

Chapitre 1

Système thermodynamique et premier principe



James Prescott Joule, 1818-1889

EPFL

1.1 Introduction

- 1.1.1 Cours
- 1.1.2 Exercices
- 1.1.3 Livres de cours
- 1.1.4 Chapitres
- 1.1.5 Mécanique et thermodynamique
- 1.1.6 Principes et lois
- 1.1.7 Citations
- 1.1.8 Expériences

1.2 Système thermodynamique

- 1.2.1 Caractérisation d'un système
- 1.2.2 Paroi d'un système

1.3 Etat, variable et fonctions d'état

- 1.3.1 Dérivées partielles d'une fonction
- 1.3.1 Dérivées partielles d'une fonction
- 1.3.2 Différentielle d'une fonction
- 1.3.3 Dérivée temporelle d'une fonction

1.4 Processus et changement d'état

1.4.1 Processus et changement d'état

1.5 Grandeurs extensive et intensive

1.5.1 Grandeur extensive

1.5.2 Grandeur densitaire

1.5.3 Grandeur intensive

1.5.4 Autre grandeur

1.5.5 Homogénéité et uniformité

1.6 Equation de bilan

1.7 Premier principe de la thermodynamique

1.7.1 Processus, système, courants et puissance

1.7.2 Premier principe - translation

1.7.3 Premier principe - rotation

1.8 Thermodynamique et mécanique

1.8.1 Système indéformable, fermé, diatherme

1.8.2 Variables d'état extensives

1.8.3 Energie

1.9 Energie interne

- 1.9.1 Bilan d'énergie interne
- 1.9.2 Travail, chaleur et apport énergétique de matière
- 1.9.3 Fonction d'état et autre fonction
- 1.9.4 Dérivée temporelle de l'énergie interne

1.10 Energie

- 1.10.1 Premier principe

1.11 Applications

- 1.11.1 Oscillateur harmonique amorti
- 1.11.2 Gaz et piston
- 1.11.3 Air et ventilateur
- 1.11.4 Questions

1.1 Introduction

- 1.1.1 Cours
- 1.1.2 Exercices
- 1.1.3 Livres de cours
- 1.1.4 Chapitres
- 1.1.5 Mécanique et thermodynamique
- 1.1.6 Principes et lois
- 1.1.7 Citations
- 1.1.8 Expériences

- **Moodle** : PHYS-106(d)

<https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=15831>

- **Cours** : auditoire CE1 6

① **Lundi : 15h15-17h**

② **Mercredi : 10h15-12h**

Les sections traitées dans chaque cours sont répertoriées dans le “calendrier de cours”.

- **Notes de cours** :

① **Sans équation** : pdf à remplir

② **Avec équations** : pdf complets (à la fin de chaque chapitre)

- **Exercices** : salles CM1 120, CM1 121, CM1 106, CM0 10, CM0 9

- **Lundi : 17h15-19h**

Les exercices traités durant une session d'exercices figurent dans le "calendrier d'exercices". Ces exercices sont tirés du livre.

- **Encadrement** : une équipe d'assistants étudiants motivés seront présents pour vous guider dans la résolution des exercices sous la direction de l'assistant principal : **Bastian Lengen**.
- **Classification** : quatre niveaux de difficulté

① Facile 

② Moyen 

③ Difficile 

④ Expert 

- **Ed Discussion** : forum - cours et exercices

Vous êtes encouragés à poser vos questions. Les assistants répondront à vos questions et vous pouvez aussi répondre aux questions d'autres étudiants. C'est votre forum !

- **Exercices à rendre** : les deux exercices à rendre doivent être remis aux assistants sous forme papier durant les séances d'exercices.
 - ① **Lundi : 31 mars**
 - ② **Lundi : 5 mai**
- **Enoncés** : les énoncés seront disponibles sur moodle une semaine avant la date mentionnée ci-dessus pour que vous puissiez les imprimer et faire les exercices par vous-même.
- **Correction** : les copies remises aux assistants seront rendues corrigées une semaine plus tard et le corrigé sera alors disponible sur moodle.
- **Format** : ces exercices sont tirés d'anciens problèmes d'examen et leur format sera celui de l'examen.
- **Philosophie** : la correction est purement qualitative. Il n'y aura pas d'évaluation ou de note.

- **Livres de cours** : français et anglais

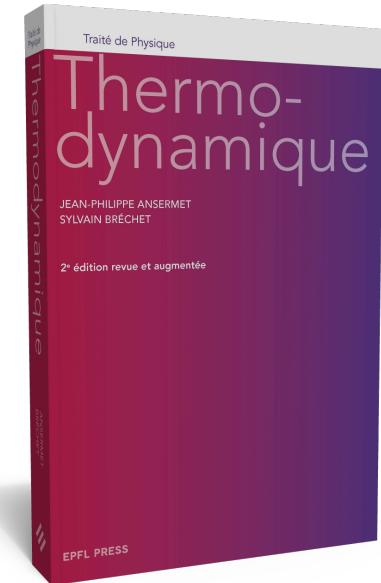
① Thermodynamique

J.-Ph. Ansermet, S. Bréchet

EPFL Press

3^e édition 2024 (édition de poche)

2 volumes : théorie et exercices



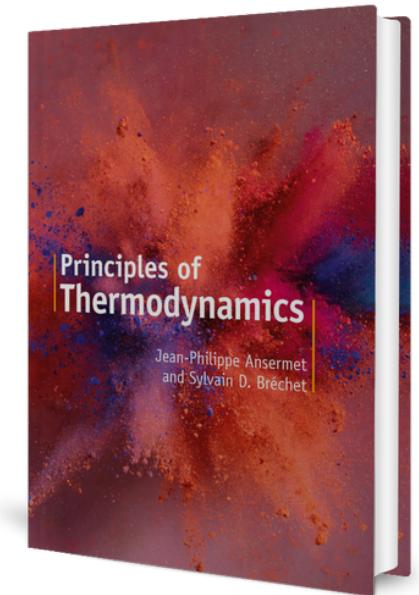
② Principles of thermodynamics

J.-Ph. Ansermet, S. D. Bréchet

Cambridge University Press

1^{ère} édition 2019 (édition brochée)

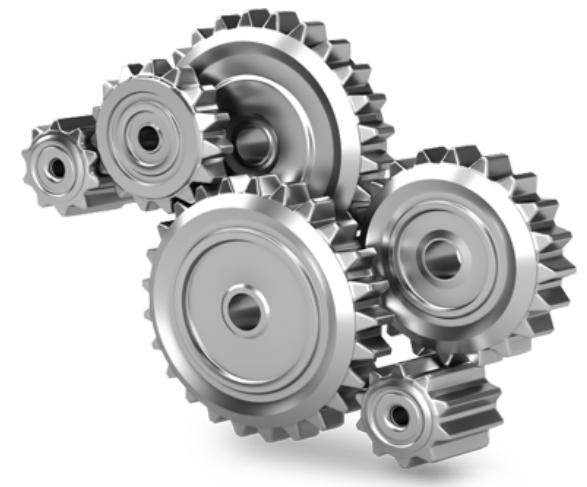
1 volume



- ① **Système thermodynamique et premier principe**
- ② **Entropie et deuxième principe**
- ③ **Thermodynamique de sous-systèmes simples**
- ④ **Potentiels thermodynamiques**
- ⑤ **Calorimétrie**
- ⑥ **Transitions de phases**
- ⑦ **Machines thermiques**
- ⑧ **Chimie et électrochimie**
- ⑨ **Thermodynamique statistique**
- ⑩ **Matière et champs électromagnétiques (pas abordé en cours)**
- ⑪ **Thermodynamique des milieux continus**
- ⑫ **Thermodynamique des processus irréversibles**

① Mécanique : dynamique d'un solide indéformable

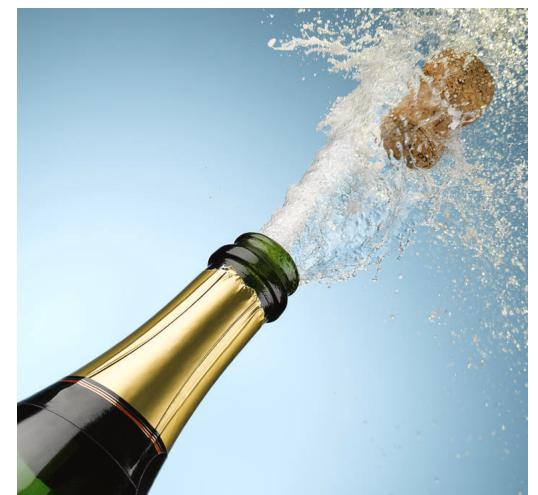
- **Objet d'étude** : solide en translation et rotation sans déformation
- **Processus** : mécaniques (forces et moments de forces extérieurs)
- **Evolution temporelle** : due aux processus dynamiques (mécaniques)



Mécanique

② Thermodynamique : extension de la mécanique

- **Objets d'étude** : solide, liquide ou gaz en translation et rotation avec déformation
- **Processus** : mécaniques (forces et moments de forces extérieurs, déformation), thermiques (échanges de chaleur), chimiques (échanges de matière).
- **Evolution temporelle** : due aux processus thermodynamiques (mécaniques, thermiques, chimiques et électrodynamiques)



Thermodynamique

- **Physique** : description de phénomènes naturels - structure hiérarchique
 - **1 Principes** : niveaux de description fondamentaux - cadre conceptuel
 - Premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie)
 - Deuxième principe de la thermodynamique (causalité)
 - **2 Lois** : niveaux de description particuliers - soumis aux principes
 - Lois du mouvement (mécanique)
 - Loi d'Ohm (électricité)
 - Loi de Fourier (chaleur)
- **Mécanique** : définie par des lois soumises au cadre conceptuel des principes fondamentaux de la thermodynamique
- **Thermodynamique** : cadre conceptuel fondamental de la physique classique que doivent satisfaire les théories classiques définies par des lois :
 - Mécanique classique
 - Mécanique des fluides
 - Chimie et électrochimie classique
 - Electrodynamique classique
 - Elasticité

Arnold Sommerfeld (1868 - 1951)



La thermodynamique est un sujet curieux. La première fois qu'on l'aborde, on ne le comprend pas du tout. La deuxième fois, on pense qu'on le comprend, sauf l'un ou l'autre point. La troisième fois, on sait qu'on ne le comprend pas, mais à ce stade on y est tellement habitué qu'on ne s'en préoccupe plus.

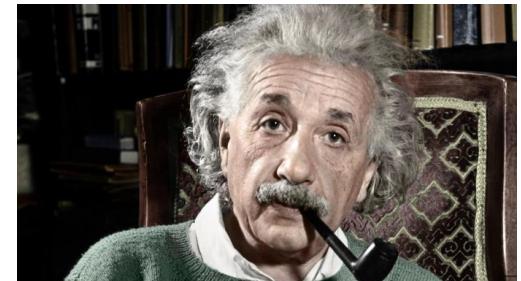


Arnold
Sommerfeld

Albert Einstein (1879 - 1953)



Une théorie est d'autant plus impressionnante que ses prémisses sont simples, qu'elle met en rapport des choses aussi variées que possible, et que son domaine d'application est vaste. C'est ainsi que je suis très impressionné par la thermodynamique. C'est la seule théorie d'un contenu si universel que, j'en suis convaincu, elle ne sera jamais mise en défaut dans le cadre de l'applicabilité de ses concepts élémentaires.



Albert
Einstein

1 Importance historique :

démontrer les phénomènes physiques

2 Importance symbolique :

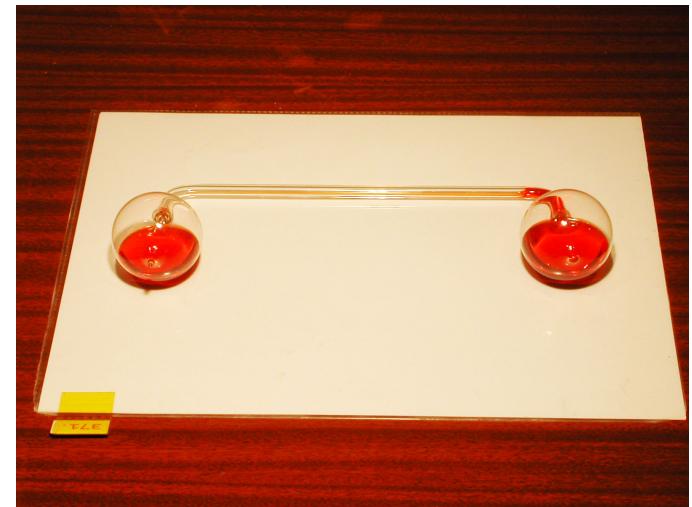
rester dans l'interrogation de la nature

3 Importance méthodologique :

repérer le passage du réel au modèle

4 Importance didactique :

lien entre enseignement et vie quotidienne,
curiosité scientifique



Thermomètre des “amoureux”

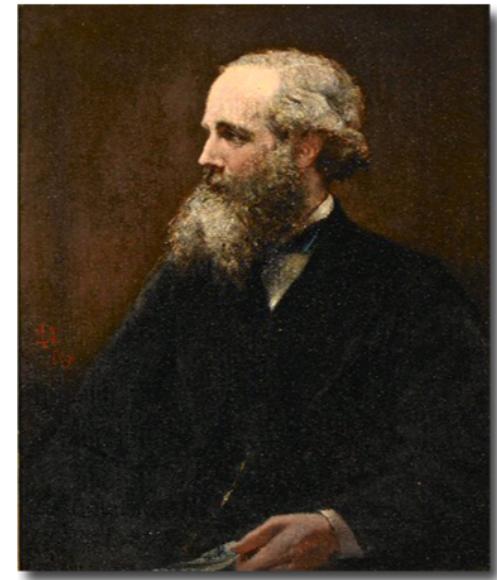


Boucle de Seebeck

James Clerk Maxwell (1831 - 1879)



Je n'ai pas de raison de penser que l'intelligence humaine soit capable de conceptualiser les lois physiques en se basant uniquement sur ses propres ressources sans faire appel aux résultats expérimentaux. De telles tentatives se sont toujours soldées par des théories artificielles et pleines de contradictions.



James Clerk
Maxwell

Richard Feynman (1918 - 1988)



Peu importe la beauté de votre théorie, peu importe votre intelligence, peu importe si vous êtes célèbre. . . Si votre théorie n'est pas en accord avec l'expérience, elle est fausse, un point c'est tout !



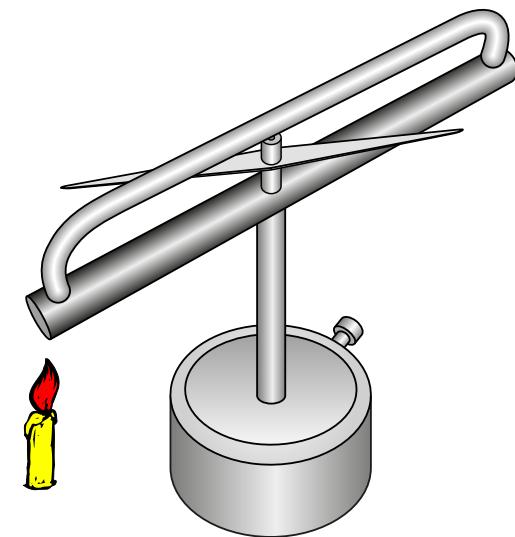
Richard
Feynman



- Le thermomètre est constitué de deux récipients sphériques en verre liés par un tube en verre contenant un liquide (alcool).
- ① En échauffant la paroi en verre d'une sphère par contact thermique avec une main, on échauffe le gaz à l'intérieur de la sphère ce qui repousse le liquide vers l'autre sphère.
- ② En versant un liquide très volatile sur la paroi d'une sphère, l'évaporation du liquide refroidit le gaz à l'intérieur de la sphère par contact thermique ce qui attire le liquide de l'autre sphère.



- L'oiseau est constitué de deux récipients sphériques en verre liés par un tube en verre contenant un liquide (alcool) qui peut basculer.
- ① Lorsque le bec de l'oiseau est en contact thermique avec l'eau, le feutre s'imbibe d'eau et sa température augmente brusquement. La dilatation de l'air au sommet du tube provoque alors la descente rapide du liquide dans le tube. Cela donne lieu au basculement de l'oiseau en position verticale par déplacement du centre de gravité en dessous de l'axe horizontal.
- ② L'évaporation de l'eau requiert un apport de chaleur qui refroidit le bec de l'oiseau. La contraction de l'air au sommet du tube provoque alors la montée progressive du liquide dans le tube. Cela donne lieu au basculement de l'oiseau en position horizontale par déplacement du centre de gravité en dessus de l'axe horizontal. Et le cycle recommence...



- Une aiguille métallique aimantée (boussole) montée dans un cadre constitué de deux métaux différents formant une boucle verticale peut osciller horizontalement. Initialement, elle pointe vers le nord.
- En chauffant une jonction et en maintenant l'autre jonction à température ambiante, on constate que l'aiguille est déviée.
- La tension générée par effet Seebeck (thermoélectricité) à la jonction chaude permet la circulation d'un courant électrique dans le circuit. La circulation de ce courant génère un champ magnétique qui dévie l'aiguille métallique aimantée.



- On remplit un récipient en verre à moitié d'eau. On fait bouillir l'eau avec un béc bunsen. L'eau se transforme en vapeur d'eau et expulse l'air dans la moitié supérieure du récipient. On ferme le récipient avec un bouchon et on le retire du feu.
- On verse alors de l'eau froide sur le récipient en verre. Par contact thermique, la vapeur d'eau dans le récipient se condense et se transforme en grande partie en eau liquide ce qui provoque une grande diminution de sa pression.
- L'abaissement important de la pression de la vapeur d'eau diminue la température d'ébullition de l'eau. Ainsi, l'eau se remet à bouillir bien que sa température soit bien inférieure à 100°C.

1.2 Système thermodynamique

1.2.1 Caractérisation d'un système

1.2.2 Paroi d'un système

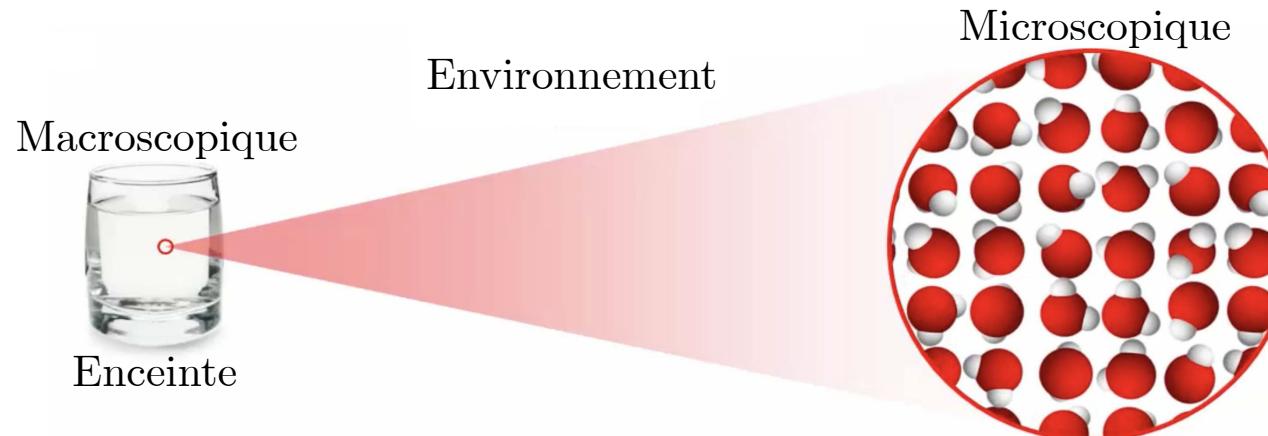
- **Système thermodynamique** : matière et rayonnement contenue dans une région de l'espace délimitée de l'environnement par une **enceinte**.

① **Microscopique** : le système est constitué de constituants élémentaires.

- Matière : atomes, molécules, électrons et ions
- Rayonnement : photons

② **Macroscopique** : le système est un continuum de matière où les constituants élémentaires sont indiscernables.

- Milieu continu



- **Description thermodynamique** : on décrit un système thermodynamique à l'échelle macroscopique comme un milieu continu.

- **Caractérisation** : la nature d'un système thermodynamique est définie par son interaction avec l'environnement à travers son enceinte.
 - ① **Ouvert** : si son enceinte permet un échange de matière avec l'environnement
 - ② **Fermé** : si son enceinte ne permet pas un échange de matière avec l'environnement
 - ③ **Diatherme** : si son enceinte permet un échange de chaleur avec l'environnement
 - ④ **Adiabatiquement fermé** : si son enceinte ne permet pas d'échange de chaleur et de matière avec l'environnement
 - ⑤ **Déformable** : si son enceinte permet une déformation effectuée par l'environnement qui ne modifie pas l'état de mouvement du système
 - ⑥ **Rigide** : si son enceinte ne permet pas de déformation effectuée par l'environnement qui ne modifie pas l'état de mouvement du système
 - ⑦ **Isolé** : si son enceinte ne permet pas d'interaction avec l'environnement

- **Paroi** : un système thermodynamique est séparé de son environnement par une enceinte composée d'une (ou plusieurs) paroi définie par ses propriétés :
 - 1 **Mobile** : si elle peut se déplacer
 - 2 **Fixe** : si elle ne peut pas se déplacer
 - 3 **Perméable** : si elle permet l'échange de matière avec l'environnement
 - 4 **Imperméable** : si elle ne permet l'échange de matière avec l'environnement
 - 5 **Diatherme** : si elle permet l'échange de chaleur avec l'environnement
 - 6 **Adiabatique** : si elle ne permet pas l'échange de chaleur avec l'environnement.

1.3 Etat, variable et fonctions d'état

- 1.3.1 Dérivées partielles d'une fonction
- 1.3.1 Dérivées partielles d'une fonction
- 1.3.2 Différentielle d'une fonction
- 1.3.3 Dérivée temporelle d'une fonction

- **Etat** : l'état d'un système est caractérisé par ses propriétés physiques, qui sont décrites par un ensemble de variables d'état. L'état est entièrement spécifié par les valeurs de ces variables d'état et ne dépend pas de l'histoire du système.
- **Variables d'état** : l'ensemble de ces variables d'état s'écrit de forme générique,

$$\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \dots\}$$

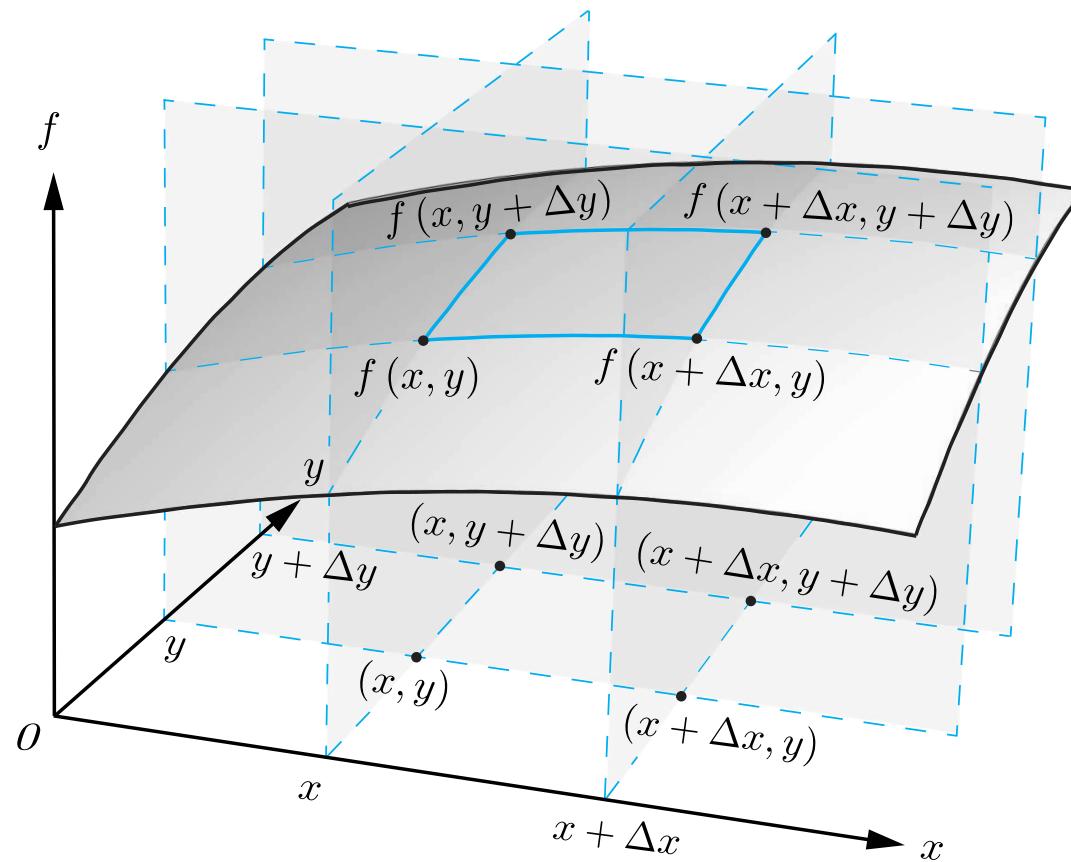
- **Fonction d'état** : une fonction d'état est une propriété physique qui dépend seulement de l'état du système. Une fonction d'état est donc une fonction des variables d'état du système,

$$F(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \dots)$$

- **Variable comme fonction d'état** : une variable d'état est une fonction d'état triviale.

- **Dérivées partielles** : d'une fonction $f(x, y)$ de deux variables x et y

(1.1)



- **Dérivées partielles** : d'une fonction $f(x, y)$ de deux variables x et y

$$\begin{aligned}\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} &\equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} &\equiv \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y}\end{aligned}\tag{1.1}$$

- **Calcul** : on fait varier une variable et on maintient l'autre constante.
- **Exemple** : fonction $f(x, y) = x^2 + 3xy$
- **Généralisation** : fonction de n variables $f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$

(1.2)

- **Variation** : de la fonction $f(x, y)$ de (x, y) à $(x + \Delta x, y + \Delta y)$

(1.3)

- **Développement mathématique** :

(1.4)

- **Différentielle** : de la fonction $f(x, y)$

(1.5)

- **Différentielle** : de la fonction $f(x, y)$

$$df(x, y) \equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y + \Delta y) - f(x, y + \Delta y)}{\Delta x} \Delta x + \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y} \Delta y \quad (1.5)$$

- **Limites** :

(1.6)

- **Différentielle** : de la fonction $f(x, y)$ (1.6) dans (1.5)

(1.7)

- **Dérivées partielles** : de la fonction $f(x, y)$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} \equiv \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} \quad (1.1)$$
$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \equiv \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{f(x, y + \Delta y) - f(x, y)}{\Delta y}$$

- **Différentielle** : de la fonction $f(x, y)$: (1.1) dans (1.7)

(1.8)

- **Généralisation** : fonction de n variables $f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$

(1.9)

- **Dérivée temporelle** : de la fonction $f(x, y) \equiv f(x(t), y(t))$

(1.10)

où $\dot{f}(x, y) \equiv \frac{df(x, y)}{dt}$ $\dot{x} \equiv \frac{dx}{dt}$ $\dot{y} \equiv \frac{dy}{dt}$

- **Généralisation** : fonction de n variables $f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$

(1.11)

1.4 Processus et changement d'état

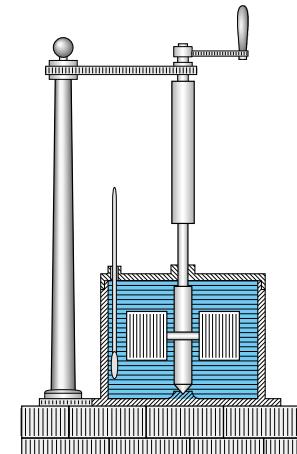
1.4.1 Processus et changement d'état

- **Processus** : un système thermodynamique peut interagir avec l'environnement au travers de processus qui changent son état.

- ① **Mécanique** : déformation
- ② **Thermique** : transfert de chaleur
- ③ **Chimique** : transfert de matière

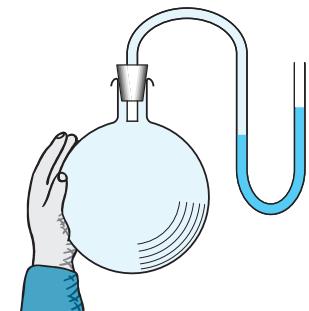
- **Changement d'état** : un processus quelconque peut donner lieu à un changement d'état de même nature ou d'une autre nature.

- ① **Calorimètre de Joule** :
déformation → changement d'état thermique



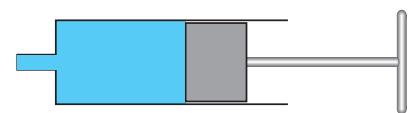
Calorimètre de Joule

- ② **Ballon de gaz** :
transfert de chaleur → changement d'état mécanique

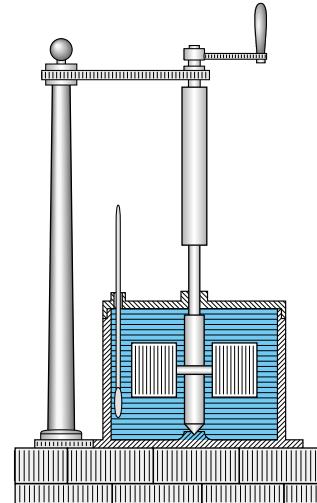
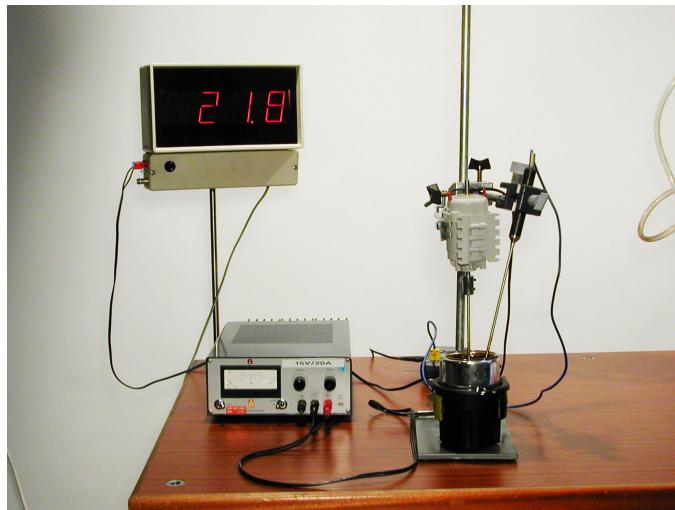


Ballon de gaz

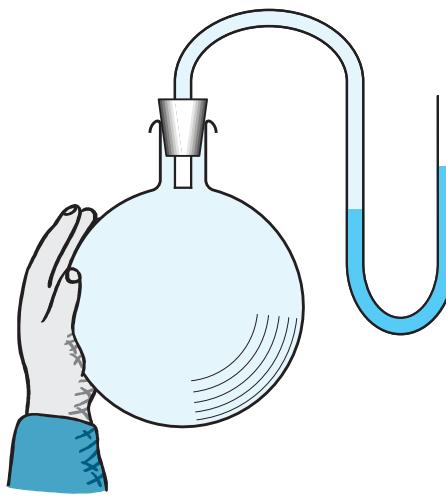
- ③ **Seringue de liquide** :
déformation → changement d'état chimique



Seringue de liquide



- Le travail effectué en tournant la manivelle est dissipé sous forme de chaleur par frottement visqueux entre les pales et le liquide. Cela conduit à un accroissement de la température.
- Le brassage (déformation) effectué sur le liquide donne lieu à un changement d'état de nature thermique (accroissement de la température).
- Cette expérience historique de Joule montre l'équivalence énergétique entre le travail et la chaleur. Elle est à la base du premier principe de la thermodynamique.

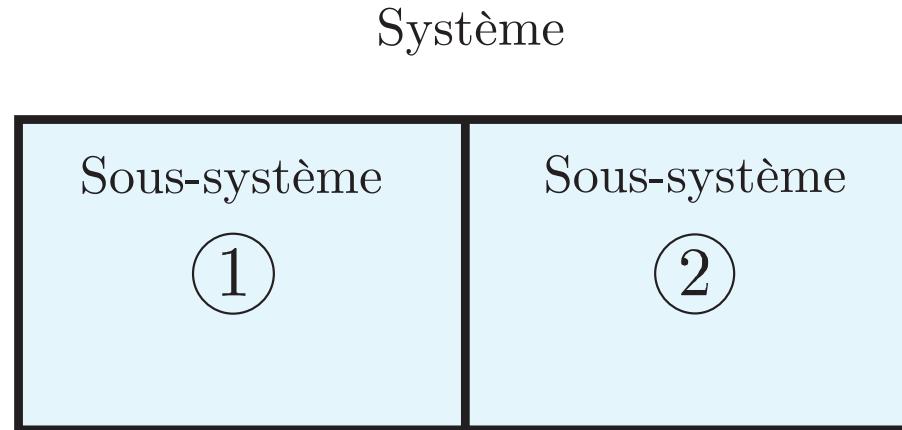


- La chaleur fournie au gaz contenu dans un ballon par contact avec une main provoque la dilatation du gaz dans le ballon. Cette dilatation (déformation) donne lieu à un accroissement de pression qui déplace le niveau du liquide dans le tube en U qui est relié au ballon.
- Le transfert de chaleur (contact avec une main) au gaz donne lieu à un changement d'état de nature mécanique (déplacement du niveau de l'eau dans le tube).

1.5 Grandeurs extensive et intensive

- 1.5.1 Grandeur extensive
- 1.5.2 Grandeur densitaire
- 1.5.3 Grandeur intensive
- 1.5.4 Autre grandeur
- 1.5.5 Homogénéité et uniformité

- **Grandeur extensive** : une grandeur est extensive quand sa valeur pour un système thermodynamique composé de plusieurs sous-systèmes thermodynamiques est égale à la somme de ses valeurs pour chaque sous-système (grandeur additive).



- ➊ **Quantité de matière** : $N = N_1 + N_2$
- ➋ **Masse** : $M = M_1 + M_2$
- ➌ **Quantité de mouvement** : $P = P_1 + P_2$
- ➍ **Moment cinétique** : $L = L_1 + L_2$
- ➎ **Energie** : $E = E_1 + E_2$
- ➏ **Volume** : $V = V_1 + V_2$

- **Grandeur densitaire** : une grandeur densitaire (ou extensive réduite) est une grandeur extensive divisée par le volume ou la masse du système.

① **Densité de quantité de matière :**

$$\text{volumique : } n = \frac{N}{V} \quad \text{massique : } n^* = \frac{N}{M}$$

② **Densité de masse :**

$$\text{volumique : } m = \frac{M}{V} \quad \text{massique : } m^* = \frac{M}{M} = 1$$

③ **Densité de quantité de mouvement :**

$$\text{volumique : } p = \frac{P}{V} \quad \text{massique : } p^* = \frac{P}{M}$$

④ **Densité de moment cinétique :**

$$\text{volumique : } l = \frac{L}{V} \quad \text{massique : } l^* = \frac{L}{M}$$

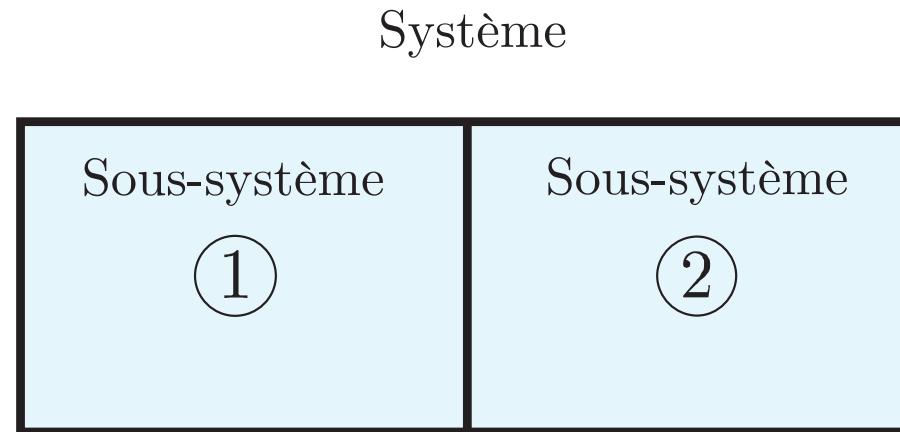
⑤ **Densité d'énergie :**

$$\text{volumique : } e = \frac{E}{V} \quad \text{massique : } e^* = \frac{E}{M}$$

⑥ **Densité de volume :**

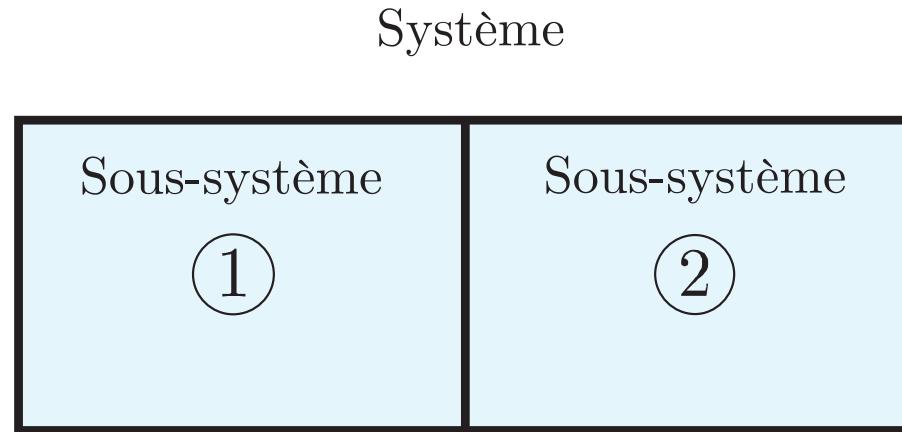
$$\text{volumique : } v = \frac{V}{V} = 1 \quad \text{massique : } v^* = \frac{V}{M}$$

- **Grandeur intensive** : une grandeur est intensive lorsqu'elle est conjuguée à une grandeur extensive, ce qui signifie qu'elle est définie comme la dérivée partielle de l'énergie par rapport à cette grandeur extensive. Une grandeur intensive est indépendante du nombre de sous-systèmes (grandeur non-additive).



- ➊ **Vitesse** : si $v_1 = v_2$ alors $v \equiv v_1 = v_2$
- ➋ **Accélération** : si $a_1 = a_2$ alors $a \equiv a_1 = a_2$
- ➌ **Pression** : si $p_1 = p_2$ alors $p \equiv p_1 = p_2$
- ➍ **Température** : si $T_1 = T_2$ alors $T \equiv T_1 = T_2$

- **Critère d'extensivité** : pour déterminer si une grandeur est extensive ou intensive, on se représente ce qui advient de cette grandeur lorsque la taille du système double. Si la grandeur est extensive, sa valeur double, alors que si elle est intensive, sa valeur reste inchangée.

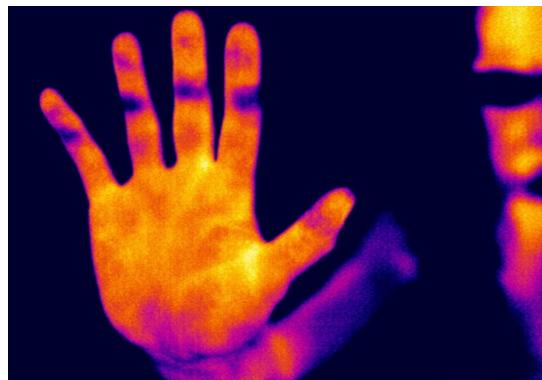


- **Autre grandeur** : il existe des grandeurs qui ne sont ni extensives, ni intensives.

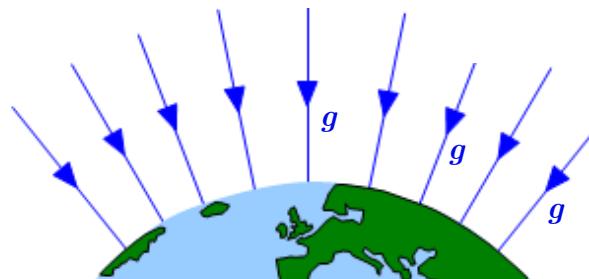
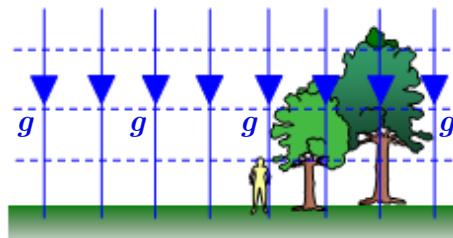
- ① **Source d'entropie** : grandeur définie au chapitre 2

si $\Sigma_{S_1} = \Sigma_{S_2} = 0$ et $\Sigma_S \neq 0$ alors $\Sigma_S \neq \Sigma_{S_1} + \Sigma_{S_2}$

- **Homogénéité** : un système est **homogène** si les fonctions d'état scalaires intensives conjuguées à ses variables d'état scalaires extensives sont indépendantes de la position, ce qui signifie qu'elles ont la même valeur pour tout sous-système.



- **Uniformité** : un système est **uniforme** si les fonctions d'état vectorielles intensives conjuguées à ses variables d'état vectorielles extensives sont indépendantes de la position, ce qui signifie qu'elles ont la même norme et la même orientation pour tout sous-système.

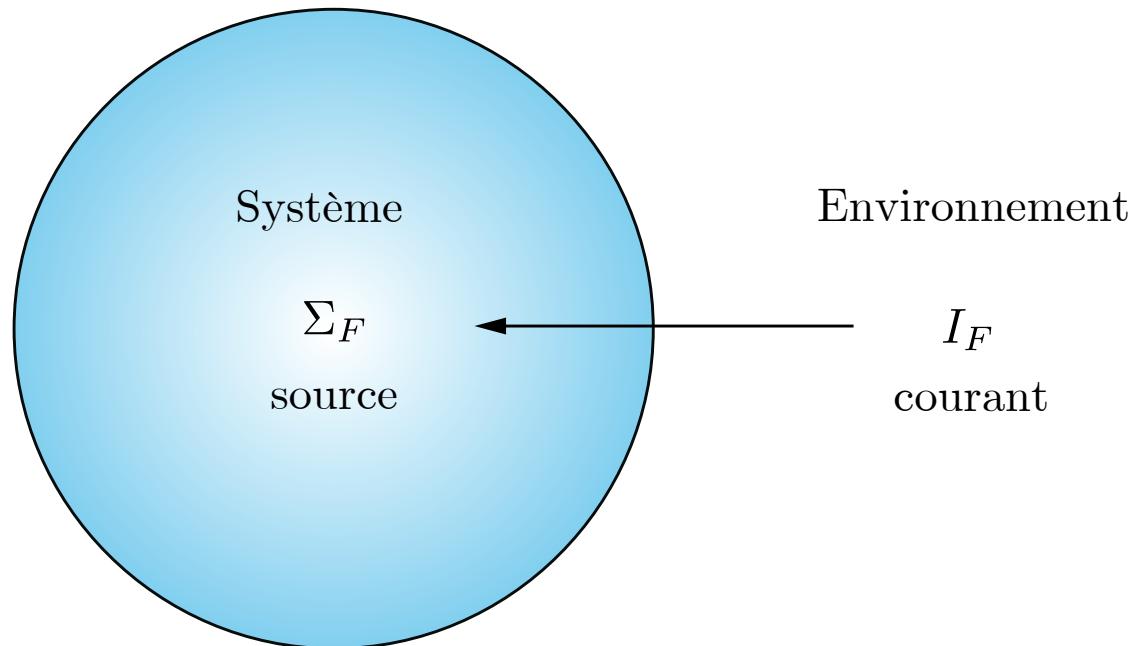


1.6 Equation de bilan

- **Equation de bilan** : cette équation décrit l'évolution d'une fonction d'état extensive F due à deux causes :

(1.12)

- ① **Le courant** I_F décrit le transfert de la fonction d'état F de l'environnement vers le système.
- ② **La source** Σ_F décrit la variation de la fonction d'état F à l'intérieur du système.



1.7 Premier principe de la thermodynamique

- 1.7.1 Processus, système, courants et puissance
- 1.7.2 Premier principe - translation
- 1.7.3 Premier principe - rotation

Pour tout système, il existe une fonction d'état scalaire et extensive E appelée **énergie**. Si le système est isolé, alors l'énergie est conservée.

- **Système isolé** : l'énergie E est constante

(système isolé) (1.13)

- **Système ouvert** : le bilan d'énergie E est (1.12)

(système ouvert) (1.14)

- **Courant d'énergie** : trois processus

(système ouvert) (1.15)

- ① I_Q est le **courant de chaleur** décrivant le **transfert de chaleur** de l'environnement vers le système par conduction et convection.
- ② I_C est le **courant énergétique de matière** décrivant le **transfert de matière** de l'environnement vers le système par convection.
- ③ I_W est le **courant de travail** décrivant la **déformation** du système par l'environnement sans modifier son mouvement (translation et rotation).

- **Source d'énergie** : puissance extérieure

(1.16)

- P^{ext} est la puissance due à l'action des forces extérieures et des moments de forces extérieures sur le mouvement de translation et de rotation du système sans le déformer.
- Unité (SI) : P^{ext} , Σ_E , I_E , I_Q , I_C et I_W : watt [W]
- **Bilan d'énergie** : système ouvert (1.15) et (1.16) dans (1.14)

(système ouvert) (1.17)

- **Bilan d'énergie** : système fermé :

(système fermé) (1.18)

- **Processus :**

- ① **Déformation** : processus qui effectue un travail W .
- ② **Transfert de chaleur** : processus qui échange de la chaleur Q .
- ③ **Transfert de matière** : processus avec apport énergétique de matière C .
- ④ **Transfert de chaleur avec matière** : processus convectif (convection)
- ⑤ **Transfert de chaleur sans matière** : processus conductif (conduction)

- **Système, courants et puissance :**

- ① **Rigide** : pas de déformation : $I_W = 0$
- ② **Déformable** : déformation : $I_W \neq 0$
- ③ **Fermé** : pas de transfert de matière : $I_C = 0$
- ④ **Ouvert** : transfert de matière : $I_C \neq 0$
- ⑤ **Adiabatiquement fermé** : pas de transferts de chaleur et matière :
 $I_Q = I_C = 0$
- ⑥ **Diatherme** : transfert de chaleur : $I_Q \neq 0$
- ⑦ **Isolé** : pas de déformation, pas de transfert de chaleur et matière :
 $P^{\text{ext}} = I_W = I_Q = I_C = 0$

- Le premier principe peut être étendu en y incluant deux lois de conservation liées aux mouvements de translation et de rotation.

Pour tout système, il existe une fonction d'état vectorielle et extensive P appelée quantité de mouvement. Si le système est isolé, alors la quantité de mouvement est conservée.

- Système isolé** : la quantité de mouvement P est constante

(système isolé) (1.19)

- Source de quantité de mouvement** : pas de courant : $I_P = 0$

(1.20)

- Bilan de quantité de mouvement** : théorème du centre de masse

(système en interaction) (1.21)

Pour tout système, il existe une fonction d'état vectorielle et extensive \mathbf{L} appelée moment cinétique. Si le système est isolé, alors le moment cinétique est conservé.

- **Système isolé** : le moment cinétique \mathbf{L} est constant

(système isolé) (1.22)

- **Source de moment cinétique** : pas de courant : $\mathbf{I}_L = \mathbf{0}$

(1.23)

- **Bilan de moment cinétique** : théorème du moment cinétique

(système en interaction) (1.24)

- **Notation** : le moment cinétique \mathbf{L} et les moments de forces extérieures \mathbf{M}^{ext} sont évalués par rapport au centre de masse G du système :

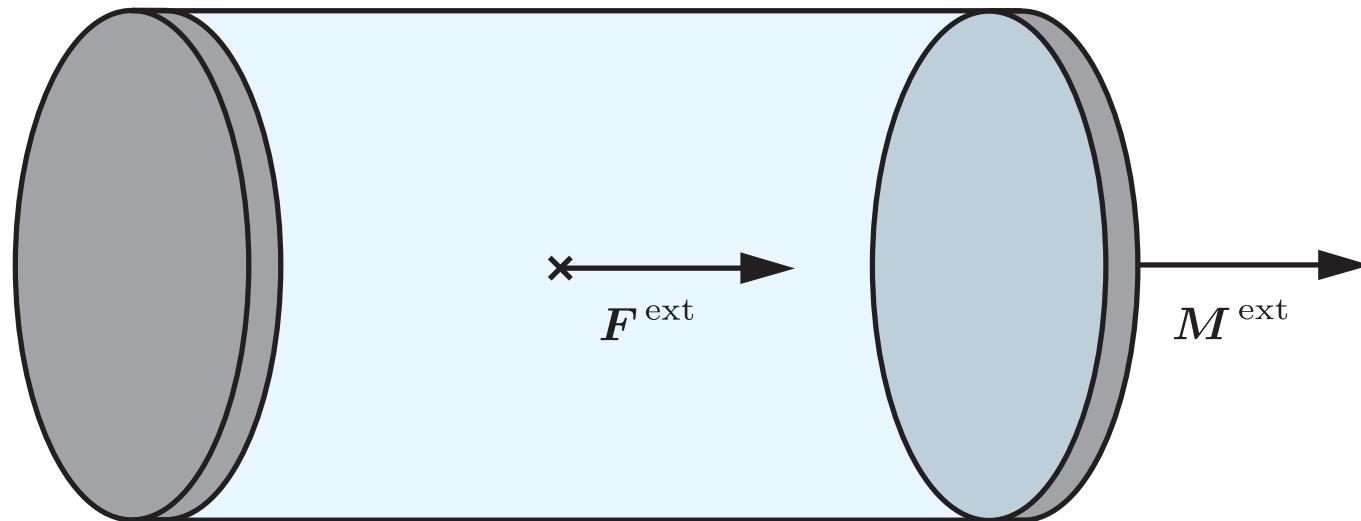
① **Moment cinétique** : $\mathbf{L} \equiv \mathbf{L}_G$

② **Moments de forces extérieures** : $\mathbf{M}^{\text{ext}} \equiv \mathbf{M}_G^{\text{ext}}$

1.8 Thermodynamique et mécanique

- 1.8.1 Système indéformable, fermé, diatherme
- 1.8.2 Variables d'état extensives
- 1.8.3 Energie

- **Système thermodynamique** : le système est un gaz homogène dans un cylindre de rayon R_0 constant fermé par deux pistons. Il est en translation selon son axe de symétrie et en rotation autour de cet axe.
 - ➊ Homogène, uniforme, indéformable, fermé, diatherme
 - ➋ Vitesse et vitesse angulaire : $\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega} = \mathbf{0}$
 - ➌ Force et moment de force extérieure : $\mathbf{F}^{\text{ext}} \times \mathbf{M}^{\text{ext}} = \mathbf{0}$
 - ➍ Masse constante : $\dot{M} = 0$
 - ➎ Moment d'inertie constant : $\dot{I} = 0$ car $I = \frac{1}{2} MR_0^2$



- **Variables d'état extensives** : $\{P, L, X_0, X_1, \dots, X_n\}$
- **Quantité de mouvement** :

(1.25)

- **Théorème du centre de masse** : (1.21) et (1.25)

(1.26)

- **Vitesse** : fonction d'état intensive conjuguée à P

(1.27)

- **Moment cinétique** :

(1.28)

- **Théorème du moment cinétique** : (1.24) et (1.28)

(1.29)

- **Vitesse angulaire** : fonction d'état intensive conjuguée à L

(1.30)

- Différentielle de l'énergie : (1.31)

- Différentielle de l'énergie interne :

(1.32)

- Vitesse et vitesse angulaire :

$$v(\mathbf{P}) = \frac{\partial E}{\partial \mathbf{P}} = \frac{\mathbf{P}}{M} \quad \text{et} \quad \omega(\mathbf{L}) = \frac{\partial E}{\partial \mathbf{L}} = \frac{\mathbf{L}}{I} \quad (1.33)$$

- Différentielle de l'énergie : (1.34)

- Energie : intégration par rapport à \mathbf{P} et \mathbf{L}

$$\begin{aligned} \int_0^E dE'(\mathbf{P}, \mathbf{L}, X_0, X_1, \dots, X_n) &= \frac{1}{M} \int_0^{\mathbf{P}} \mathbf{P}' \cdot d\mathbf{P}' + \frac{1}{I} \int_0^{\mathbf{L}} \mathbf{L}' \cdot d\mathbf{L}' \\ &+ \int_0^U dU' (X_0, X_1, \dots, X_n) \end{aligned} \quad (1.35)$$

- **Energie** : énergie cinétique de translation et de rotation et énergie interne

(1.36)

- **Vitesse et vitesse angulaire** :

$$\mathbf{v}(\mathbf{P}) = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{P}} = \frac{\mathbf{P}}{M} \quad \text{et} \quad \boldsymbol{\omega}(\mathbf{L}) = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{L}} = \frac{\mathbf{L}}{I} \quad (1.33)$$

- **Energie** : (1.33) dans (1.36) donne (1.37)
- **Différentielle de l'énergie** : (1.34) divisée par dt donne (1.38)
- **Dérivée temporelle de l'énergie** : (1.33) dans (1.38) donne (1.39)

- Dérivée temporelle de l'énergie : (1.39)

$$\dot{E}(P, L, X_0, X_1, \dots, X_n) = \mathbf{v}(P) \cdot \dot{P} + \boldsymbol{\omega}(L) \cdot \dot{L} + \dot{U}(X_0, X_1, \dots, X_n)$$

- Théorèmes du centre de masse et du moment cinétique :

$$\sum F^{\text{ext}} = \dot{P} = M \dot{\mathbf{v}} \quad \text{et} \quad \sum M^{\text{ext}} = \dot{L} = I \dot{\boldsymbol{\omega}}$$

- Dérivée temporelle de l'énergie :

(1.40)

- Dérivée temporelle de l'énergie :

(1.41)

- Puissance extérieure :

(1.42)

- Dérivée temporelle de l'énergie :

(1.43)

1.9 Energie interne

- 1.9.1 Bilan d'énergie interne
- 1.9.2 Travail, chaleur et apport énergétique de matière
- 1.9.3 Fonction d'état et autre fonction
- 1.9.4 Dérivée temporelle de l'énergie interne

- **Puissance mécanique** : courant de travail (justifié au chapitre 2)

(1.44)

- **Premier principe** : (1.44) dans (1.17) et (1.43)

- **Premier principe** : référentiel du système ouvert (au repos)

(système ouvert) (1.45)

- **Premier principe** : référentiel du système fermé $I_C = 0$

(système fermé) (1.46)

- **Premier principe** : référentiel du système isolé $I_Q = I_C = P_W = 0$

(système isolé) (1.47)

- **Condition** : (1.45) – (1.47) sont valables uniquement dans le référentiel du système (énergie cinétique nulle), sinon il faut utiliser (1.71).

- **Energie interne** : équation de bilan

(1.48)

- **Source d'énergie interne** : puissance mécanique

(1.49)

- **Premier principe** : référentiel du système ouvert

$$\dot{U} = I_Q + I_C + P_W \quad (1.45)$$

- **Courant d'énergie interne** : (1.45) et (1.48) avec (1.49)

(1.50)

- **Courant d'énergie** : (1.15) où $P_W = I_W$

(1.15)

- **Courant d'énergie** : (1.50) dans (1.15)

(1.51)

- **Premier principe** : (1.45) multiplié par dt

(système ouvert) (1.52)

- **Premier principe** : système fermé $I_C = 0$

(système fermé) (1.53)

- **Définition de l'énergie interne** :

(1.54)

- **Travail infinitésimal** : effectué sur le système

(1.55)

- **Chaleur infinitésimale** : fournie au système

(1.56)

- **Apport énergétique infinitésimal de matière** : fourni au système

(1.57)

- **Premier principe** : système ouvert (1.54) - (1.57) : (1.52)

(système ouvert) (1.64)

- **Premier principe** : système fermé $\delta C = 0$

(système fermé) (1.65)

- **Premier principe** : système isolé $\delta W = \delta Q = \delta C = 0$

(système isolé)

- **Energie interne** : l'énergie interne U est une fonction d'état, et donc la variation de U ne dépend que de l'état initial et de l'état final et pas du processus. Ainsi, la variation infinitésimale de U est une différentielle qu'on note dU .

- **Travail, chaleur et apport énergétique de matière** : le travail W , la chaleur Q et l'apport énergétique de matière C ne sont pas des fonctions d'état, car ces grandeurs dépendent du processus. Ainsi, les grandeurs infinitésimales δW , δQ et δC ne sont pas des différentielles.

- **Variation d'énergie interne** : état initial $i \rightarrow$ état final f

(1.60)

- **Travail** : état initial $i \rightarrow$ état final f

(1.61)

- **Chaleur** : état initial $i \rightarrow$ état final f

(1.62)

- **Apport énergétique de matière** : état initial $i \rightarrow$ état final f

(1.63)

- **Premier principe** : intégration de (1.58) état initial $i \rightarrow$ état final f

$$\int_{U_i}^{U_f} dU = \int_i^f \delta W + \int_i^f \delta Q + \int_i^f \delta C$$

- **Premier principe** : système ouvert (1.60) - (1.63)

(système ouvert) (1.64)

- **Premier principe** : système fermé $C_{i \rightarrow f} = 0$

(système fermé) (1.65)

- **Premier principe** : système isolé $W_{i \rightarrow f} = Q_{i \rightarrow f} = C_{i \rightarrow f} = 0$

(système isolé)

- **Fonction d'état** : dépend de l'état et pas du processus : état initial $i \rightarrow$ état final f

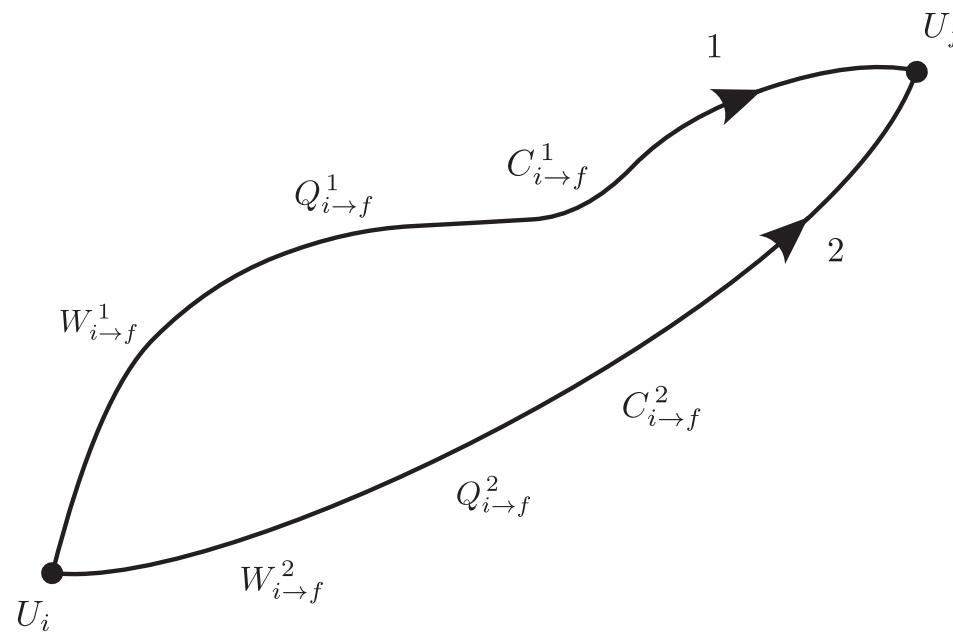
① Energie interne U : $\Delta U_{i \rightarrow f} = U_f - U_i$

- **Autre fonction** : dépend du processus : état initial $i \rightarrow$ état final f

① Travail $W_{i \rightarrow f}$: $W_{i \rightarrow f}^1 \neq W_{i \rightarrow f}^2$

② Chaleur $Q_{i \rightarrow f}$: $Q_{i \rightarrow f}^1 \neq Q_{i \rightarrow f}^2$

③ Apport énergétique de matière $C_{i \rightarrow f}$: $C_{i \rightarrow f}^1 \neq C_{i \rightarrow f}^2$



- **Dérivée temporelle de l'énergie interne** : fonction d'état

(1.66)

- **Grandeur intensive** : fonction d'état Y_i conjuguée à la variable d'état extensive X_i

(1.67)

- **Dérivée temporelle de l'énergie interne** :

(1.68)

- **Premier principe** : fonctions d'état, puissance et courants

(système ouvert) (1.69)

- **Premier principe** : fonctions d'état, puissance et courants

(système fermé) (1.70)

- Les variables d'état extensives scalaires X_0, X_1, \dots, X_n définissent l'état du système et leur évolution temporelle est régie par la puissance P_W , les courants I_Q et I_C qui décrivent les processus entre le système et l'environnement qui ne modifient pas l'état de mouvement du système.

1.10 Energie

1.10.1 Premier principe

- **Premier principe** : (1.17) avec $P_W = I_W$

$$\dot{E} = P^{\text{ext}} + P_W + I_Q + I_C \quad (\text{système ouvert}) \quad (1.71)$$

- **Premier principe** : (1.72) multiplié par dt

$$(\text{système ouvert}) \quad (1.72)$$

- **Définition de l'énergie :**

$$(1.73)$$

- **Travail extérieur infinitésimal** : effectué sur le système

$$(1.74)$$

- **Travail infinitésimal** : effectué sur le système

$$\delta W \equiv P_W dt \quad (1.55)$$

- **Chaleur infinitésimale** : fournie au système

$$\delta Q \equiv I_Q dt \quad (1.56)$$

- **Apport énergétique infinitésimal de matière** : fourni au système

$$\delta C \equiv I_C dt \quad (1.57)$$

- **Premier principe** : (1.73), (1.74), (1.55) - (1.57) dans (1.71)

(système ouvert) (1.75)

- **Premier principe** : système fermé $\delta C = 0$

(système fermé) (1.76)

- **Variation d'énergie** : état initial $i \rightarrow$ état final f

(1.77)

- **Travail extérieur** : état initial $i \rightarrow$ état final f

(1.78)

- **Travail** : état initial $i \rightarrow$ état final f

$$W_{i \rightarrow f} = \int_i^f \delta W = \int_{t_i}^{t_f} P_W dt \quad (1.61)$$

- **Chaleur** : état initial $i \rightarrow$ état final f

$$Q_{i \rightarrow f} = \int_i^f \delta Q = \int_{t_i}^{t_f} I_Q dt \quad (1.62)$$

- **Apport énergétique de matière** : état initial $i \rightarrow$ état final f

$$C_{i \rightarrow f} = \int_i^f \delta C = \int_{t_i}^{t_f} I_C dt \quad (1.63)$$

- **Premier principe** : système ouvert (1.77), (1.78) et (1.61) - (1.63)

$$(\text{système ouvert}) \quad (1.79)$$

- **Premier principe** : système fermé $C_{i \rightarrow f} = 0$

$$(\text{système fermé}) \quad (1.79)$$

1.11 Applications

- 1.11.1 Oscillateur harmonique amorti
- 1.11.2 Gaz et piston
- 1.11.3 Air et ventilateur
- 1.11.4 Questions

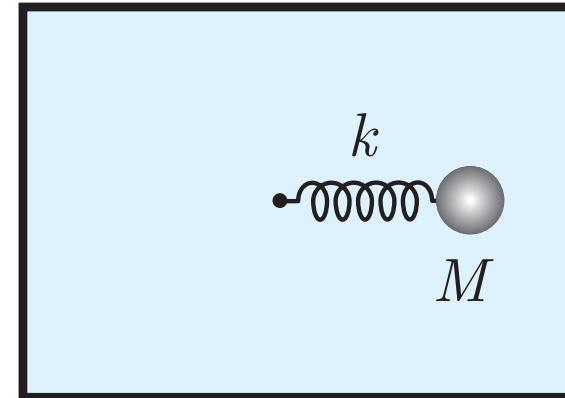
- **Système isolé** : point matériel de masse M attaché à un ressort de constante élastique k oscillant linéairement dans un fluide visqueux.

- **Variables d'état** : $\{ r, P, X_0 \}$

① **Position** : r

② **Quantité de mouvement** : $P = M v$

③ **Propriété extensive du fluide** : X_0



- **Energie** : fonction d'état

(1.81)

- **Energie interne** : énergie potentielle élastique et énergie interne fluide

(1.82)

- **Energie potentielle élastique** :

(1.83)

- **Energie** : fonction d'état

$$E(\mathbf{r}, \mathbf{P}, X_0) = \frac{\mathbf{P}^2}{2M} + U(\mathbf{r}, X_0) \quad (1.81)$$

- **Premier principe** : système isolé (1.84)

- **Dérivée partielles** :

$$(1.85)$$

- **Fonction d'état intensive** : grandeur conjuguée à X_0

$$(1.86)$$

- **Evolution temporelle** : (1.85) et (1.86) donne (1.87) avec $v = \dot{\mathbf{r}}$

$$(1.87)$$

- **Forces extérieures** : sous-système (point matériel)

(1.88)

- **Théorème du centre de masse** : sous-système (point matériel)

(1.89)

- **Evolution temporelle** : système (point matériel et fluide)

$$(\dot{\mathbf{P}} + k \mathbf{r}) \cdot \mathbf{v} + Y_0 \dot{X}_0 = 0 \quad (1.87)$$

- **Evolution temporelle** : sous-système (fluide) (1.89) dans (1.87)

(1.90)

- La force élastique \mathbf{F}^e et la force de frottement \mathbf{F}^{fr} sont des forces extérieures pour le sous-système du point matériel et des forces intérieures pour le système constitué du point matériel et du fluide.

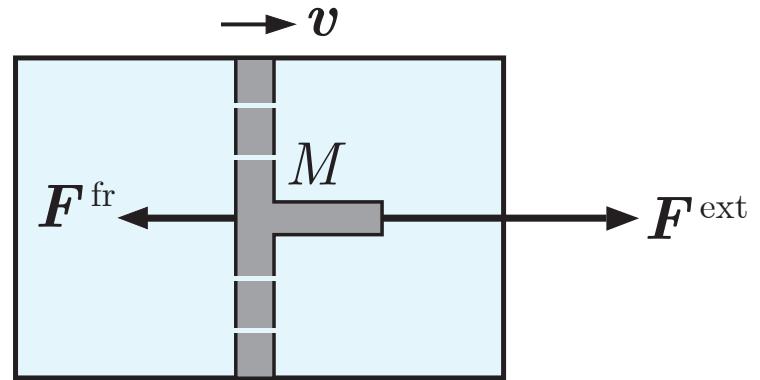
- **Système adiabatiquement fermé et rigide** : gaz de masse négligeable dans un cylindre adiabatiquement fermé qui passe à travers un piston perméable de masse M soumis à une force extérieure F^{ext} et une force de frottement interne F^{fr} .

- **Variables d'état** : $\{ P, X_0 \}$

① **Quantité de mouvement** : $P = M v$

② **Propriété extensive du fluide** : X_0

- **Energie** : fonction d'état



(1.95)

- **Premier principe** : puissance extérieure P^{ext}

(1.96)

- **Fonctions d'état intensives** : grandeurs conjuguées à P et X_0

- **Evolution temporelle** : (1.96)

- **Puissance extérieure** : force extérieure \mathbf{F}^{ext}

(1.97)

- **Evolution temporelle** : système (gaz et piston)

(1.98)

- **Théorème du centre de masse** : sous-système (piston)

(1.99)

- **Evolution temporelle** : sous-système (gaz) (1.99) dans (1.98)

(1.100)

- **Frottement interne** : gaz (translation)

(1.101)

- **Système adiabatiquement fermé et rigide** : air de masse négligeable et ventilateur de moment d'inertie I soumis à moment de force extérieure M^{ext} et à un moment de force de frottement M^{fr} .

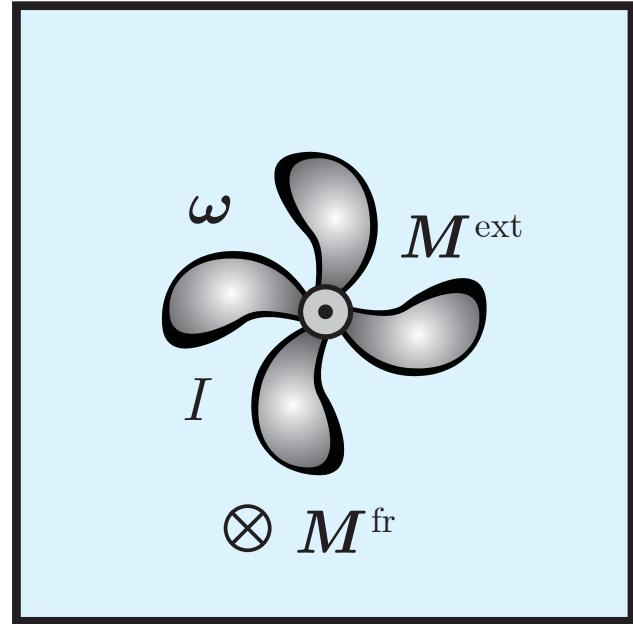
- **Variables d'état** : $\{ L, X_0 \}$

① **Moment cinétique** : $L = I \omega$

② **Propriété extensive du fluide** : X_0

- **Energie** : fonction d'état

(1.102)



- **Premier principe** : puissance extérieure P^{ext}

(1.103)

- **Fonctions d'état intensives** : grandeurs conjuguées à L et X_0

- **Evolution temporelle** : (1.103)
- **Puissance extérieure** : moment de force extérieure M^{ext} (1.104)
- **Evolution temporelle** : système (air et ventilateur) (1.105)
- **Théorème du moment cinétique** : sous-système (ventilateur) (1.106)
- **Evolution temporelle** : sous-système (air) (1.106) dans (1.105) (1.107)
- **Frottement interne** : air (rotation) (1.108)

- **Questions** : à un million

- ① Quelle est la nature physique de la variable d'état extensive X_0 ?
- ② Quelle est la nature physique de la fonction d'état intensive Y_0 conjuguée à X_0 ?
- ③ Pourquoi $\dot{X}_0 > 0$? Qu'est-ce que cela signifie ?



- **Réponses** : à un million, voire plus ...

- ① L'entropie $S \equiv X_0$ (chapitre 2)
- ② La température $T \equiv Y_0$ (chapitre 2)
- ③ La dérivée temporelle de l'entropie $\dot{S} = \dot{X}_0 > 0$ est positive à cause de l'irréversibilité de l'évolution temporelle liée au frottement (chapitre 2 : deuxième principe).