

# Physique Générale : Thermodynamique

Prof. Romuald Houdré, IPHYS-FSB

[romuald.houdre@epfl.ch](mailto:romuald.houdre@epfl.ch)

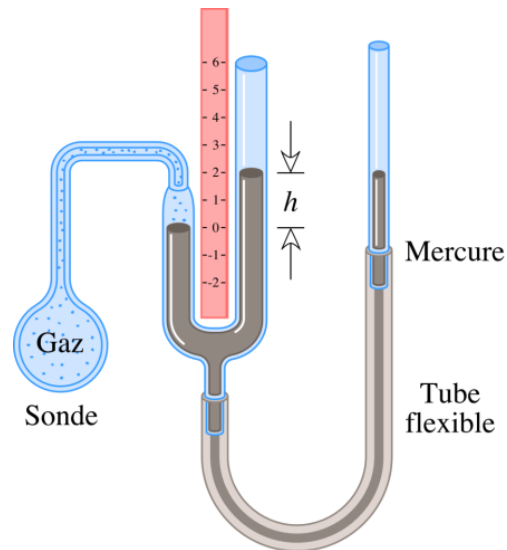
Bureau : PH B2 402

## Objectifs du cours

Bases de la physique "classique"

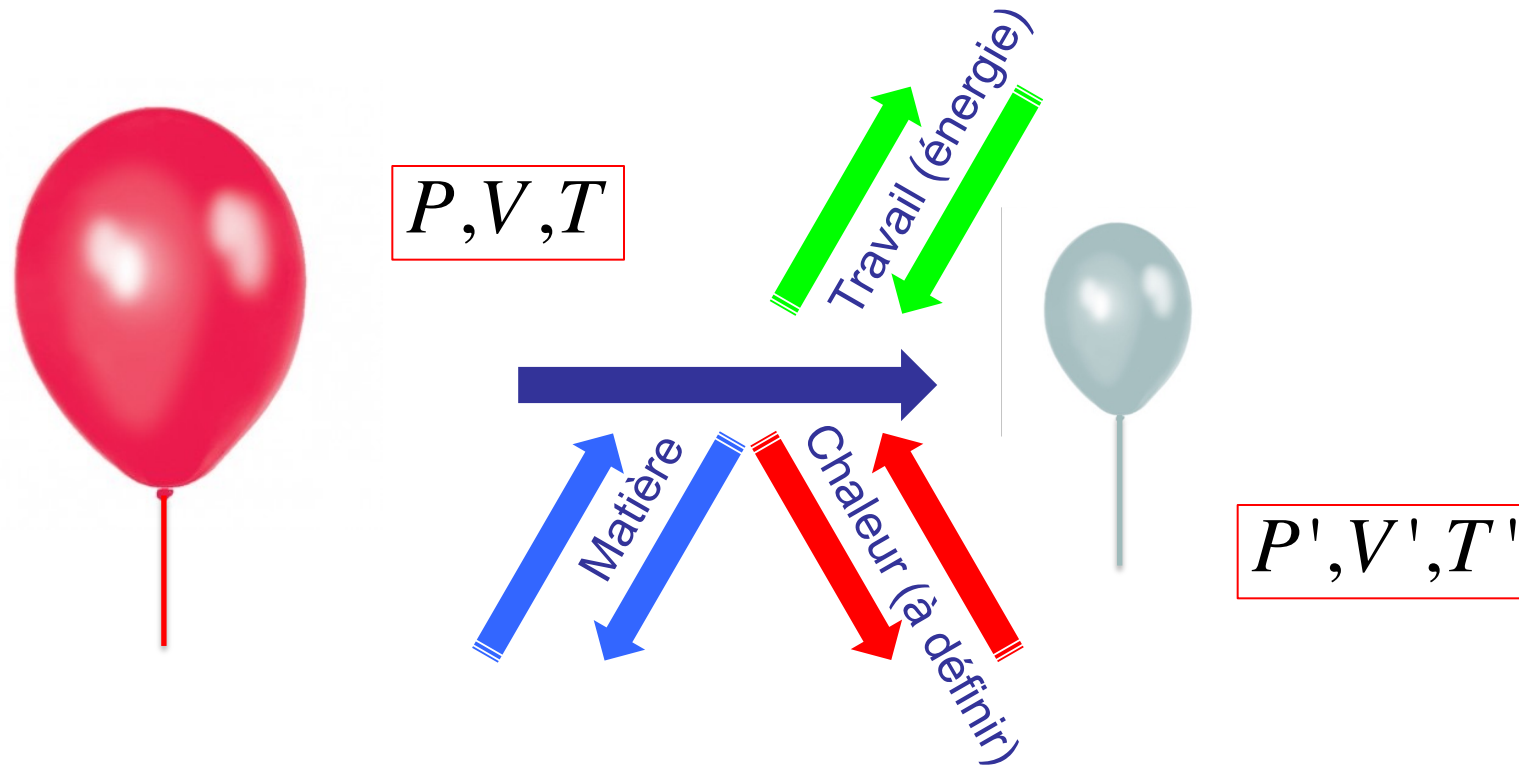
Suite de Physique Générale I, Mécanique

Physique Générale II, Thermodynamique



$$P(T, V) = \dots$$

## Thermodynamique



Plus généralement, la thermodynamique est l'étude des transformations d'un système et des échanges énergétiques.

## Physique Générale II, Thermodynamique

## Etude de l'énergie et de ses transformations



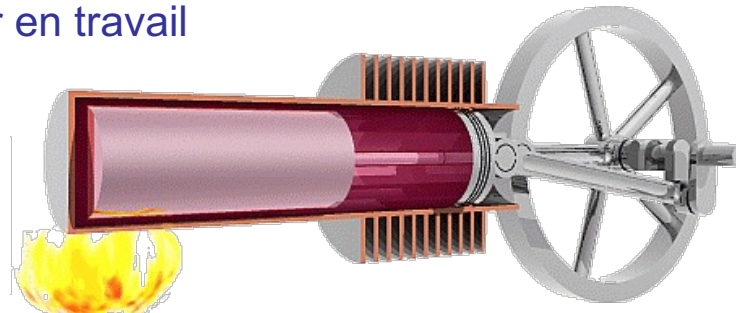
Exemples : transfert de chaleur engendré par un travail

Quelles sont les limites physiques, qu'est ce qu'il est possible de faire et qu'est ce qui est impossible ?



Pourquoi certaines transformations sont "réversibles" et d'autres non ?

Exemples : transformation de chaleur en travail





**- Introduction, gaz parfaits et réels**

- Définitions, Equation d'état d'un système thermodynamique
- Pression, température
- Le gaz parfait et son équation d'état
- Les fluides réels, le fluide de Van der Waals

**- Théorie microscopique statistique****- Les deux principes de la thermodynamique**

- Travail, chaleur, élémentaires
- Calorimétrie



- Le premier principe, énergie, chaleur, travail
- Machines de Carnot, Stirling
- Le deuxième principe



- Entropie

**- Machines thermiques****- Transitions de phase****- Phénomènes irréversibles**

- Transferts de matière, diffusion
- Transferts thermiques, conduction de la chaleur
- Rayonnement thermique, corps noir

**(- Fonctions thermodynamiques généralisées et potentiels thermodynamiques)**

**(- Quand le travail n'est pas seulement le travail des forces de pression  $-pdV$ )**

**(- Développement historique de la thermodynamique)**

**Prérequis :**

- Analyse (Dérivés, intégrales, dérivées partielles, équation différentielles simples)
- Bases de l'analyse vectorielle
- Physique Générale I

## Cours

En ligne via [moodle.epfl.ch](https://moodle.epfl.ch) :

- Copie des transparents du cours
- Vidéos du cours
- Expériences d'auditoire
- Questions clickers
- Exercices en cours
- Séance d'exercices avant la séance et **corrigés après la séance**
- Forum



## Cours

Le cours est enseigné en "**classe inversée**". Chaque semaine, vous visionnez les vidéos du cours magistral de manière indépendante **avant** la séance de lundi en amphi où on est illustre et discute les points délicats ou importants.



Les séances en amphi **ne sont pas un résumé rapide du cours** qui permet de se dispenser d'étudier le cours avant la séance.

## Cours

Les lundi et mardi, je retrouve la classe complète en amphi :

- Dans un premier temps pour les expériences, des quizz (clickers) et des petits exercices. Nous pourrions également aborder la pratique de résolution de problèmes et motiver les questions qui seront abordées la semaine suivante.
- Dans un second temps je serai à votre disposition pour répondre à vos questions.

## Cours, interactions

**Durant tout le semestre.**

Forum Ed discussion (lien sur le moodle).

**Durant le cours : clickers.**

Fonctionnement : Soit avec les clickers à aller chercher à la bibliothèque

Soit en se connectant à [responseware.eu](https://responseware.eu)

Soit (mieux) en téléchargeant l'app **PointSolutions** sur votre téléphone



**PointSolutions**

Éducation

Turning Technologies, LLC

☆☆☆☆☆

Nombre d'évaluations insuffisant

Au premier lancement choisir la région Europe.

Se connecter en tant que **invité**, ne pas s'identifier.

Se connecter à la session : **thermosiegc**

**Exercices, 2 heures**

Les séances d'exercices sont organisées en tutorat. Formez des groupes de max 10 personnes et les assistants sont là pour répondre à vos questions sur les exercices.

Les énoncés des exercices seront en ligne quelques jours avant et les corrigés après la séance.

- Assistants doctorants

**Johan Felisaz (PH)**

**Zakaria Jouini (PH)**

- Assistants étudiants

**Léo Carron (SIE)**

**Victor Denner (GC)**





**Eloi Borlet (GC)**

**Arthus Duval (GC)**



**Paul Gregory (PH)**

Il y a "trop" d'exercices proposés pour une séance : *c'est normal*.

- 4 types d'exercices :

-  Conceptuels, compréhension physique
-  Illustration, applications simples du cours
-  Problème (académique)
-  Problème + modélisation

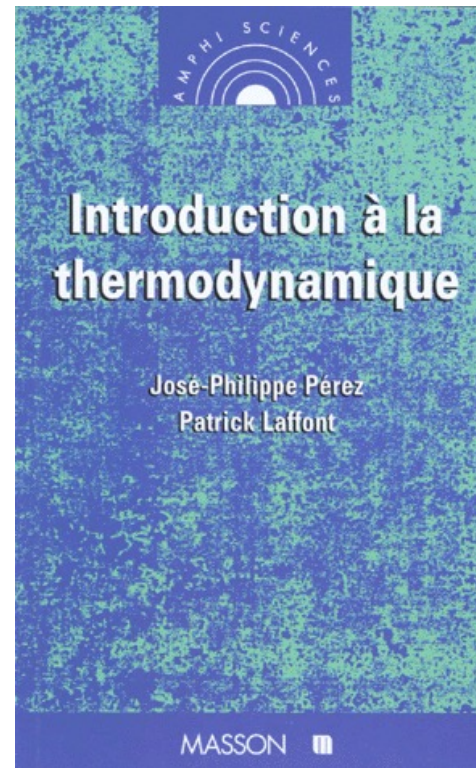
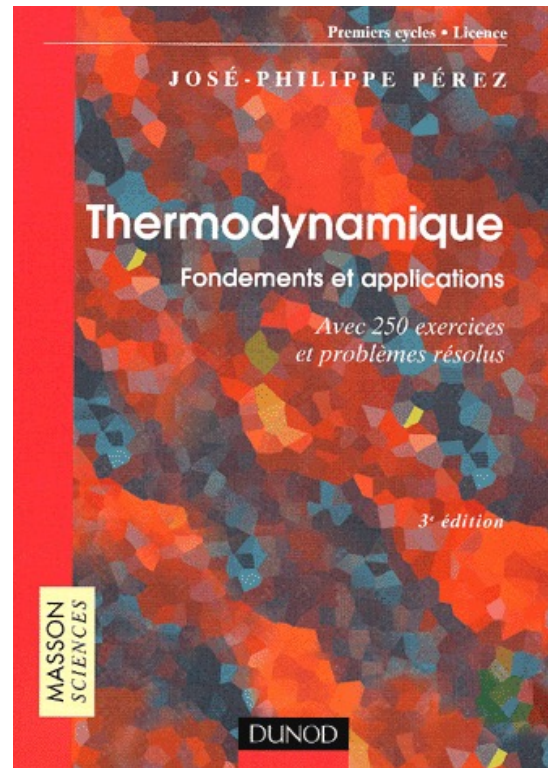
- Difficulté :

- \*, \*\*, \*\*\* : Indication de la difficulté
- Difficulté de l'examen final :  et  \*\*, \*\*\*.
- *Être capable de résoudre les exercices \* n'est pas suffisant.*

Beaucoup des exercices sont extraits d'anciens examens. C'est toujours indiqué.

## - Bibliographie

- *Thermodynamique, J.P. Pérez*
- *Introduction à la thermodynamique, J.P. Pérez & P. Laffont*

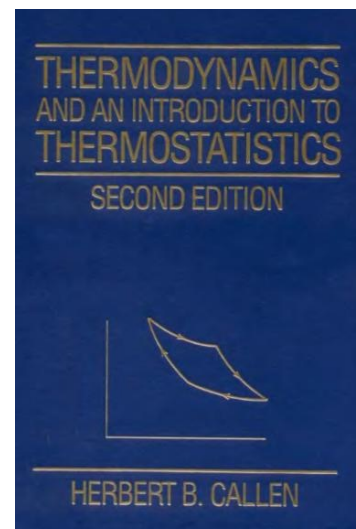
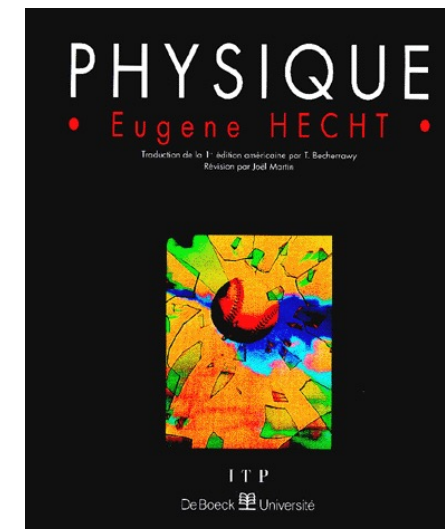
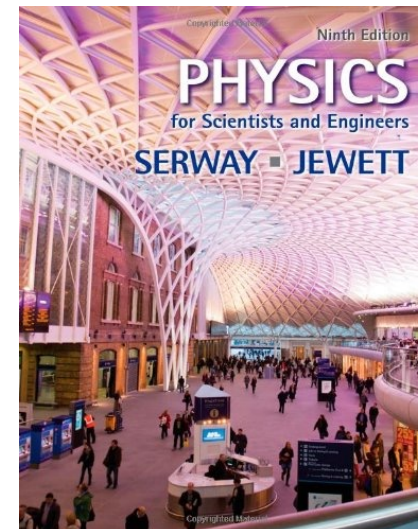
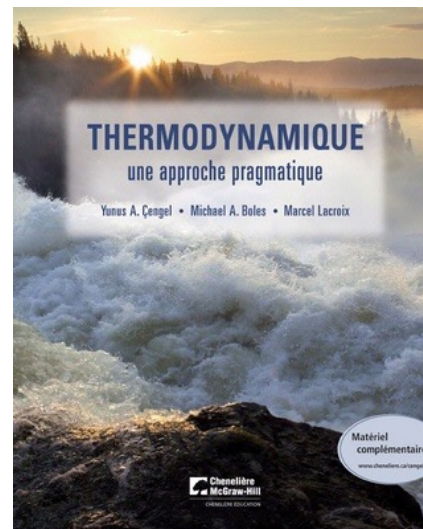
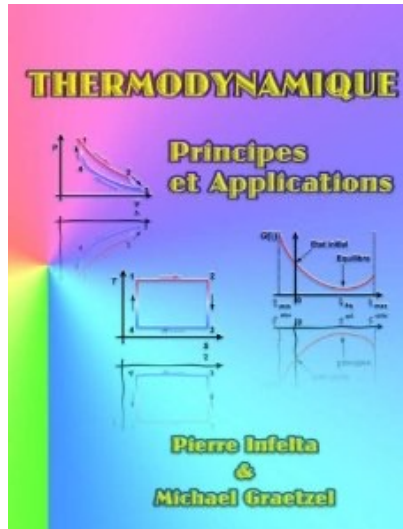
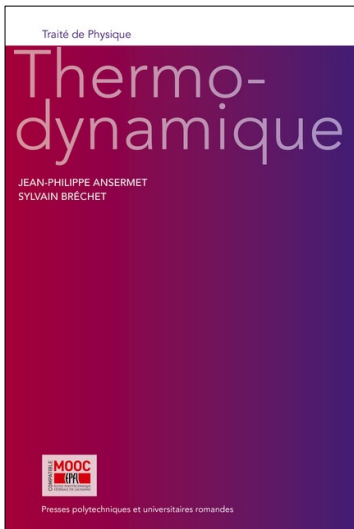


Note : les corrigés du Pérez sont soit dans le livre ou bien sur le site web associé. Attention le lien indiqué dans le livre n'est plus valide. Le bon lien est maintenant [www.culturediff.org/jpp/ouvrage6.htm](http://www.culturediff.org/jpp/ouvrage6.htm)



## - Bibliographie, autres suggestions

- *Thermodynamique*, J.P. Ansermet & S. Bréchet  
→ MOOC [www.coursera.org/learn/thermo-base](http://www.coursera.org/learn/thermo-base)
- *Thermodynamique*, P. Infelta & M. Graetzel
- *Thermodynamique, une approche pragmatique*, Y.A. Çengel, M.A. Boles & M. Lacroix
- *Physics for Scientists and Engineers*, R.A. Serway & J.W. Jewett
- *Physique*, E. Hecht
- *Thermodynamics*, B. Callen (Pour ceux qui veulent aller plus loin)



\$\$\$ mais nombreux  
exemplaires au Rolex



**Mooc : Apprendre à étudier en sciences et ingénierie**  
[courseware.epfl.ch/courses/course-v1:EPFL+Etudier+2017/about](https://courseware.epfl.ch/courses/course-v1:EPFL+Etudier+2017/about)

# Comprendre ne suffit pas pour réussir l'examen

**Prof. Pierre Dillenbourg**  
Centre de recherche et d'appui pour la formation et ses technologies (CRAFT)

Aller aux séances d'exercices, obtenir la solution des exercices du jour, la ranger consciencieusement; la relire attentivement 7 fois .... puis échouer à l'examen! Pourquoi un échec? Parce qu'il existe un gouffre entre comprendre une solution et l'élaborer soi-même. Ce n'est que du bon sens. Lorsqu'on lit une solution, il semble évident d'appliquer tel opérateur au pas 5 du problème. C'est

très différent lorsqu'on se retrouve seul face au problème et qu'il faut choisir une des innombrables opérations applicables. Qu'il s'agisse de maths, de chimie, de physique ou d'informatique, le plus difficile c'est de déterminer quel opérateur appliquer à quel moment. A l'examen, c'est ce qui permettra de trouver la solution. De nombreux enseignants de l'EPFL vous le diront: ne lisez pas la solution avant de faire les exercices. Venez aux séances d'exercices, essayez de les résoudre en petits groupes et ne demandez de l'aide qu'après avoir essayé plusieurs minutes. ☺



© ALAIN HERZOG

Roland Tormey • Cécile Hardebolle

## APPRENDRE À ÉTUDIER

Guide à l'usage des étudiants en sciences et en ingénierie

8  
découvertes  
de la recherche  
pour booster vos  
performances

Presses polytechniques et universitaires romandes



**Examen blanc : date à déterminer**

à  $\approx 2/3$  du cours

Modalité identique à l'examen final

**Sujet de l'examen**



La matière vue en cours + exercices

Modalité : examen écrit

Durée : 3½ heures

Document autorisé, 1 feuille manuscrite A4 recto-verso de notes

**Exigences pour la réussite de l'examen:**

- Compréhension des concepts
- Analyse
- Capacité à dériver les calculs
- Communiquer : Rédaction
- Niveau de difficulté :  Conceptuels ou  Problèmes, \*\* ou \*\*\*.

Note : il y a de nombreux exemples de problèmes d'examens passés dans les séries d'exercices.

**Exigences pour la réussite de l'examen:**

- **Analyse** et compréhension de l'énoncé :
  - Quels phénomènes physiques sont en jeux ?
  - Distinguer les phénomènes clefs de ceux que l'on peut négliger
- **Modélisation** :
  - Mise en équations du modèle
  - Approximations éventuelles
- **Résoudre** (calculs)
- Analyse du **résultat** :
  - Dimensions
  - **Sens critique** : le résultat fait il sens ? Cas limites raisonnables ?
- **Rédaction** (détailler et expliquer les calculs)
  - **Pas de calculs numériques dans le cours des calculs !**



- Introduction.
  - Outils mathématiques.
  - Définitions.
  - Pression.



*Thermodynamics is a funny subject. The first time you go through it, you don't understand it at all. The second time you go through it, you think you understand it, except for one or two small points. The third time you go through it, you know you don't understand it, but by that time you are so used to it, it doesn't bother you any more.*

*Arnold Sommerfeld*

1

*Rappels*

2

*Comment décrire un système thermodynamique et ses transformations, variables, équations, définitions, outils mathématiques*

3

*Pression*

Rappel de notions (a priori connues 🙄🤔) du collège/gymnase/lycée ... et de PGI :

❑ **Pression**,  $P \propto [\text{Force} \perp] [\text{Surface}]^{-1}$  (Pa, bar, ...)

❑ **Température**,  $T$  (K, ° C, ...) 🤔

❑ **Travail, énergie**,  $W$  (J, ...), PGI

❑ **Loi de l'hydrostatique**

$$P_A - P_B = -\rho g h$$

❑ **Poussée d'Archimède**



❑ **Loi des gaz parfaits,**

- $P$  : pression
- $V$  : volume
- $T$  : température
- $n$  : nombre de moles
- $R$  : constantes des gaz parfaits,  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$



@ $T$  constant :  $P \cdot V = Cst$

@ $V$  constant :  $P / T = Cst$

@ $P$  constant :  $V / T = Cst$

$$PV = nRT$$

1

*Rappels*

2

*Comment décrire un système thermodynamique et ses transformations, variables, équations, définitions, outils mathématiques*

3

*Pression*

Un système thermodynamique peut être décrit par :



- Grandeurs *microscopiques*

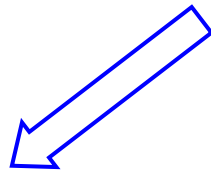
- Positions et vitesses individuelles des atomes d'un gaz etc...

$$\mathcal{N}_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ atomes/mole}$$

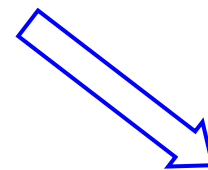
- Approche statistique
  - Physique statistique
  - Thermodynamique statistique
  - Théorie cinétique des gaz

- Approche *phénoménologique* de la thermodynamique. Partir de l'expérience et du sens commun pour en énoncer des lois et des principes généraux.

- Grandeurs *macroscopiques* caractérisant l'état du système



**Variable extensive**

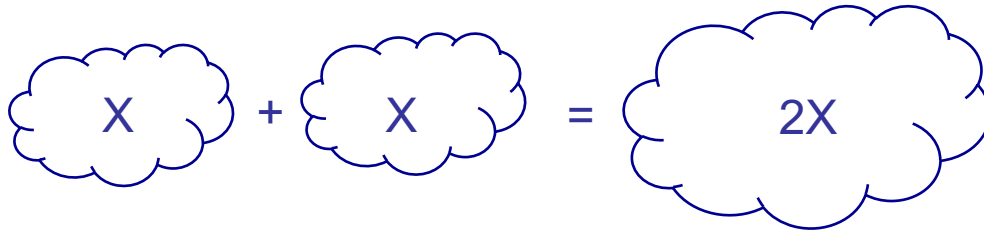


**Variable intensive**



- **Variable extensive**

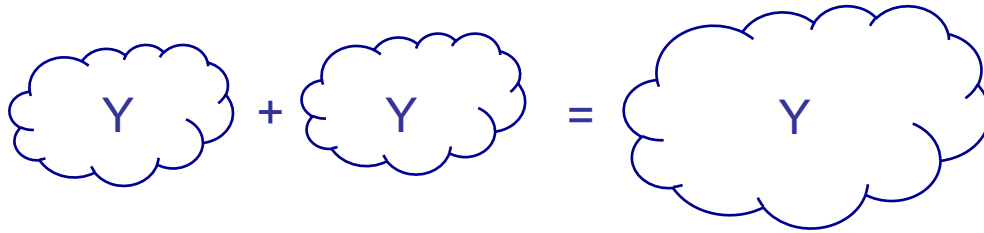
Variable proportionnelle à la taille du système



- *Masse,  $m$*
- *Nombre de particule,  $n$*
- *Volume,  $V$*
- *Charge électrique,  $q$*
- *Population d'un pays*
- *Quantité de mouvement*
- *Energie interne,  $U$*
- *Entropie,  $S$*
- ...

- **Variable intensive**

Variable indépendant de la taille du système



- *Température,  $T$*
- *Pression,  $P$*
- *Potentiel chimique,  $\mu$*
- *Densité,  $\rho$*
- ...

Conséquence importante : une variable intensive peut être définie comme une variable *locale* et dépendre de la position si le système n'est pas à l'équilibre (la densité ou bien la température ne sont pas nécessairement la même partout dans le système).

- **Variables d'état**

Ensemble suffisant de grandeurs macroscopiques qui permettent de décrire l'état d'un système particulier à l'**équilibre** dans le référentiel de son centre de masse.

- Principales variables ou fonctions d'état que nous utiliserons dans ce cours

- Pression  $P$  : unité Pascal Pa ( $\text{force}/\text{m}^2 = \text{Nm}^{-2}$ )
- Température  $T$  : unité Kelvin K
- Volume  $V$  : unité  $\text{m}^3$
- Energie interne  $U$  : unité Joule J (énergie)
- Entropie  $S$  : unité  $\text{JK}^{-1}$
- Enthalpie  $H$  : unité Joule J (énergie)

- **Equation d'état**

Relation satisfaite entre les variables d'état d'un système particulier à l'**équilibre**

*Exemples : gaz parfait*

$$pV = nRT$$

*gaz de Van der Waals*

$$\left( p + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT$$

- **Fonction d'état**

Fonction qui ne dépend que des variables d'état d'un système

- Conséquence importante : sa valeur est *indépendante* du procédé utilisé pour arriver dans cet état, elle ne dépend que de l'état du système considéré

*Exemples : énergie interne  $U$*

*entropie  $S$*

*enthalpie  $H$*

- **Variable d'état ou bien fonction d'état ?**

- Selon les différentes manières pour un système d'échanger de l'énergie, le nombre de variables d'état peut varier. Par exemple si il y a des réactions chimiques une variable dénommée potentiel chimique est nécessaire (plus dans le cours de chimie), idem pour des milieux magnétiques avec l'aimantation.
- Dans ce cours, les variables d'état que nous utiliserons le plus sont la pression  $P$ , le volume  $V$  et la température  $T$ .
- L'équation d'état fait que ces variables *ne sont pas indépendantes*. Par exemple pour un gaz parfait :

$$P(V,T) = \frac{nRT}{V} \quad V(P,T) = \frac{nRT}{P} \quad T(P,V) = \frac{PV}{nR}$$

**Spécificités :**Mécanique du point et du solide

- But : Déterminer une équation horaire

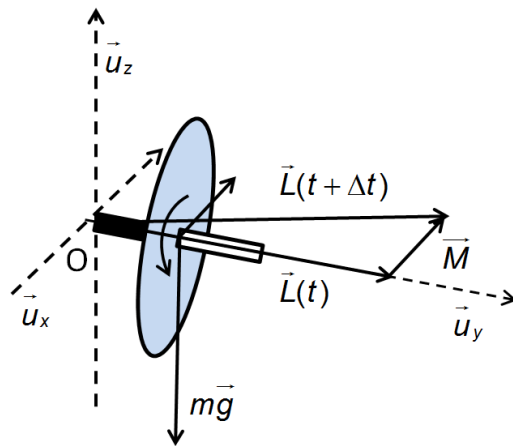
$$\begin{pmatrix} x_{CG}(t) \\ y_{CG}(t) \\ z_{CG}(t) \end{pmatrix} \quad \theta(t), \quad \varphi(t)$$

Trouver l'évolution de variables en fonction d'*une seule* variable, le temps  $t$

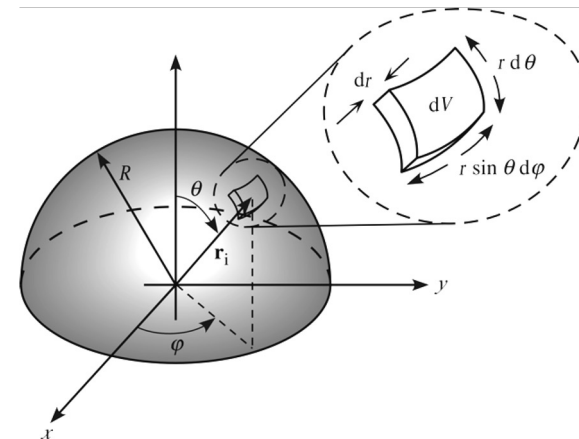
**Spécificités :**Mécanique du point et du solide

- Analyse vectorielle (vecteurs, produit scalaire, produit vectoriel, coordonnées )
- Analyse (équations différentielles et intégrales multiples)

$$\vec{a} = \vec{a}_e + \vec{a}' + 2\vec{\omega} \times \vec{V}' + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}')$$



$$I_{cm,\Delta} = \iiint_V r_{\perp}^2 dm$$



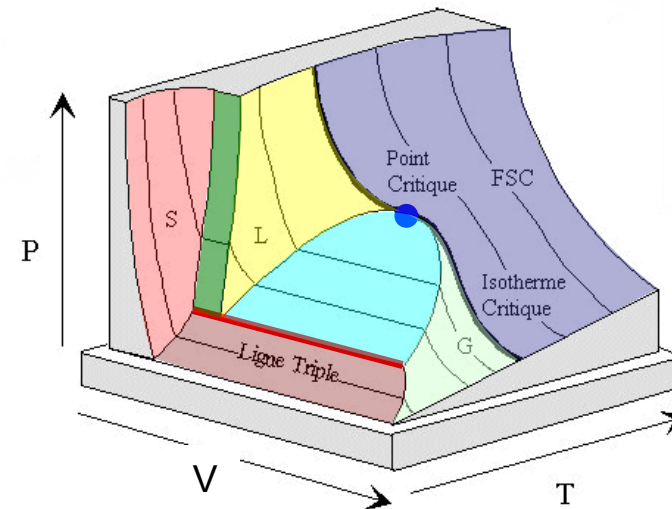
Spécificités :

Thermodynamique



$$PV = nRT$$
$$f(P, V, T) = 0$$

L'état du système étudié dépend de *plusieurs* variables.





**Spécificités :**Thermodynamique

L'état du système étudié dépend de *plusieurs* variables.

**Outils mathématiques 1 :**

$$f(P, V, T) = 0$$



- Selon les problèmes étudiés, on exprimera certaines de ces variables comme une fonction des autres

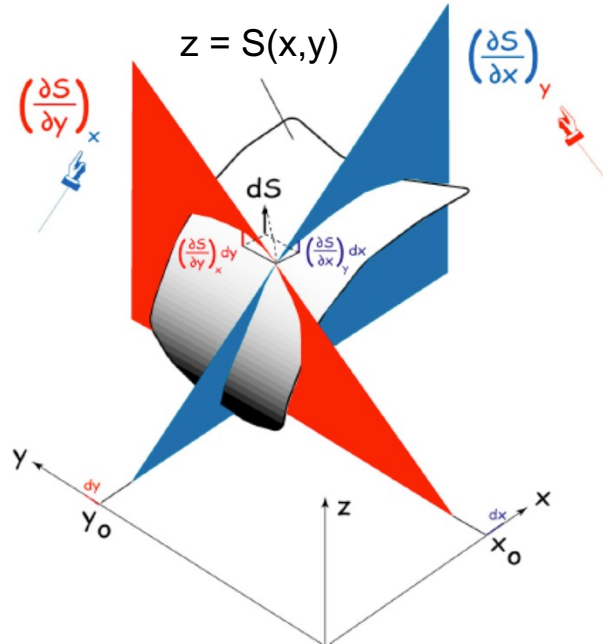
$$P(V, T) \quad V(P, T) \quad T(P, V) \quad \text{etc...}$$

- Dérivées  $P'(V, T) = ???$
- Dérivées partielles et différentielle

$$\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_T \quad \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \quad \text{etc.}$$

## Outils mathématiques 1 :

- Dérivées  $P'(V,T) = ???$



- Dans le plan rouge ( $x = x_0$ ), une petite variation  $dy$  de  $y$  donne une variation  $dS$  de  $S$  :

$$dS = S'(x = x_0, y) dy = \left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)_{x_0} dy$$

- Dans le plan bleu ( $y = y_0$ ), une petite variation  $dx$  de  $x$  donne une variation  $dS$  de  $S$  :

$$dS = S'(x, y = y_0) dx = \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_{y_0} dx$$

- Dans un plan quelconque, une petite variation  $dx$  et  $dy$  donne une variation :

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)_{y_0} dx + \left( \frac{\partial S}{\partial y} \right)_{x_0} dy$$

**Outils mathématiques 1 :**

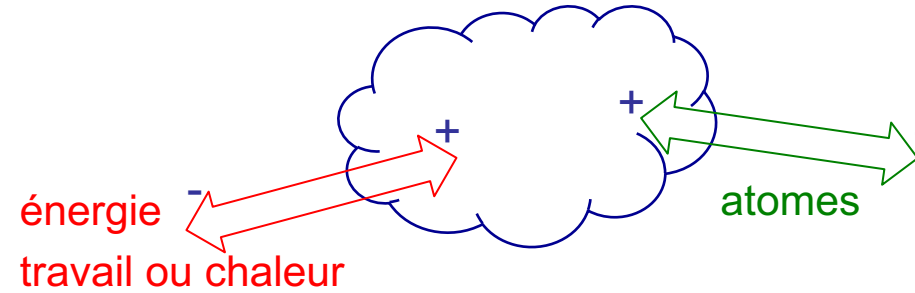
Exemples de variables auxiliaires utilisant des dérivées partielles :

Variation du volume :

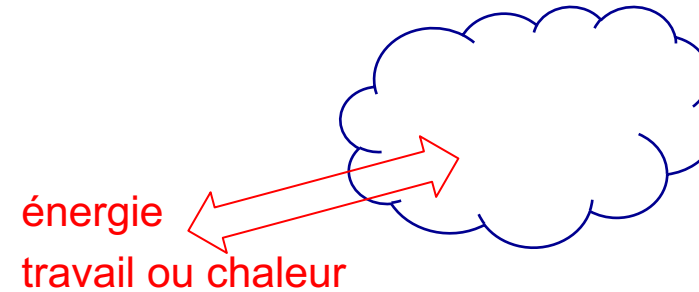
- Dilatation thermique, coefficient de dilatation thermique isobare  $\alpha_V = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$
- Coefficient de compressibilité isotherme  $\kappa_T = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$
- Coefficient de pression isochore  $\alpha_P = \frac{1}{P} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$
- Capacité calorifique à volume constant  $C_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$

La première étape est toujours de bien définir le système thermodynamique que l'on va étudier. On distingue trois cas de figure :

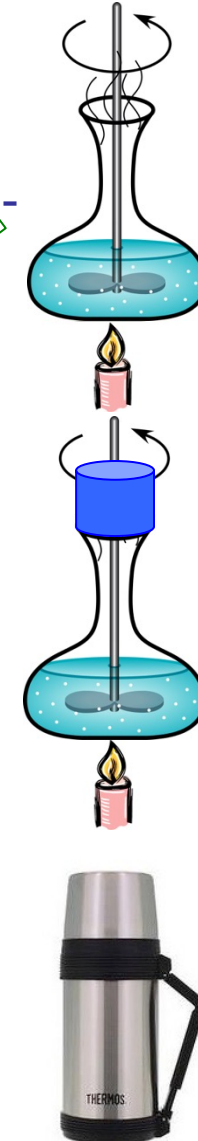
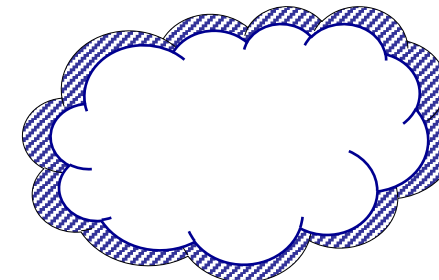
**Système ouvert** : le système échange de la *matière* et de l'*énergie* avec l'extérieur.



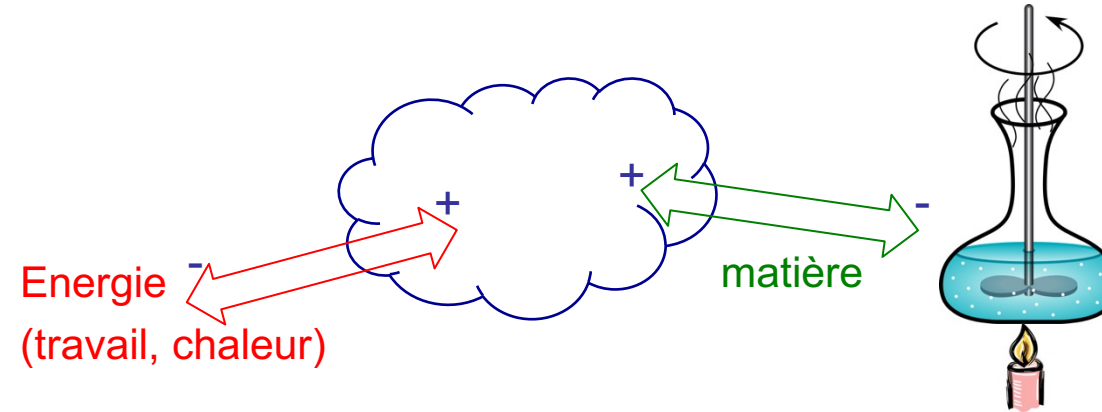
**Système fermé** : le système échange de l'*énergie* (*travail et/ou chaleur*) avec l'extérieur.



**Système isolé** : le système n'échange ni *énergie* ni *matière* avec l'extérieur.



Il est crucial de bien définir la convention de signe utilisée pour les échanges.

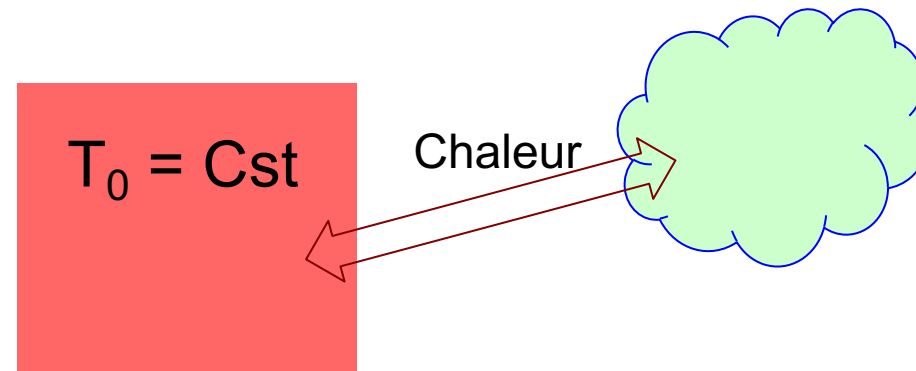


- La convention utilisée est de prendre toujours **le point de vue du système**.
- Si la quantité est *gagnée* par le système, elle est *positive* (négative si elle est perdue).
- Attention certains livres ( $\approx 1/3$ ) utilisent une convention opposée pour le travail mécanique ( $\rightarrow$  et plus cours sur le 1<sup>er</sup> principe).



- **Thermostat**

**Thermostat** : système capable d'échanger de l'énergie sous forme de chaleur avec l'extérieur dans les deux sens (donner et recevoir) *sans changer de température*.



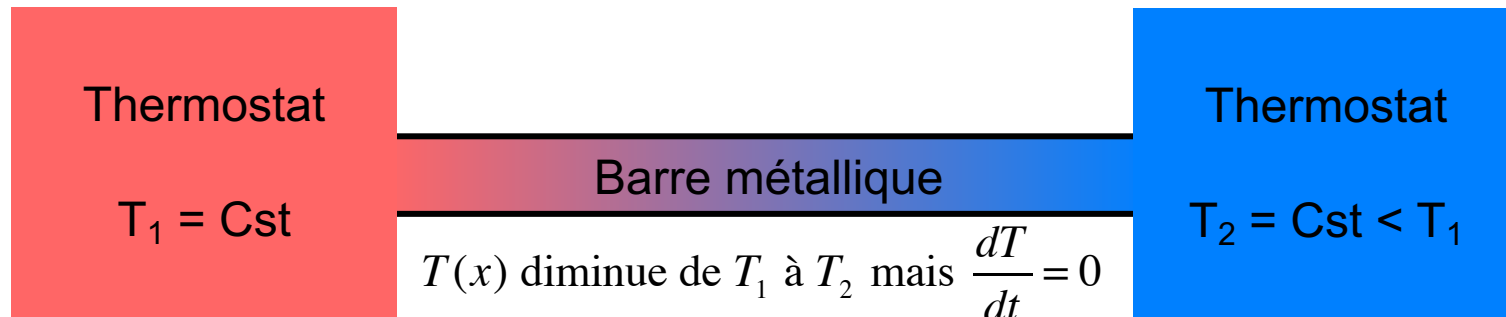
- Un thermostat est caractérisé uniquement par sa température.
- Exemple : un lac dont les dimensions sont telles que la température de l'eau ne sera pas affectée par des échanges de chaleur avec un système thermodynamique beaucoup plus petit qui utilise l'eau du lac pour être refroidit ou réchauffé.

- **Systèmes thermodynamiques**

**Système *stationnaire*** : système dont les variables d'état ne dépendent pas du temps.

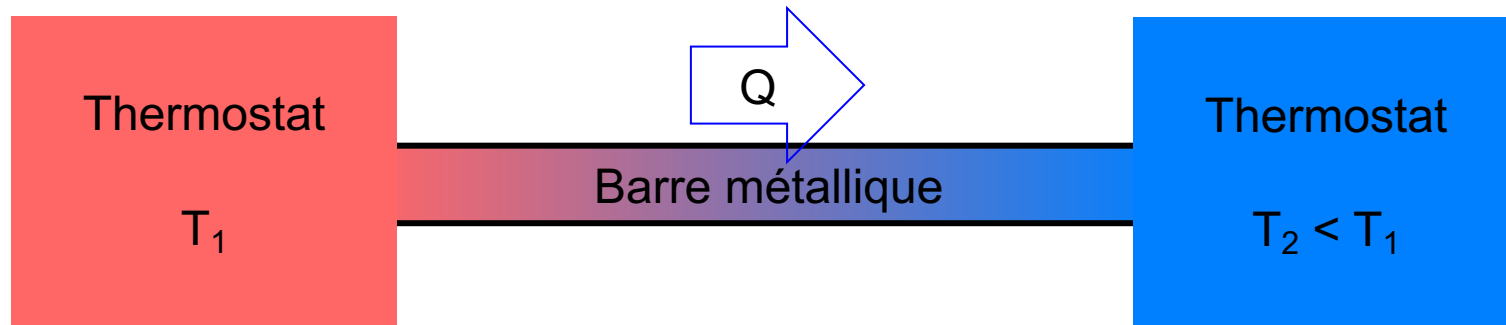
$$\frac{d}{dt} \{ \text{variables d'état} \} = 0$$

$$\dot{p} = 0, \quad \dot{T} = 0, \quad \dot{V} = 0, \quad \dot{n} = 0 \quad \text{etc...}$$

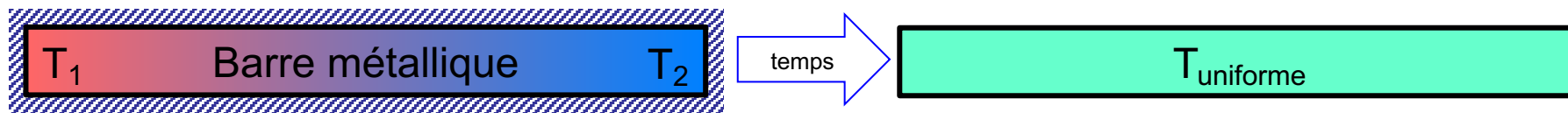


- Systèmes thermodynamiques

**Système à l'équilibre thermodynamique** : système stationnaire qui, si il est *isolé* de tout échange avec l'extérieur, reste stationnaire.



Exemples : la barre métallique est dans un état stationnaire mais **n'est pas à l'équilibre thermodynamique**





1

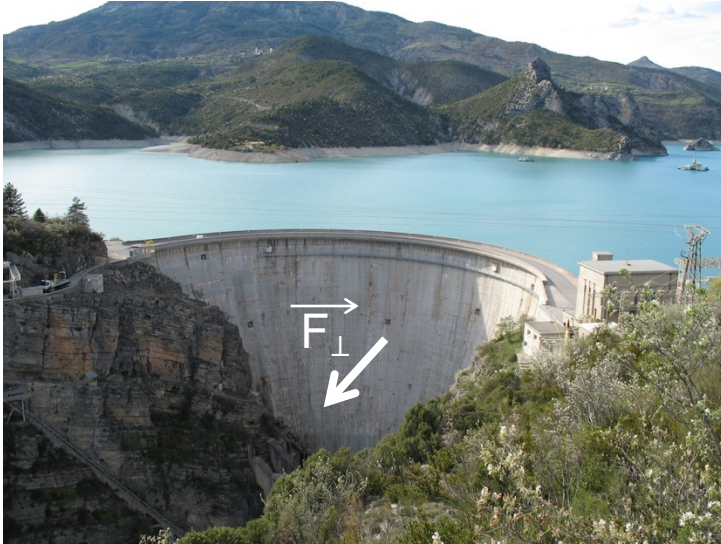
*Rappels*

2

*Comment décrire un système thermodynamique et ses transformations, variables, équations, définitions, outils mathématiques*

3

*Pression*



**Pression** : c'est la mesure de la composante de la force exercée *perpendiculairement* à une surface par un milieu.

Le module de la force exercée perpendiculairement est proportionnelle à la surface  $S$ . La pression est le facteur de proportionnalité, c'est une variable intensive.

$$P = \frac{F_{\perp}}{S}$$

Comme cette valeur n'est pas nécessairement constante sur toute la surface, il est mieux de la définir sous une forme différentielle sur un élément de surface infiniment petit  $dS$ .

$$P = \frac{dF_{\perp}}{dS}$$

Comme la surface n'est pas nécessairement plane, il est également mieux de définir la pression à partir de l'élément de surface  $dS$  et un vecteur unitaire perpendiculaire à la surface au point considéré.

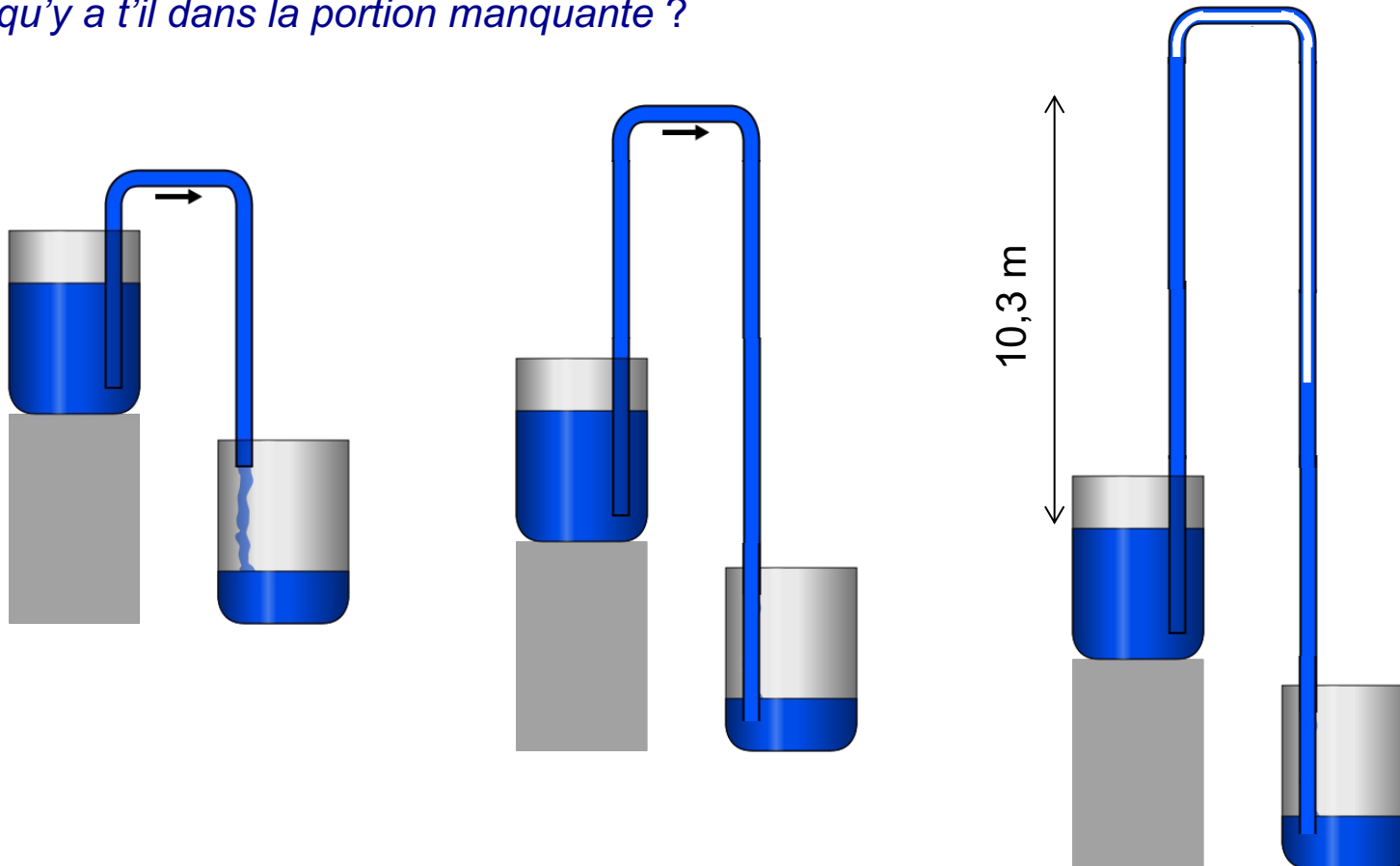
$$P = \frac{\vec{dF} \cdot \vec{n}}{dS}$$

L'unité de pression est une force/surface, en unités internationales :  $\text{Nm}^{-2}$  ou Pascal (Pa).  
Ordre de grandeur à retenir : pression atmosphérique au niveau de la mer  $P_{\text{atm}} = 10^5 \text{ Pa}$ .

## Expériences historiques sur la pression atmosphérique

Origine du problème : on sait utiliser depuis l'antiquité des siphons pour l'approvisionnement en eau des villes.

Au XVII<sup>e</sup> siècle, les fontainiers constatent que les siphons ne fonctionnent plus pour des hauteurs supérieures à 18 brasses (soit 10,3 m). La colonne d'eau se rompt. *Pourquoi et qu'y a t'il dans la portion manquante ?*



## Expériences historiques sur la pression atmosphérique

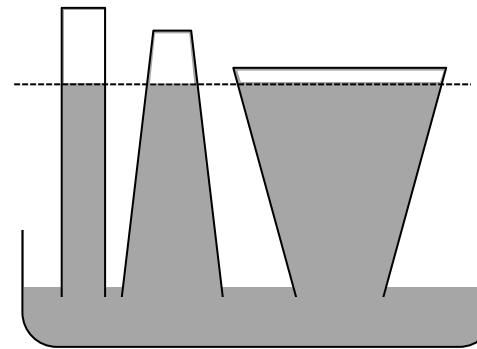
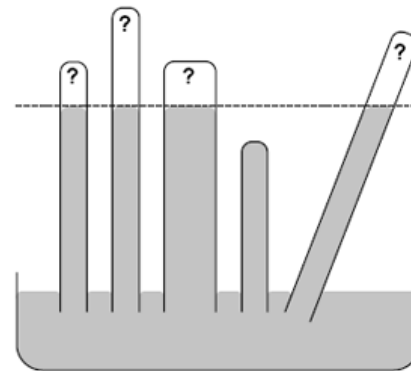
### E. TORRICELLI

E. Torricelli, remplace l'eau par un liquide beaucoup plus dense (du mercure) et refait l'expérience.

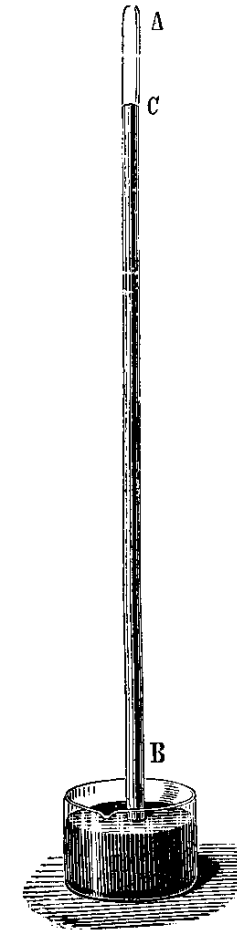
- Hydrostatique  $P_A - P_B = -\rho gh$   
 $dP = -\rho g dh$

- Le baromètre de Torricelli (1644)

- Controverses sur le vide



Evangelista Torricelli  
1608 - 1647



*A donné son nom au Torr ancienne unité de pression (1 Torr = 1 mmHg  $\approx$  133 Pa )*

## Expériences historiques sur la pression atmosphérique

Ce qui fait monter la colonne de mercure dans le tube ce n'est pas que la "nature a horreur du vide" (R. Descartes), c'est la pression de l'atmosphère qui s'exerce sur la surface du mercure.

A la même époque on se demande si il est possible de "peser" le poids de l'atmosphère au dessus de nous. B. Pascal comprend que c'est exactement ce que l'on fait dans l'expérience de Torricelli. Il y a  $\approx 1 \text{ kg d'air par cm}^2$  au dessus de nous ( $10^5 \text{ Pa}$ ).

### B. PASCAL

- Expérience au Puy de Dôme par Petit et Florin Périer (1646-1648)



Blaise Pascal  
1623 - 1662

1 Variable extensive et variable intensive

2 Variable, fonction et équation d'état

3 Dérivées partielles

4 Systèmes thermodynamiques

- ouverts
- fermés,
- isolés
- stationnaires,
- à l'équilibre
- thermostat

5 Pression

6





Expériences auditoires EPFL : [auditoires-physique.epfl.ch](http://auditoires-physique.epfl.ch)

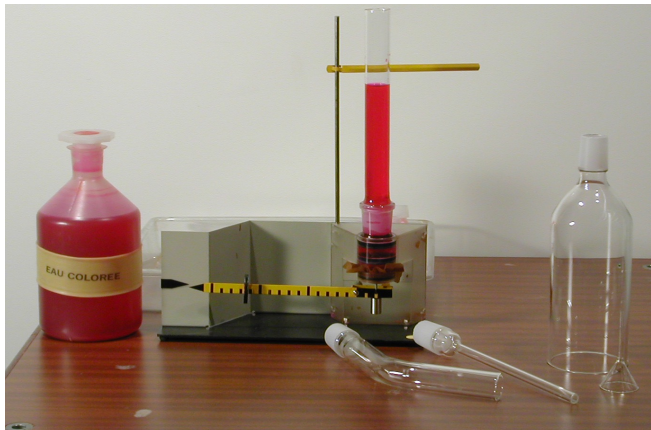
Chaine YouTube : [www.youtube.com/channel/UC4htKGfCRRkFylqAo8DGocg](http://www.youtube.com/channel/UC4htKGfCRRkFylqAo8DGocg)



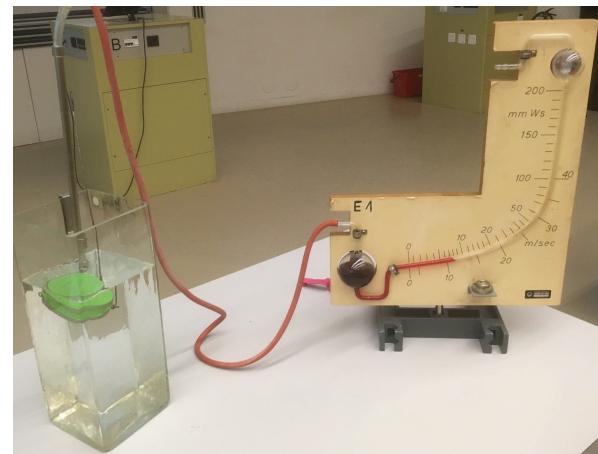
Moteur thermique



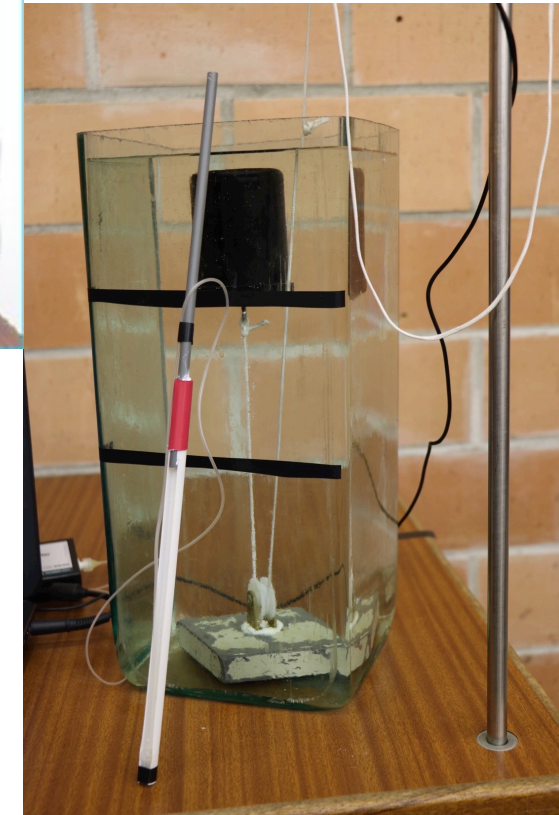
Baroscope



Pression hydrostatique



Membrane de Harti



Poussée d'Archimède