



Physique : mesures, mécanique, fluides et thermodynamique

OSSIK · COURS 11-01 · LE CORRIGÉ · RÉVISION 0.5

PASS - majeure santé - classement d'après la maquette publique de Paris Cité, sans lien avec l'université. Cours original rédigé avec une IA. Le cours de ta faculté fait foi.

Sommaire du cours

Partie 1 · Mesures, dimensions et incertitudes	1
Partie 2 · Forces, mouvements et bilans énergétiques	7
Partie 3 · Pressions et écoulements des fluides	12
Partie 4 · Réseaux hydrauliques et puissance des écoulements	18
Partie 5 · Thermodynamique et transferts de chaleur	24

Partie 1 · Mesures, dimensions et incertitudes

Prérequis et objectifs

Maîtriser les puissances de dix, les fractions et la lecture d'une droite. Une mesure ne devient interprétable qu'après définition du phénomène, de l'unité et du protocole.

À l'issue de ce cours, vous devez pouvoir :

- Convertir des grandeurs simples et composées.
- Distinguer dispersion, biais et incertitude.
- Propager une incertitude et contrôler un résultat.

Fondements du thème

Comprendre ce que représente un nombre

Une grandeur physique associe une valeur, une unité et une définition opérationnelle. Une pression de 12 kPa n'est pas simplement « 12 » : elle exprime une force rapportée à une surface. Les unités SI de base comprennent le mètre, le kilogramme, la seconde, l'ampère, le kelvin, la mole et la candela. Les unités dérivées se construisent par produits et quotients. Un newton vaut $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; un joule vaut $\text{N}\cdot\text{m}$; un pascal vaut $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$; un watt vaut $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$. Ces conventions sont vérifiées dans la [Brochure sur le SI du BIPM](#).

L'analyse dimensionnelle teste la cohérence d'une relation avant tout calcul. Dans $E_c = mv^2/2$, le produit $\text{kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2$ donne des joules. Dans une exponentielle $\exp(-t/\tau)$, le rapport t/τ doit être sans dimension. On ne peut additionner une température et une énergie ; on peut additionner deux énergies après conversion dans la même unité. Une expression homogène n'est toutefois pas

nécessairement correcte : elle peut contenir un facteur numérique erroné ou reposer sur une mauvaise hypothèse.

Les conversions de surfaces et volumes sont une source fréquente d'erreurs. Un centimètre vaut 10^{-2} m, donc 1 cm^2 vaut 10^{-4} m^2 et 1 cm^3 vaut 10^{-6} m^3 . Un litre vaut 10^{-3} m^3 ; un millilitre vaut 10^{-6} m^3 . La masse volumique $\rho = m/V$ s'exprime en kg/m^3 . Pour l'eau dans un exercice simple, 1000 kg/m^3 équivaut à 1 g/mL . Masse volumique et densité relative ne se confondent pas : la seconde est un rapport sans unité à une référence précisée.

Mesures, incertitudes et représentation

La fidélité de mesure décrit la faible dispersion de mesures répétées dans des conditions spécifiées ; la justesse concerne leur proximité avec une valeur de référence. Un appareil peut donner des résultats très regroupés mais systématiquement décalés. L'incertitude absolue conserve l'unité de la grandeur ; l'incertitude relative est leur quotient. Pour un produit de grandeurs indépendantes, les incertitudes types relatives se combinent en quadrature dans l'approximation linéaire. Une estimation maximale prudente peut additionner leurs valeurs absolues ; ce n'est pas la même convention.

Une droite $y = ax + b$ a une pente dont l'unité est celle de y divisée par celle de x . Si $C(t) = C_0 \exp(-kt)$, tracer $\ln(C/C_0)$ en fonction de t fournit une pente $-k$. Le logarithme porte ici sur un rapport sans dimension. Avant d'utiliser une calculatrice, prévoir le signe, l'ordre de grandeur et la variation attendue. Une augmentation du dénominateur, à numérateur constant, doit diminuer le quotient.

Développements et raisonnements

Construire une mesure avant de lui attribuer des décimales

Le mesurande est la grandeur que l'on cherche à connaître. « La température » reste incomplet : il faut une position, un instant et un état du système. Un capteur peut modifier cet état, par exemple lorsqu'une sonde initialement froide échange de la chaleur avec un petit échantillon. Une valeur instrumentale comprend donc la réponse de l'appareil et le lien entre cette réponse et le mesurande. L'étalonnage établit ce lien à l'aide de références ; il ne garantit pas que les conditions d'utilisation ultérieures soient identiques.

Supposons une balance dont l'indication suit $y = ax + b$. Le terme b est un décalage de zéro et a un facteur d'échelle. Soustraire le blanc corrige b si ce blanc est stable. Cela ne corrige pas une mauvaise pente. Si l'appareil indique $1,03\text{ g}$ pour une référence de $1,00\text{ g}$ après correction du zéro, l'écart relatif vaut 3% . Pour une réponse proportionnelle sur tout le domaine, la masse corrigée est $y/1,03$. Cette correction exige la vérification de la linéarité et une référence d'incertitude connue.

Pourquoi les incertitudes ne s'additionnent pas toutes de la même façon

Pour $y = f(x)$, une petite variation donne $dy \approx f'(x) dx$. Si y dépend de plusieurs entrées, chaque dérivée indique combien la sortie répond à une variation de cette entrée. Sous indépendance des erreurs, leurs variances s'additionnent après pondération par les dérivées. Pour $y = ab$, on obtient $u(y)^2 \approx b^2 u(a)^2 + a^2 u(b)^2$. Diviser par y^2 donne la somme des carrés des incertitudes relatives. Cette formule concerne les incertitudes types, non les bornes d'erreur maximale.

Une covariance positive ajoute un terme positif lorsque les sensibilités ont le même signe. Deux mesures faites avec le même instrument peuvent partager un décalage commun : les répéter ne suffit pas à éliminer ce défaut. Pour une différence entre deux valeurs, un biais commun stable peut au

contraire se compenser. La structure des erreurs doit donc précéder le choix d'une formule.

Situation	Question préalable	Traitement justifié
Lectures répétées	Les conditions restent-elles identiques ?	Estimer la dispersion
Mesure étalonnée	La référence et la pente sont-elles valides ?	Corriger et propager
Produit de mesures	Les erreurs sont-elles indépendantes ?	Quadrature si oui
Intervalle maximal	Connaît-on des bornes garanties ?	Propagation des bornes

Chiffres significatifs et cohérence

Une calculatrice peut afficher douze décimales après division de deux valeurs connues à 2 %. Ces décimales ne deviennent pas de l'information expérimentale. On conserve des chiffres de garde pendant les calculs, puis on arrondit l'incertitude et la valeur sur des rangs cohérents. L'ordre de grandeur constitue un contrôle indépendant : le volume d'un petit tube de laboratoire ne peut pas devenir plusieurs mètres cubes après une conversion.

Atelier de calcul et analyse de sensibilité

Un cylindre idéal possède $r = 2,00 \text{ mm}$, $u(r) = 0,02 \text{ mm}$, $L = 10,0 \text{ mm}$ et $u(L) = 0,1 \text{ mm}$, avec des incertitudes indépendantes. Le volume vaut $V = \pi r^2 L = 125,6637 \text{ mm}^3$, soit $0,125664 \text{ mL}$. Le facteur r^2 explique pourquoi l'incertitude relative du rayon intervient avec le coefficient deux. On obtient $u(V)/V = \text{racine}[(2 \times 0,02/2,00)^2 + (0,1/10,0)^2] = 0,02236$. L'incertitude absolue est $2,810 \text{ mm}^3$. On peut rendre $V = 125,7 \pm 2,8 \text{ mm}^3$ en indiquant qu'il s'agit d'une incertitude type.

Une seconde équipe améliore la mesure de longueur : $u(L)$ devient $0,02 \text{ mm}$. L'incertitude relative devient $\text{racine}[0,02^2 + 0,002^2] = 2,01 \text{ \%}$. Le gain est faible car le rayon domine déjà le budget d'incertitude. Réduire $u(r)$ à $0,005 \text{ mm}$ avec $u(L)$ initiale donne au contraire $1,12 \text{ \%}$. Cet exemple explique pourquoi améliorer l'instrument le plus coûteux n'est pas forcément améliorer la grandeur qui limite la précision.

Pour une estimation maximale, prendre r dans $[1,98 ; 2,02]$ et L dans $[9,9 ; 10,1]$ donne des bornes obtenues par substitution aux extrêmes, car V augmente avec chacune des entrées positives. Elles ne doivent pas être présentées comme un intervalle de confiance à 95 %. L'origine probabiliste ou déterministe de l'intervalle change son interprétation, même si deux largeurs numériques se ressemblent.

Approfondissement et contrôle du modèle

Comparer deux résultats de mesure

Deux mesures peuvent différer sans être incompatibles compte tenu de leur incertitude. Pour des estimations indépendantes x_1 et x_2 , l'incertitude type de la différence est racine[$u_1^2 + u_2^2$]. Comparer l'écart à cette échelle aide à distinguer une fluctuation plausible d'un désaccord demandant investigation. Ce raisonnement ne doit pas devenir un verdict automatique, car une erreur commune peut être absente de l'incertitude annoncée.

Si deux instruments mesurent la même référence avec des unités différentes, convertir aussi leurs incertitudes. Une incertitude absolue de 0,2 cm devient 2 mm, tandis que l'incertitude relative reste inchangée. Un changement d'unité ne rend pas un appareil plus précis. Enfin, une série de valeurs identiques peut refléter une résolution insuffisante plutôt qu'une absence de variabilité physique : le pas d'affichage peut masquer les variations.

Mise à l'épreuve : Quand répéter ne réduit plus l'incertitude

Problème. Une série de 25 lectures indépendantes a un écart-type de répétabilité de 0,50 g. L'étalonnage apporte une incertitude type commune de 0,20 g, indépendante de la répétabilité. Calculer l'incertitude de la moyenne, puis celle obtenue avec 100 lectures.

Résolution. La composante aléatoire vaut $0,50/\sqrt{25} = 0,10$ g. La composante commune ne se divise pas par $\sqrt{25}$: $u = \sqrt{(0,10)^2 + (0,20)^2} = 0,224$ g. Avec 100 lectures, $u = \sqrt{(0,05)^2 + (0,20)^2} = 0,206$ g. Quadrupler le travail améliore donc peu le résultat. Même une infinité de répétitions ne ferait pas descendre ce budget sous 0,20 g. Pour progresser, il faut agir sur la référence, la dérive ou le modèle d'étalonnage. Ce plancher est une propriété des hypothèses d'incertitude, pas une erreur certaine de 0,20 g.

Budget de mesure : identifier les composantes avant de les combiner

Évaluation par série et par information externe

Une évaluation dite de type A utilise l'analyse statistique d'une série ; une évaluation de type B utilise d'autres informations, comme un certificat, une résolution ou un modèle de dérive. Ce ne sont pas deux natures opposées d'erreurs : les deux peuvent aboutir à des incertitudes types, combinables dans un même budget. Une correction connue doit être appliquée ; l'incertitude porte alors sur ce qui reste inconnu dans cette correction.

Si l'arrondi d'un affichage de pas d est modélisé par une loi uniforme entre $-d/2$ et $+d/2$, son incertitude type est $d/\sqrt{12}$. Ce résultat vient de la variance d'une loi uniforme sur un intervalle de largeur d . Il dépend du modèle : des valeurs répétées bloquées sur le même digit ne constituent pas automatiquement des erreurs de quantification indépendantes que l'on divise par $\sqrt{n}$.

La moyenne de n répétitions indépendantes de variance s^2 apporte s^2/n . Une incertitude de correction commune apporte sa variance entière. On écrit donc d'abord le modèle $y = \text{moyenne} + \text{correction}$, puis les sensibilités et covariances. Cette organisation évite de mettre indistinctement toutes les contributions sous le facteur $1/n$.



Exercice guidé : choisir l'amélioration utile

Une série de 16 lectures possède $s = 0,08$ unité. Une correction commune a $u_{\text{corr}} = 0,03$ unité. L'arrondi final, distinct de la dispersion des lectures et non déjà inclus dans s , a un pas $d = 0,02$ unité. Les trois contributions sont supposées indépendantes. Calculer $u(y)$, puis comparer deux améliorations : 64 lectures, ou une référence améliorant u_{corr} à 0,01 avec 16 lectures.

Correction. Les contributions initiales sont 0,02, 0,03 et $0,02/\sqrt{12} = 0,00577$. La combinaison donne $\sqrt{(0,0004+0,0009+0,0000333)}=0,03651$. Avec 64 lectures, elle devient 0,03215 ; avec la meilleure référence et 16 lectures, 0,02309. La référence améliore davantage ce budget. Le calcul ne recommande pas un appareil : il montre comment la contribution dominante oriente une décision expérimentale.

Exercice de critique : éviter le double comptage

La dispersion observée intègre déjà les fluctuations de l'affichage. Peut-on ajouter automatiquement $d/\sqrt{12}$ comme nouvelle erreur indépendante à chaque lecture ? **Non.** Il faut préciser ce que représente s et ce qui demeure hors de ce modèle. Ajouter deux descriptions du même phénomène surestime une composante ; l'ignorer entièrement peut au contraire la sous-estimer. L'exemple précédent séparait expressément un arrondi final supplémentaire.

Schéma de raisonnement

De la lecture au résultat

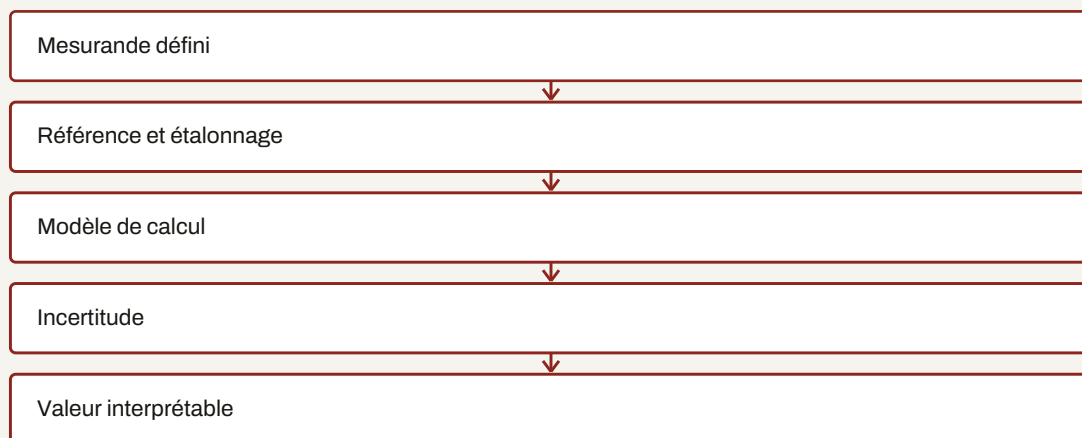


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Chaque étape apporte une condition de validité. Ce schéma ne signifie pas qu'un étalonnage élimine toutes les erreurs : la dérive et les conditions d'utilisation doivent aussi être examinées.

Exercices progressifs

1. Convertis 250 mL en m^3 .
2. Une force de 20 N agit sur 4 cm^2 . Quelle pression ?
3. La relation $x = at$ est-elle compatible avec x distance et a accélération ?
4. Une balance étalonnée a $y = 1,02x + 0,05 \text{ g}$. Une lecture vaut 2,09 g. Estimer x .

5. Deux mesures indépendantes possèdent chacune une incertitude type de 3 unités. Calculer celle de leur somme.
6. Un capteur fournit des valeurs répétées très proches, toutes décalées de 10 %. Discuter précision et justesse.

Corrections argumentées

1. Réponse : $250 \times 10^{-6} = 2,50 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Le facteur porte sur le volume, pas sur une longueur.
2. Réponse : $4 \text{ cm}^2 = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$; $p = 20/(4 \times 10^{-4}) = 50\,000 \text{ Pa} = 50 \text{ kPa}$.
3. Non : at a la dimension d'une vitesse. Une distance due à une accélération constante contient un terme en at^2 , associé à un facteur et aux conditions initiales.
4. $x = (2,09 - 0,05)/1,02 = 2,00 \text{ g}$. La soustraction du zéro doit précéder la correction de pente. Une simple soustraction de 2 % de la lecture ne correspond pas au modèle.
5. $u = \text{racine}(3^2 + 3^2) = 4,243 \text{ unités}$. La somme 6 serait une borne prudente si chaque erreur était bornée par 3 ; elle n'est pas la combinaison des incertitudes types indépendantes.
6. La répétabilité est bonne, mais un biais de calibration compromet la justesse. Multiplier les répétitions réduit l'incertitude sur la moyenne des lectures sans supprimer ce biais.

Références et portée

- Source 1 : www.bipm.org
- Source 2 : www.bipm.org

Sources consultées le 1er octobre 2026 pour les notions signalées. Développements, situations et calculs pédagogiques OSSI K ; données fictives. La concordance complète avec les supports universitaires de l'année et la relecture scientifique humaine restent à réaliser. Les modèles biomédicaux ne fournissent aucune décision thérapeutique individuelle.

Partie 2 · Forces, mouvements et bilans énergétiques

Prérequis et objectifs

Connaître les vecteurs, les projections et les dérivées élémentaires. Définir le système étudié avant de recenser les forces.

À l'issue de ce cours, vous devez pouvoir :

- Construire un bilan des forces et moments.
- Relier travail et énergie cinétique.
- Distinguer puissance, rendement et conservation.

Fondements du thème

Décrire puis expliquer le mouvement

La position dépend du référentiel choisi. La vitesse est la dérivée de la position ; l'accélération est la dérivée de la vitesse. Un mouvement circulaire uniforme a une vitesse de norme constante, mais sa direction varie : il existe donc une accélération centripète $a = v^2/r$. Dans un référentiel galiléen et pour une masse constante, la somme des forces extérieures vaut ma . Une vitesse constante implique une résultante nulle, pas une absence de forces.

Le poids vaut mg et dépend du champ de pesanteur ; la masse caractérise l'inertie. La réaction d'un support peut compenser le poids. Une force de frottement s'oppose au glissement relatif et dissipe généralement de l'énergie mécanique. Les forces d'action et de réaction concernent deux objets différents : elles ne s'annulent pas dans le bilan des forces d'un seul objet. Un diagramme isolant l'objet évite cette confusion.

Pour un solide en équilibre statique, la résultante des forces et celle des moments doivent s'annuler. Le moment d'une force par rapport à un axe dépend de son bras de levier perpendiculaire : $M = Fd$. L'unité est $N \cdot m$, mais un moment n'est pas une énergie malgré la même dimension. Dans un avant-bras simplifié, la force musculaire peut être bien supérieure au poids porté, car son bras de levier est court. Les contraintes articulaires ne se déduisent donc pas du seul poids de l'objet tenu.

Travail, énergie et puissance

Le travail d'une force constante au cours d'un déplacement rectiligne est $W = Fd \cos \theta$. Une force perpendiculaire au déplacement ne travaille pas. Le théorème de l'énergie cinétique donne $\Delta E_c =$ somme des travaux, avec $E_c = mv^2/2$. Près de la surface terrestre et pour g constant, l'énergie potentielle de pesanteur peut s'écrire $E_p = mgz$, après choix arbitraire de l'origine. Seules les différences ont une conséquence mécanique.

Si seules des forces conservatives travaillent, $E_c + E_p$ est constante. Avec des frottements, l'énergie mécanique diminue tandis que l'énergie totale, incluant les échanges thermiques, se conserve. La puissance est le débit de transfert énergétique $P = dW/dt$. Un rendement est le rapport énergie utile/énergie reçue, en précisant les frontières du système et la forme d'énergie considérée.

Développements et raisonnements

Choisir le système et le repère

Considérons une charge soulevée par un câble vertical. Pour le système « charge », les forces extérieures sont son poids et la tension du câble. La force exercée par la charge sur le câble n'appartient pas à ce bilan. Avec l'axe vertical orienté vers le haut, $T - mg = ma$. Lorsque la charge monte à vitesse constante, $a = 0$ et $T = mg$. Pendant son accélération vers le haut, T dépasse mg ; lorsqu'elle monte en ralentissant, a est négatif et T peut devenir inférieur au poids.

L'expression « elle monte » ne suffit donc pas à conclure sur les forces. La vitesse détermine le mouvement instantané ; l'accélération décrit sa variation. En mouvement circulaire uniforme, le changement de direction donne une accélération même si le compteur de vitesse reste constant. Le repère et les signes doivent apparaître avant les valeurs numériques, car ils rendent les résultats négatifs interprétables.

Retrouver le théorème énergétique

En une dimension, multiplier $m \, dv/dt = F$ par v donne $m \, v \, dv/dt = F \, dx/dt$. Le membre gauche est la dérivée de $mv^2/2$; le droit est la puissance mécanique instantanée. Intégrer entre deux instants donne la variation d'énergie cinétique égale au travail total. Ce raisonnement montre pourquoi une force perpendiculaire à la vitesse peut modifier sa direction sans changer l'énergie cinétique.

Pour un ressort idéal, $F = -kx$ par rapport à l'équilibre. Son travail entre x_1 et x_2 vaut $-k(x_2^2 - x_1^2)/2$. On définit alors une énergie potentielle $kx^2/2$. Le signe moins correspond au retour vers l'équilibre. L'énergie stockée dépend du carré de l'allongement : doubler x multiplie cette énergie par quatre, sous réserve de rester dans le domaine élastique linéaire.

Équilibre des moments et modèle biomécanique

Le moment est un produit vectoriel. Sa norme Fd utilise la distance perpendiculaire entre l'axe et la ligne d'action, pas nécessairement la longueur du segment anatomique. Si le muscle fait un angle θ avec le segment, le bras efficace est $r \sin \theta$. Lorsque l'angle diminue, une force plus grande peut être nécessaire pour produire le même moment. Le modèle de levier ne détermine toutefois pas à lui seul les contraintes locales dans le tendon ou le cartilage.

Bilan	Grandeur conservée ou équilibrée	Condition
Translation statique	Somme des forces nulle	Accélération nulle
Rotation statique	Somme des moments nulle	Pas d'accélération angulaire
Énergie mécanique	Cinétique + potentielle	Travaux dissipatifs absents
Énergie totale	Toutes les formes d'énergie	Frontière du système explicitée

Un bilan mécanique incomplet peut donner une force correcte par coïncidence. Il faut vérifier séparément l'équilibre horizontal, vertical et la rotation. Les réactions au point d'appui disparaissent parfois du bilan des moments autour de ce point, mais elles restent présentes dans le bilan des forces.

Atelier de calcul et analyse de sensibilité

Une charge de 4 kg accélère verticalement de 0 à 1,5 m/s en 0,50 s. L'accélération constante vaut $3,0 \text{ m/s}^2$; la tension requise est $4(9,81 + 3,0) = 51,24 \text{ N}$. Sur cet intervalle, le déplacement vaut 0,375 m. Le travail du câble est 19,215 J ; celui du poids -14,715 J. Leur somme est 4,500 J, égale à $4 \times 1,5^2/2$. La vérification énergétique retrouve le résultat obtenu par les forces.

Dans un levier horizontal fictif, une charge de 40 N agit à 0,25 m de l'axe. Un câble moteur tire à 0,04 m de l'axe sous un angle de 30° avec le levier. Le moment résistant vaut $10 \text{ N}\cdot\text{m}$. Le bras moteur est $0,04 \sin 30^\circ = 0,020 \text{ m}$; la traction est donc 500 N. Remplacer ce bras par 0,04 m ferait sous-estimer la force d'un facteur deux. Si l'angle passe à 90° , la traction nécessaire devient 250 N. La force change avec la géométrie alors que le moment demandé reste identique.

Une machine fournit ensuite 120 J utiles en 3 s en recevant 200 J. Sa puissance utile moyenne est 40 W et son rendement énergétique 60 %. Le reste de l'énergie peut être dissipé ou stocké sous d'autres formes. On ne doit pas annoncer une puissance dissipée de 80 W : les 80 J restants rapportés à 3 s représentent 26,7 W. L'unité empêche ici de confondre énergie et débit énergétique.

Approfondissement et contrôle du modèle

Quantité de mouvement et durée d'une action

La quantité de mouvement $p = mv$ est vectorielle. Une force résultante intégrée dans le temps produit une impulsion égale à la variation de p pour un système de masse constante. Un même changement de vitesse réalisé sur une durée plus longue demande une force moyenne plus faible. Cela explique l'intérêt mécanique d'allonger un temps de décélération dans un modèle d'arrêt.

Il faut distinguer cette relation du théorème de l'énergie cinétique : l'impulsion relie force et temps, le travail relie force et déplacement. Une force importante très brève peut modifier fortement la vitesse sans agir sur une longue distance. Pour une collision, la conservation de quantité de mouvement dépend des forces extérieures pendant l'intervalle ; la conservation d'énergie cinétique exige en plus un choc élastique. Une énergie cinétique perdue peut devenir déformation et chaleur sans violer la conservation totale.

Mise à l'épreuve : Une réaction articulaire oubliée

Problème. Un levier horizontal sans masse porte une charge verticale descendante de 40 N à 0,25 m du pivot. Un câble exerce une traction verticale ascendante à 0,05 m du pivot, du même côté que la charge. Déterminer la traction et la réaction verticale du pivot sur le levier.

Résolution. Le bilan des moments autour du pivot donne $T \times 0,05 - 40 \times 0,25 = 0$, donc $T = 200 \text{ N}$. Le bilan vertical impose $R + 200 - 40 = 0$, soit $R = -160 \text{ N}$: le pivot pousse ici vers le bas. Une réaction n'est pas nécessairement dirigée vers le haut. Oublier R laisserait une résultante ascendante de 160 N incompatible avec l'équilibre. Le point matériel aurait permis le bilan des forces, mais pas la condition de rotation : la géométrie du solide est indispensable. Il s'agit d'un montage idéal, sans estimation de contraintes dans un tissu réel.



Schéma de raisonnement

Bilan mécanique

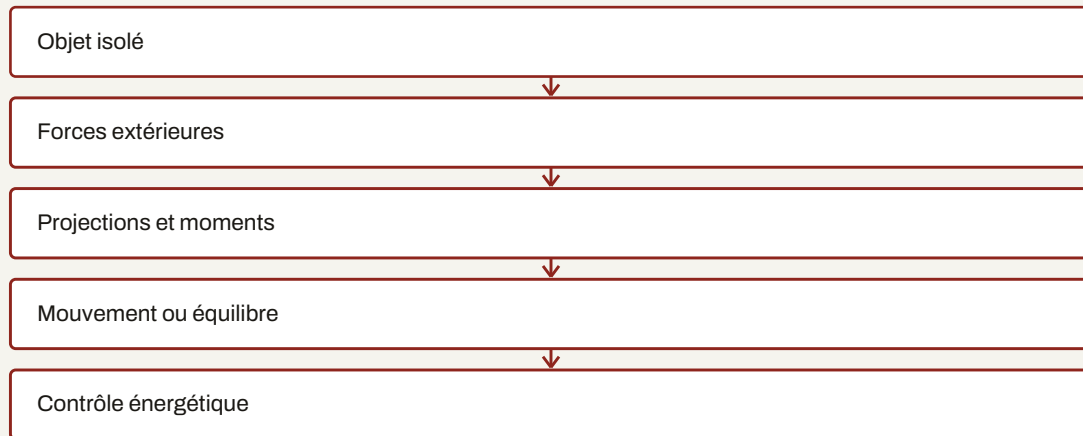


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

L'ordre proposé oblige à définir les forces du même système. Le dernier contrôle est partiel : une énergie cohérente ne suffit pas à vérifier la direction de toutes les forces.

Exercices progressifs

1. Un objet de 2 kg accélère à 3 m/s^2 . Résultante ?
2. Un objet de 5 kg est élevé de 2 m avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Gain d'énergie potentielle ?
3. Une charge exerce 30 N à 0,30 m d'un axe ; un muscle agit à 0,03 m. Force d'équilibre ?
4. Un ressort de raideur 200 N/m est étiré de 3 cm. Calculer force de rappel et énergie stockée.
5. Une force de 10 N agit perpendiculairement sur un déplacement de 2 m. Travail ?
6. Une charge de 3 kg monte à vitesse constante. Calculer la tension d'un câble vertical idéal.

Corrections argumentées

1. 6 N, dans la direction de l'accélération. Cette valeur ne décrit pas séparément chaque force.
2. 98,1 J. À vitesse constante et sans autre perte, le travail moteur est égal à ce gain.
3. 300 N si les forces sont perpendiculaires aux bras et si les autres moments sont négligés : $F \times 0,03 = 30 \times 0,30$.
4. La force a pour norme $kx = 6 \text{ N}$ et pointe vers l'équilibre. L'énergie est $kx^2/2 = 0,090 \text{ J}$. Convertir les centimètres avant de mettre la longueur au carré.
5. $W = Fd \cos 90^\circ = 0 \text{ J}$. La force peut néanmoins dévier une trajectoire ; un travail nul ne signifie pas absence d'effet mécanique.
6. $T = mg = 29,43 \text{ N}$. La résultante est nulle parce que la vitesse est constante ; les deux forces ne sont pas individuellement nulles.



Références et portée

- Source 1 : openstax.org
- Source 2 : openstax.org

Sources consultées le 1er octobre 2026 pour les notions signalées. Développements, situations et calculs pédagogiques OSSIK ; données fictives. La concordance complète avec les supports universitaires de l'année et la relecture scientifique humaine restent à réaliser. Les modèles biomédicaux ne fournissent aucune décision thérapeutique individuelle.

Partie 3 • Pressions et écoulements des fluides

Prérequis et objectifs

Savoir convertir surfaces, débits et pressions. Distinguer une vitesse moyenne d'un débit volumique.

À l'issue de ce cours, vous devez pouvoir :

- Déduire une pression hydrostatique.
- Relier conservation du débit et vitesse.
- Identifier les hypothèses de Bernoulli et Poiseuille.

Fondements du thème

Pression et poussée

La pression est une grandeur scalaire ; la force qu'elle exerce sur une petite surface est normale à cette surface. Dans un liquide incompressible au repos, la pression augmente avec la profondeur : $\Delta p = \rho gh$. La pression absolue inclut la pression de référence ; la pression relative est mesurée par rapport à celle-ci. Confondre ces deux notions produit notamment des erreurs dans la loi des gaz parfaits, qui utilise la pression absolue.

La poussée d'Archimède sur un corps immergé vaut le poids du fluide déplacé. Elle résulte du gradient vertical de pression. Le corps flotte si une immersion partielle peut rendre cette poussée égale à son poids. Une interface courbe soumise à une tension superficielle crée également une différence de pression. Pour une interface sphérique simple, $\Delta p = 2\gamma/r$. Une bulle de savon possédant deux interfaces conduit, dans le modèle usuel, à $4\gamma/r$. Il faut identifier la géométrie avant de mémoriser un coefficient.

Débit, vitesse et résistance

Le débit volumique $Q = dV/dt$ s'exprime en m^3/s . Pour un écoulement uniforme dans une section S , $Q = Sv$. En régime stationnaire incompressible dans un conduit sans branchement, le débit est conservé : une diminution de section augmente la vitesse moyenne. Ce résultat ne suffit pas à déterminer une pression.

La relation de Bernoulli $p + \rho v^2/2 + \rho gz = \text{constante}$ compare des points d'une même ligne de courant sous des hypothèses précises : fluide idéal, incompressible, régime stationnaire et absence de travail de pompe ou de dissipation entre les points. Dans un conduit horizontal idéal, une vitesse plus élevée correspond à une pression statique plus faible. Dans un écoulement visqueux réel, une perte de charge doit être ajoutée au bilan.

Pour un fluide newtonien en écoulement laminaire établi dans un tube cylindrique rigide, Poiseuille donne $Q = \pi r^4 \Delta p / (8\eta L)$. La résistance hydraulique $R = \Delta p / Q$ vaut $8\eta L / (\pi r^4)$. Diviser le rayon par deux multiplie la résistance par seize. Le sang et les vaisseaux ne respectent pas parfaitement toutes ces hypothèses : la relation apporte un modèle de raisonnement, pas une description universelle.

Le nombre de Reynolds $Re = \rho v D / \eta$ compare les effets inertiels aux effets visqueux. Il est sans dimension. La transition vers la turbulence dépend aussi de la géométrie et des perturbations ; une valeur seuil mémorisée pour un tube ne doit pas être appliquée automatiquement à tout écoulement. Des résistances en série s'additionnent ; en parallèle, leurs conductances s'additionnent.

Développements et raisonnements

Déduire l'hydrostatique d'un bilan des forces

Isolons une colonne de liquide au repos, de section S et d'épaisseur dz , avec z orienté vers le haut. Les forces de pression sur les faces horizontales doivent compenser son poids. Le bilan donne $dp/dz = -\rho g$. Si ρ reste constante, intégrer sur une différence de hauteur donne $p_{\text{bas}} - p_{\text{haut}} = \rho gh$. Le résultat ne dépend pas de la forme globale du récipient : c'est la hauteur de liquide et sa masse volumique qui déterminent cette contribution.

Un manomètre compare deux pressions par une différence de niveaux. Il mesure une pression relative, alors qu'un gaz comprimé obéit à une équation d'état utilisant sa pression absolue. Par exemple, une surpression de 20 kPa dans un environnement à 100 kPa correspond à 120 kPa absolus. Introduire 20 kPa dans $pV = nRT$ ferait sous-estimer la quantité de gaz d'un facteur six.

Relier profil de vitesse et débit

Le débit exact est l'intégrale de la vitesse normale sur une section. Écrire $Q = Sv$ signifie que v est la vitesse moyenne de cette section. Dans un écoulement de Poiseuille, le profil est parabolique, nul à la paroi dans le modèle sans glissement et maximal sur l'axe. La vitesse maximale vaut deux fois la moyenne. Utiliser la vitesse axiale dans $Q = Sv$ sans correction surestime le débit d'un facteur deux.

La dépendance en r^4 combine deux phénomènes : agrandir le rayon augmente la surface disponible et diminue l'importance relative des gradients de vitesse. Cette forte dépendance explique la sensibilité aux petites variations géométriques. Une augmentation du rayon de 10 % multiplie le débit théorique par $1,1^4 = 1,4641$ à pression fixée. Elle ne le multiplie pas seulement par 1,10 ou 1,21.

Choisir l'équation selon les pertes

Bernoulli conserve une énergie mécanique par unité de volume dans un modèle idéal. Poiseuille décrit au contraire une perte d'énergie par viscosité. Ils répondent à des aspects différents du même système. Pour comparer deux réservoirs reliés par un conduit réel, on peut construire un bilan énergétique avec pression, énergie cinétique, altitude, pompe et pertes. Effacer le terme de perte revient à modifier le modèle physique.

Grandeur	Définition	Unité SI
Pression p	Force normale par surface	Pa
Débit Q	Volume traversant une section par temps	m^3/s
Résistance R	Différence de pression divisée par débit	$\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$
Viscosité η	Coefficient du cisaillement newtonien	Pa·s

Une vitesse élevée ne permet pas seule de conclure à la turbulence. Il faut aussi la dimension du conduit, la viscosité et la masse volumique. Dans un tube court, l'écoulement peut ne pas être établi ; dans un conduit déformable, le rayon varie avec la pression. Dans ces situations, l'application de Poiseuille exige un examen spécifique.



Atelier de calcul et analyse de sensibilité

Un tube horizontal de rayon 1,0 mm et longueur 0,20 m transporte un liquide newtonien de viscosité 1,0 mPa·s. On impose $\Delta p = 100$ Pa. Après conversion, $Q = \pi \times (10^{-3})^4 \times 100 / (8 \times 10^{-3} \times 0,20) = 1,9635 \times 10^{-7}$ m³/s, soit 0,19635 mL/s. La section est $\pi \times 10^{-6}$ m² ; la vitesse moyenne vaut 0,0625 m/s. Avec $\rho = 1000$ kg/m³ et $D = 0,002$ m, $Re = 125$. Ces données sont compatibles avec un régime laminaire, sans prouver à elles seules que la longueur d'entrée soit négligeable.

On double maintenant le débit sans changer le tube. La pression nécessaire double à 200 Pa tant que les propriétés et le régime restent ceux du modèle. La puissance hydraulique $P = \Delta p Q$ est multipliée par quatre, car pression et débit doublent ensemble. À l'inverse, si seule la différence de pression est imposée, diviser le rayon par deux divise Q par seize et la puissance dissipée par seize.

Une conduite verticale contient enfin une colonne d'eau de 0,30 m. Le supplément de pression hydrostatique est 2943 Pa. Il dépasse largement la perte visqueuse de 100 Pa du premier scénario. Cette comparaison montre pourquoi négliger l'altitude peut être une approximation plus grave que négliger un petit écart de viscosité. Elle ne transforme pas pour autant la pression hydrostatique en perte irréversible : l'énergie potentielle peut être récupérée dans un bilan idéal.

Approfondissement et contrôle du modèle

Tension superficielle et changement d'échelle

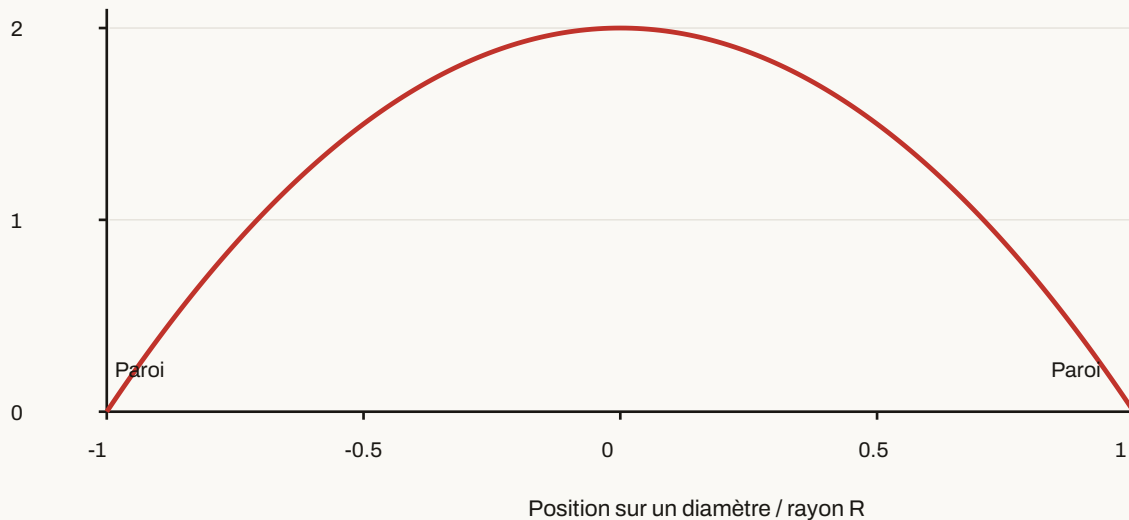
Une interface possède une énergie associée à son aire. La tension superficielle γ s'exprime en N/m, également équivalent à J/m². Pour une interface sphérique simple, la surpression $2\gamma/r$ augmente lorsque le rayon diminue. Cette relation suppose une géométrie et un état d'interface précis ; une bulle comportant deux interfaces ne reprend pas le même coefficient.

La comparaison de deux sphères doit préciser si γ est identique. Si un agent tensioactif modifie γ avec l'aire ou la composition, on ne peut déduire les pressions du rayon seul. Une relation de Laplace n'est pas une description complète d'un organe : parois, tissus voisins, courbures multiples et régulation interviennent. Le raisonnement d'échelle reste utile pour comprendre pourquoi les phénomènes de surface deviennent relativement importants quand les dimensions diminuent.

Lecture visuelle : Écoulement laminaire : profil radial parabolique

Écoulement laminaire : profil radial parabolique

Tube rigide ; fluide newtonien ; écoulement établi
Vitesse / vitesse moyenne



Dans un tube cylindrique rigide, un fluide newtonien en régime laminaire établi donne $v(r)/v_{\text{moy}} = 2[1 - (r/R)^2]$. L'abscisse représente un diamètre signé ; aux parois la vitesse est nulle. La moyenne se fait sur la surface de section, pas sur un simple segment.

Question de lecture. La vitesse axiale représente-t-elle la vitesse moyenne ?

Correction. Non : elle vaut deux fois la moyenne dans ce modèle. Employer $v_{\text{max}} \times \text{aire}$ pour calculer Q surestimerait donc le débit d'un facteur deux.

Mise à l'épreuve : Pourquoi moyenner les rayons échoue

Problème. Deux moitiés de même longueur d'un tube ont des rayons r et $2r$. À viscosité identique, comparer la résistance exacte du modèle de Poiseuille à celle obtenue en attribuant à tout le tube le rayon moyen $1,5r$.

Résolution. Notons R_0 la résistance du tube entier de rayon r . Les portions en série valent $R_0/2$ et $R_0/(2 \times 16)$. Leur somme est $17R_0/32 = 0,53125R_0$. Le rayon moyen donnerait $R_0/1,5^4 = 0,19753R_0$, soit une sous-estimation de 62,8 %. La portion étroite domine parce que les résistances s'additionnent, contrairement aux rayons. Ce calcul suppose des profils établis dans chaque portion et néglige la perte singulière au raccord : il démontre l'erreur de moyenne à l'intérieur du modèle, sans chiffrer toutes les pertes réelles.



Passer d'une conservation idéale à un bilan avec dissipation

Pressions, altitude et vitesse : choisir le même trajet

Pour un écoulement stationnaire incompressible, un bilan par unité de volume peut s'écrire $p_1 + \rho g z_1 + \rho v_1^2/2 = p_2 + \rho g z_2 + \rho v_2^2/2 + \Delta p_{\text{pertes}}$, sans pompe entre les sections. Tous les termes ont l'unité du pascal. Le terme cinétique n'est pas une perte irréversible : une partie peut se reconvertir en pression. Le terme de perte représente une dissipation et reste positif dans le sens réel de l'écoulement.

Un rétrécissement accélère le fluide si le débit est conservé. Dans le modèle sans perte et horizontal, la pression statique diminue alors. Ajouter à cette même baisse une perte calculée comme si toute l'énergie cinétique était dissipée compterait deux fois un effet. Il faut séparer géométrie, énergie cinétique et résistance.

Exercice en deux étapes

Un liquide fictif possède $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$. Dans un conduit horizontal, les vitesses moyennes passent de 0,20 à 0,80 m/s. Calculer la différence $p_1 - p_2$ sans perte, puis avec une perte supplémentaire de 500 Pa.

Correction. Le bilan idéal donne $\rho(v_2^2 - v_1^2)/2 = 1000(0,64 - 0,04)/2 = 300 \text{ Pa}$. Avec dissipation, $p_1 - p_2 = 300 + 500 = 800 \text{ Pa}$. Le changement de pression n'est donc pas une mesure directe de perte dissipative sans correction de vitesse et d'altitude. La vitesse moyenne seule suppose également une représentation adaptée du profil ; un coefficient correcteur peut être nécessaire dans un bilan plus précis.

Tester le régime avant d'utiliser Poiseuille

Le nombre de Reynolds $Re = \rho v D / \eta$ compare des effets d'inertie et de viscosité pour une géométrie donnée. Le diamètre D et la vitesse doivent correspondre au même segment. Les seuils de transition ne sont pas universels : perturbations, entrée, rugosité et pulsations peuvent intervenir. Poiseuille demande davantage qu'un petit Reynolds : tube droit, section circulaire constante, fluide newtonien, régime établi et conditions stationnaires.

Application. Avec $D = 2 \text{ mm}$, $\eta = 0,004 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ et $v = 0,20 \text{ m/s}$, $Re = 100$. Si v est multipliée par quatre dans un segment de diamètre divisé par deux, Re est multiplié par deux, pas quatre. Ce changement simultané illustre pourquoi un seul paramètre ne suffit pas à prévoir le régime. Le sang réel et les réseaux biologiques ne sont pas automatiquement décrits par l'ensemble des hypothèses du tube idéal.

Schéma de raisonnement

Modéliser un écoulement

1. Géométrie • 2. Débit et pression • 3. Régime d'écoulement • 4. Relation adaptée • 5. Bilan de puissance

La relation dépend du régime identifié. Le schéma ne suppose pas que le sang réel soit partout un fluide newtonien dans un tube rigide.

Exercices progressifs

1. Différence hydrostatique sur 0,50 m d'eau ?
2. La section est divisée par quatre à débit constant.
3. Le rayon double, Δp , η et L restant constants.
4. À débit fixé, le rayon d'un tube diminue de 20 %. Quel facteur multiplie la perte de pression de Poiseuille ?
5. Une vitesse axiale vaut 0,40 m/s dans un profil parabolique établi. Quelle vitesse moyenne ?
6. Une pression relative vaut -5 kPa dans une atmosphère à 101 kPa. Quelle pression absolue ?

Corrections argumentées

1. $1000 \times 9,81 \times 0,50 = 4905 \text{ Pa}$, environ 4,9 kPa.
2. La vitesse moyenne est multipliée par quatre. Cela ne signifie pas que le débit est multiplié par quatre.
3. Le débit est multiplié par seize dans le modèle de Poiseuille. Si le débit était imposé, la différence de pression nécessaire serait divisée par seize.
4. Le facteur est $1/0,8^4 = 2,4414$. Le débit fixé impose une pression plus grande lorsque la résistance augmente.
5. 0,20 m/s, car le maximum vaut deux fois la moyenne pour ce profil précis. La relation ne vaut pas pour tout écoulement.
6. 96 kPa. La pression relative négative signifie une pression inférieure à l'atmosphère, non une pression absolue négative.

Références et portée

- Source 1 : openstax.org
- Source 2 : www.bipm.org

Sources consultées le 1er octobre 2026 pour les notions signalées. Développements, situations et calculs pédagogiques OSSIK ; données fictives. La concordance complète avec les supports universitaires de l'année et la relecture scientifique humaine restent à réaliser. Les modèles biomédicaux ne fournissent aucune décision thérapeutique individuelle.



Partie 4 • Réseaux hydrauliques et puissance des écoulements

Prérequis et objectifs

Avoir étudié débit, pression, Poiseuille et conservation de l'énergie. Les réseaux décrits utilisent des conduits idéalisés.

À l'issue de ce cours, vous devez pouvoir :

- Calculer une résistance hydraulique équivalente.
- Établir un bilan de puissance.
- Comparer débit imposé et pression imposée.

Fondements du thème

Construire un modèle avant de calculer

Considérons un liquide newtonien incompressible circulant dans un tube droit de longueur $L = 0,10$ m et de rayon $r = 1,0$ mm. On donne $\eta = 1,0 \times 10^{-3}$ Pa·s et $Q = 1,0$ mL/s. Le tube est horizontal, rigide, et le régime supposé stationnaire laminaire établi. La question porte sur la différence de pression nécessaire, la vitesse moyenne et la puissance dissipée.

Le premier travail consiste à convertir les données : $r = 1,0 \times 10^{-3}$ m et $Q = 1,0 \times 10^{-6}$ m³/s. Le débit n'est pas une vitesse ; la vitesse dépend de la section. La viscosité s'exprime en Pa·s, et non en Pa/s. Un tableau des unités avant substitution évite des erreurs de facteurs mille ou million.

Étape 1 : vitesse et validité du régime

La section $S = \pi r^2$ vaut $3,14 \times 10^{-6}$ m². La vitesse moyenne $v = Q/S$ vaut environ 0,318 m/s. Avec $\rho = 1000$ kg/m³ et $D = 2r = 0,002$ m, Reynolds vaut $Re = \rho v D / \eta \approx 636$. Cette valeur est compatible avec l'hypothèse laminaire d'un tube lisse dans les conditions usuelles, sans démontrer à elle seule que tous les effets d'entrée sont négligeables.

Le calcul forme une boucle logique : on suppose un régime pour utiliser une loi, puis on vérifie que les résultats ne contredisent pas cette hypothèse. Si Reynolds était beaucoup trop élevé pour le modèle choisi, le résultat algébrique ne deviendrait pas vrai simplement parce que les unités sont cohérentes. La validation d'un modèle porte sur ses conditions autant que sur son arithmétique.

Étape 2 : résistance et perte de charge

Poiseuille donne $R = 8\eta L / (\pi r^4)$. Le numérateur vaut $8,0 \times 10^{-4}$ Pa·s·m et le dénominateur $3,14 \times 10^{-12}$ m⁴. Donc $R \approx 2,55 \times 10^8$ Pa·s/m³. La différence de pression $\Delta p = RQ$ vaut environ 255 Pa.

Un tube horizontal ne signifie pas que la pression reste constante : la viscosité dissipe l'énergie mécanique. Bernoulli sans perte ne conviendrait pas pour décrire cette baisse. Si le rayon était réduit à 0,5 mm en maintenant le même débit, la résistance serait multipliée par seize et Δp approcherait 4080 Pa. La vitesse serait multipliée par quatre et Reynolds par deux, ce qui exige de réexaminer le régime.

Étape 3 : puissance et réseau

La puissance hydraulique dissipée vaut $P = \Delta p Q = 255 \times 10^{-6} = 2,55 \times 10^{-4} \text{ W}$, soit 0,255 mW. L'unité se vérifie : $\text{Pa} \times \text{m}^3/\text{s} = \text{N} \cdot \text{m}/\text{s} = \text{W}$. Cette puissance correspond à une conversion d'énergie mécanique en énergie interne dans le modèle ; elle n'est pas l'énergie dissipée durant toute l'expérience. Pendant dix secondes, l'énergie associée vaut $Pt = 2,55 \text{ mJ}$.

Deux tubes identiques en parallèle présentent une résistance équivalente $R/2$. À différence de pression imposée, le débit total double tandis que le débit de chaque branche reste celui d'un tube seul. À débit total imposé, chaque branche reçoit la moitié et la pression requise est divisée par deux. Toujours préciser ce que l'on maintient constant avant d'affirmer qu'une grandeur augmente ou diminue.

Développements et raisonnements

Deux contraintes externes conduisent à deux réponses différentes

Un conduit ne détermine pas seul son débit : il faut connaître le mécanisme qui impose ou produit une différence de pression. Une source de pression idéale maintient Δp malgré les changements de résistance ; une source de débit idéale maintient Q en adaptant Δp . Dans le premier cas $Q = \Delta p/R$; dans le second $\Delta p = RQ$. Les valeurs mesurées sur un réseau biologique réel dépendent aussi des régulations et de la compliance des conduits.

Deux résistances en série portent le même débit, tandis que les pertes de pression s'additionnent. Leur équivalent est $R_1 + R_2$. Dans deux branches parallèles, la différence de pression entre les nœuds d'entrée et de sortie est commune et $Q_{\text{total}} = Q_1 + Q_2$. On obtient $1/R_{\text{eq}} = 1/R_1 + 1/R_2$. Une branche ajoutée diminue la résistance équivalente, sans garantir que chaque branche initiale porte un débit plus grand : cela dépend de la source.

La puissance décrit le coût énergétique d'un débit

Une différence de pression est une énergie par volume. Multiplier par Q donne une énergie par temps, donc $P = \Delta p Q$. Pour un élément résistif, $P = RQ^2 = \Delta p^2/R$. À débit fixé, augmenter la résistance augmente la puissance nécessaire. À pression fixée, augmenter la résistance diminue le débit et la puissance dissipée. Les deux conclusions sont compatibles parce qu'elles concernent des expériences différentes.

Une pompe réelle possède un rendement. Si la puissance hydraulique utile est 0,50 W et le rendement 25 %, elle reçoit 2,0 W. Le complément se retrouve dans les pertes de la machine selon le système choisi. Un rendement peut dépendre du point de fonctionnement ; il ne faut pas transporter sa valeur d'un débit à un autre sans justification.

Quand un réseau n'est plus purement résistif

Un conduit élastique stocke un volume lorsque sa pression augmente. La compliance $C_h = dV/dp$ relie variation de volume et variation de pression. Le débit entrant peut alors différer du débit sortant pendant un transitoire, car une partie du liquide remplit le stockage. Cela ne viole pas la conservation : $Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}} = dV/dt$.

En associant une compliance à une résistance, on obtient une relaxation de constante de temps RC_h dans un modèle linéaire. L'analogie avec le circuit électrique aide à comprendre une réponse pulsatile, mais elle ne rend pas les deux systèmes matériellement identiques. Une inertie de fluide, des conduits

non linéaires et des réflexions d'ondes peuvent demander un autre modèle.

Atelier de calcul et analyse de sensibilité

Considérons deux branches de résistances 2×10^8 et 3×10^8 Pa·s/m³ soumises à 600 Pa. Les débits sont 3×10^{-6} et 2×10^{-6} m³/s. Le total est 5×10^{-6} m³/s et la résistance équivalente $1,2 \times 10^8$ Pa·s/m³. La puissance totale vaut $600 \times 5 \times 10^{-6} = 0,003$ W. La somme des puissances des branches donne $0,0018 + 0,0012 = 0,003$ W, contrôle indépendant du bilan.

On place en série une résistance supplémentaire de $0,8 \times 10^8$ Pa·s/m³, en maintenant 600 Pa sur le réseau entier. R_{total} devient 2×10^8 et Q_{total} 3×10^{-6} m³/s. La chute de pression en série vaut 240 Pa, laissant 360 Pa aux branches parallèles. Leurs débits deviennent $1,8 \times 10^{-6}$ et $1,2 \times 10^{-6}$ m³/s. Utiliser encore 600 Pa pour chaque branche après cet ajout reviendrait à attribuer la même énergie deux fois.

Si la source impose au contraire le débit initial de 5×10^{-6} m³/s, la pression totale doit monter à 1000 Pa. Les branches conservent alors 600 Pa et leurs débits initiaux, tandis que le nouvel élément reçoit 400 Pa. La puissance nécessaire passe à 0,005 W. Les composants du réseau n'ont pas changé entre ces deux expériences ; seule la contrainte externe a changé.

Approfondissement et contrôle du modèle

Résistance locale et résistance équivalente

Dans un réseau, un rétrécissement limité peut peser davantage qu'une longue portion large, à cause de la dépendance en rayon puissance quatre. La moyenne arithmétique des rayons n'est donc pas suffisante pour calculer une résistance totale. Il faut découper les portions où la géométrie est approximativement uniforme, calculer leurs résistances puis les associer selon le trajet.

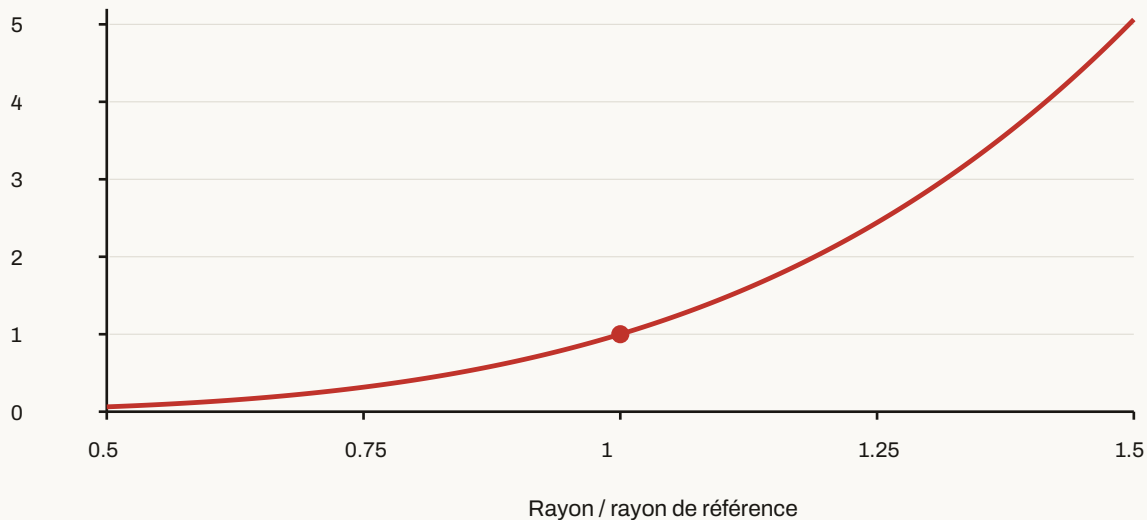
Cette démarche ne dispense pas de tenir compte des pertes singulières aux changements brusques de section, qui peuvent sortir du modèle de Poiseuille développé. Une section plus petite augmente la vitesse à débit fixé et peut modifier le régime. Le calcul d'une résistance est ainsi lié à une vérification de cohérence après résolution. Une valeur numériquement précise fondée sur une géométrie grossière doit rester présentée comme une estimation de modèle.



Lecture visuelle : Poiseuille : le rayon agit à la puissance quatre

Poiseuille : le rayon agit à la puissance quatre

Même pression motrice, viscosité et longueur
Débit / débit de référence



Modèle de Poiseuille à pression motrice, viscosité et longueur fixes : $Q/Q_0 = (r/r_0)^4$. Tube cylindrique rigide et régime laminaire établi. La relation ne décrit pas automatiquement une circulation pulsatile et déformable.

Question de lecture. Une diminution du rayon de 20 % diminue-t-elle le débit de 20 % ?

Correction. Non : $0,8^4 = 0,4096$. Le débit diminue d'environ 59 %, si toutes les autres hypothèses sont maintenues.

Mise à l'épreuve : Le débit net d'un réservoir compliant

Problème. Un réservoir de compliance constante $C_h = 2 \text{ mL/kPa}$ se vide dans une résistance $R = 5 \text{ kPa}\cdot\text{min/mL}$ vers une pression de référence nulle. Aucun débit n'entre. Sa surpression initiale est 3 kPa. Établir puis résoudre le bilan.

Résolution. Le stockage varie comme $dV/dt = C_h dp/dt$. La sortie vaut p/R . Ainsi $C_h dp/dt = -p/R$ et $p(t) = 3 \exp(-t/10)$, avec t en minutes. À 10 min, $p = 1,104 \text{ kPa}$ et $Q_{\text{sortie}} = 0,221 \text{ mL/min}$. Le volume évacué vaut $C_h[3 - p(t)] = 3,793 \text{ mL}$. Il reste une surpression après une constante de temps. L'analogie RC traduit exactement ce bilan linéaire, mais aucune pompe biologique ni compliance variable n'est représentée ici.



Schéma de raisonnement

Réseau hydraulique

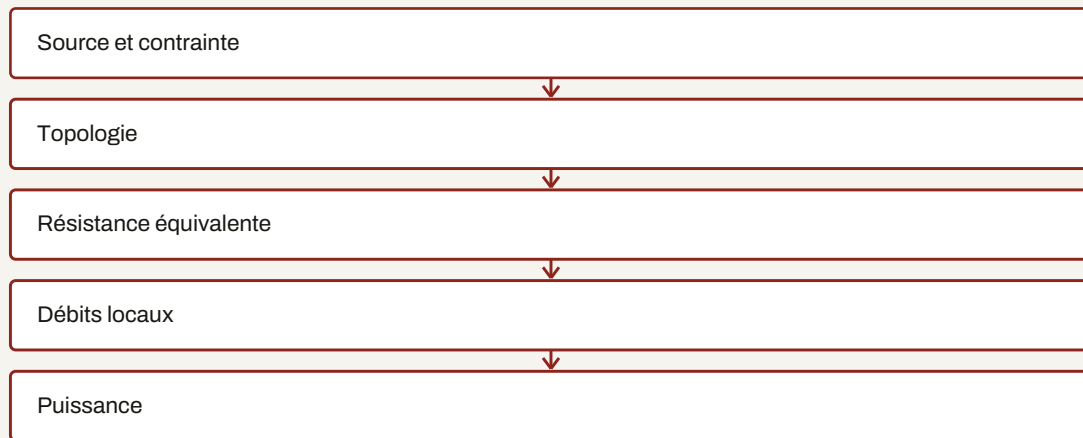


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Ce schéma concerne un réseau stationnaire. Un stockage de volume exige un bilan temporel supplémentaire ; les débits des branches ne peuvent alors pas tous être déduits d'une simple résistance.

Exercices progressifs

1. Dans ce cas, que devient Δp si la longueur double et Q reste constant ?
2. Deux tubes identiques sont placés en série à débit constant. Quelle résistance totale ?
3. Pourquoi la loi $Q = Sv$ ne permet-elle pas à elle seule de calculer Δp ?
4. Deux résistances identiques en parallèle remplacent une seule résistance. À pression imposée, que devient le débit total ?
5. À débit imposé, une résistance triple. Que deviennent pression et puissance ?
6. Une compliance de 2 mL/kPa reçoit 0,4 mL net. Variation de pression dans le modèle linéaire ?

Corrections argumentées

1. Elle double, car R est proportionnelle à L sous les mêmes hypothèses. Reynolds ne change pas si Q et r restent constants, mais les effets d'entrée relatifs peuvent changer.
2. $R_{\text{totale}} = 2R$; la même quantité de liquide traverse successivement les deux tubes et les pertes de pression s'additionnent.
3. C'est une relation cinématique de débit. La relation pression-débit exige une description dynamique avec viscosité, géométrie et conditions d'écoulement.
4. La résistance équivalente est divisée par deux, donc le débit total double. Chaque branche porte le débit que portait le conduit initial.
5. La pression triple par $\Delta p = RQ$; la puissance triple par $P = RQ^2$. Le résultat serait différent à pression imposée.



6. $\Delta p = \Delta V / C_h = 0,4/2 = 0,20$ kPa. Le volume net est l'intégrale de la différence entre débit entrant et sortant.

Références et portée

- Source 1 : openstax.org
- Source 2 : openstax.org

Sources consultées le 1er octobre 2026 pour les notions signalées. Développements, situations et calculs pédagogiques OSSIK ; données fictives. La concordance complète avec les supports universitaires de l'année et la relecture scientifique humaine restent à réaliser. Les modèles biomédicaux ne fournissent aucune décision thérapeutique individuelle.

Partie 5 • Thermodynamique et transferts de chaleur

Prérequis et objectifs

Connaître énergie, puissance, proportionnalité et exponentielle. Les températures thermodynamiques sont exprimées en kelvins.

À l'issue de ce cours, vous devez pouvoir :

- Établir un premier principe avec signes cohérents.
- Calculer un échauffement et un changement d'état.
- Relier conduction, convection et rayonnement.

Fondements du thème

Définir le système et les échanges

Un système ouvert échange matière et énergie ; un système fermé échange de l'énergie mais pas de matière ; un système isolé n'échange ni l'une ni l'autre. La température décrit un état thermique, tandis que la chaleur est une énergie transférée sous l'effet d'une différence de température. Un corps ne « contient » pas une quantité de chaleur au même sens qu'il possède une énergie interne.

Avec la convention des échanges reçus positifs, le premier principe s'écrit $\Delta U = Q + W$. Le travail reçu lors d'une compression quasi statique est $W = -\int p_{\text{ext}} dV$: si le volume diminue, ce travail est positif. D'autres ouvrages prennent le travail fourni positif et écrivent $\Delta U = Q - W_{\text{fourni}}$; les deux écritures sont compatibles si les définitions sont cohérentes.

Pour un gaz parfait, $pV = nRT$ avec T en kelvins et p absolue. Une transformation isotherme conserve T ; une transformation isobare conserve p ; une transformation isochore conserve V ; une transformation adiabatique signifie $Q = 0$. Adiabatique ne signifie pas isotherme : une détente adiabatique peut refroidir le gaz. L'enthalpie $H = U + pV$ facilite les bilans à pression constante quand seul le travail de pression intervient.

Chaleur sensible, changement d'état et irréversibilité

Sans changement d'état et pour une capacité thermique massique c approximativement constante, $Q = mc\Delta T$. Durant un changement d'état à la pression appropriée, $Q = mL$ peut être échangé sans variation de température. L'évaporation prélève ainsi de l'énergie. Le second principe introduit l'entropie : l'entropie d'un système isolé ne diminue pas. Il indique le sens des transformations spontanées, que la conservation de l'énergie ne fixe pas à elle seule.

La conduction transfère l'énergie à travers un milieu sans déplacement macroscopique global de matière. La convection implique un mouvement du fluide. Le rayonnement électromagnétique permet un transfert dans le vide. Pour un échange radiatif net avec un environnement uniforme, le modèle gris donne $P = \epsilon \sigma S(T^4 - T_{\text{env}}^4)$, avec températures absolues. La surface, l'émissivité et la température de l'environnement comptent autant que la température de l'objet.

Développements et raisonnements

Une convention de signe constitue une partie du modèle

Pour un système fermé, adoptons $\Delta U = Q + W$, où Q et W sont positifs lorsqu'ils sont reçus. Une compression par l'extérieur fournit un travail positif au gaz. Lors d'une expansion contre une pression extérieure constante, $W = -p_{\text{ext}} \Delta V$. Une autre convention existe avec le travail fourni par le système ; l'important est de ne pas passer de l'une à l'autre au milieu du bilan.

Pour un gaz parfait, l'énergie interne dépend de la température dans le modèle choisi. Lors d'une expansion isotherme, $\Delta U = 0$, mais Q et W ne sont pas forcément nuls : ils se compensent. Une transformation adiabatique impose $Q = 0$; elle n'impose pas une température constante. Une paroi isolante empêche l'échange thermique, mais ne bloque pas nécessairement le travail mécanique.

Du stockage thermique à la résistance thermique

La capacité thermique $C_{\text{th}} = mc$ relie une petite variation de température à une énergie stockée : $dU = C_{\text{th}} dT$ lorsque les autres contributions sont négligées. Pour une couche plane homogène, la conduction stationnaire donne $P = \lambda S(T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}})/e$. On définit $R_{\text{th}} = e/(\lambda S)$, en K/W. Des couches traversées par le même flux thermique en série additionnent leurs résistances.

La convection peut être représentée par $P = hS(T_{\text{surface}} - T_{\text{fluide}})$, avec h dépendant des conditions d'écoulement. Ce coefficient n'est pas une constante intrinsèque du solide. Le rayonnement net vers un grand environnement idéal s'écrit $\epsilon \sigma S(T_{\text{surface}}^4 - T_{\text{env}}^4)$. Les températures absolues sont indispensables : remplacer les kelvins par des degrés Celsius dans la puissance quatrième rend le calcul dépourvu de sens.

Pourquoi la chaleur latente change le raisonnement

À pression donnée, un corps pur peut absorber de l'énergie pendant un changement d'état sans que sa température augmente. La relation $Q = mc\Delta T$ ne décrit alors que les portions sans changement de phase. Il faut ajouter mL pour la masse réellement transformée. Un mélange de phases n'est pas forcément homogène et les pertes vers l'environnement peuvent empêcher le bilan adiabatique simple.

Transformation ou transfert	Condition du modèle	Relation utile
Chauffage sans changement d'état	c approximativement constant	$Q = mc\Delta T$
Fusion à l'équilibre	Température de fusion fixée	$Q = mL$
Conduction plane stationnaire	λ , S et e connus	$P = \Delta T/R_{\text{th}}$
Refroidissement global	Température interne uniforme	Excès thermique exponentiel

L'entropie sert à discuter le sens des transformations. Une énergie conservée ne garantit pas qu'un processus soit réversible. Un transfert spontané de chaleur entre deux corps à températures différentes crée de l'entropie ; inverser ce transfert nécessite un dispositif et du travail.



Atelier de calcul et analyse de sensibilité

On mélange 0,10 kg d'eau à 60 °C et 0,20 kg d'eau à 20 °C dans un récipient d'abord supposé sans capacité thermique, isolé de l'extérieur. Les masses ont la même capacité thermique massique. Le bilan est $0,10c(T_f - 60) + 0,20c(T_f - 20) = 0$, donc $T_f = 33,33$ °C. Ce n'est pas la moyenne arithmétique 40 °C, car les masses diffèrent. L'eau chaude cède environ 11,15 kJ si $c = 4180$ J/kg/K ; l'eau froide reçoit la même quantité.

Si le récipient possède une capacité thermique de 100 J/K et commence à 20 °C, il reçoit lui aussi de l'énergie. Le bilan devient $418(T_f - 60) + 836(T_f - 20) + 100(T_f - 20) = 0$. On trouve $T_f = 32,35$ °C. Le résultat se rapproche de la température initiale de la plus grande capacité froide, ce qui fournit un contrôle du sens de variation.

Une paroi de surface 0,020 m², d'épaisseur 0,010 m et de conductivité 0,20 W/m/K possède $R_{th} = 2,5$ K/W. Une différence de 20 K conduit à 8 W en régime stationnaire. Doubler l'épaisseur réduit ce débit énergétique à 4 W ; cela ne divise pas la quantité totale d'énergie par deux indépendamment du temps. Sur cinq minutes à flux constant de 8 W, l'énergie transférée est 2400 J. Le régime stationnaire suppose ici que les températures des deux faces restent imposées.

Approfondissement et contrôle du modèle

Refroidissement exponentiel d'un objet uniforme

Si un objet de capacité thermique C_{th} échange une puissance $hS(T - T_{ext})$ avec un environnement de température constante, son bilan donne $C_{th} dT/dt = -hS(T - T_{ext})$. L'excès de température décroît donc exponentiellement avec une constante de temps $C_{th}/(hS)$. Une capacité plus grande ralentit l'évolution ; un échange plus efficace l'accélère. La température finale reste celle de l'environnement dans ce modèle.

Cette description suppose que la température soit presque uniforme à l'intérieur de l'objet. Si le centre et la surface diffèrent fortement, un unique nombre T ne suffit plus et la conduction interne doit être décrite. La constante h peut aussi varier avec l'écoulement ou l'orientation. Une droite observée sur un tracé logarithmique de l'excès de température soutient le modèle sur la période étudiée, mais ne garantit pas sa validité pour une autre taille ou un autre milieu. L'expérience doit conserver les mêmes conditions aux frontières.

Mise à l'épreuve : Conservation de l'énergie, température finale et irréversibilité

Problème. Deux masses d'eau de 0,10 kg, initialement à 20 °C et 80 °C, sont mélangées dans une enceinte isolée. Prendre la même capacité thermique massique constante $c = 4180$ J·kg⁻¹·K⁻¹, sans changement d'état ni capacité du récipient. Prévoir la température finale.

Résolution. Le bilan $0,10c(T_f - 20) + 0,10c(T_f - 80) = 0$ donne $T_f = 50$ °C. L'énergie totale est conservée. Pourtant, l'entropie totale augmente : $\Delta S = 0,10c \ln(323,15/293,15) + 0,10c \ln(323,15/353,15)$, soit environ 3,62 J/K. Les logarithmes utilisent des kelvins et des rapports sans dimension. Les contributions individuelles ont des signes opposés, mais leur somme est positive. Le mélange ne revient donc pas spontanément aux deux températures initiales par simple conservation d'énergie. Une enceinte isolée peut subir une transformation irréversible.



Résistances thermiques et uniformité de température

Retrouver une résistance à partir de Fourier

Pour une paroi plane homogène d'épaisseur e et de surface S , en régime stationnaire unidimensionnel, le débit thermique vaut $P = \lambda S(T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}})/e$. On définit $R_{\text{th}} = e/(\lambda S)$, en K/W. Le coefficient λ est une conductivité thermique, non une constante de décroissance. Une grande résistance diminue le débit pour une même différence de température.

Deux couches en série traversées par le même débit ont $R_{\text{total}} = R_1 + R_2$. La chute de température de chaque couche est PR_i . La somme des températures absolues n'intervient jamais dans cette association ; ce sont les différences qui se répartissent. Des chemins en parallèle additionnent au contraire leurs conductances si les températures aux extrémités sont communes.

Exercice de construction

Deux couches ont la même surface de $0,010 \text{ m}^2$. La première a $e_1 = 2 \text{ mm}$ et $\lambda_1 = 0,20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; la seconde $e_2 = 1 \text{ mm}$ et $\lambda_2 = 0,50$. Les faces extérieures diffèrent de 12 K . Calculer les résistances et le débit, puis les chutes internes.

Correction. $R_1 = 0,002/(0,20 \times 0,010) = 1 \text{ K/W}$; $R_2 = 0,001/(0,50 \times 0,010) = 0,20 \text{ K/W}$. $P = 12/1,20 = 10 \text{ W}$. Les chutes sont 10 K et 2 K , dont la somme retrouve 12 K . Les interfaces sont supposées parfaites ; une résistance de contact devrait être ajoutée si elle n'est pas négligeable.

Pourquoi le refroidissement exponentiel peut échouer

Le modèle à température uniforme suppose que la conduction interne redistribue rapidement la chaleur par rapport à l'échange avec l'extérieur. Le nombre de Biot $Bi = hL_c/\lambda$ compare ces résistances, avec $L_c = \text{volume}/\text{surface d'échange}$ pour un objet dont toutes les faces pertinentes échangent. Un Bi très petit soutient l'approximation uniforme ; une règle indicative telle que $Bi < 0,1$ n'est pas une preuve pour toute géométrie ou précision demandée.

Exercice de limite. Pour une sphère de rayon 3 mm , $L_c = r/3 = 1 \text{ mm}$. Avec $h = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ et $\lambda = 0,50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $Bi = 0,04$. Si le rayon est multiplié par dix à matériaux et échange identiques, $Bi = 0,4$; les gradients internes deviennent plus difficiles à négliger. Utiliser la même exponentielle sans réexaminer cette hypothèse ferait passer une approximation d'échelle pour une loi universelle.



Schéma de raisonnement

Bilan thermique

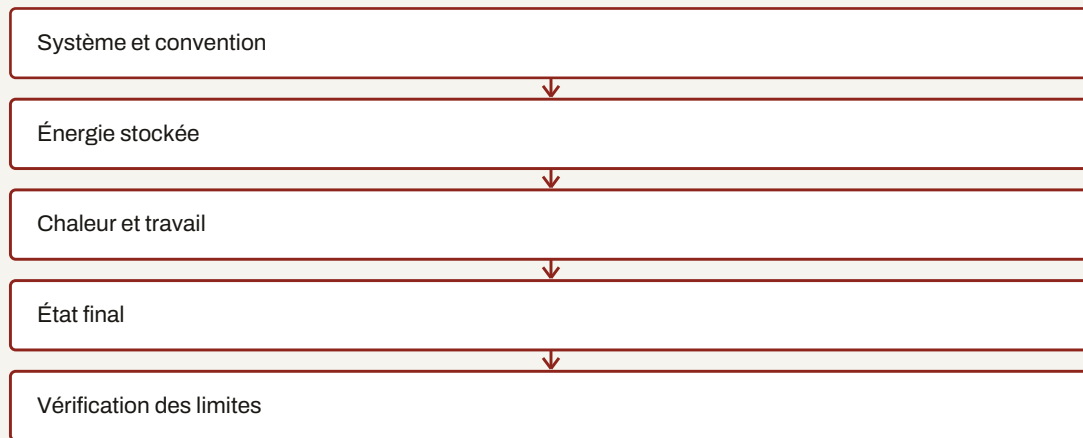


Schéma de principe original • lire les conditions et limites dans le texte

Le schéma relie un bilan à un état final. Il ne précise pas la vitesse d'atteinte de cet état, qui nécessite un modèle des échanges.

Exercices progressifs

1. Chauffer 0,20 kg d'eau de 5 °C avec $c = 4180 \text{ J/kg/K}$.
2. $Q = 100 \text{ J}$ et travail fourni = 40 J : variation d'énergie interne ?
3. À quantité et volume fixes, T absolue double.
4. Un système reçoit 400 J de chaleur et fournit 150 J de travail. Variation d'énergie interne ?
5. Quelle énergie fond 20 g de glace déjà à sa température de fusion si $L = 334 \text{ kJ/kg}$?
6. Pourquoi une expansion adiabatique n'est-elle pas nécessairement isotherme ?

Corrections argumentées

1. $Q = 4180 \text{ J}$. Une différence de 5°C vaut une différence de 5 K .
2. $\Delta U = 60 \text{ J}$; le travail reçu vaut -40 J .
3. La pression absolue double pour un gaz parfait. Doubler la valeur en degrés Celsius ne permet pas cette conclusion.
4. $\Delta U = 400 - 150 = 250 \text{ J}$ avec les énergies reçues positives. Le travail fourni est négatif dans cette convention.
5. $Q = 0,020 \times 334000 = 6680 \text{ J}$. Il faut ajouter un échauffement préalable si la glace commence sous sa température de fusion.
6. Q est nul mais le gaz peut fournir du travail. Son énergie interne diminue alors et sa température peut baisser ; les deux contraintes portent sur des propriétés différentes.

Références et portée

- Source 1 : openstax.org
- Source 2 : openstax.org

Sources consultées le 1er octobre 2026 pour les notions signalées. Développements, situations et calculs pédagogiques OSSIK ; données fictives. La concordance complète avec les supports universitaires de l'année et la relecture scientifique humaine restent à réaliser. Les modèles biomédicaux ne fournissent aucune décision thérapeutique individuelle.