

## Thermodynamique PHYS106(b)

### **Introduction à la thermodynamique**

Jérémy Genoud

École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Swiss Plasma Center (SPC), CH-1015  
Lausanne, Switzerland

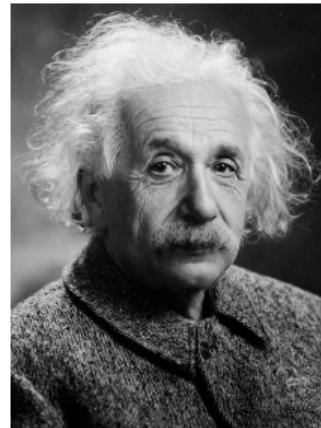
1. **Introduction à la thermodynamique**
2. Théorie cinétique des gaz
3. Gaz parfaits, gaz réels, gaz de Van der Waals
4. Transitions de phase
5. Le premier principe
6. Le second principe
7. Cycles et machines thermiques
8. Diffusion, transfert de chaleur
9. Systèmes ouverts, potentiel chimique
10. Introduction à la relativité restreinte

1. Introduction à la thermodynamique
  - 1.1 Bref historique
  - 1.2 Définition thermodynamique et exemples
  - 1.3 Motivation approche statistique
  - 1.4 Définitions et conventions
  - 1.5 La pression
  - 1.6 La température
  - 1.7 Compléments mathématiques



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."

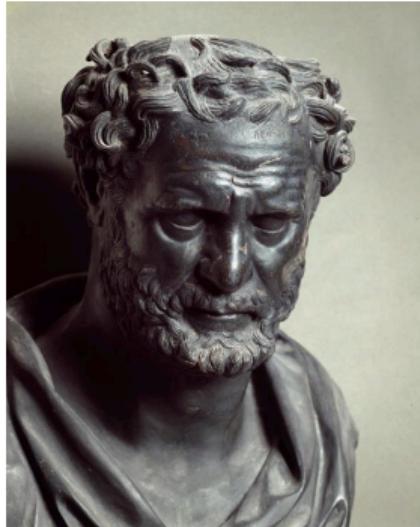


Albert Einstein (1879-1955)

"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."

# Thermodynamique

chaleur       dunamis



Démocrite (-400 BC)

*Origines:*

- ▶ Philosophes Grecs (Héraclite, Démocrite)
- ▶ Spéculations sur la nature de la matière et de l'énergie.
- ▶ Démocrite: "La chaleur pourrait être liée au mouvement des atomes"

# Théories, études

Philosophes grecs

Héraclite

Démocrite

~ -400

↓  
D ~ 0

Héron d'Alexandrie

Eolipyle : machine à vapeur  
et à réaction



Galilée, Boyle

Lavoisier

~ 1700

↓  
A

- premières études expérimentales

sur les gaz et la pression

- lien entre pression et volume

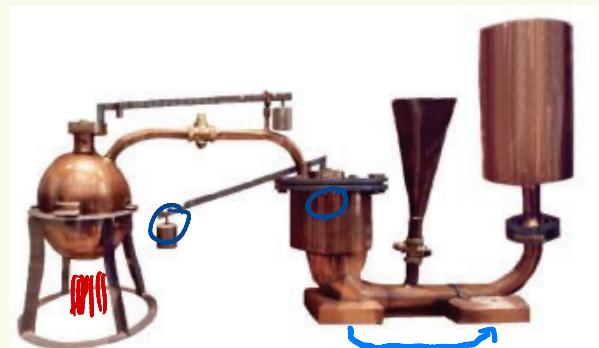
- concept de calorique  
chaleur latente

# Inventions

→ 1690

Denis Papin

- marmite à vapeur  
- machine à vapeur constituée  
d'un cylindre et d'un  
piston



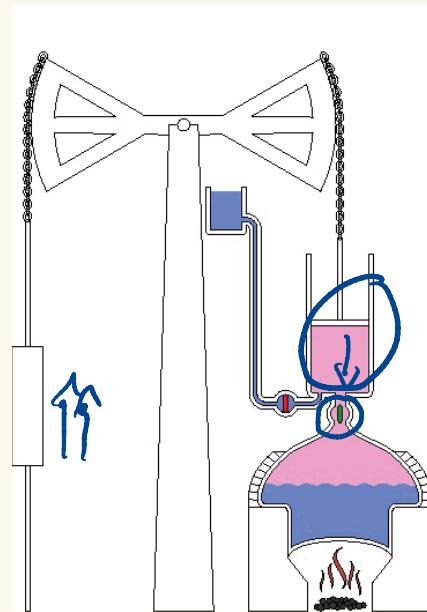
# Théories, études

→ 1712

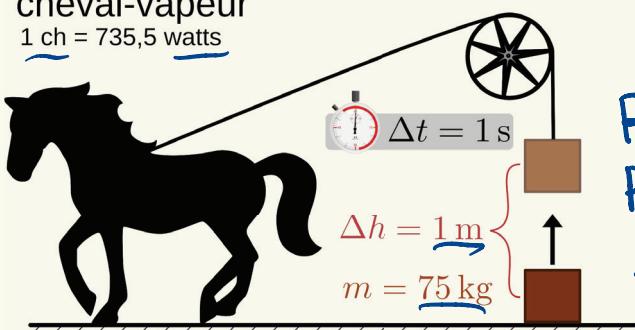
# Inventions

Thomas Newcomen

- première machine à vapeur industrielle



cheval-vapeur  
1 ch = 735,5 watts



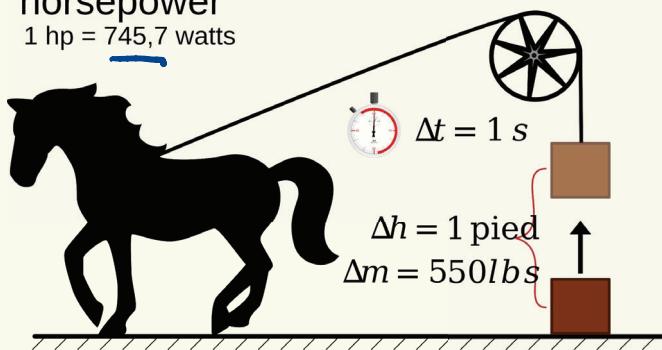
→ 1765

# James Watt

- améliore grandement la machine de Newcomen (condenseur séparé)

- concept de cheval-vapeur

horsepower  
1 hp = 745,7 watts



→ 1769-1771 Nicolas Joseph Cugnot

-premier véhicule automobile



→ 1802 Richard Trevithick

-première machine à vapeur à haute pression  
- première locomotive à vapeur



# Théories, études

Sadi Carnot 1824  
- Cycles thermodynamiques,  
- efficacité des machines  
thermiques

James Prescott Joule 1843

- la chaleur est une  
forme d'énergie

Julius Robert von Mayer 1850

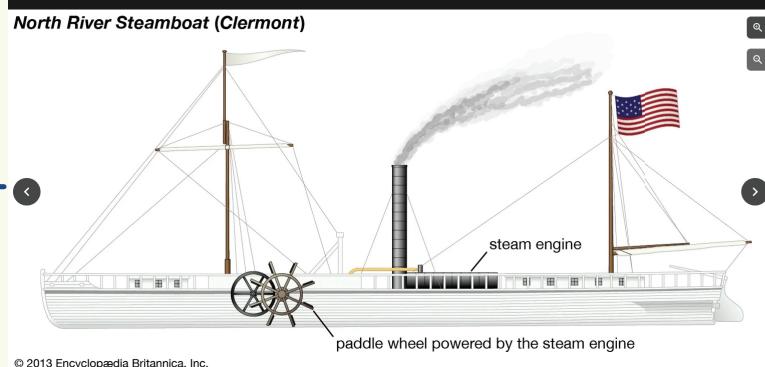
- énonce le premier principe

Rudolf Clausius 1850

- concept d'entropie  
- deuxième principe

# Inventions

→ 1807 Robert Fulton  
- premier navire  
à vapeur



## Théories, études

Lord Kelvin

(1824 - 1907)

- échelle absolue de température
- contribue aux lois fondamentales de la thermodynamique

Ludwig Boltzmann

(1844 - 1906)

- relie la thermodynamique à la mécanique statistique

## Inventions

↗

↗

↗

application à des systèmes complexes  
(chimie, biologie)

# Théories, études

# Inventions

Ilya Prigogine 1970

- systèmes complexes
- structures dissipatives
- irréversibilité

Aujourd'hui

Applications modernes :

- énergies renouvelable
- physique des plasmas
- nanotechnologie
- astrophysique
- cosmologie

⋮

La thermodynamique étudie les relations entre **la chaleur**, **l'énergie** et **le travail**, ainsi que les transformations de l'énergie d'une forme à une autre.

# Exemples de phénomènes/objets où la thermodynamique intervient

---

- ▶ Maison
  - ▶ Thermomètre
  - ▶ Pile
  - ▶ Réfrigérateur, congélateur
  - ▶ Plaques de cuisson
  - ▶ Chauffe eau, cocotte minute
  - ▶ Chauffage, chaudière, pompe à chaleur
  - ▶ Isolation thermique
  - ▶ Climatisation
- ▶ Transport
  - ▶ Moteur thermique (cycle Otto, cycle Diesel)
  - ▶ Turboréacteur
  - ▶ Moteur fusée
- ▶ Réactions chimiques
- ▶ Phénomènes biologiques
- ▶ Phénomènes atmosphériques
  - ▶ Nuages et pluie
  - ▶ Vent, Cyclones
  - ▶ Glacier
  - ▶ Eruption volcanique
  - ▶ Ecosystème
- ▶ Production d'électricité (60-70 % basée sur des cycles thermodynamiques)
  - ▶ Centrale à charbon, fioul
  - ▶ Centrale biomasse
  - ▶ Centrale nucléaires (fission, fusion)
  - ▶ Centrale géothermique
  - ▶ Centrale solaire thermodynamique
- ▶ Astrophysique
  - ▶ Etoile
  - ▶ Trou noir
- ▶ Cosmologie

## Buts de la thermodynamique

---

- ▶ Décrire de manière macroscopique des objets ou systèmes extrêmement complexes
- ▶ Etudier les transformations d'énergies entre différentes formes (comment ?, conditions ?, limites ?)
- ▶ Etablir des lois et principes universels
- ▶ Expliquer les processus naturels (irréversibilités des phénomènes naturels, de certaines transformations)
- ▶ Optimiser l'efficacité énergétique des machines thermiques
- ▶ ...

## Définitions

---

- ▶ Un système: partie de l'univers que l'on considère
- ▶ Macroscopique: à l'échelle de nos sens
- ▶ Variable d'état: grandeur physique qui décrit l'état d'**équilibre** d'un système thermodynamique. Elles dépendent uniquement de l'état actuel du système, et non de la manière dont cet état a été atteint (son histoire).  
Exemples : la pression  $p$ , le volume  $V$ , la température  $T$ .
- ▶ Equation d'état: équation qui relie les différentes variables d'état à l'équilibre thermodynamique.  
Exemple: loi des gaz parfait  $pV = nRT$ .  
*"moteur de des gaz parfait"*
- ▶ Fonction d'état: Fonction qui ne dépend que des variables d'état d'un système. Conséquence: sa valeur est indépendante du procédé utilisé pour arriver dans cet état, elle ne dépend que de l'état du système considéré.  
Exemple: l'énergie interne  $U$ , l'entropie  $S$ , l'enthalpie  $H$ .

- ▶ Variable extensive: variable proportionnelle à la taille du système.

Exemple: masse  $m$ , nombre de particules  $n$ , volume  $V$ , quantité de mouvement  $p$ , énergie interne  $U$ , entropie  $S$ .

$$\textcircled{x} + \textcircled{x} = \textcircled{2x}$$

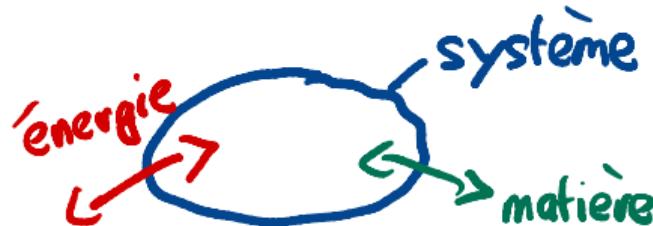
- ▶ Variable intensive > variable indépendante de la taille du système.

Exemple: température  $T$ , pression  $p$ , potentiel chimique  $\mu$ , densité  $\rho$ .

$$\textcircled{x} + \textcircled{x} = \textcircled{x}$$

## Définitions: Systèmes thermodynamiques

- ▶ Système ouvert: le système peut échanger de la matière et de l'énergie avec l'extérieur.



- ▶ Système fermé: le n'échange pas de matière avec le milieu extérieur.



## Définitions: Systèmes thermodynamiques

---

- ▶ Système isolé: le système n'échange ni énergie, ni matière avec l'extérieur.



Thermos

- ▶ Système stationnaire: système dont les variables d'état ne dépendent pas du temps
- ▶ Système à l'équilibre thermodynamique: système stationnaire qui, si il est isolé de tout échange avec l'extérieur, reste stationnaire.
- ▶ Thermostat: système capable d'échanger de l'énergie sous forme de chaleur avec l'extérieur dans les deux sens (donner et recevoir) **sang changer de température.**

$$\frac{d}{dt}(x) = \dot{x} = 0$$

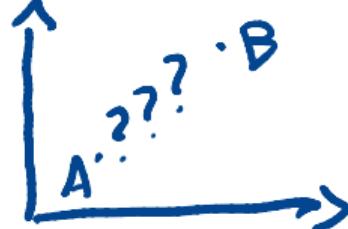
## Définitions: transition réversible ou irréversible

---

- ▶ Transition réversible: transition faite d'une succession d'états d'équilibres thermodynamique.



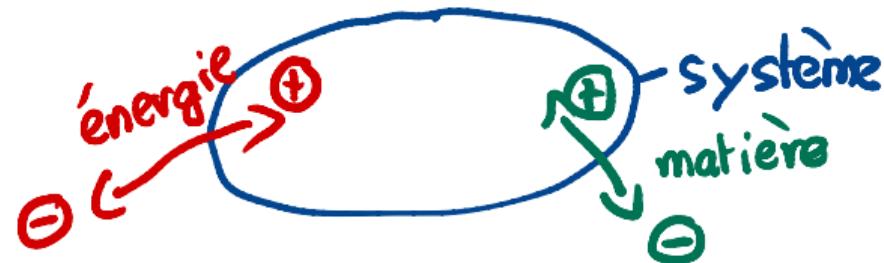
- ▶ Transition irréversible: transition telle que les états intermédiaires (entre l'état initial et final) ne sont pas des états à l'équilibre thermodynamique.



## Convention de signe

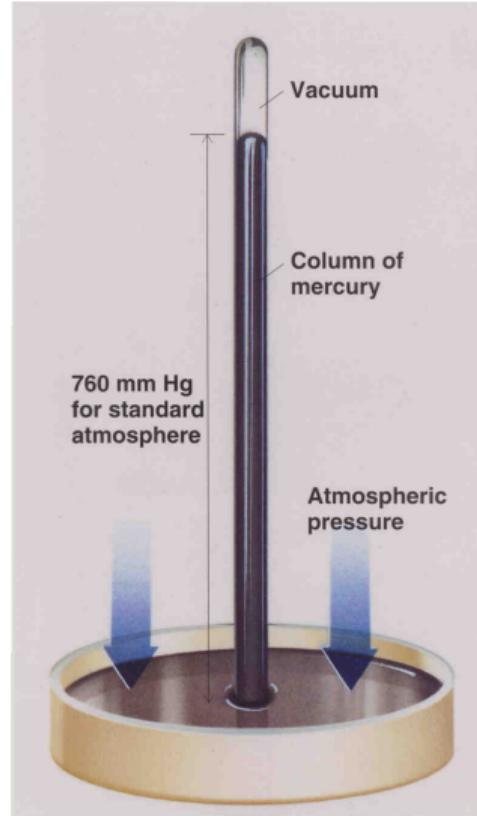
---

- ▶ La convention tout au long du cours est de prendre le point de vue du système.
- ▶ Si la quantité est gagnée par le système, elle est positive (négative si perdue).



## Le baromètre de Torricelli

---

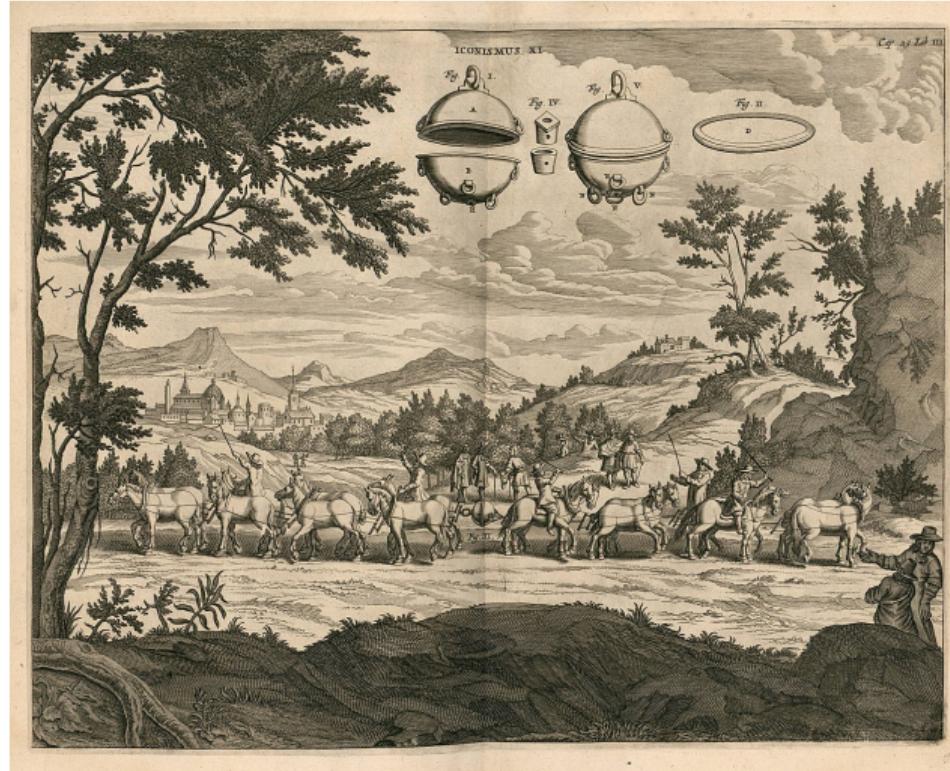


# Expérience du Puy-de-Dôme

---



# Les hémisphères de Magdebourg



## Exemples de thermomètres



Thermomètre à Mercure



Thermomètre à bilame



Thermomètre infrarouge



Thermocouple



Thermomètre à sonde platine



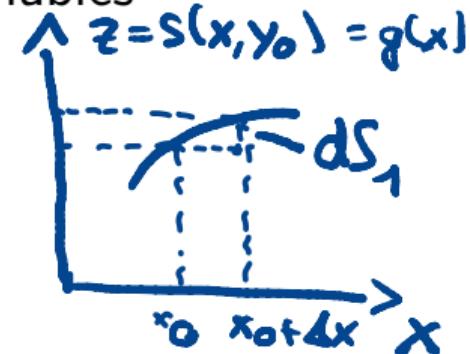
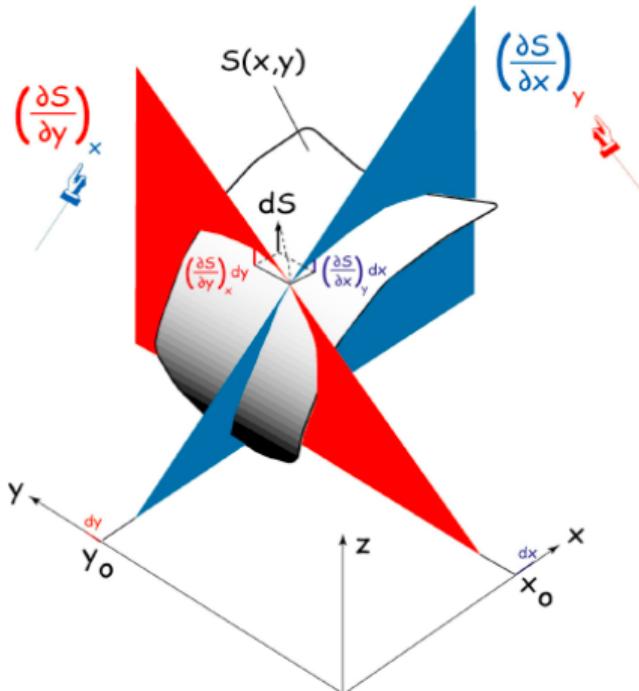
### 1.8.1 Dérivées partielles de fonction de plusieurs variables

$$z = s(x_0, y) = h(y)$$



$$ds_2 = \left. \frac{\partial s}{\partial y} \right|_{x_0} \cdot dy$$

$$\uparrow \frac{dh}{dy}$$



$$\left. \frac{\partial s}{\partial x} \right|_y = \frac{dg}{dx}$$

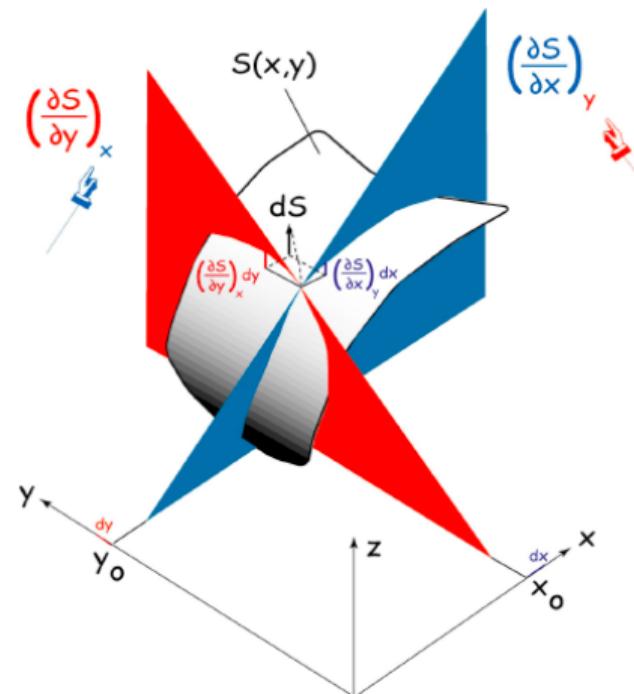
$$ds_1 = \frac{dg}{dx} \cdot dx$$

$$ds_1 = \left. \frac{\partial s}{\partial x} \right|_{y_0} \cdot dx$$

### 1.8.1 Dérivées partielles de fonction de plusieurs variables

1D :  $d$  "d droit"

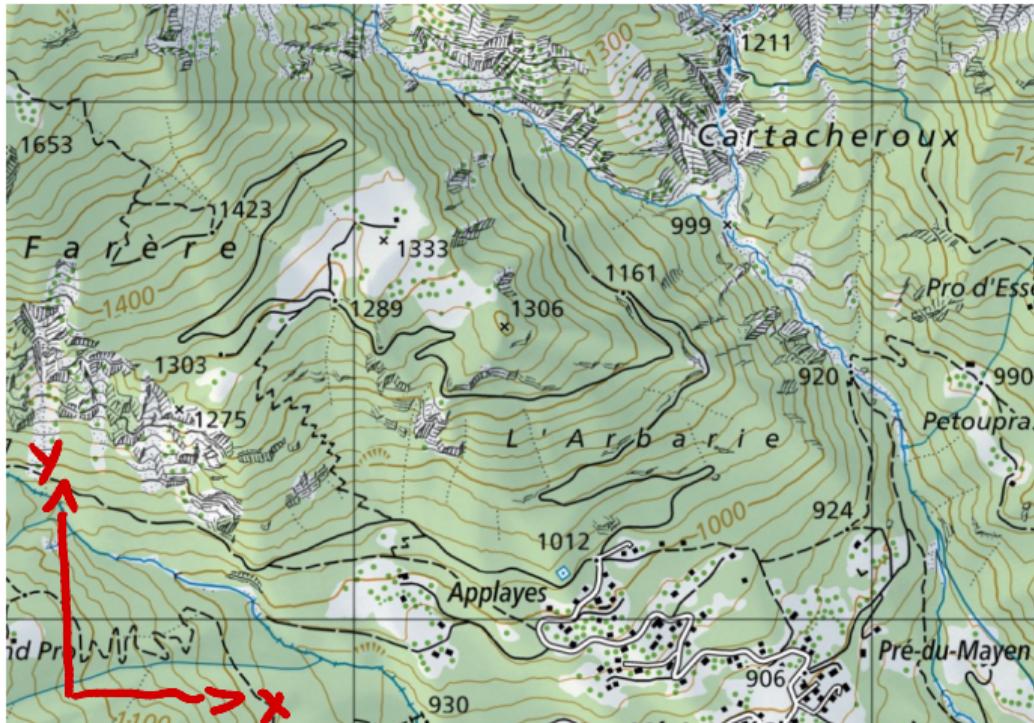
ND :  $\partial$  "d rond"



$$dS = dS_1 + dS_2$$

$$dS = \frac{\partial S}{\partial x} \Big|_{x_0} dx + \frac{\partial S}{\partial y} \Big|_{y_0} dy$$

## Exemple carte topographique 2D



$f(x, y) =$   
altitude

### 1.8.2 Différentielle de fonction de plusieurs variables



Source [www.bahnhof-grindelwald.ch](http://www.bahnhof-grindelwald.ch)