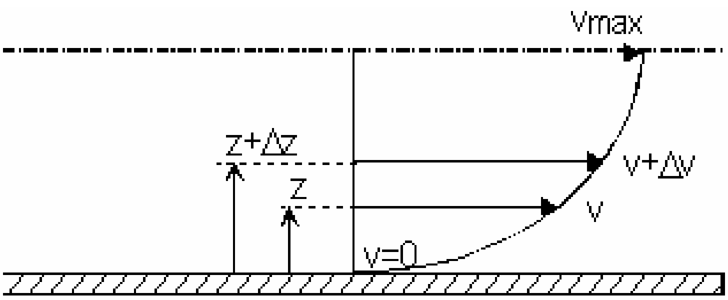
3.1.2 Conclusion

- Dans un ***fluide réel***, les forces de contact ne sont pas perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquelles elles s'exercent. La viscosité est due à ces ***frottements*** qui s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres.
- Les phénomènes dus à la ***viscosité*** des fluides ne se produisent que ***lorsque ces fluides sont en mouvement***.

3.2 Viscosité dynamique - Viscosité cinématique

3.2.1 Profil des vitesses

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un ***profil de vitesse***.



Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement d'ensemble, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse.

Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres.

La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance z de cette courbe au plan fixe : v = v(z).

3.2.2 Viscosité dynamique

Considérons deux couches de fluide contiguës distantes de Δz. La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit Δv, à leur surface S et inversement proportionnelle à Δz :

$$\boxed{F = \eta S.\frac{\Delta v}{\Delta z}}$$

Le facteur de proportionnalité ***η* est le coefficient de viscosité dynamique** du fluide.

Dimension : $[\eta] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$.

Unité : Dans le système international (SI), l'unité de viscosité dynamique est

le Pascal seconde [Pa·s]

3.2.3 Viscosité cinématique

Dans de nombreuses formules apparaît le rapport de la viscosité dynamique η et de la masse volumique ρ.

Ce rapport est appelé ***viscosité cinématique*** ν :

$$\boxed{\nu = \frac{\eta}{\rho}}$$

Dimension : $[\nu] = L^2 \cdot T^{-1}$.

Unité : Dans le système international (SI), l'unité de viscosité n'a pas de nom particulier : [m^2/s].

3.2.4 Ordre de grandeur ; influence de la température

Fluide	η [Pa·s]
eau (0 °C)	$1{,}787 \times 10^{-3}$
eau (20 °C)	$1{,}002 \cdot \times 10^{-3}$
eau (100 °C)	$0{,}2818 \cdot \times 10^{-3}$
huile d'olive (20 °C)	$\approx 100 \cdot \times 10^{-3}$
glycérol (20 °C)	$\approx 1{,}0$
H_2 (20 °C)	$0{,}860 \cdot \times 10^{-5}$
O_2(20 °C)	$1{,}95 \cdot \times 10^{-5}$

La viscosité des liquides diminue beaucoup lorsque la température augmente.

Il n'existe pas de relation rigoureuse liant η et T.

Contrairement à celle des liquides, ***la viscosité des gaz augmente avec la température***.

3.3 Mesurage de viscosités

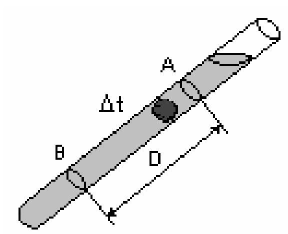
3.3.1. Viscosimètre d'Ostwald

On mesure la durée d'écoulement *t* d'un volume *V* de liquide à travers un tube capillaire. On montre que la viscosité cinématique ν est proportionnelle à la durée *t*. Si on connaît la constante de l'appareil (*K*) fournie par le constructeur :

$$\boxed{\nu = K \cdot t}$$

Si on ne connaît pas cette constante, on la détermine préalablement à l'aide de l'eau.

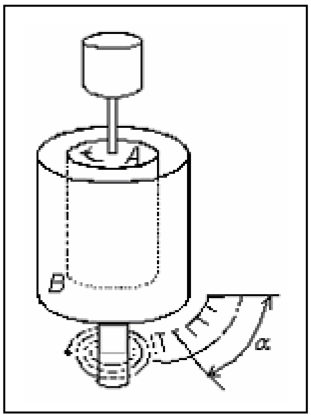
3.3.2 Viscosimètre à chute de bille ou viscosimètre d'Hoepler



Une bille sphérique tombe lentement dans un tube bien calibré renfermant le liquide visqueux. On mesure la durée *t* que met la bille pour parcourir une certaine distance. On montre que la viscosité dynamique η est proportionnelle à la durée *t* :

$$\boxed{\eta = K \cdot t}$$

3.3.3 Viscosimètre rotatif ou viscosimètre de Couette



Un cylindre plein (*A*) tourne à vitesse constante dans un liquide contenu dans un récipient cylindrique (*B*) ; celui-ci, mobile autour de son axe de révolution, est entraîné par le liquide. Un ressort, exerçant un couple de torsion après avoir tourné d'un angle α, retient (B) en équilibre.

On montre que la viscosité dynamique η est proportionnelle à l'angle α :

$$\boxed{\eta = K \cdot \alpha}$$

3.3.4 Applications ; conséquences

La propulsion par hélice d'un avion ou d'un bateau est possible grâce à la viscosité de l'air ou de l'eau.

A cause de sa viscosité, la pression d'un fluide réel diminue en s'écoulant dans une canalisation ; cela nécessite parfois d'introduire des pompes à distance régulière tout au long de la canalisation.

CHAPITRE 4 PERTES DE CHARGE

4.1 Le phénomène

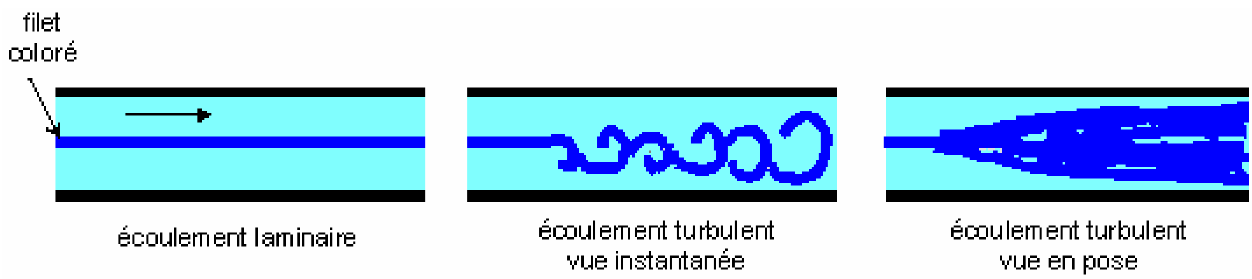
OBSERVATION

- La pression d'un liquide réel diminue tout au long d'une canalisation dans laquelle il s'écoule, même si elle est horizontale et de section uniforme, contrairement au théorème de Bernoulli.
- La pression d'un fluide réel diminue après le passage à travers un coude, une vanne ou un rétrécissement.

CONCLUSION

- Un ***fluide réel***, en ***mouvement***, subit des ***pertes d'énergie*** dues aux frottements sur les parois de la canalisation (pertes de charge *systématiques*) ou sur les "accidents" de parcours (pertes de charge *singulières*).

4.2 Les différents régimes d'écoulement : nombre de Reynolds



Les expériences réalisées par ***Reynolds*** (1883) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : ***laminaire et turbulent***.

En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un ***nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds*** et donné par la relation :

$$\boxed{Re = \frac{\rho v D}{\eta}} \quad \text{ou} \quad \boxed{Re = \frac{vD}{\nu}},$$

avec :

- ρ = masse volumique du fluide,
- v = vitesse moyenne,
- D = diamètre de la conduite,
- η = viscosité dynamique du fluide,
- ν = viscosité cinématique : $\nu = \dfrac{\eta}{\rho}$

L'expérience montre que :

si	***Re < 2000***	***le régime est LAMINAIRE***
si	***2000 < Re < 3000***	***le régime est intermédiaire***
si	***Re > 3000***	***le régime est TURBULENT***

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur, le passage d'un type d'écoulement à un autre se faisant progressivement.

4.3 Théorème de Bernoulli appliqué à un fluide réel avec pertes de charge

Lors d'un écoulement d'un fluide réel il peut y avoir des *pertes de charge* entre les points (1) et (2) ; dans le cas d'une installation ne comportant pas de machine hydraulique (pompe ou turbine) on écrira la relation de Bernoulli sous la forme :

$$\boxed{\frac{1}{2}\rho\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \rho g(z_2 - z_1) + \left(p_2 - p_1\right) = -\Delta p}$$

- Δp représente l'ensemble des pertes de charge entre (1) et (2) exprimées en Pa.

4.4 Expression des pertes de charge

4.4.1 Influence des différentes grandeurs

Lorsqu'on considère un fluide réel, les pertes d'énergie spécifiques ou bien comme on les appelle souvent, les ***pertes de charge*** dépendent de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide mais non de la valeur absolue de la pression qui règne dans le liquide.

La différence de pression $\Delta p = p_1 - p_2$ entre deux points (1) et (2) d'un circuit hydraulique a pour origine :

- Les frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie ; on les appelle ***pertes de charge régulières ou systématiques***.
- La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, etc.) ; ce sont les ***pertes de charge accidentelles ou singulières***.

Le problème du calcul de ces pertes de charge met en présence les principales grandeurs suivantes :

Le fluide caractérisé par :
- sa masse volumique ρ ;
- sa viscosité cinématique ν.

Un tuyau caractérisée par :
- sa section (forme et dimension) en général circulaire (diamètre D) ;
- sa longueur L ;
- sa rugosité k (hauteur moyenne des aspérités de la paroi).

Ces éléments sont liés par des grandeurs comme la vitesse moyenne d'écoulement v ou le débit q et le nombre de Reynolds Re qui joue un rôle primordial dans le calcul des pertes de charge.

4.4.2 Pertes de charge systématiques

➢ ***Généralités***

Ce genre de perte est causé par le frottement intérieur qui se produit dans les liquides ; il se rencontre dans les tuyaux ***lisses*** aussi bien que dans les tuyaux ***rugueux***.

Entre deux points séparés par une longueur L, dans un tuyau de diamètre D apparaît une perte de pression Δp. exprimée sous la forme suivante :

$$\boxed{\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2}{2} \frac{L}{D}}$$

Différence de pression [Pa].

$$\boxed{\Delta h = \lambda \frac{v^2}{2g} \frac{L}{D}}$$

Perte de charge exprimée en mètres de colonne de fluide [mCF]

λ est un coefficient sans dimension appelé ***coefficient de perte de charge linéaire*.**

Le calcul des pertes de charge repose entièrement sur la détermination de ce coefficient .

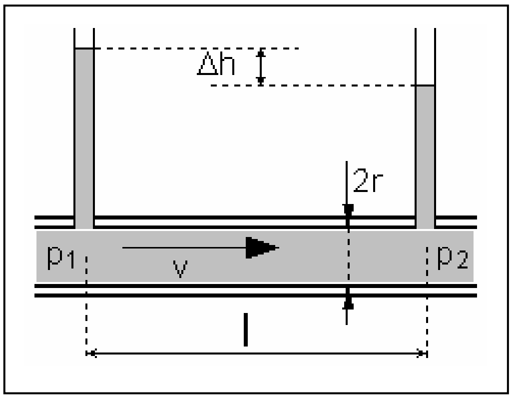
➢ ***Cas de l'écoulement laminaire : Re < 2000***

Dans ce cas on peut montrer que le coefficient λ est uniquement fonction du nombre de Reynolds Re ; l'état de la surface n'intervient pas et donc λ ne dépend pas de k (hauteur moyenne des aspérités du tuyau), ni de la nature de la tuyauterie :

$$\boxed{\lambda = \frac{64}{Re}} \quad \text{avec} \quad \boxed{Re = \frac{vD}{\nu}}$$

Il est alors immédiat de voir que Δh est proportionnel à la vitesse v et donc au débit q, ainsi qu'à la viscosité cinématique ν.

➢ ***Loi de Poiseuille***



Pour un ***écoulement laminaire***, dans une conduite cylindrique horizontale, le débit-volume d'un fluide est donné par :

$$q_v = \frac{\pi r^4}{8\eta l}(p_1 - p_2),$$

avec :

- q_v : débit-volume [$m^3 \cdot s^{-1}$],
- r : rayon intérieur [m],
- η: viscosité dynamique du fluide [Pa·s],
- l : longueur entre les points (1) et (2) [m],
- p_1 et p_2 : pression du fluide aux points (1) et (2) [Pa].

- ***Cas de l'écoulement turbulent : Re > 3000***

Les phénomènes d'écoulement sont beaucoup plus complexes et la détermination du coefficient de perte de charge résulte de mesures expérimentales. C'est ce qui explique la diversité des formules anciennes qui ont été proposées pour sa détermination.

En régime turbulent l'état de la surface devient sensible et son influence est d'autant plus grande que le nombre de Reynolds Re est grand. Tous les travaux ont montré l'influence de la rugosité et on s'est attaché par la suite à chercher la variation du coefficient λ en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité k du tuyau.

La formule de Colebrook est actuellement considérée comme celle qui traduit le mieux les phénomènes d'écoulement en régime turbulent. Elle est présentée sous la forme suivante :

$$\boxed{\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left(\frac{k}{3{,}7D} + \frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}\right)}$$

L'utilisation directe de cette formule demanderait, du fait de sa forme implicite, un calcul par approximations successives ; on emploie aussi en pratique des représentations graphiques (abaques).

Pour simplifier la relation précédente, on peut chercher à savoir si l'écoulement est ***hydrauliquement lisse*** ou ***rugueux*** pour évaluer la prédominance des deux termes entre parenthèses dans la relation de Colebrook.

Remarque **:**

On fait souvent appel à des formules empiriques plus simples valables pour des cas particuliers et dans un certain domaine du nombre de Reynolds, par exemple :

Formule de Blasius (pour des tuyaux lisses et Re < 10^5) :

$$\boxed{\lambda = 0{,}316\,\mathrm{Re}^{-0{,}25}}$$

4.4.3 Pertes de charge accidentelles

Ainsi que les expériences le montrent, dans beaucoup de cas, les pertes de charge sont à peu près proportionnelles au carré de la vitesse et donc on a adopté la forme suivante d'expression :

$$\boxed{\Delta p = K\frac{\rho v^2}{2}}$$

Différence de pression [Pa].

$$\boxed{\Delta h = K\frac{v^2}{2g}}$$

Perte de charge exprimée en mètres de colonne de fluide [mCF]

K est appelé ***coefficient de perte de charge singulière*** (sans dimension).

La détermination de ce coefficient est principalement du domaine de l'expérience.

4.5 Théorème de Bernoulli généralisé

Lors d'un écoulement d'un fluide réel entre les points (1) et (2) il peut y avoir des *échanges d'énergie* entre ce fluide et le milieu extérieur :

- par *travail* à travers une machine, pompe ou turbine ; la puissance échangée étant P ;
- par *pertes de charge* dues aux frottements du fluide sur les parois ou les accidents de parcours ; la différence de pression étant Δp.

Le théorème de Bernoulli s'écrit alors sous la forme générale :

$$\boxed{\frac{1}{2}\rho\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \rho g(z_2 - z_1) + \left(p_2 - p_1\right) = \frac{\sum P}{q_v} - \Delta p}$$

avec :

- ΣP : somme des puissances échangées entre le fluide et le milieu extérieur, à travers une machine, entre (1) et (2) :

  $P > 0$ si le fluide reçoit de l'énergie de la machine (pompe),

  $P < 0$ si le fluide fournit de l'énergie à la machine (turbine),

  $P = 0$ s'il n'y a pas de machine entre (1) et (2).
- Δp : somme des pertes de charge entre (1) et (2) .

CHAPITRE 5 TENSION SUPERFICIELLE

5.1 Le phénomène

OBSERVATION

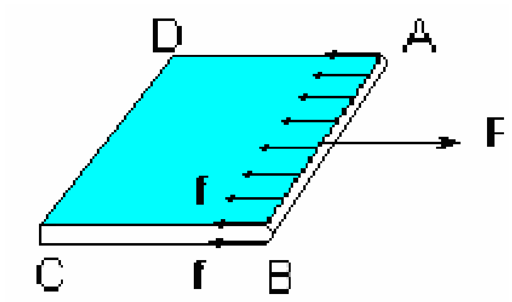
- La surface libre de l'eau dans un tube forme un ménisque près des bords.
- Les poils d'un pinceau sec se rassemblent lorsqu'ils sont mouillés.
- Une aiguille fine en acier flotte à la surface de l'eau.
- L'eau monte dans un capillaire alors que le mercure descend.
- Une plaque de verre adhère très fortement à une surface plane lorsque celle-ci est mouillée.
- Une lame de savon prend une forme telle que sa surface soit minimale.

CONCLUSION

- La surface libre d'un liquide tend à se contracter spontanément de façon à acquérir une aire minimale.
- La surface d'un liquide se comporte un peu comme la membrane tendue d'un ballon.

5.2 La force de tension superficielle

5.2.1 Force de tension superficielle appliquée à un solide tiré par une lame liquide



Considérons un cadre ABCD dont le coté AB, de longueur L, peut glisser sur DA et CB. Plongé initialement dans un liquide (par exemple de l'eau de savon), ce cadre est rempli d'une lame mince liquide. Le liquide tire AB vers DC par une force f sur chaque face de la lame, proportionnelle à la longueur L, telle que $f = \gamma L$.

Pour maintenir AB en équilibre, il faut lui appliquer une force **F** (qui ne dépend pas de la position de AB) telle que :

$$F = 2 \cdot f \quad \text{ou} \quad F = 2\,\gamma\,L$$

avec F en [N] , L en [m] et γ en [N·m^{-1}].

5.2.2 Définition

Dans la relation précédente, le coefficient γ s'appelle ***tension superficielle*** du liquide.

Dimension : [γ] = M?T^{-2}.

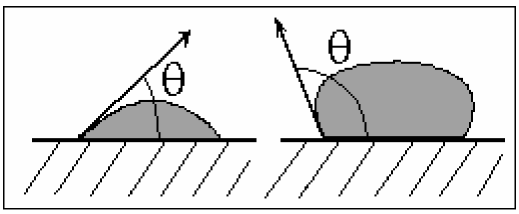
Unité : Dans le système international (SI), l'unité de ***tension superficielle*** n'a pas de nom particulier : [N·m^{-1}].

5.2.3 Ordres de grandeur (dans le cas d'interface liquide - air)

liquide	γ (N·m^{-1}) à 20 °C
eau (à 20 °C	73·x 10^{-3}
eau (à 0 °C)	75,6 x 10^{-}3
huile végétale	32·x 10^{-3}
éthanol	22·x 10^{-3}
éther	17·x 10^{-3}
mercure	480·x 10^{-3}

5.2.4 Angle θ de raccordement liquide / solide

Une goutte de liquide déposée sur une plaque solide plane et horizontale peut :

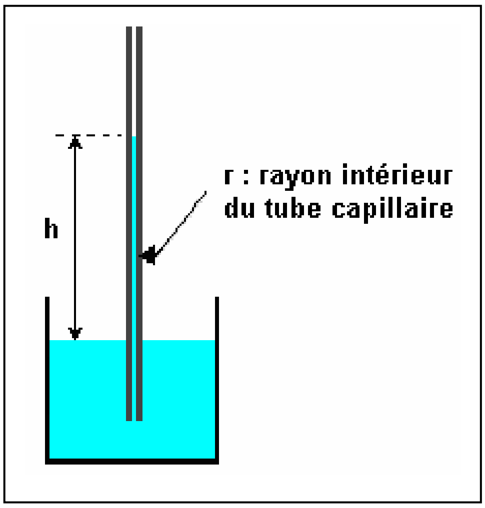


- soit s'étaler largement (par exemple de l'eau sur du verre propre) ; dans ce cas, on dit que le liquide ***mouille parfaitement*** le solide, et l'angle de raccordement ***θ vaut 0°*** ;
- soit former une lentille :
  - si θ **< 90°**, le liquide ***mouille imparfaitement*** le solide (par exemple l'eau sur du verre sale)
  - si θ **> 90°**, le liquide ***ne mouille pas*** le solide (par exemple le mercure sur du verre).

Le même angle de raccordement se retrouve à la surface libre d'un liquide près des bords du récipient et provoque la formation d'un ménisque dans les tubes.

5.3 Tube capillaire : Loi de Jurin

Un tube capillaire (du latin *capillus* : cheveu) est un tube de petit diamètre intérieur. Lorsqu'on plonge un tube capillaire, ouvert aux deux extrémités, dans un liquide, celui-ci "monte" (si $\theta < 90$ °) ou "descend" (si $\theta > 90$ °) dans le tube d'une hauteur **h** telle que :



$$\boxed{h = \frac{2\gamma\cos\theta}{r\rho g}},$$

où :

- r : *rayon intérieur du tube* ;
- ρ : *masse volumique du liquide* ;
- g : *intensité de la pesanteur* ;
- γ : *tension superficielle du liquide* ;
- θ : *angle de raccordement liquide/solide*.

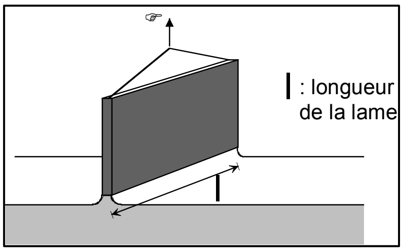
5.4 Mesurages de tension superficielle

5.4.1 Méthode du capillaire

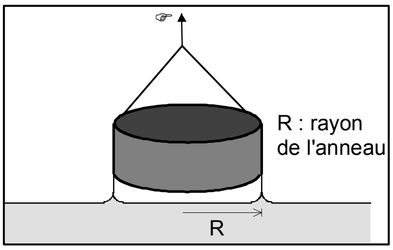
On applique la loi de Jurin. On mesure la dénivellation **h** et connaissant les autres paramètres, on en déduit une valeur de γ.

5.4.2 Méthode de la lame immergée ou de l'anneau immergé

Une lame de platine, parfaitement propre, de longueur **L**, plongée dans un liquide de tension superficielle γ, est soutenue par le levier d'une balance de torsion qui permet de mesurer la force **F** exercée sur la lame (le zéro est réglé lorsque la lame est dans l'air). On soulève doucement la lame jusqu'à ce qu'elle affleure le liquide (la poussée d'Archimède est alors nulle) et on mesure alors la force $F = 2\,\gamma\,L$. On en déduit une valeur de γ.



La lame peut être remplacée par un anneau de rayon **R**, soutenu par un dynamomètre. On soulève lentement l'anneau et, au moment de son **arrachement** de la surface du liquide, on mesure la force $F = 4\pi r\gamma$. On en déduit une valeur de γ.



5.4.3 Méthode du stalagmomètre

Lorsqu'un liquide, de masse volumique ρ, s'écoule par un tube fin, le poids des gouttes obtenues est proportionnel à la tension superficielle γ du liquide et au rayon extérieur **R** du tube :

$$m \cdot g = k \cdot R \cdot \gamma$$

On compte le nombre **N** de gouttes qui s'écoulent pour un volume **V** donné délimité par deux traits de jauge gravés sur le tube. :

$$N = V \cdot \rho \cdot g / (k \cdot R \cdot \gamma)$$

Le stalagmomètre est étalonné avec de l'eau pure à 20 °C :

$$N_0 = V \cdot \rho_0 \cdot g / (k\ R \cdot \gamma_0)$$

On obtient :

$$\gamma = \gamma_0 \frac{\rho}{\rho_0} \frac{N_0}{N}$$

5.4.4 Applications : agents tensioactifs

Le rôle des agents tensioactifs est d'abaisser la valeur de la tension superficielle des liquides dans lesquels ils sont ajoutés pour les rendre mouillants, moussants, détergents, émulsifiants...

CHAPITRE 6 RAPPELS FORMULES

On rappelle les relations de la dynamique des fluides incompressibles :

- Relation de Bernoulli : $$\boxed{\frac{1}{2}\rho\left(v_2^2 - v_1^2\right) + \rho g\left(z_2 - z_1\right) + \left(p_2 - p_1\right) = \frac{P}{q_v} - \Delta p}$$

Pertes de charge

On rappelle qu'entre deux points d'une canalisation de diamètre D (rayon R), dans laquelle circule un fluide, avec une vitesse moyenne v (q_v est le débit-volume), séparés par une longueur L, apparaît une différence de pression (perte de charge) Δp. exprimée sous la forme suivante :

$$\boxed{\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2}{2}\frac{L}{D}}$$

ρ = masse volumique du fluide ; η = viscosité dynamique

ν = viscosité cinématique ;. $\nu = \frac{\eta}{\rho}$

λ est un coefficient sans dimension appelé **coefficient de perte de charge linéaire.**

Nombre de Reynolds Re : $$\boxed{Re = \frac{v.D}{\nu}}$$

Dans le cas de ***l'écoulement laminaire***, on peut montrer que la différence de pression s'exprime sous la forme :

Loi de Poiseuille : $$\boxed{\Delta p = \frac{8\eta L}{\pi R^4} q_V}$$

Relation donnant la masse volumique ρ d'un gaz (en fonction de la pression p et de la température T) :

$$\boxed{\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0}\frac{T_0}{T}}$$

Masse volumique de l'air dans les conditions normales de température et de pression CNTP

(θ_0 = 0°C, P_0 = 760 mm Hg), ρ_0 = 1,293 kg.m^{-3} .

Cavitation

On appelle ***cavitation*** l'ébullition locale dans un fluide où la pression diminue jusqu'à devenir égale à la pression de vapeur saturante.

L'implosion des bulles formées peut entraîner l'érosion de pièces métalliques des machines, l'émission de bruit, de vibrations, ou des pertes de rendement.

CHAPITRE 7 EXERCICES DE MECANIQUE DES FLUIDES

7.1 Relation de continuité

1° De l'eau s'écoule dans une conduite de 30,0 cm de diamètre à la vitesse de 0,50 $m.s^{-1}$. Calculer le débit-volume en $m^3.s^{-1}$ et L/min ; donner la valeur numérique du débit-masse.

2° Dans une conduite de 30,0 cm de diamètre, l'eau circule avec un débit-volume de 1800 L/min. Calculer la vitesse moyenne d'écoulement. Le diamètre devient égal à 15,0 cm ; calculer la nouvelle vitesse moyenne.

3° De l'air circule dans une conduite de 15,0 cm de diamètre à la vitesse moyenne v_1 = 4,50 $m.s^{-1}$. Calculer le débit-volume q_v.

4° La pression manométrique est de 2,10 bar, la pression atmosphérique normale vaut 1013 mbar et la température est de 38 °C. Exprimer le débit-masse q_m en fonction des pressions et des températures puis faire le calcul numérique.

Données :

masse molaire de l'air 29,0 $g.mol^{-1}$; constante du gaz parfait : R = 8,32 $J.mol^{-1}.K^{-1}$.

Relation donnant la masse volumique ρ d'un gaz (en fonction de la pression p et de la température T (voir annexe à la fin du document)

7.2 Ecoulement permanent à travers un ajutage

On utilise en travaux pratiques une cuve verticale (voir schéma ci-dessous) remplie d'eau ; on supposera que le niveau A dans la cuve est constant. Le fluide s'écoule par un trou de diamètre D situé dans le fond de la cuve. L'eau sera considérée comme un fluide parfait incompressible.

1° Enoncer le théorème de Bernoulli pour un fluide parfait en précisant la signification des différents termes.

2° Appliquer la relation de Bernoulli entre les points A et B et déterminer l'expression littérale de la vitesse v_B au niveau du trou.

3° Donner la relation permettant de calculer le débit-volume théorique q_v au point B.

4° Calculer numériquement la vitesse v_B et le débit-volume q_v au point B.

5° En fait le débit réel vaut 0,92 L/s. Comparez à la valeur trouvée dans la question 4. Justification ?

6° On explique en partie cette différence par une contraction de la veine liquide à la sortie de l'orifice. En déduire le diamètre D' de la veine liquide à la sortie de la cuve.

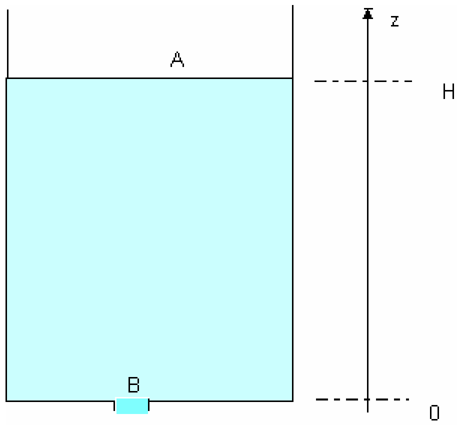
Valeurs numériques :

H = 0,82 m

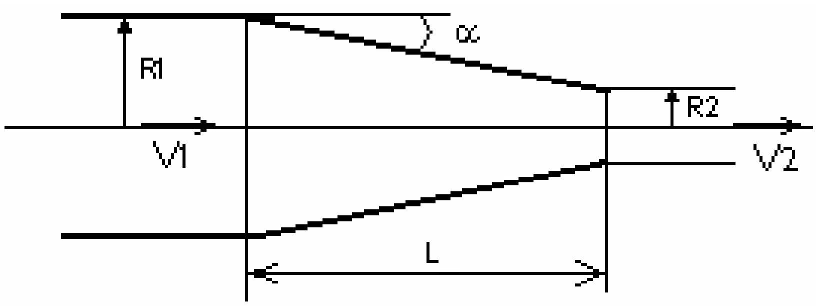
D = 2,0 cm.

ρ(eau) = 1000 kg.m^{-3}.

g = 9,81 m.s^{-2}.



7.3 Ecoulement convergent à travers d'une conduite

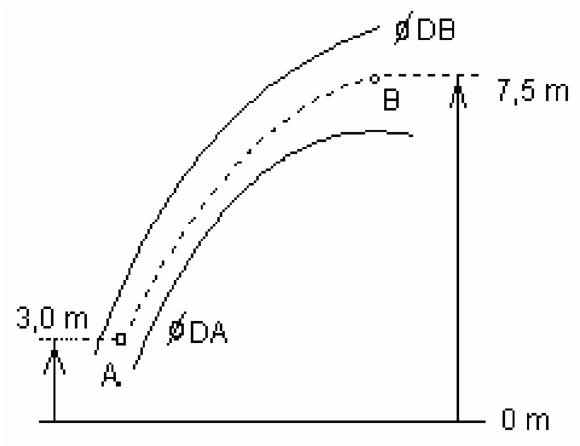


On veut accélérer la circulation d'un fluide parfait dans une conduite de telle sorte que sa vitesse soit multipliée par 4. Pour cela, la conduite comporte un convergent caractérisé par l'angle α (schéma ci-dessus).

1° Calculer le rapport des rayons R_1/R_2 Application numérique.

2° Calculer (R_1 - R_2) en fonction de L et α. En déduire la longueur L (R_1 = 50 mm, α = 15°).

7.4 Relation de Bernoulli



De l'eau (supposé fluide parfait) s'écoule du point A au point B avec un débit-volume de 350 L/s.

La pression en A vaut 0,70 bar.

Calculer la pression en B (détailler les calculs littéraux, puis les applications numériques).

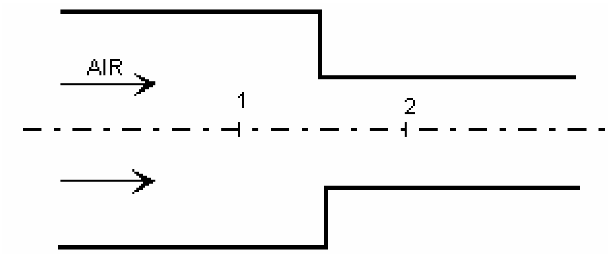
Données :

Diamètres aux points A et B :

D_A = 35,0 cm, D_B = 64,0 cm.

7.5 Convergent dans l'air

On considère le convergent horizontal ci-dessous dans lequel circule de l'air (supposé fluide parfait incompressible) .



Le débit-volume q_v vaut 220 $L.s^{-1}$.

$S_1 = 6{,}5\times10^{-2}$ m^2 et $S_2 = 2{,}0\times10^{-2}$ m^2.

1° Calculer le débit-masse q_m . On supposera la masse volumique de l'air constante :

ρ (air) = 3,20 $kg.m^{-3}$.

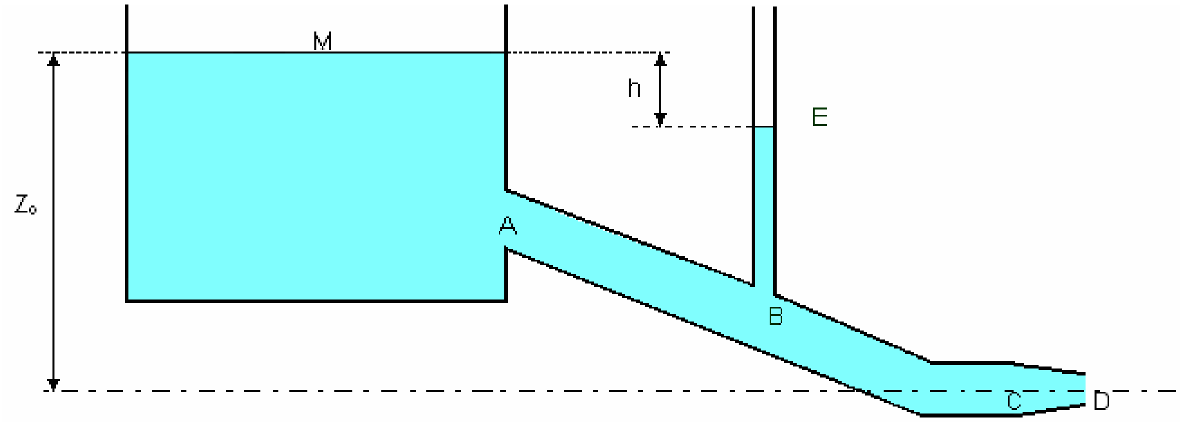
2° Calculer les vitesses moyennes v_1 et v_2.

3° Calculer la différence de pression $\Delta p = p_1 - p_2$ aux bornes du convergent. Donner sa valeur en Pascal et mbar.

4° Calculer la dénivellation h d'un manomètre différentiel à eau branché entre les points 1 et 2.

5° Expliquer pourquoi on peut considérer la masse volumique de l'air comme constante.

7.6 Réservoir



Dans la figure ci-dessus, R est un réservoir rempli d'eau, de très large section et dont le niveau Z_0 est maintenu constant. AC est une conduite de diamètre D. En C se trouve une courte tuyère de diamètre d. C et D sont sur la même horizontale.

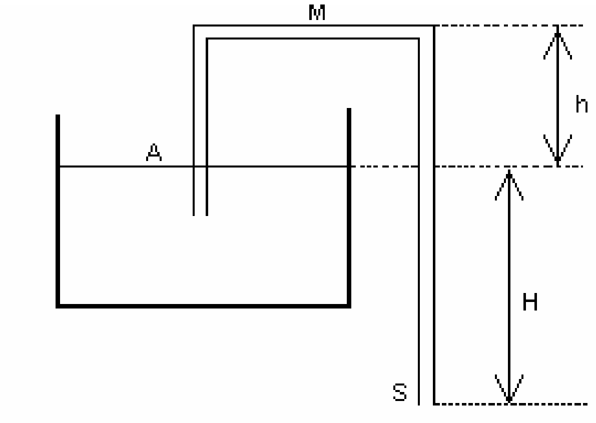
1° Etablir l'expression de la vitesse v_D de l'eau à la sortie de la tuyère (justifier les approximations effectuées). Exprimer le débit volume q en fonction de v_D , d, et g ;
En déduire l'expression de la vitesse v dans la conduite AC.
A.N : Z_0 = 4,0 m ; D = 5,0 cm ; d = 2,0 cm.   Calculer v_D , q et V.

2° Un tube est placé en B en liaison avec la conduite.
2.1 En utilisant la relation de Bernoulli, exprimer littéralement la pression au point B.
2.2 Par application de la loi de l'hydrostatique dans le tube vertical, calculer littéralement la pression p_B .
2.3 En déduire l'expression de h, différence des niveaux des surfaces libres du réservoir et du tube en fonction de v et g. Pouvait-on prévoir aisément ce résultat ?

3° Représenter la ligne de charge et la ligne piézométrique effective de l'installation.

7.7 Etude d'un siphon

Soit un siphon de diamètre d (d = 10,0 mm) alimenté par un récipient rempli d'eau, de grande dimension par rapport à d et ouvert à l'atmosphère (p_{atm}= 1,0 bar).



1° Calculer la vitesse moyenne du fluide en S puis le débit-volume q_v du siphon.

A.N : H = 3,0 m.

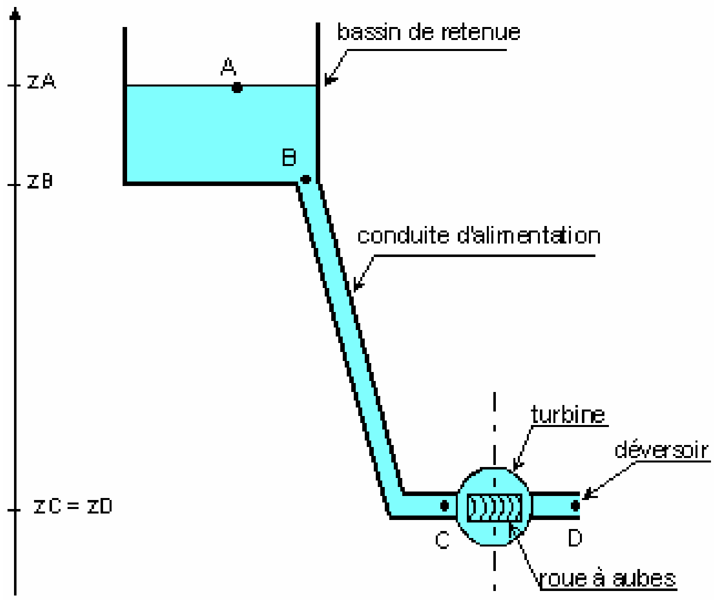
2° Donner l'expression de la pression p_M au point M en fonction de h.

3° Représenter l'allure de la pression p_M en fonction de h.

h peut-il prendre n'importe quelle valeur ?

7.8 Turbine

Une turbine est alimentée par une retenue d'eau selon le schéma ci-dessous.



On donne :

- Diamètre *d* de la conduite d'alimentation et de déversoir : *d* = 700 mm
- Pression aux points A, B, C et D : $p_A = p_D = 1{,}01$ bar $p_C = 1{,}1$ bar
- Cote des points A, B et C : $z_A = 363$ m $z_B = 361$ m $z_C = 353$ m
- Viscosité dynamique de l'eau : $1{,}00 \times 10^{-3}$ Pa·s

L'eau sera considérée comme un fluide parfait incompressible et on supposera que le niveau de l'eau dans la retenue est constant.

1° Calculer, dans ces hypothèses, la vitesse d'écoulement v_C du fluide au point C (c'est-à-dire à l'entrée de la turbine).

2° En déduire le débit-volume q_v de l'eau dans la conduite.

3° Justifier que les vitesses d'écoulement en B et en C sont égales.

4° Calculer la pression p_B à l'entrée de la conduite.

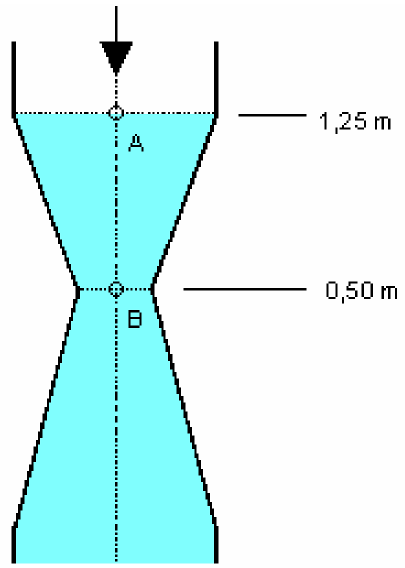
5° Calculer la puissance fournie par l'eau à la turbine.

6° Calculer le nombre de Reynolds de l'écoulement de l'eau. En déduire la nature du régime de cet écoulement.

7.9 Tube de Venturi vertical

On étudie l'écoulement de l'eau à travers un tube de Venturi vertical.

(Schéma ci-dessous). On supposera le liquide comme parfait et le régime d'écoulement permanent.



1° Ecrire l'équation de continuité et exprimer la relation littérale entre les vitesses moyennes v_A , v_B et les diamètres D_A et D_B .

A.N : Débit-volume : q_v = 200 L / s. Calculer v_A et v_B .

2° Appliquer la relation de Bernoulli entre A et B en précisant clairement la signification des différents termes.

A.N : Calculer $\Delta p = p_A - p_B$

Données numériques :

D_A = 30,0 cm, D_B = 15,0 cm.

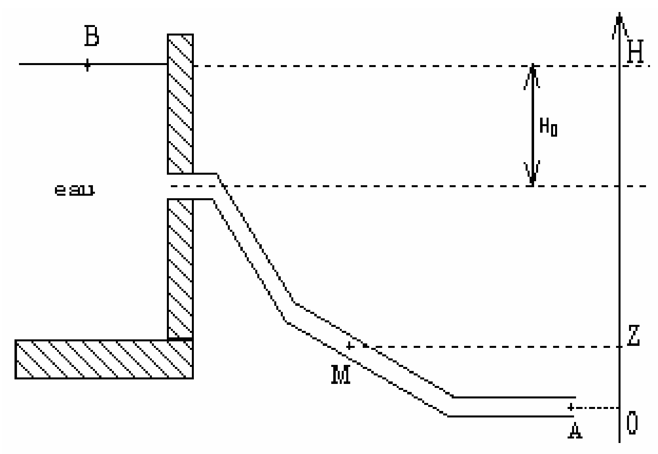
$\rho_{eau} = 1000\ kg.m^{-3}$.

Les côtes Z_A et Z_B des points A et B sont indiquées sur le schéma.

7.10 Conduite forcée . Phénomène de cavitation

Une conduite amène de l'eau à la température moyenne de 10 °C, de masse volumique constante ρ, d'un barrage vers la turbine d'une centrale hydroélectrique. La conduite cylindrique, de diamètre constant D = 30 cm et de longueur L = 200 m, se termine horizontalement, son axe étant situé à H = 120 m au-dessous de la surface libre de l'eau dans le barrage de très grande capacité. Le départ de la conduite est à H_0 = 20 m au dessous du niveau pratiquement constant. On néglige tout frottement et on prendra les valeurs numériques suivantes : g = 9.81 $m.s^{-2}$, $\rho = 1000\ kg.m^{-3}$, p_{atm} = 1,01 bar, pression de vapeur saturante de l'eau à 10 °C : 12,4 mbar.

Schéma :



1° Calculer littéralement la vitesse v_A du fluide à la sortie A (extrémité à l'air libre) ; faire l'application numérique.

Calculer le débit-volume q_v à la sortie.

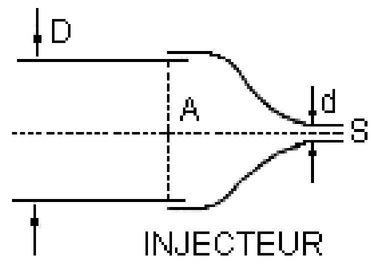
2° Déterminer littéralement la pression p_M au point M de côte z.

Donner l'allure de $p_M = f(z)$; pour quelles valeurs de z la pression de l'eau devient-elle inférieure à la pression saturante de l'eau?

Quel serait le phénomène observé pour cette valeur limite de z ?

3° Pour éviter ce problème dans la conduite, on dispose à l'extrémité A de la conduite une tubulure de section décroissante (injecteur), de diamètre de sortie d et d'axe horizontal.

Expliquer qualitativement comment est modifiée la pression à l'intérieur de la conduite.



7.11 Nombre de Reynolds

- Pour quelles *limites* du nombre de Reynolds Re a-t-on un *écoulement laminaire* ?

Quelles sont les limites pour un écoulement intermédiaire (ou critique) et pour un écoulement turbulent ?

- Calculer la vitesse critique pour de l'eau circulant dans un tuyau de diamètre 3,0 cm ($\nu = 1{,}0\times10^{-6}\ m^2.s^{-1}$).

Montrer littéralement que, dans les *hypothèses d'un écoulement laminaire*, la perte de charge Δp est proportionnelle au débit-volume q_v. Exprimer également Δh.

- On considère un écoulement d'air dans une conduite rectiligne cylindrique, de diamètre D, sous une pression p , et à la température θ (°C).

1° Calculer la valeur du nombre de Reynolds Re correspondant aux conditions expérimentales ci-dessous.

En déduire le type d'écoulement.

2° Quels sont les autres écoulements que vous connaissez. Comment les distingue t-on ? Précisez.

Schématiser les lignes de courant dans les différents cas. Qu'appelle-t-on profil de vitesse ? Donner un exemple.

Données expérimentales :

- Débit-volume de l'air q_v = 1,50 m^3 / heure.
- Diamètre D = 90,0 mm.
- Température θ (°C) = 25°C.
- Viscosité dynamique de l'air à 25°C : $\eta = 1{,}80 \times 10^{-5}$ Pa·s.
- Pression p = 900 mm de mercure.
- Masse volumique du mercure : $13{,}6 \times 10^3$ kg/m^3.

7.12 Ecoulement laminaire

1° On pompe de l'huile de densité 0,86 par un tuyau horizontal de diamètre D = 5,0 cm, de longueur L = 300 m, avec un débit-volume de 1,20 L/s ; la différence de pression entre les extrémités du tuyau vaut $20{,}6 \times 10^4$ Pa. Calculer la viscosité cinématique et dynamique de l'huile (on fera l'hypothèse d'un écoulement laminaire que l'on justifiera à posteriori).

2° Pour du fuel lourd, on donne les valeurs numériques suivantes :

ρ = 912 kg.m^{-3} ; $\nu = 2{,}05 \times 10^{-4}$ $m^2.s^{-1}$; q_v = 20,0 L.s^{-1} ; L = 1,0 km.

2.1 Pour une canalisation de longueur L, la perte de charge vaut 2,0 bar. Exprimer Δp en Pascal et en mCF.

2.2 En faisant l'hypothèse d'un écoulement laminaire, en déduire le *diamètre* D de la canalisation.

2.3 Calculer ensuite le nombre de Reynolds Re et *vérifier* que l'hypothèse de l'écoulement laminaire est bien vérifiée.

7.13 Ecoulement laminaire ; pertes de charge. Applications

Un écoulement d'huile de graissage de viscosité dynamique moyenne η = 0,275 Pa.s et de masse volumique ρ = 890 kg.m^{-3} se fait dans un tube horizontal de diamètre nominal DN = 150 mm et de longueur L = 120 m. On installe sur ce tube, deux capteurs de pression statique constitués par deux manomètres de Bourdon (PI Pressure Indicateur sur le schéma) ; les valeurs des pressions relatives données par ces appareils sont : p_2 = 1,12 bar et p_3 = 0,465 bar.

p_{atm} = pression atmosphérique = $1{,}00 \times 10^5$ Pa, g = 9,81 m.s^{-2}.

1° Calculer la différence de pression $\Delta p_{23} = p_2 - p_3$ en utilisant la loi de Poiseuille et en déduire la valeur du débit-volume q_v puis la vitesse moyenne v du fluide dans le tube.

2° En déduire la valeur du nombre de Reynolds Re. Montrer qu'il s'agit bien d'écoulement laminaire.

Quels sont les autres types d'écoulement que vous connaissez ? Comment les distingue t-on ?

3° Calculer la valeur du coefficient de perte de charge linéaire λ.

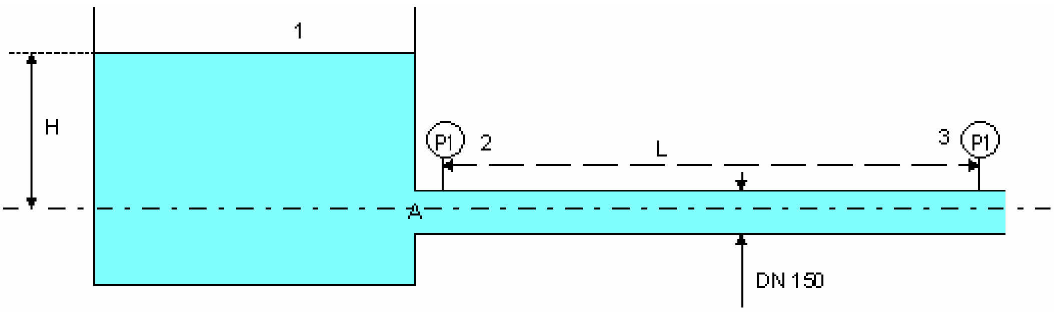
Donner la valeur numérique du produit λ.Re**.** Conclusions.

4° Exprimer la relation de Bernoulli ; quelles sont les conditions d'application ?

Appliquer la relation de Bernoulli entre les points 1 et 2 en négligeant tout frottement entre ces deux points (notamment au point A).

En déduire l'expression littérale donnant H en fonction de p_{atm} , p_2, v, ρ et g. Calculer numériquement H.

Schéma de l'installation :



7.14 Baromètre

On mesure la pression atmosphérique avec un baromètre à mercure. La hauteur de mercure est voisine de 76 cm .

1° Commet-on une erreur par excès ou par défaut si des phénomènes capillaires interviennent ?

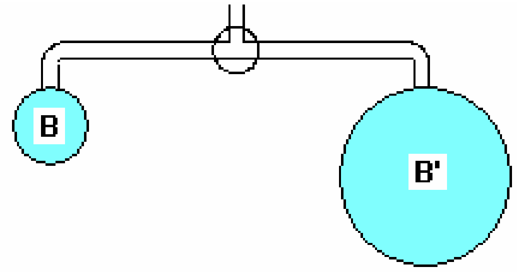
2° On désire que cette erreur ne dépasse pas 1 %. Quel diamètre minimal doit avoir le tube ?

Données :

- angle de raccordement mercure-verre : θ = 130 °
- tension superficielle du mercure : $\gamma = 480 \times 10^{-3}$ N/m
- masse volumique du mercure $13{,}6 \times 10^3$ kg/m^3.

7.15 Bulle

La surpression entre la pression intérieure et la pression extérieure d'une bulle d'eau de savon de rayon R est donnée par la relation : $p_i - p_e = 4 \cdot \gamma / R$ dans laquelle γ est la tension superficielle de l'eau savonneuse. On gonfle une bulle B avec une eau de savon ($\gamma = 30{,}0 \times 10^{-3}$ N·m^{-1}), en exerçant une surpression de 5 Pa.



1° Quel est le rayon de la bulle ?

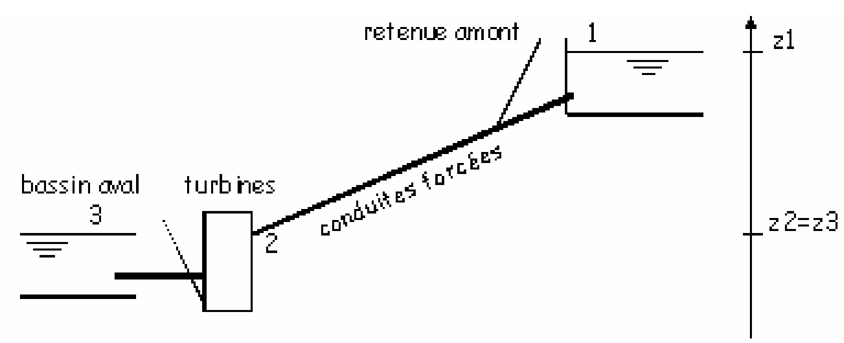
2° Comment varie le rayon de la bulle lorsque la surpression augmente ?

3° Lorsqu'on souffle de l'air dans une bulle de savon pour la faire grossir, comment varie la pression à l'intérieur de la bulle ?

4° À l'aide d'un dispositif muni d'un robinet à trois voies, on gonfle deux bulles de savon B et B' de rayon, respectivement R et R', avec R < R' (voir schéma). On met en communication les deux bulles. Que se passe-t-il ?

7.16 Installation hydroélectrique

Une installation hydroélectrique comporte une retenue d'eau amont, trois conduites forcées parallèles de diamètre 300 cm chacune, un ensemble de turbines, un bassin aval selon le schéma donné en annexe. Lors du turbinage, le débit-volume total est q_v = 217 m^3/s. On supposera nulles les vitesses de l'eau en 1 et en 3.



1° Calculer la vitesse d'écoulement de l'eau dans les conduites forcées.

2° Calculer le nombre de Reynolds pour l'écoulement de l'eau dans une conduite forcée ; l'écoulement est-il laminaire ou turbulent ?

3° Calculer les pertes de charge dans une conduite forcée entre les points 1 et 2.

4° Calculer la puissance échangée entre l'eau et le milieu extérieur dans l'ensemble des turbines entre les points 2 et 3 en supposant qu'il n'y a pas de pertes de charge lors de cet échange.

5° La puissance utile fournie par les turbines est de 1200 MW. Calculer le rendement des turbines.

On donne :

- viscosité cinématique de l'eau : $1{,}00 \times 10^{-6}$ m²/s
- $p_1 = p_3 = 1100$ mbar
- $p_2 = 73$ bar
- $z_1 = 1695$ m
- $z_2 = z_3 = 740$ m

7.17 Tube de Pitot

Pour connaître la vitesse d'écoulement de l'air à 20 °C (considéré comme un fluide parfait) dans une cheminée de section 2,00 m², on utilise un tube de Pitot et on mesure une différence de pression de 0,250 mbar entre les deux prises de pression.

1° Déterminer la vitesse de l'air dans la cheminée.

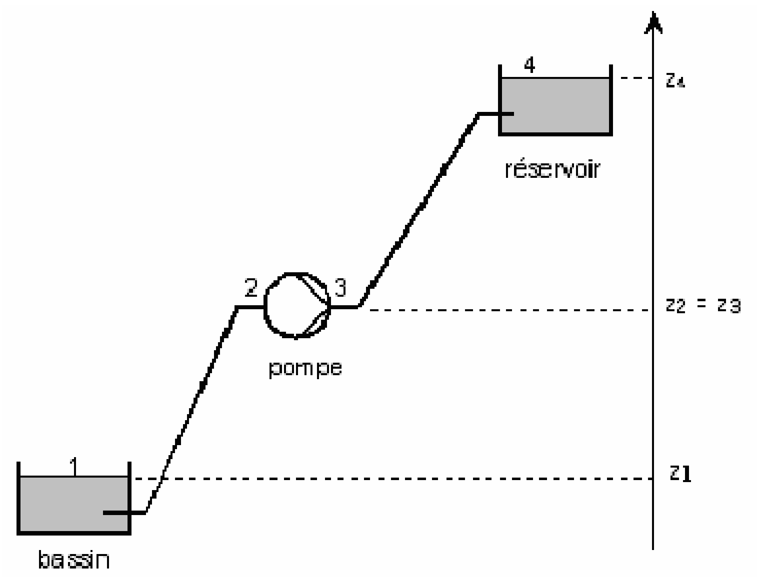
2° Déterminer le débit-volume et le débit-masse de l'air dans la cheminée.

Données :

Masse volumique de l'air à 20 °C : 1,205 kg/m^3

7.18 Pompe

Une pompe, de puissance utile 36 kW, remonte de l'eau entre un bassin et un réservoir à travers une conduite de diamètre 135 mm selon le schéma ci-dessous. La vitesse d'écoulement de l'eau dans la conduite est de 6,0 m/s.



On donne :

- $z_1 = 0$; $z_2 = z_3 = 20$ m ; $z_4 = 35$ m (l'axe Oz est vertical ascendante)
- $p_1 = p_4 = 1013$ mbar
- viscosité dynamique de l'eau : $1{,}00 \times 10^{-3}$ Pa·s.

On négligera les pertes de charge singulières dans les coudes et dans la pompe.

1° Calculer le débit-volume de l'eau dans la conduite.

2° Calculer le nombre de Reynolds pour l'écoulement de l'eau dans la conduite ; l'écoulement est-il laminaire ou turbulent ?

3° Calculer la différence de pression entre la sortie et l'entrée de la pompe.

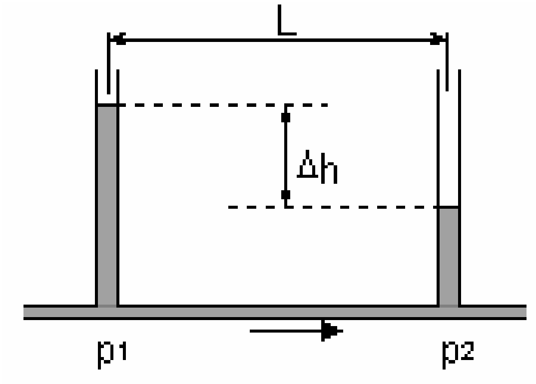
4° Calculer les pertes de charge systématiques dans la conduite entre les points 1 et 4.

5° Calculer le coefficient de perte de charge linéaire dans la conduite de longueur égale à 65 m.

6° Le rendement de la pompe étant de 84 %, calculer la puissance absorbée par la pompe.

7.19 Viscosité

Pour mesurer la viscosité d'une huile, on utilise le dispositif schématisé ci-dessous. On fait couler l'huile dans un tube horizontal de 7,0 mm de diamètre et comportant deux tubes manométriques verticaux situés à L = 600 mm de l'un de l'autre. On règle le débit-volume de cet écoulement à 4,0 x 10^{-6} m^3/s. La dénivellation de l'huile entre ces deux tubes est alors Δh = 267 mm. La masse volumique de l'huile est de 910 kg/m^3. On suppose que l'écoulement est de type laminaire.



1° Calculer la viscosité dynamique de l'huile.

2° Calculer le nombre de Reynolds de cet écoulement ; justifier l'hypothèse initiale

THERMIQUE

1. Chaleur – Température – Dilatations

2. Quantité de chaleur

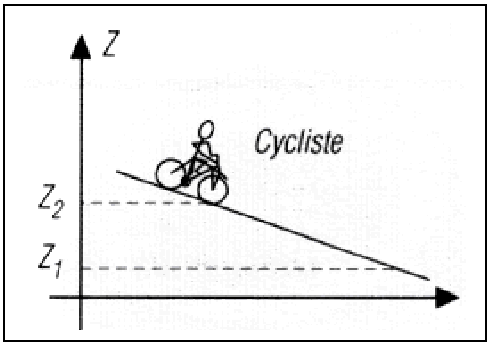
3. Modes de transfert de la chaleur

Chapitre 1 Chaleur - Température - Dilatations

1.1 Non conservation de l'énergie mécanique d'un système. Chaleur

FAITS EXPERIMENTAUX

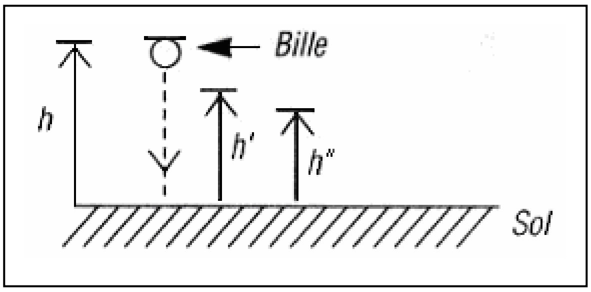
1.



• Le cycliste en freinant passe de l'altitude Z_2 à l'altitude Z_1 ;

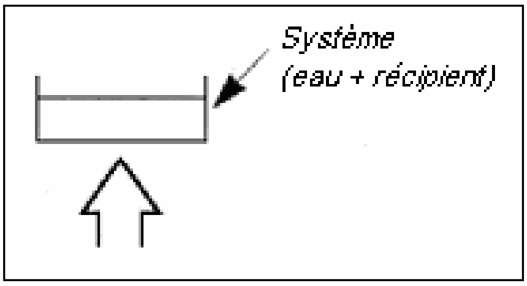
• Analyser l'évolution de l'énergie mécanique E du système [bicyclette, Terre].

2.



• Une bille est lâchée d'une altitude h. Qu'observez- vous?

3.



• Chauffer le système.

OBSERVATION

1. Les jantes et les patins de freins se sont échauffés.
2. La bille rebondit et remonte à des altitudes h' et V inférieures à h.
3. L'eau et le récipient se sont échauffés, si on continue de chauffer l'eau se met à bouillir.

INTERPRETATION

L'énergie mécanique E_T du système a diminué. Simultanément un ***effet thermique*** est apparu dans les parties du système où les forces de frottement travaillent.

Si on abandonne le système, les jantes et les patins de freins vont reprendre leur état initial on dira que le système a fourni de la ***chaleur*** au milieu extérieur.

Le travail des forces de frottement a assuré le transfert de l'énergie du système vers te milieu extérieur.

2. Le système [Terre, bille] perd de l'énergie mécanique. La bille et le sol ont échangé de l'énergie au moment du contact (choc). On dira que de l'énergie a été échangée sous forme de ***chaleur***.

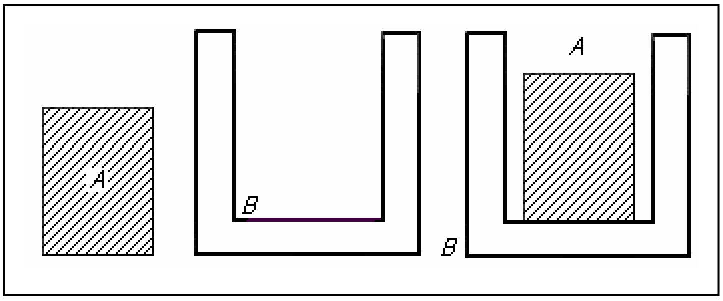
3. L'énergie cinétique et potentielle des molécules d'eau ont augmenté : de l'énergie a été transférée de la flamme vers le système sous forme de chaleur.

A SAVOIR

Travail et ***chaleur*** sont des modes de transfert d l'énergie entre deux systèmes.

1.2 Echanges de chaleur entre deux corps

EXPERIENCE



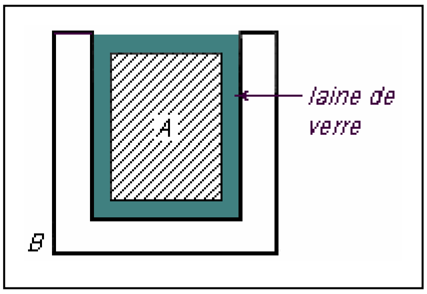
1. Chauffer le bloc d'aluminium A, puis mettre A au contact de B.

OBSERVATION

• Au bout d'un temps t le cylindre B s'est échauffé.

INTERPRETATION

• Il y a eu ***échange thermique*** entre A et B



2. Recommencer, mais interposer au préalable de la laine de verre entre A et B.

OBSERVATION

• On ne constate plus l'échauffement de B.

INTERPRETATION

• Il n'y a pas eu échange thermique entre A et B.

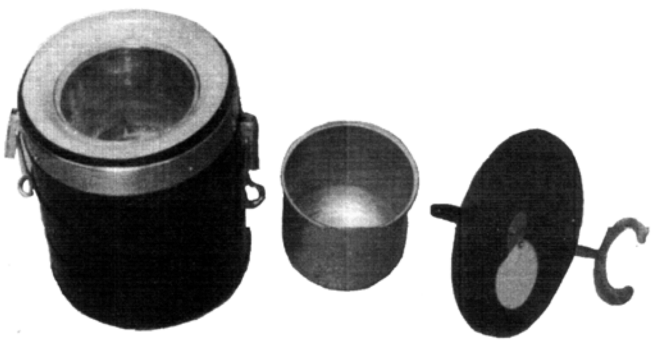
A SAVOIR

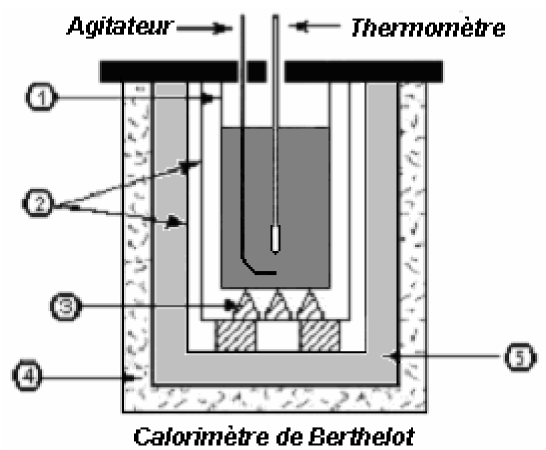
Un système est dit ***thermiquement isolé*** s'il n'échange pas de chaleur avec le milieu extérieur.

Remarque :

Il est impossible de réaliser un système parfaitement isolé mais on peut s'en rapprocher avec une excellente approxImatIon.

Exemple: le ***calorimètre***





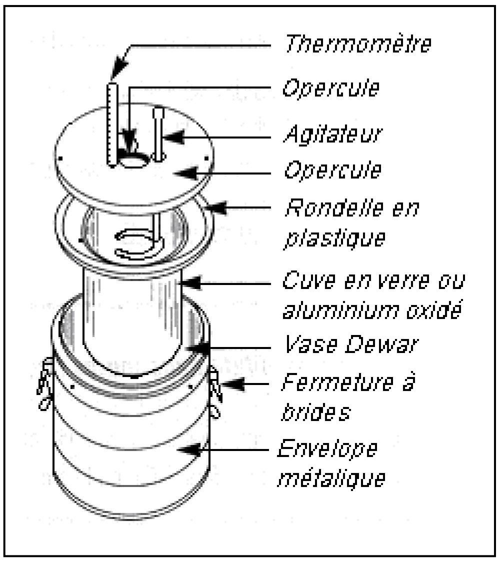
Calorimètre de Berthelot

① *Vase calorimétrique en laiton*

② *Cale en liège*

③ *Enceintes de protection*

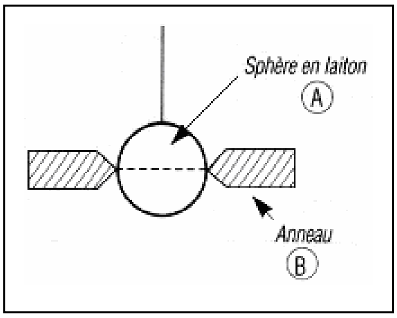
④, ⑤ *Enceinte extérieure calorifugée par du feutre, elle peut éventuellement être remplie d'eau*



1.3 Effet d’un apport de chaleur: le phénomène de dilatation

1.3.1 Dilatation des solides

EXPERIENCE

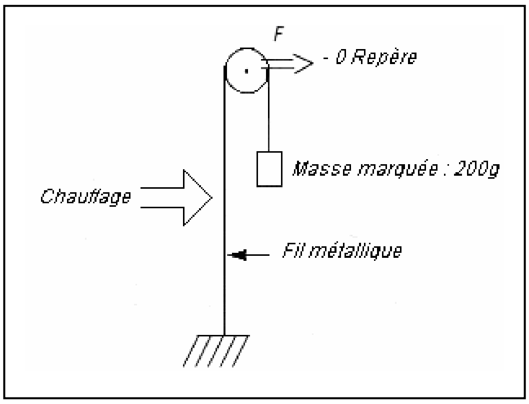


DESCRIPTION

• Avant chauffage, A passe librement dans B.

• Chauffer A seul ; que constate-t-on?

• Chauffer l’ensemble A + B.



• Chauffer le fil métallique, puis le laisser refroidir.

OBSERVATION

• Lorsque A est chauffée elle ne passe plus à travers l’anneau B : son volume a donc augmenté. Si on laisse refroidir A elle passe de nouveau dans elle a repris son volume initial. Lorsque A et B sont chauffés ensemble, A passe librement à travers B. Le diamètre de la sphère reste égal au diamètre intérieur de l’anneau.

• La flèche F se déplace vers le bas : le fil métallique s’est allongé. Au bout d’un temps t, le fil reprend sensiblement sa longueur initiale.

A SAVOIR

Un solide se ***dilate dans toutes les directions***. S’il est isotrope et si toutes ses parties sont chauffées de la même façon, il reste identique à lui-même : il ne se déforme pas.

Lorsqu’il y a augmentation de volume, on dit qu’il y a ***dilatation cubique***.

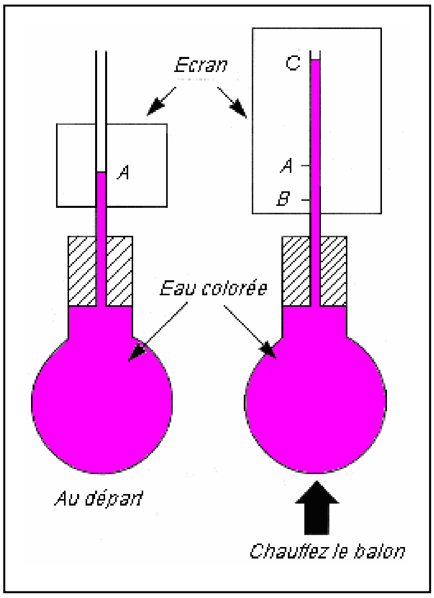
Le changement de dimension du fil métallique s’appelle une ***dilatation***. Le fil a subi une ***dilatation linéaire***.

Remarque :

Un corps creux se dilate comme un corps plein. Une cavité se dilate comme si elle était pleine du solide qui l’entoure.

1.3.2 Dilatation des liquides

EXPERIENCE



DESCRIPTION

• Dans l'état initial, à la température ambiante : repérer le niveau A.

• Chauffer le ballon.

OBSERVATION

• Le niveau de l'eau baisse de A en B puis remonte en C.

INTERPRETATION

La paroi du ballon s'est échauffée la première : le volume intérieur du ballon a augmenté (dilatation cubique de l'enveloppe). Le volume du liquide compris entre les repères A et B caractérise la dilatation du ballon. L'eau s'est dilatée ensuite. Le volume de l'eau compris entre les repères B et C caractérise la dilatation réelle de l'eau.

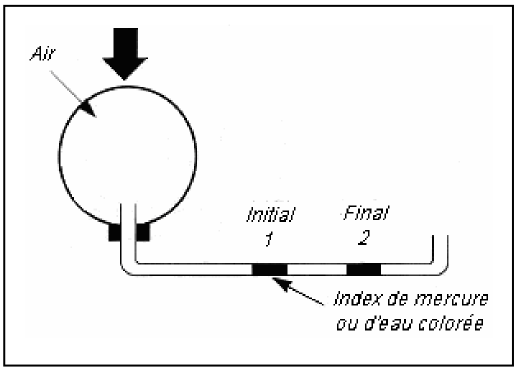
L'eau se dilate d'une façon plus importante que le verre.

A SAVOIR

Ce résultat est général : les liquides se dilatent beaucoup plus que les solides.

1.3.3 Dilatation des gaz

EXPERIENCE



DESCRIPTION

• Index de mercure dans la position 1.

• Chauffer le ballon (par exemple avec les mains).

• Faire le bilan des actions dans les deux états.

OBSERVATION

• Dans la position 1: l'index est en équilibre.

• Lorsqu'on chauffe, l'index se déplace et se fixe dans la position 2.

INTERPRETATION

1. L'action exercée par l'air intérieur sur l'index de mercure est égale a celle exercée par l'air extérieur. La pression de l'air intérieur du ballon est donc la pression atmosphérique.

2. La pression est la même.

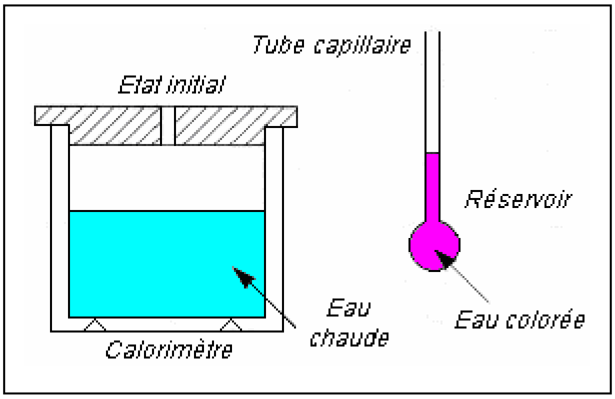
A SAVOIR

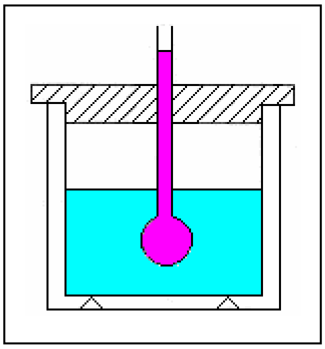
D'une manière générale, tous les gaz se comportent comme l'air. Lorsqu'on chauffe un gaz à pression constante son volume augmente.

1.4 Equilibre thermique - Repérage des températures

1.4.1 Equilibre thermique

EXPERIENCE





DESCRIPTION

• Introduire le tube capillaire dans le calorimètre.

OBSERVATION

• L'eau colorée monte dans le tube. Après un certain temps, le niveau de l'eau se stabilise dans le tube.

A SAVOIR

Lorsque le niveau se stabilise dans le tube, il n'y a plus d'échange de chaleur entre l'eau du tube et l'eau du calorimètre. On a réalisé un ***équilibre thermique***. On conviendra de dire que l'eau du calorimètre et l'eau du réservoir sont à la ***même température.***

Généralisation

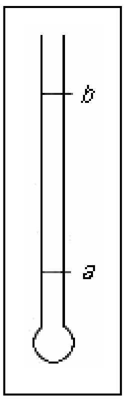
Un ensemble de deux systèmes est en ***équilibre thermique*** lorsque ces deux systèmes sont à la même température, c'est-à-dire n'échangent plus de chaleur.

Thermostat

Si l'un des corps est de dimensions très importantes par rapport à l'autre il est appelé ***thermostat***. Mis en contact avec un corps de petites dimensions, on admettra que l'énergie du thermostat n'a pas varié ni sa température. A l'équilibre thermique le corps de petites dimensions a pris la température du thermostat.

1.4.2 Repérage des températures

• Construction d'une échelle thermométrique



Echelle Celsius

Par convention, on associe au repère *a* le nombre 0, au repère *b* le nombre 100.

a) glace fondante ;

b) ébullition de l'eau sous la pression atmosphérique normale ;

• La distance ab est divisée en 100 parties égales. Chaque intervalle ainsi obtenu représente une variation de température de un degré Celsius (1 °C).

• Le système tube capillaire, réservoir, liquide, graduation est appelé ***thermomètre***.

Echelle absolue ou échelle Kelvin

C'est une échelle à un point de référence, elle permet de faire des ***mesures*** de température. Elle s'introduit au cours de l'étude des gaz parfaits.

On a la correspondance :

$$T\ (K) = t\ (°C) + 273$$

0 K = - 273 °C   273 K = 0 °C   373 K = 100 °C

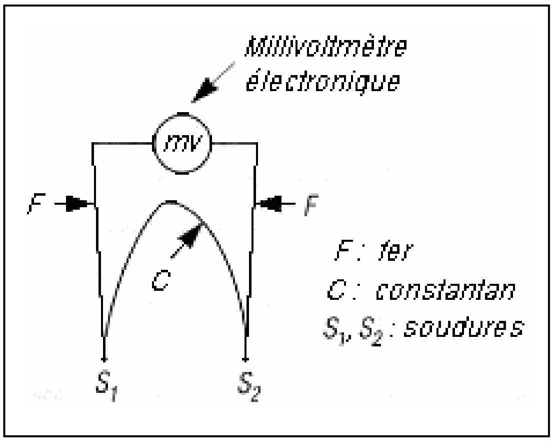
Remarque :

Il résulte de cette relation qu'une ***différence de température*** s'exprime par le même nombre dans l'échelle Celsius et dans l'échelle absolue :

$$T_A - T_B = t_A - t_B$$

1.5 Le Thermocouple

EXPERIENCE



DESCRIPTION

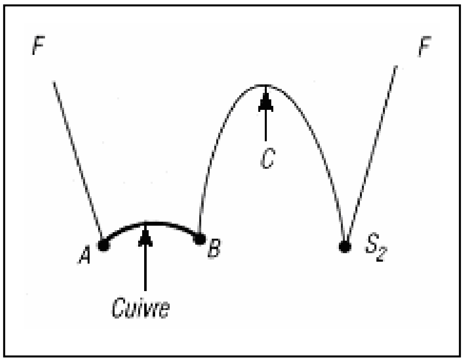
- Réaliser une chaîne de deux conducteurs (Fer, Constantan) formant entre eux deux jonctions S_1 et S_2.
- Chauffer l'une des soudures S_1 ou S_2 et maintenir l'autre à 0 °C.
- Chauffer le fer ou le constantan loin des soudures S_1 et S_2.
- Chauffer de la même façon S_1 et S_2.

OBSERVATION

• Le millivoltmètre indique une faible tension *e* ; e dépend de la température θ de la soudure chauffée.

• Aucune tension n'est décelée.

EXPERIENCE



DESCRIPTION

- Remplacer la jonction S_1 par un fil de cuivre AB, intercalé entre le fer et le constantan.
- Refaire l'expérience 1.

OBSERVATION

• Le fonctionnement est le même à condition que les deux points A et B soient à la même température.

A SAVOIR

La force électromotrice *e* observée résulte de la différence de température entre les deux soudures. Si on connaît la loi d'évolution $e = f(\theta)$ on a réalisé un instrument pour mesurer la température appelé ***thermomètre***.

L'ensemble des deux conducteurs fer et constantan soudés constitue un ***thermocouple*** ou un ***couple thermoélectrique***.

Remarques:

1. Ce résultat est général, on obtient les mêmes résultats si on remplace le fer et le constantan par d'autres métaux ou alliages métalliques.

2. Loi des métaux intermédiaires

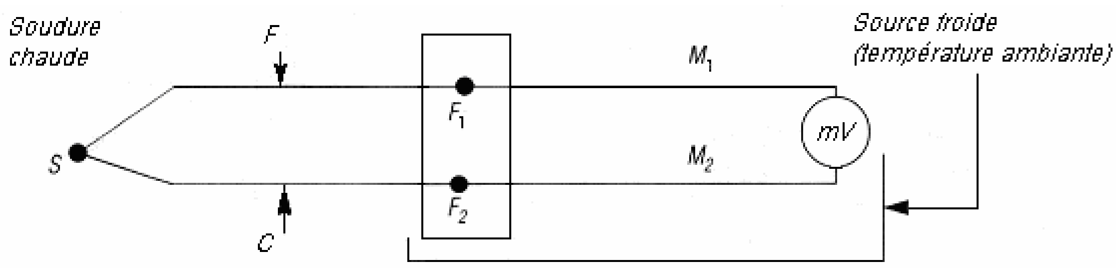
La force électromotrice d'un thermocouple n'est pas modifiée quand on intercale dans le circuit un ou plusieurs métaux intermédiaires, à condition que la partie du circuit ainsi formée soit maintenue à la même température.

Conséquences :

• on peut relier au millivoltmètre les conducteurs constituant le couple par des fils métalliques d'une autre nature.

• on peut supprimer la soudure froide, celle-ci étant à la température ambiante et non à 0 °C.

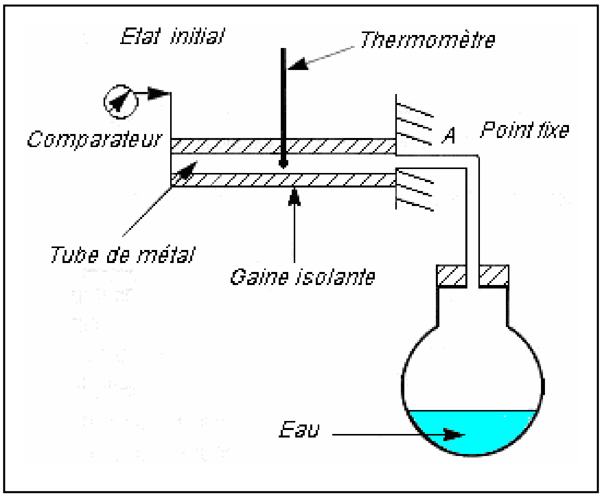
3. Montage pratique de mesure



Le couple est constitué par deux fils de fer et de constantan, par exemple, soudés en S; S étant la soudure chaude. La soudure froide étant constituée par les jonctions F_1 et F_2 les fils M_1 et M_2 et le millivoltmètre. Ces procédés de compensation éliminent l'influence de la température de la soudure froide.

1.6 Etude quantitative de la dilatation d'un solide

Détermination du coefficient de dilatation linéaire d'un métal.



DESCRIPTION

• Le tube de métal fixé en A est chauffé par la vapeur d'eau.

MANIPULATION

• Mettre le comparateur au zéro et noter θ_0 température initiale du tube.

• Mesurer la longueur l_0 initiale du tube.

• Chauffer l'eau du ballon.

• Mesurer l'allongement $\Delta l = l - l_0$ correspondant à une élévation de température $\Delta\theta = \theta - \theta_0$.

• Déterminer le coefficient de dilatation linéaire α_e du métal étudié :

$$\alpha_e = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta\theta} ,$$

α_e exprimé en K^{-1}.

• Par définition α_e représente l'allongement subi par une unité de longueur du corps pour une élévation de température de 1 °C.

• Comparer le résultat obtenu avec la valeur indiquée dans le tableau. Valeurs de α_e pour quelques matériaux α_e [K^{-1}].

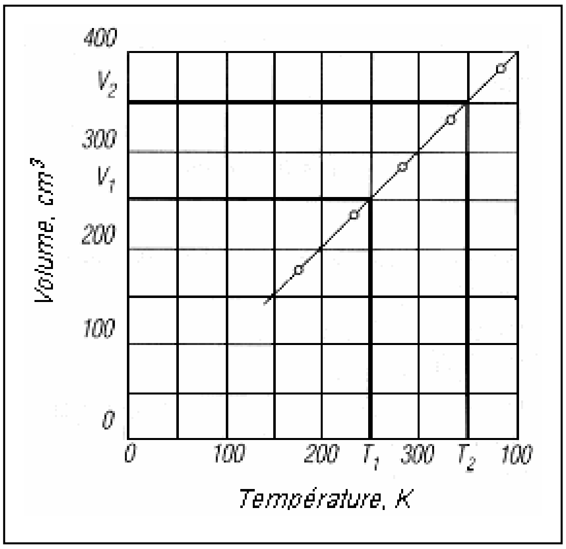
Cas des solides :

Métaux		Verres		Alliages	
Zinc	$2,9 \times 10^{-5}$	Verre ordinaire	$0,8 \times 10^{-5}$	Laiton	$1,9 \times 10^{-5}$
Plomb	$2,7 \times 10^{-5}$	Verre pyrex	$0,3 \times 10^{-5}$	(65% Cu ; 30% Zn)	
Aluminium	$2,3 \times 10^{-5}$	Verre de silice	$0,06 \times 10^{-5}$	Invar	$0,12 \times 10^{-5}$
Cuivre	$1,7 \times 10^{-5}$			(64% Fe ; 36% Ni)	
Argent	$1,8 \times 10^{-5}$				
Nickel	$1,3 \times 10^{-5}$				
Fer	$1,2 \times 10^{-5}$				
Platine	$0,9 \times 10^{-5}$				

Cas des liquides :

Coefficients de dilatation de liquides (α_v)	
Ether	$1,6 \times 10^{-3}$
Benzène	$1,1 \times 10^{-3}$
Toluène	$1,1 \times 10^{-3}$
Glycérine	$0,49 \times 10^{-3}$
Mercure	$0,18 \times 10^{-3}$

Cas des gaz :



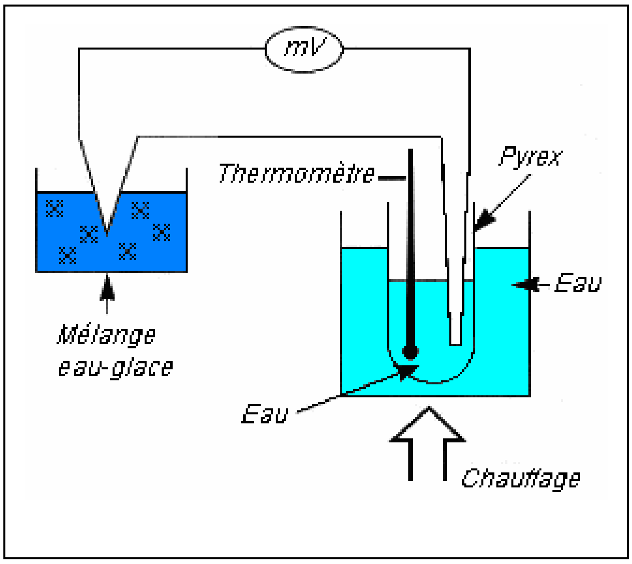
Loi de Charles

• A pression constante, le volume d'un gaz croît proportionnellement à sa température absolue. On a :

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

• En toute rigueur cette loi ne s'applique qu'au gaz parfait. Cependant, si les températures ne sont pas trop basses et les pressions trop élevées le comportement des gaz réels n'est pas très éloigné de celui du gaz parfait et on peut utiliser cette loi qui donne des résultats acceptables.

1.7 Etalonnage du couple Fer- Constantan



DESCRIPTION

• Réaliser le montage ci-contre. L'une des soudures est maintenue à 0 °C, l'autre est placée dans de l'eau préalablement portée au voisinage de l'ébullition.

MANIPULATION

• Au cours du refroidissement, relever les valeurs de la F.E.M *e* indiquée par le millivoltmètre en fonction de température θ de la soudure chaude.

ETUDE

• Tracer la courbe représentant les variations de *e* en fonction de θ.

• En déduire la sensibilité du thermocouple en mV par degré.

1.8 Apport théorique

1.8.1 Représentation microscopique de la matière

Un gaz est une assemblée de molécules en perpétuelle agitation. Ces molécules obéissent aux lois de la dynamique. Il en est de même pour les chocs entre molécules et les chocs molécules-paroi du récipient qui contient le gaz.

Du fait du grand nombre de molécules (1 litre d'air dans les conditions normales contient de l'ordre de 3 x 1022 molécules), il n'est pas possible d'appliquer les lois de la mécanique à chaque molécule. Les seules grandeurs mesurables sont la pression, le volume et la température du gaz appelées variables d'état du gaz.

Ces grandeurs sont qualifiées de ***macroscopique*** car mesurables à notre échelle. Elles s'obtiennent à partir de ***l'état microscopique*** en faisant des moyennes. Le problème est donc statistique.

1.8.2 Représentation microscopique du gaz

• Les molécules sont ponctuelles, leur volume est négligeable par rapport au volume du gaz.

• Les interactions entre les molécules autres que les chocs sont nulles.

• La répartition des molécules est totalement désordonnée.

• L'interaction entre deux molécules est un choc élastique qui a lieu avec conservation de l'énergie cinétique.

1.8.3 La température cinétique T

La température T sera la grandeur, qui, à notre échelle, traduira le degré d'agitation des particules qui composent le corps (molécules, atomes, ions). T est d'autant plus élevée que l'agitation thermique est plus grande. Plus précisément la température cinétique est une mesure de l'énergie cinétique moyenne de chaque molécule du corps.

Nous voyons donc que chauffer un gaz c'est augmenter sa température, c'est donc augmenter son énergie cinétique.

Le modèle cinétique des gaz peut se généraliser aux solides et aux liquides. Transférer de la chaleur d'un corps à un autre c'est donc transporter de l'énergie mécanique.

1.8.4 Le zéro absolu

Il n'y a pas de limite supérieure aux hautes températures. Lorsque la température croît l'agitation des particules (atomes, molécules, ions) constituant la matière augmente. Un solide fond, s'évapore puis les molécules se cassent et se transforment en atomes puis en plasma, la température atteint alors plusieurs millions de degrés Celsius.

Au contraire, il y a une limite inférieure, quand l'agitation thermique décroît puis cesse; la température la plus basse est atteinte on l'appelle le zéro absolu.

Au zéro absolu, on ne peut plus extraire d'énergie thermique d'un corps, on ne peut donc plus abaisser la température.

Cette limite est 273,15 degrés Celsius au-dessous de 0 °C. Par définition : 0 K = - 273,15 °C.

C'est le point de référence de l'échelle absolue.

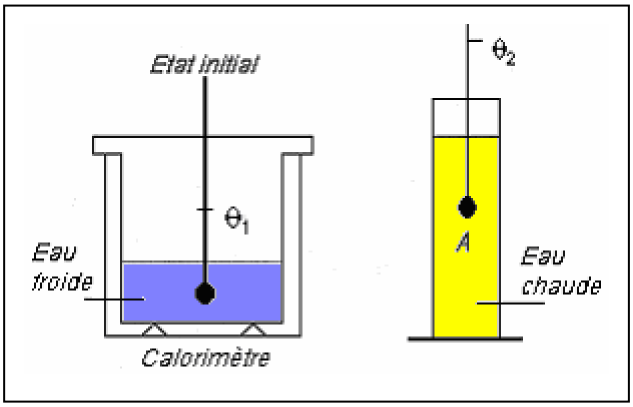
1.8.5 Les phénomènes de dilatation thermique

Quel que soit l'état solide, liquide, gazeux ou de plasma de la matière, elle se dilate lorsqu'elle est échauffée et se contracte lorsqu'on la refroidit. Ceci est vrai à quelques exceptions près (cas de l'eau). L'apport de chaleur augmente l'agitation thermique des particules (atomes, molécules, ions) qui la constituent. Les collisions de ces particules de plus en plus intenses au fur et à mesure que l'on chauffe ont pour effet un déplacement de plus en plus important de ces particules. L'effet global est une dilatation de la matière.

CHAPITRE 2 QUANTITÉ DE CHALEUR

2.1 Principe de la calorimétrie

EXPERIENCE



DESCRIPTION

- Relever la température θ_1 du calorimètre et la température θ_2 de l'eau.
- Verser une partie du contenu de A dans le calorimètre.
- Relever la température θ_3 du mélange contenu dans le calorimètre.

OBSERVATION

Au bout d'un certain temps la température θ_3 du mélange ne varie plus, il y a équilibre thermique.

A SAVOIR

D'une manière générale, lors d'un échange de chaleur entre deux corps A et B, si la température de A diminue, A cède de la chaleur, si la température de B augmente, B reçoit de la chaleur.

Dans un système ***thermiquement isolé*** la quantité de chaleur cédée par le corps chaud est égale à la quantité de chaleur reçue par le corps froid.

2.2 Notion de quantité de chaleur absorbée par un corps

La quantité de chaleur absorbée par un corps dépend de trois paramètres :

- la masse du corps
- l'écart de température $\theta_f - \theta_i$
- la nature du corps.

Soient deux même quantités d'eau, à la même température θ. Chauffons l'une des deux avec un thermo-plongeur : sa température augmente et nous consommons de l'énergie électrique. D'après le principe de conservation de l'énergie, cette d'énergie doit se retrouver quelque part, ce ne peut être que dans l'eau (si on néglige les pertes vers l'extérieur). Cette énergie emmagasinée par l'eau est sous forme d'énergie thermique ou calorifique.

Mélangeons maintenant ces deux masses d'eau, l'une à la température θ_1 et l'autre à la température θ_2. Le mélange obtenue sera à la température θ' égale à :

$$\theta' = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \quad \text{ou} \quad \theta_2 - \theta' = \theta' - \theta_1$$

Si nous n'avions pas les mêmes masses d'eau, par exemple les masses m_1 et m_2 nous constatons que la température θ' dépend du rapport de leurs masses :

$$(m_1 + m_2)\,\theta' = m_1\theta_1 + m_2\theta_2$$

$$m_2(\theta_2 - \theta') = m_1(\theta' - \theta_1)$$

Si nous avions deux liquides différents, θ' dépendrait de la nature des deux liquides, en particulier pour obtenir la température θ_2, il ne faudrait pas chauffer de la même façon qu'avec l'eau. Il faut faire intervenir deux coefficients c_1 et c_2 qui traduisent la capacité des corps à stocker l'énergie thermique :

$$m_2c_2(\theta_2 - \theta') = m_1c_1(\theta' - \theta_1)$$

$$m_1c_1(\theta' - \theta_1) + m_2c_2(\theta' - \theta_2) = 0$$

La quantité mc (θ_f - θ_i) s'appelle la chaleur Q échangée avec l'extérieur par un corps de masse m, de chaleur massique c quand sa température passe de la valeur θ_i à la valeur θ_f.

$$Q = mc\,(\theta_f - \theta_i)\,,$$

ou :

Q - quantité de chaleur absorbée par le corps en joules [J] ;

m - masse du corps en kg ;

$\theta_f - \theta_i$ - en degrés Celsius ;

c - est caractéristique du corps et est appelé ***capacité thermique massique*** du corps. Ce coefficient s'exprime en J kg^{-1} K^{-1}.

Cette quantité de chaleur est égale à la variation d'énergie thermique du corps : on peut donc assimiler le produit « m c θ » à la quantité d'énergie thermique stockée.

Si θ_f . θ_i , le corps s'est échauffé, il a reçu de l'énergie et Q est positive.

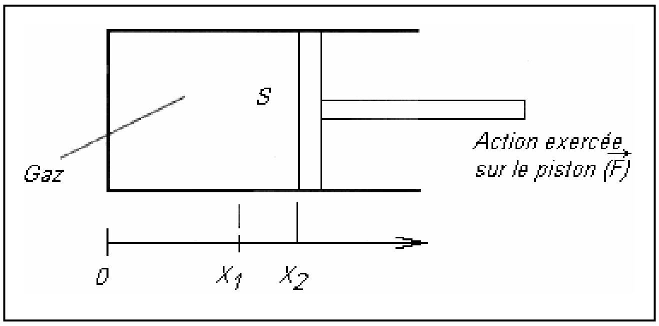
Si θ_f , θ_i , le corps s'est refroidi, il a donné de l'énergie et Q est négatif.

L'unité légale d'énergie thermique et de chaleur est le joule [J]. Autres unités : la calorie [cal], 1 cal = 4,1868 J ; la thermie, 1 thermie = 106 cal.

Exercice : Quel volume d'eau à 60 °C faut-il ajouter à 100 l d'eau à 20 °C pour obtenir un bain à 35 °C?

2.3 Echange de travail entre un système et le milieu extérieur

EXPERIENCE



DESCRIPTION

• Soit un gaz de masse m = 1 kg enfermé dans un cylindre.

• On déplace lentement le piston vers la gauche de la position 2 à la position1. $\Delta x = x_1 - x_2$ étant très petit par rapport à la longueur du cylindre.

• Evaluer le travail élémentaire des forces exercées sur le gaz lors de ce déplacement.

On note :

- P - pression du gaz ;
- P_A - pression atmosphérique ;
- $\overrightarrow{F}$ force exercée par l'opérateur sur le piston.

On sait que, généralement, la force représente le produit entre la pression et la section sur laquelle s'exerce, d'où :

• $\overrightarrow{PS}$ force pressante exercée par le gaz sur le piston.

• $\overrightarrow{P_AS}$ force pressante exercée par la pression atmosphérique.

Evaluation du travail

• Equation d'équilibre du piston dans l'état initial :

$$\overrightarrow{PS} + \overrightarrow{P_AS} + \overrightarrow{F} = 0$$

• Travail reçu par le gaz dans le déplacement Δx du piston :

$$\Delta W = PA \cdot S \cdot \Delta x + F \cdot \Delta x$$

$$\Delta W = (P_A \cdot S + F)\,\Delta x = -\,P \cdot S \cdot \Delta x = -\,P \cdot S\,(x_1 - x_2)$$

On pose :

$S \cdot x_1 = V_1$ – volume état final ;

$S \cdot x_2 = V_2$ – volume état initial.

$\Delta W = -\,P\,(V_1 - V_2) = -\,P\,\Delta V$

$\Delta V = V_1 - V_2$ étant négatif ΔW est positif.

A SAVOIR

Si le piston se déplace vers la gauche ou vers la droite d'une quantité Δx telle que la pression P ne varie pas, le travail élémentaire échangé entre le système et le milieu extérieur est :

$$\Delta W = -\,P\,\Delta V\,,$$

- ΔW en joules ;
- P en pascals ;
- ΔV en m^3.

Si le déplacement a lieu vers la gauche	$\Delta V < 0$	$\Delta W > 0$ le travail est reçu par le système.
Si le déplacement à lieu vers la droite	$\Delta V > 0$	$\Delta W < 0$ le travail est fourni par le système.

Généralisation

Si un gaz ou plus généralement un système échange à la fois de la chaleur (Q) et du travail (W) avec le milieu extérieur on dira que son énergie interne à varié de $\Delta U = W + Q$,

ΔU représentant la variation d'énergie interne entre l'état initial (2) et l'état final (1).

Les grandeurs W et Q s'expriment en joules et sont comptées positivement si elles sont reçues par le système et négativement dans le cas contraire.

2.4 Chaleurs massiques ou capacités thermiques massiques

La ***chaleur massique c*** d'un corps est la quantité de chaleur qu'il faut fournir (ou prendre) à l'unité de masse de ce corps pour que sa température s'élève (ou s'abaisse) de 1 K (ou 1 °C).

L'unité de chaleur massique est le J kg^{-1} K^{-1} ou J kg^{-1} °C^{-1}.

Corps	c (J kg^{-1} K^{-1})	Corps	c (J kg^{-1} K^{-1})
eau	4,1855 ?10^{3}	Aluminium	0,92 ?10^{3}
glace	2,1 ?10^{3}	Fer	0,75 ?10^{3}
eau vapeur	1,9 ?10^{3}	Air	1 ?10^{3}

Exercice : Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à un vase métallique pesant 190 g pour élever sa température de 21 °C à 41 °C ? Dans l'intervalle considéré, la chaleur massique du métal est 380 J kg^{-1} K^{-1}.

2.5 Capacité thermique. Valeur en eau

Le produit **m c = C** s'appelle la ***capacité thermique ou capacité calorifique*** est la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température de 1 °C.

Unité de C : J K^{-1}.

L'équivalent en eau (ou valeur en eau) d'un système est la masse d'eau *μ* échangeant la même quantité de chaleur avec l'extérieur quand il subit la même variation de température :

$$m\,c\,T = \mu\,c_e\,T$$

$$\mu = \frac{mc}{c_e}$$

Détermination de la valeur en eau d'un calorimètre

DESCRIPTION

• Noter la température θ_1 du vase calorimétrique vide muni de ses accessoires (agitateurs, thermomètre).

• Verser une masse d'eau m de température θ_2.

• Noter la température d'équilibre θ_f.

ETUDE

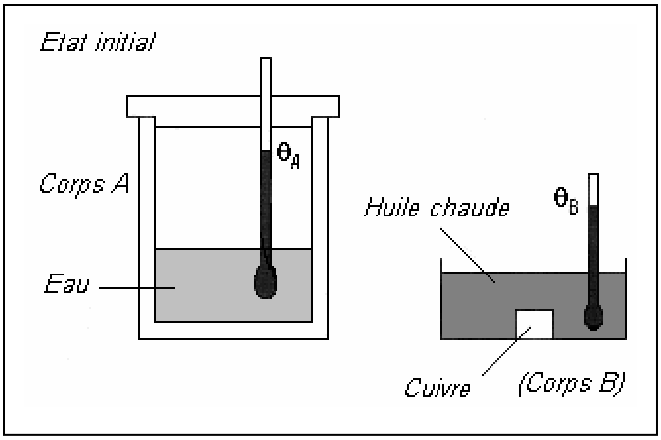
Le calorimètre et ses accessoire ont absorbé une quantité de chaleur, comme l'aurait fait une masse d'eau μ (C_e = 4185 J kg^{-1} K^{-1}) (μ en kg).

• Ecrire l'équation calorimétrique e calculer μ.

• Calculer la capacité thermique C_{cal} du calorimètre.

$C_{cal} = \mu C_e$ en J K^{-1}.

2.6 Détermination de la capacité thermique massique C du cuivre par la méthode des mélanges



DESCRIPTION

• **Etat initial**

Corps A : eau masse m_A

C = 4180 J kg^{-1} K^{-1}

température θ_A.

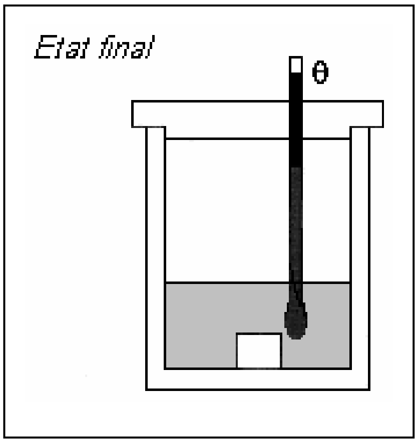
Corps B : cuivre masse m_B

température θ_B

C_B inconnue.

• **Etat final** A l'équilibre thermique : θ.

• Valeur en eau du calorimètre μ.



MANIPULATION

• Déterminer θ_A, m_A, m_B, θ_B, θ.

ETUDE

• Ecrire l'équation calorimétrique.

• Exprimer C_B capacité thermique massique du cuivre.

• Calculer C_B.

• Analyser les causes d'erreur.

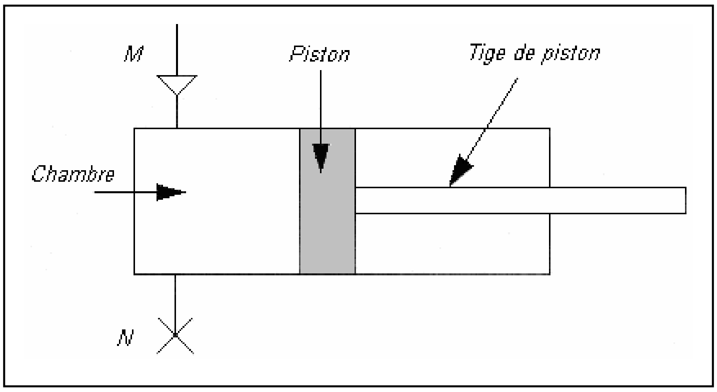
Masse du cuivre m_B.

Température initiale du cuivre θ_B = 100 °C.

2.7 Etude d'un vérin simple effet

Ce système utilise l'énergie hydraulique pour produire un mouvement rectiligne.

EXPERIENCE

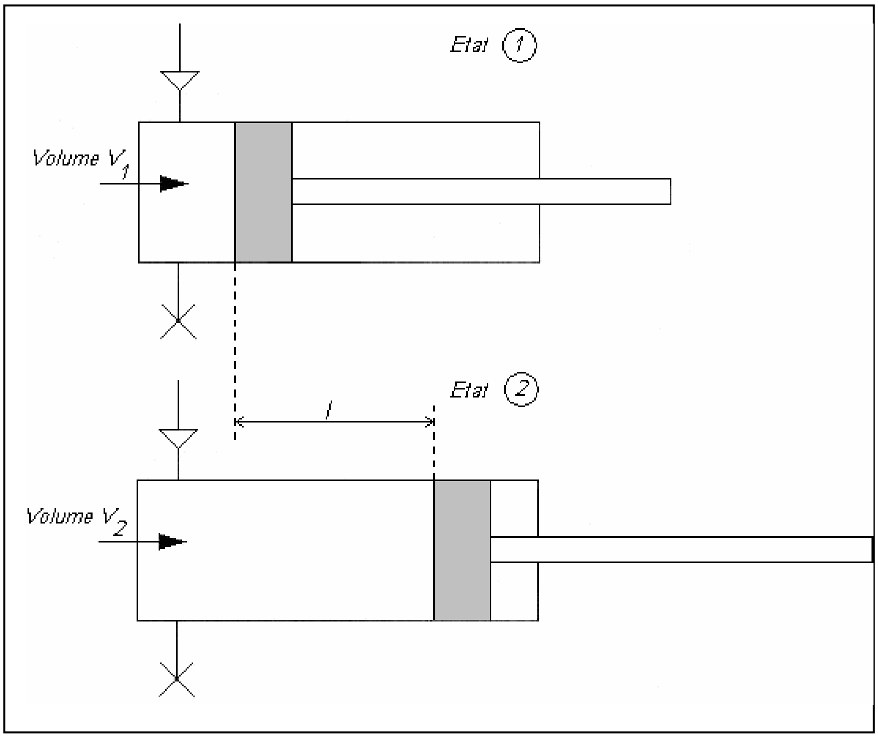


DESCRIPTION

M - vanne d'admission du fluide

N - vanne d'échappement

EXPERIENCE



DESCRIPTION

• **Etat 1 :** - N fermée

- M ouverte admission du fluide à la pression P (instantanée).

• **Etat 2 :** Piston en bout de course

- M se ferme

- N s'ouvre.

On admet que la pression dans la chambre prend instantanément la valeur de la pression atmosphérique P_A.

Retour à l'état 1. Une action extérieure déplace le piston, la vanne N se ferme et M s'ouvre la pression s'élève à la pression P instantanément. On dit que le système a décrit un ***cycle***.

ETUDE

• Evaluer le travail fourni par le fluide lors de la transformation 1 → 2.

• Evaluer le travail fourni par l'opérateur lors de la transformation 2 → 1.

• Tracer dans un diagramme (P, V) les différentes transformations qui constituent un cycle. Montrer que le travail fourni par la force pressante est $W = - P_e (V_2 – V_1)$; P_e pression effective.

• Compléter le tableau :

Volume	Position		Pression	Graphe
	M	N		
V_1	0	f	P	AB
				BC
V_2				CD
				DA
V_1				AB

2.8 Chaleur latente

Si on a un système qui échange de la chaleur avec l'extérieur, sa température peut rester constante : la chaleur sert à autre chose, par exemple à le faire changer d'état. La chaleur mise en jeu s'appelle alors ***chaleur latente***.

La chaleur latente L est la chaleur échangée avec l'extérieur au cours d'un changement d'état du système. Pour un corps de masse m :

$$Q = m L$$

L s'exprime en $J\ kg^{-1}$.

2.9 Notion d'énergie interne

Nous savons que les particules (atomes, molécules, ions) qui constituent la matière sont soumises à l'agitation thermique. Chaque particule possède donc de l'énergie cinétique ainsi que de l'énergie potentielle due à sa position et aux éventuelles interactions avec les autres particules.

Cette énergie, microscopique, répartie sur l'ensemble des particules constituant la matière considérée est appelée ***énergie interne***. Elle est symbolisée par la lettre U.

Lorsqu'on chauffe de l'eau, l'énergie mécanique totale des molécules d'eau augmente : on dit que l'énergie interne du système [eau + récipient] a augmenté.

Par définition cette augmentation que l'on désigne par ΔV est égale à la quantité de chaleur reçue par le système.

On écrit $\Delta U = Q$.

• Si un système n'échange que de la chaleur avec un autre système, la variation d'énergie interne est égale à Q quantité de chaleur qu'il reçoit.

• S'il échange de la chaleur et du travail on écrira : $\Delta U = W + Q$.

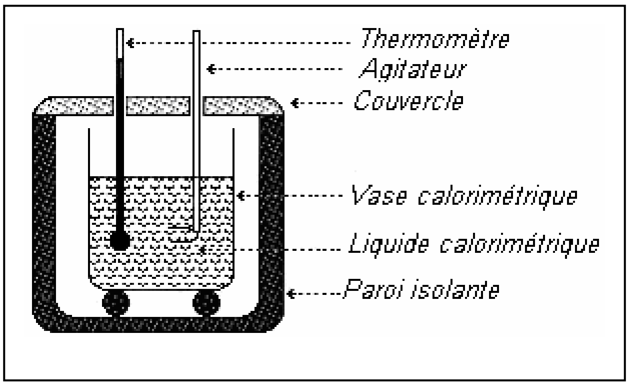
• Seules les variations d'énergie interne d'un système peuvent être déterminées.

2.10 La calorimétrie

La calorimétrie est science qui s'occupe des mesures des quantités de chaleur.

Elle repose sur le principe de l'égalité des échanges de chaleur : lorsque deux corps n'échange que de la chaleur, la quantité de chaleur gagnée par l'un est égale à celle perdue par l'autre (en valeur absolue).

Exercice: Un bloc d'aluminium de 1000 g à 80 °C est plongé dans 1 l d'eau à 20 °C. La température finale est de 30,4 °C. Quelle est la chaleur massique de l'aluminium?



Pour ces mesures, on utilise un appareil : ***le calorimètre***. C'est une enceinte que l'on peut considérer comme thermiquement isolante.

Dans le calorimètre de Berthelot, l'expérience est faite à l'intérieur d'un récipient appelé vase calorimétrique qui contient le liquide calorimétrique. Ce vase est placé dans une enceinte isolante.

Un deuxième type de calorimètre est le calorimètre Dewar : le récipient est à double paroi de verre, entre lesquelles un vide est fait. Les bouteilles thermos constituent l'application domestique du vase Dewar.

Méthode des mélanges:

Dans un calorimètre de Berthelot, de valeur en eau μ, on verse une masse m d'eau, le tout étant à la température T_i.

On y met alors le corps dont on veut déterminer la chaleur massique c', sa température étant T_i' et sa masse m'.

On attend que l'équilibre se fasse, c'est-à-dire que les températures des deux corps soient égales : on la notera T_f.

On aura donc:

$$- m' c'(T_f - T_i') = (m + \mu)\, c_e\, (T_f - T_i)$$

Exercice : m = 200 g ; m' = 200 g ; T_i = 14,5 °C ; T_i' = 100 °C ; T_f = 21 °C; capacité thermique C du calorimètre : 14 J K^{-1} ; Valeur en eau μ du calorimètre : 50 g.

Trouver la chaleur massique c' du cuivre.

Méthode électrique:

On plonge le corps dans le liquide calorimétrique. Tout est à la température T_i.

On fait passer pendant un certain temps t un courant d'intensité I, sous une tension U. En fin d'expérience, la température de l'ensemble est égale à T_f. On a :

$$U\, I\, t = (m\, c_e + \mu\, c_e + m' c')(T_f - T_i)$$

2.11 Exercices

I : Un calorimètre contient 1000 g d'eau à 15 °C. On y verse 1000 g d'eau à 65,5 °C. La température du mélange étant à l'équilibre de 40 °C, calculer la capacité thermique ainsi que la valeur en eau du calorimètre.

II : Un calorimètre en laiton pesant 100 g contient 200 g d'eau et un bloc d'aluminium pesant 140 g. La température initiale étant 15 °C, on ajoute 300 g d'eau à 60 °C; la température finale est de 40 °C.

Calculer la chaleur massique de l'aluminium, celle du laiton étant de 418 J kg^{-1} K^{-1}.

III : Sur un bloc de glace à 0 °C, on place un morceau de fer pesant 250 g et chauffé à 80 °C. Quelle est la masse de glace qui fond?

Chaleur de fusion de la glace : $3{,}3 \cdot 10^5$ J kg^{-1}.

Chaleur massique du fer 460 J kg^{-1} K^{-1}.

IV : Le vase calorimétrique d'un calorimètre est en aluminium, sa masse est m = 50 g·µ.

a) Calculer la capacité thermique de ce vase sachant que la capacité thermique massique de l'aluminium vaut 920 J kg^{-1} K^{-1}.

b) Le calorimètre contient une masse d'eau de 100 g (c_e = 4,19·10 J kg^{-1} K^{-1});

le thermomètre et les accessoires du calorimètre ont une capacité thermique de 15 J K^{-1}, calculer la capacité thermique totale C du calorimètre.

c) La température initiale du calorimètre contenant les 100 g d'eau est t_1 = 17,2 °C. On introduit dans le calorimètre une certaine quantité d'eau à la température t_2 = 100 °C, la température d'équilibre s'établit à t_e = 38,5 °C.

Calculer la capacité thermique C' de l'eau introduite.

En déduire la valeur de la masse d'eau.

V : On veut refroidir un verre de jus de fruit pris à 30 °C. La capacité calorifique du verre et du jus est de 550 J K^{-1}. On introduit alors une certaine masse m de glace à 0 °C. On veut que la température finale de l'ensemble soit de 10 °C.

On admet qu'il n'y a échange de chaleur qu'entre la glace et le verre de jus de fruit. Calculer la masse de glace nécessaire.

VI : On place dans un calorimètre une masse M = 400 g d'eau que l'on chauffe à l'aide d'une résistance électrique alimentée par un courant d'intensité 0,85 A, sous une tension de 220 V. Il en résulte un accroissement régulier de la température de l'eau de 4,86 °C par minute.

Quelle est la capacité thermique C du calorimètre?

Trouvez la valeur en eau du calorimètre.

VII : Un calorimètre, de capacité thermique C = 120 J kg^{-1} K^{-1} contient 250 g d'eau et 40 g de glace en équilibre thermique.

Quelle est sa température?

On chauffe lentement l'ensemble avec une résistance électrique. La température de l'eau du calorimètre atteint 28,8 °C lorsque la quantité de chaleur dissipée par la résistance est égale à 51530 J.

En déduire la valeur de la chaleur latente de fusion de la glace.

VIII : Écrire la réaction de combustion du propane.

Quelle est l'énergie dégagée par la combustion de 10 g de propane sachant que le pouvoir calorifique d'un alcane à n atomes de carbone vaut (662 x n + 260) kJ mol^{-1} ?

Cette combustion a servi à chauffer 3 kg d'eau, dont la température de départ vaut 15 °C. Quelle est la température finale de l'eau?

Masse molaire atomique en g mol^{-1} : C = 12; H = 1.

IX : Le débit d'eau dans un radiateur est noté q'_V . L'eau chaude pénètre dans le radiateur à la température θ_1. Elle ressort à la température θ_2. L'installation comporte dix radiateurs. La chaudière récupère l'eau provenant des radiateurs, à la température θ_2 et la réchauffe à la température θ_1.

On donne q'_V = 0,035 L s^{-1} ; θ_1 = 75 °C; θ_2 = 65 °C ; C = 4185 J K^{-1} $°C^{-1}$.

1 - Exprimer la quantité de chaleur Q, dégagée par un radiateur en une minute. Calculer Q.

2 - calculer la puissance du radiateur.

3 - La chaudière utilise comme combustible du gaz. Le rendement de la combustion est de 80%. La chaleur de combustion de ce gaz est 890 kJ mol^{-1}. Le volume molaire de ce gaz, mesuré dans les conditions de combustion est 24 L mol^{-1}.

Calculer le débit du gaz brûlé.

CHAPITRE 3 MODES DE TRANSFERT DE LA CHALEUR

Entre deux corps dont la température est différente se produit un ***flux thermique***, la chaleur passant du corps chaud au corps froid jusqu ce qu'il y ait équilibre thermique.

Aucun moyen ne permet d'empêcher l'échange de chaleur, seule son intensité peut être modifiée. Le transfert de chaleur s'effectue de trois manières différentes :

• par ***rayonnement ;***

• par ***convection ;***

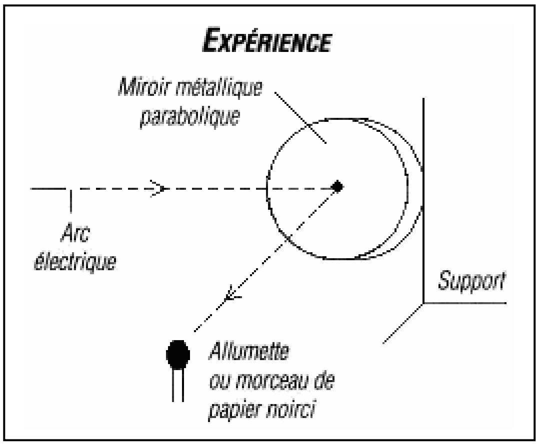
• par ***conduction thermique***.

En pratique, ces trois modes de transfert se produisent simultanément.

3.1 Transfert d'énergie par rayonnement

3.1.1 Mise en évidence

EXPÉRIENCE



DESCRIPTION

• Disposer dans le faisceau réfléchi la partie soufrée (noircie) d'une allumette ou un morceau de papier noir.

OBSERVATION

• L'allumette s'enflamme ainsi que le papier.

A SAVOIR

Le rayonnement permet un transfert d'énergie d'un émetteur à un récepteur. Ce transfert peut s'effectuer dans le vide. Par exemple, l'énergie provenant du soleil et qui arrive sur terre. Cette énergie ne peut être transmise ni par conduction thermique ni par convection. L'énergie rayonnante est transportée par les ***ondes électromagnétiques***.

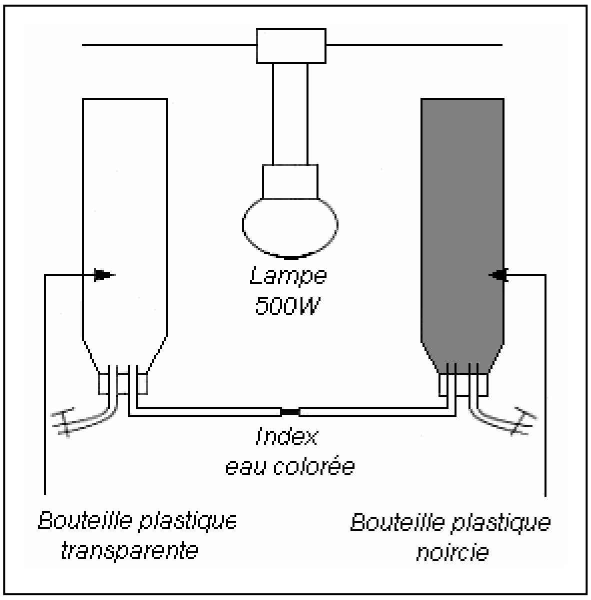
L'arc électrique émet un ***rayonnement thermique*** encore appelé rayonnement par ***incandescence***.

Le rayonnement thermique est émis par les solides chauffés.

3.1.2 Rôle de l'état de surface dans l'absorption et l'émission

a) Absorption

EXPERIENCE



DESCRIPTION

- La lampe 500 W est placée à égale distance des deux bouteilles.
- Mettre la lampe sous tension.

OBSERVATION

- Après un temps très court de fonctionnement de la lampe on observe le déplacement de l'index vers la bouteille transparente.

INTERPRETATION

La bouteille peinte en noir s'est échauffée plus rapidement que la bouteille transparente : elle absorbe mieux l'énergie que celle-ci.

A SAVOIR

Les corps noirs absorbent mieux l'énergie rayonnante que les corps non noirs.

On introduit un corps idéal appelé ***« Corps Noir »*** dont on peut calculer les caractéristiques de rayonnement.

Propriétés du Corps Noir relatives à l'absorption.

On appelle ***Corps Noir*** ou récepteur intégral un récepteur thermique dont le facteur d'absorption (rapport du flux absorbé au flux incident) est égal à l'unité quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement incident.

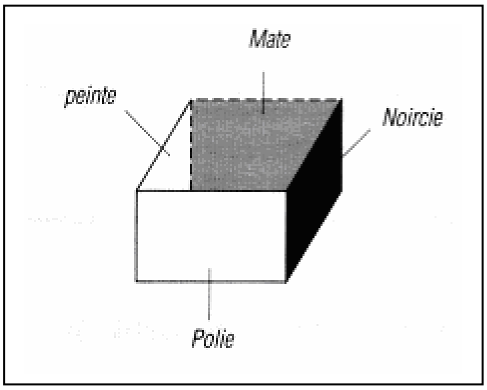
Remarques :

Un corps parait noir à la température ordinaire s'il absorbe toutes les radiations qu'il reçoit et, qu'à cette température, le rayonnement qu'il émet est composé de radiations invisibles (longueur d'onde dans l'infrarouge).

b) Emission

Lorsqu'on élève la température d'un morceau de fer, il faut atteindre environ 500 °C pour qu'une partie des radiations émises soient dans le domaine visible. Si on élève encore sa température le corps devient rouge sombre, rouge vif, jaune puis blanc. La composition du rayonnement émis par un corps chauffé dépend de sa température.

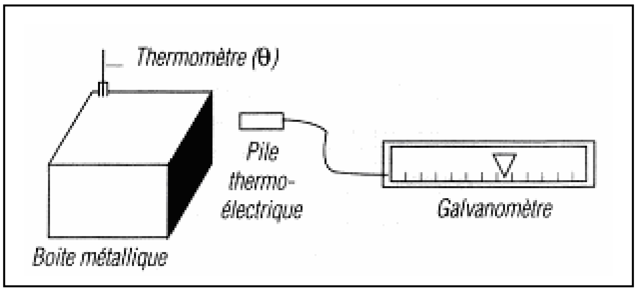
EXPERIENCE



DESCRIPTION

- A l'aide de la pile thermoélectrique, étudier le rayonne ment émis par chaque face.
- La pile est disposée successivement à une même distance de chaque face.
  Comparer les déviations lues au galvanomètre qui sont proportionnelles à l'énergie reçue.

.



- La température θ ne varie pas durant le relevé des déviations.

OBSERVATION

- La déviation la plus grande est obtenue avec la face noircie ; la déviation la plus faible est obtenue avec la face polie.

INTERPRETATION

La face noircie rayonne le plus, la face polie le moins. On obtient des résultats intermédiaires avec les autres faces.

A SAVOIR

On peut établir les résultats suivants :

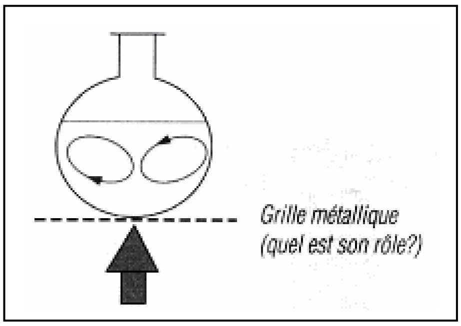
Tout solide porté à une température T rayonne de l'énergie, mais l'énergie transportée par le rayonnement du corps noir à cette température T, est supérieure à celle transportée par le rayonnement de tout corps non noir pour toute longueur d'onde.

La température T est le paramètre le plus important. Il détermine la ***puissance totale*** émise ainsi que la ***répartition*** de cette puissance en fonction de la longueur d'onde.

3.2 Transfert de chaleur par convection

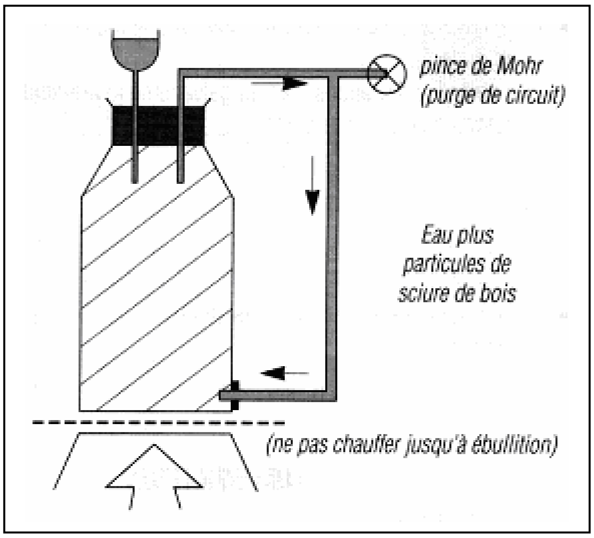
3.2.1 Convection dans les liquides

EXPERIENCE



DESCRIPTION

• Chauffer le ballon contenant de l'eau et de la sciure de bois.



• Simulation du chauffage central (thermosiphon)

OBSERVATION

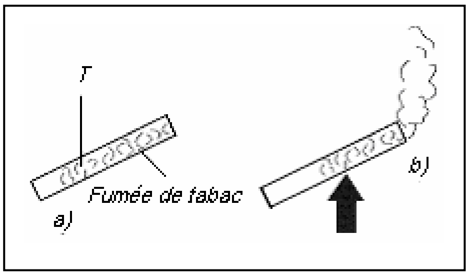
• Les particules de sciure de bois se déplacent matérialisant des courants ascendants dans l'eau.

A SAVOIR

La propagation de la chaleur se fait suivant des courants appelés ***courants de convection***. Dans ce cas le transfert de chaleur s'accompagne d'un transfert de matière.

3.2.2 Convection dans les gaz

EXPERIENCE



DESCRIPTION

• Insuffler de la fumée dans le tube T.

• Puis chauffer le tube T.

OBSERVATION

a) La fumée de tabac reste localisée dans le tube T.

b) La fumée est animée de mouvements ascendants et s'échappe du tube T.

A SAVOIR

Les courants de convection dans un fluide sont dûs au fait que la masse volumique varie dans le fluide si celui-ci n'est pas à température uniforme.

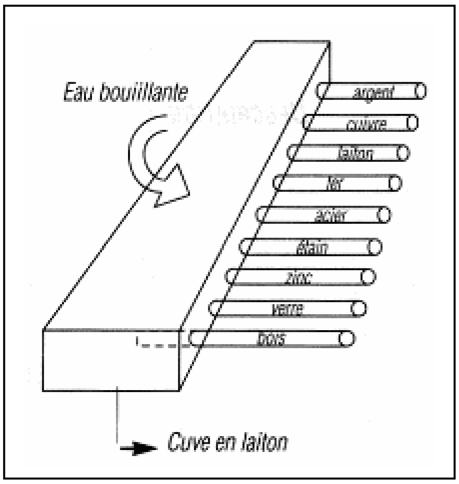
Les parties chaudes du fluide, moins denses, ont tendance à monter ; les plus froides à descendre. Les courants de convection réalisent un ***échange de chaleur*** par transport de matière.

Si on veut freiner le transfert de chaleur par convection on freine les courants de convection en imposant au fluide de se déplacer entre des parois rapprochées.

3.3 Transfert de chaleur par conduction thermique

3.3.1 Conduction thermique dans les solides

EXPERIENCE



DESCRIPTION

• Recouvrir les différents tiges de paraffine ou les enrouler dans du papier indicateur de chaleur.

• Verser de l'eau bouillante dans la cuve. Comparer la conduction thermique des différentes substances.

OBSERVATION

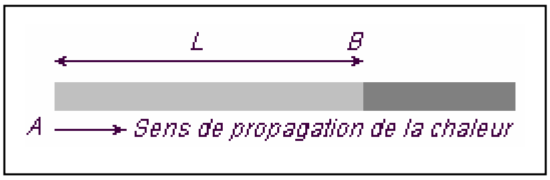
• La paraffine fond inégalement vite sur les différentes tiges. Sa vitesse de fusion nous permet de suivre la propagation de la chaleur. On peut distinguer des bons et des mauvais conducteurs de la chaleur.

A SAVOIR

Les solides qui, comme l'argent, le cuivre, le laiton, le fer, l'acier, l'étain, le zinc propagent la chaleur sont dits ***conducteurs*** de la chaleur. Ceux qui conduisent très mal la chaleur comme le verre et le bois sont dits ***isolants thermiques*** (en fait, ce sont de très mauvais conducteurs).

Voir aussi la lecture en fin de chapitre.

Notion de gradient de température



Pour la tige de cuivre, par exemple, la longueur de paraffine fondue est de 10 cm dans la direction de propagation de la chaleur.

$\theta_A = 80$ °C

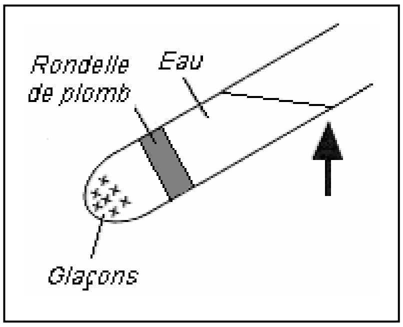
$\theta_B = 50$ °C

On définit le gradient comme étant $\frac{\Delta\theta}{l}$. Ici $\frac{\Delta\theta}{l} = \frac{\theta_A - \theta_B}{l} = \frac{30}{10^{-1}} = 300\ °C \cdot m^{-1}$

L'aptitude d'un matériau à la conduction thermique est caractérisée par un coefficient appelé coefficient de conductivité thermique.

3.3.2 Conduction des liquides

EXPERIENCE



DESCRIPTION

• Chauffer la surface libre de l'eau.

OBSERVATION

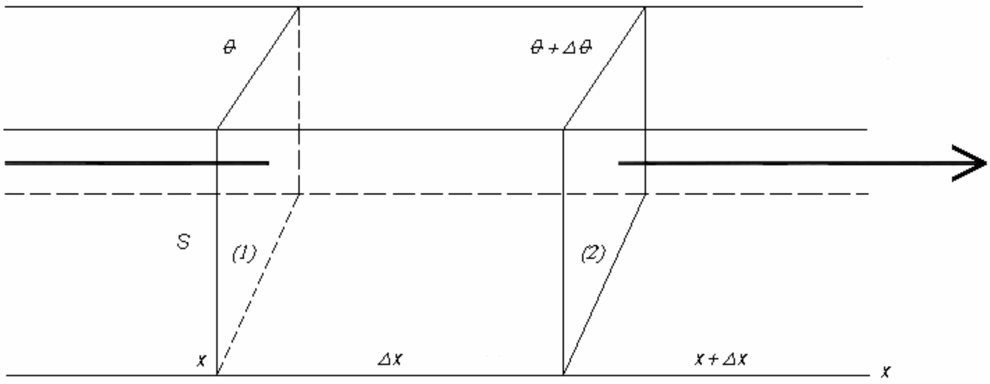
• Au bout d'un certain temps, l'eau se met à bouillir, les glaçons ne fondent pas.

A SAVOIR

L'eau, et d'une façon générale les fluides sont de mauvais conducteurs de la chaleur (sauf le mercure qui est un bon conducteur de la chaleur car c'est un métal).

3.4 Transmission de chaleur par conduction thermique : Loi de Fourier

Le loi de Fourier exprime pour un solide homogène et isotrope, le flux de chaleur **Φ** traversant ce corps une fois le régime permanent établi (les températures en divers points du solide sont alors indépendantes du temps). Elle suppose en outre l'absence de déperdition thermique par la surface du corps.



a) Définitions

• ***Flux de chaleur Φ*** : Quantité de chaleur échangée par unité de temps.

$$\boxed{\Phi = \frac{Q}{t}}$$

Unité : le watt [W]

• Dans le bâtiment par exemple, on a l'habitude de rapporter le flux à l unité de surface, on obtient la ***densité de flux :***

$$\boxed{\varphi = \frac{\Phi}{S}}$$

Unité : watt?m^{-1} [W?m^{-1}]

b) Loi de Fourier

Le flux de chaleur est proportionnel à la surface S et au gradient de température $\frac{\Delta\theta}{\Delta X}$ ce qui se traduit par :

$$\boxed{\Phi = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta\theta}{\Delta X}}$$

Par convention le flux de chaleur est compté positivement de (1) vers (2) ce qui justifie le signe moins.

c) λ est appelé coefficient de conductivité du corps

• La densité de flux traversant le corps pour une différence de 1 °C (ou 1 K) entre les températures des deux faces (1) et (2) séparées par x = 1 m d'épaisseur :

$$\varphi = \frac{\lambda \Delta\theta}{\Delta X}$$

Si $\Delta\theta$ = 1 °C, ΔX = 1 m : φ = 1 watt?m^{-2}

λ s'exprime en watt?m^{-1}?°C^{-1} ou watt?m^{-1}?K^{-1}.

• Le coefficient de conductivité λ varie avec la température du corps considéré il ne peut jamais s'annuler ce qui explique le fait qu'un matériau isolant ne peut pas arrêter le flux de chaleur mais ne peut que le ralentir.

Valeurs du coefficient λ a pour quelques matériaux à 20 °C en W?m^{-1}?K^{-1}

Métaux		**Bétons**		**Mortiers**	1,15
Cuivre	390	plein	1,70	**Autre matériaux**	
Aluminium	200	de granulats légers	0,50	Verre	1,15
Fer	60	cellulaire autoclavé	0,20	Caoutchouc synthétique	0,40
Plomb	35	de fibres de bois	0,10	Polyamides	0,40
				PVC	0,20

Isolants		**Plâtre**	
Laine de verre	0,040	sans granulats	0,50
Polystyrène	0,040	avec granulats légers	0,30
Mousse rigide de PVC	0,030		
		Pierres	
Bois		granites	3
lourds	0,30	schistes	2
liège	0,050	calcaire	1
Panneaux de particules	0,15	meulières	1,80
Contreplaqué	0,12		

d) Résistance thermique

C'est la résistance opposée au flux de chaleur par le matériau. Cette résistance r est proportionnelle à l'épaisseur l et inversement proportionnelle à la conductivité.

On écrit : $$\boxed{r = \frac{l}{\lambda}}$$

- Unités : l en mètres [m], λ en [W?m^{-1}?K^{-1}] ;

  r s'exprime en [W^{-1}?m^{2}?K].

- L'inverse $K = \frac{1}{r}$ s'appelle le coefficient de transmission thermique.

  Il s exprime en W?m^{-2}?K^{-1}.

- D'après la loi de Fourier, on a pour un mur d'épaisseur l :

$$\Phi = \lambda S \cdot \frac{\Delta\theta}{l}$$

On introduit la densité de flux :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} ,$$

et la résistance thermique :

$$r = \frac{l}{\lambda}$$

Alors : $$\boxed{\Delta\theta = r?\varphi},$$

équation reliant le gradient de température, la résistance thermique et la densité de flux.

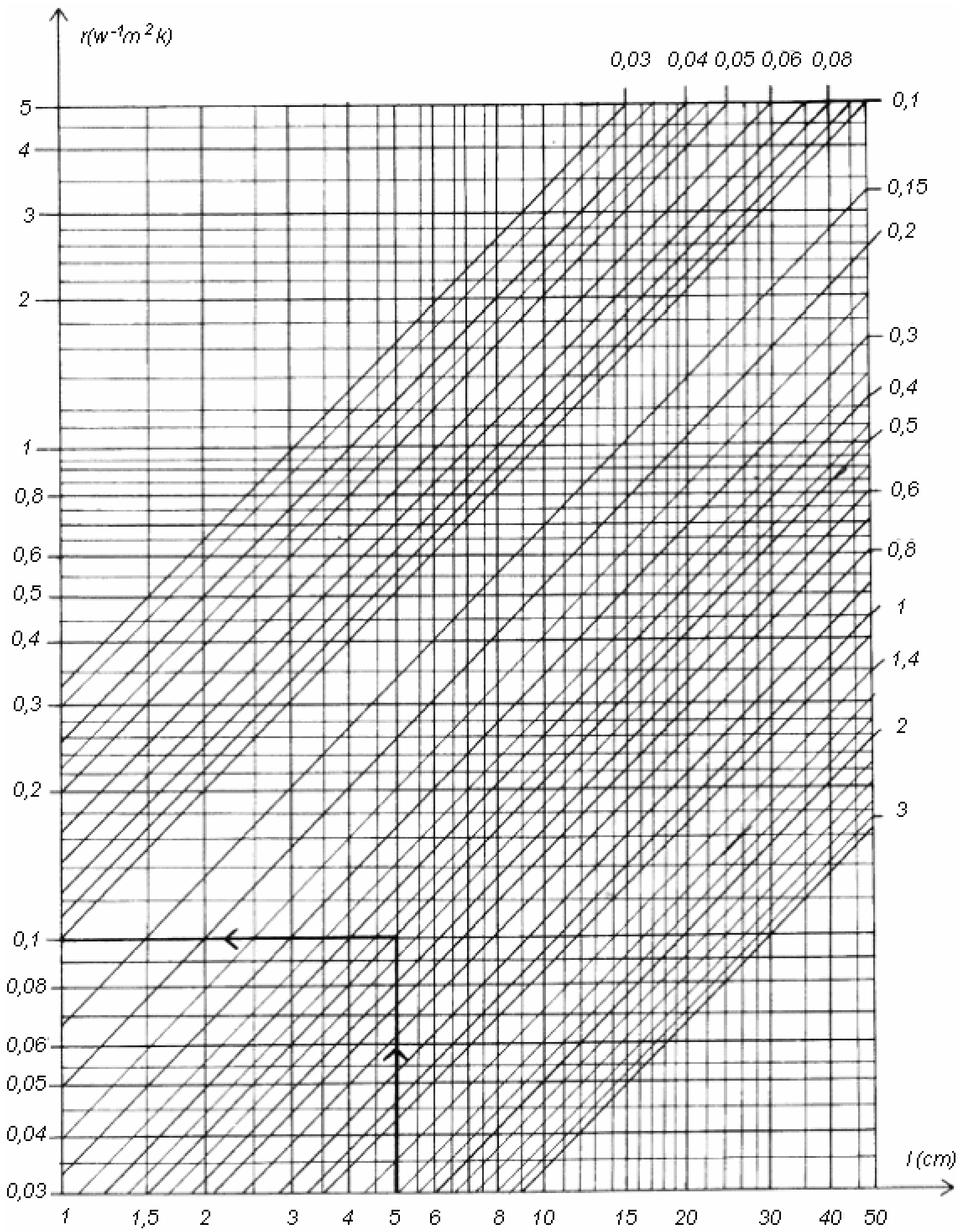
- Connaissez-vous une analogie électrique de ce résultat?

L'abaque ci-dessous permet de déterminer la résistance thermique r d'une épaisseur l de matériau de conductivité thermique λ.

r = 0,1 W^{-1}?m^{2}?K.

Par exemple un plâtre (λ = 0,50) d'épaisseur l = 5 cm présente une résistance thermique de r = 0,1 W^{-1}?m^{2}?K.

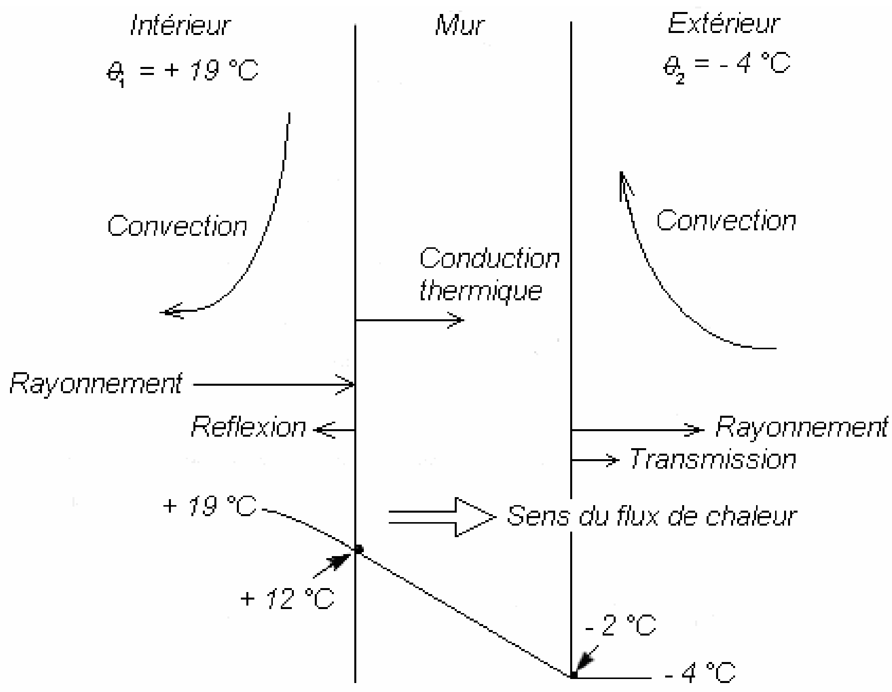
Abaque r = f(l) paramètre λ.



3.5 Mécanisme de l'échange de chaleur à travers une paroi

Soit un mur d'habitation séparant l'intérieur de la maison à θ_1 = + 19 °C de l'extérieur à θ_2 = - 4 °C. Le mur est supposé homogène.

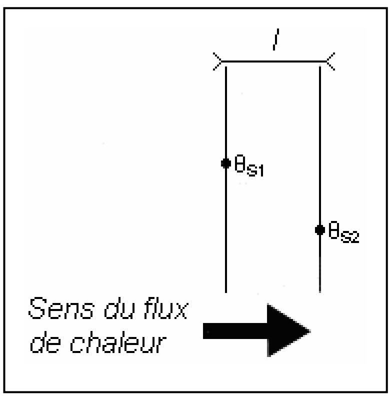
Commenter le schéma :



3.6 Equation de la densité de flux dans une paroi

- **mur simple**

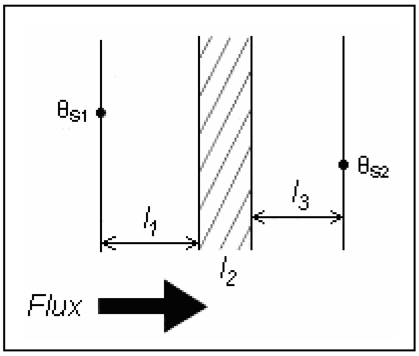
Soit un mur formé d'un matériau homogène de conductivité λ. Les deux faces sont maintenues à des températures constantes θ_{S1} et θ_{S2}.



On écrit :

$$\varphi = \frac{\theta_{S1} - \theta_{S2}}{r} = \frac{\theta_{S1} - \theta_{S2}}{\frac{l}{\lambda}}$$

- **murs juxtaposés**



On écrit : $$\varphi = \frac{\theta_{S1} - \theta_{S2}}{r_1 + r_2 + r_3}$$

$$r_1 = \frac{l_1}{\lambda_1} \qquad r_2 = \frac{l_2}{\lambda_2} \qquad r_3 = \frac{l_3}{\lambda_3}$$

3.7 L'énergie rayonnante

L'énergie rayonnante est transportée par les ***ondes électromagnétiques***. Ces ondes sont dûes aux oscillations des électrons contenus dans la matière. C'est lors de l'interaction du rayonnement avec la matière qu'apparaît la chaleur. (Il s'agit donc d'émission et d'absorption de radiations électromagnétiques).

L'arc électrique émet un **rayonnement thermique** encore appelé rayonnement par ***incandescence***.

D'une façon générale, on parle de rayonnement thermique ou par incandescence lorsque les caractéristiques de ce rayonnement ne dépendent que de la température de la source.

Si un rayonnement de longueur d'onde déterminée rencontre un corps qui est absorbant pour cette longueur d'onde, une partie de ce rayonnement est transformé en chaleur lors de l'interaction.

3.8 Le phénomène de conduction thermique

L'apport d'énergie thermique augmente l'agitation thermique des particules constituant la matière.

Les oscillations de ces particules se propagent de proche en proche permettant le transfert de chaleur. On peut montrer que ce transfert n'est possible que si le matériau contient des ***électrons libres***.

C'est le cas des métaux et des alliages métalliques, ce n'est pas le cas du verre et du bois.

Ceci explique, en outre, que les bons conducteurs de la chaleur le sont aussi de l'électricité.

Bibliographie **:**

Mécanique 2 – AGATI (Dunod)

Mécanique expérimentale des fluides – COMOLET (Masson)

Mécanique des fluides – HANAUER (Breal)

Mesure des débits et vitesses des fluides – LEFEBVRE (Masson)

Mécanique des fluides (cours et exercices résolus) – MEIER (Masson)

Mécanique des fluides appliquée – OUZIAUX (Dunod Universités)

Mécanique / Phénomènes vibratoires – PRUNET (Dunod)

La Mécanique des fluides – SALIN (Nathan Universités)