

LP 01 : CONTACT ENTRE DEUX SOLIDES. FROTTEMENT

Pré-requis

Introduction

I-Contact entre deux solides

I-1 Liaisons de contact

I-2 Contact ponctuel

Vitesse de glissement

Mouvement de roulement et de pivotement

Travail des actions de contact

II-Frottement de glissement

II-1 Lois phénoménologiques de G. Amontons et C.A. Coulomb

1ère loi (frottement sans glissement)

2ème loi (frottement avec glissement)

II-2 Détermination de μ et μ_s

TRC

Expérience

III-Applications

III-1 Archet de violon

Solutions de l'équation des cordes vibrantes

III-2 Expérience de Timochenko

TRC

Expérience

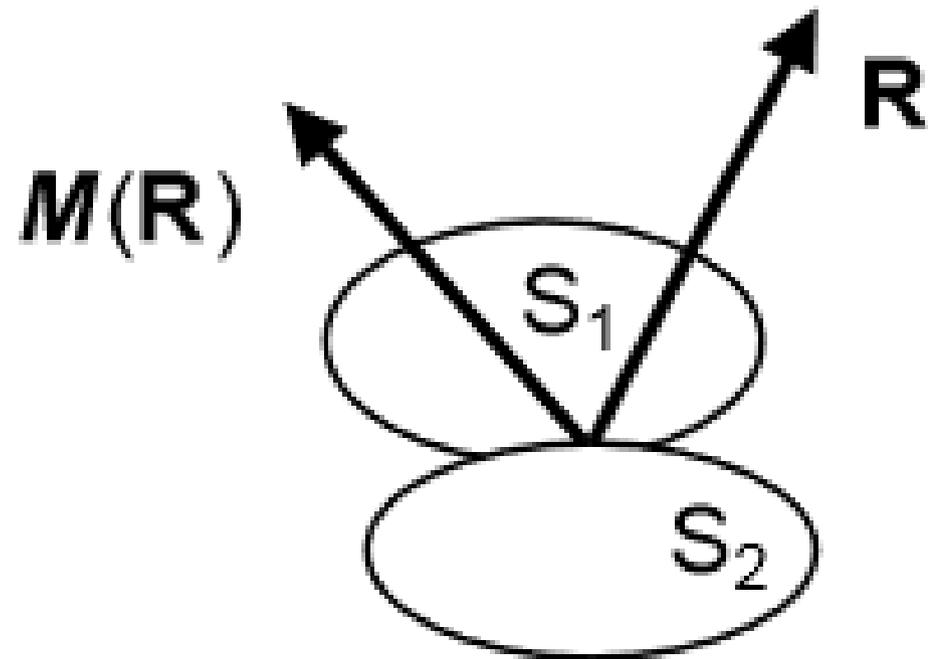
III-3 Autres exemples

Conclusion

CONTACT ENTRE DEUX SOLIDES

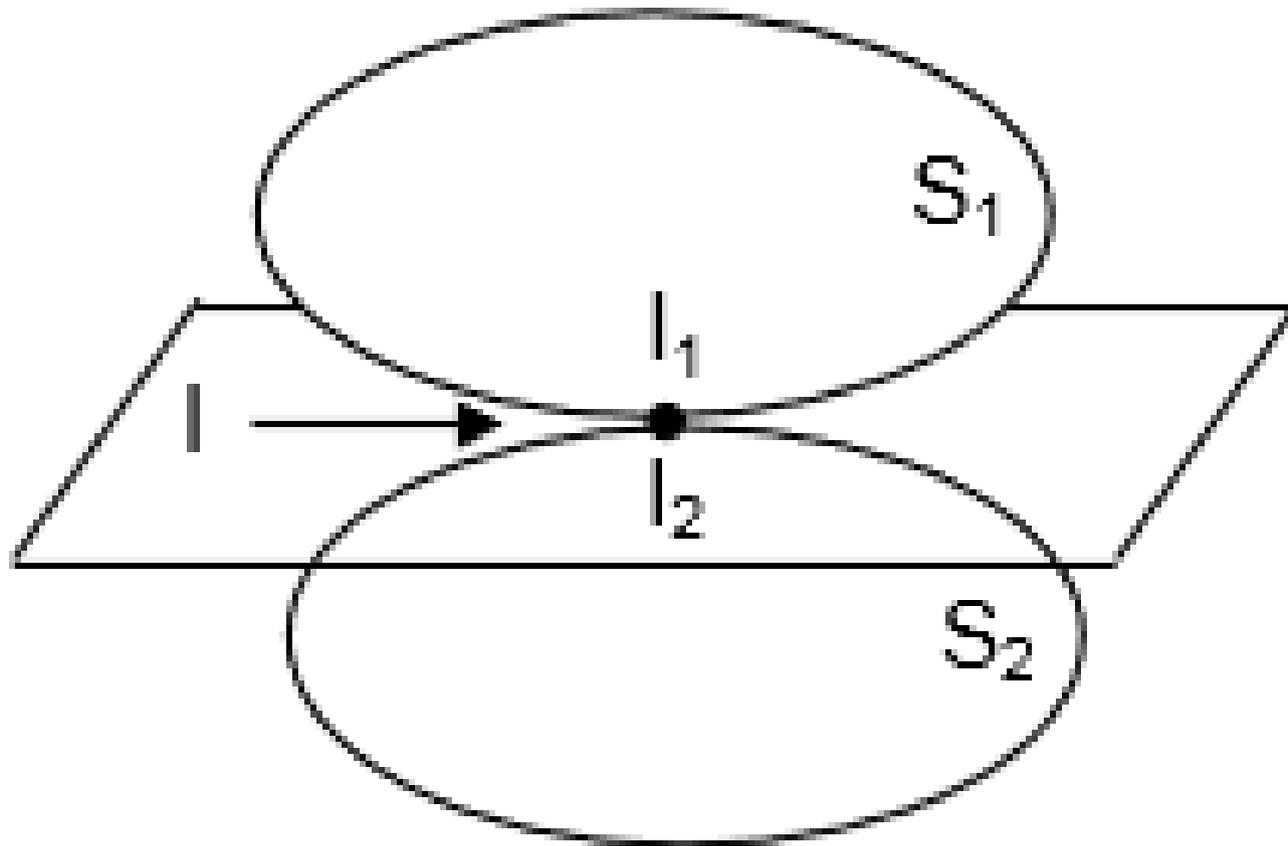
FROTTEMENTS

LIAISONS DE CONTACT

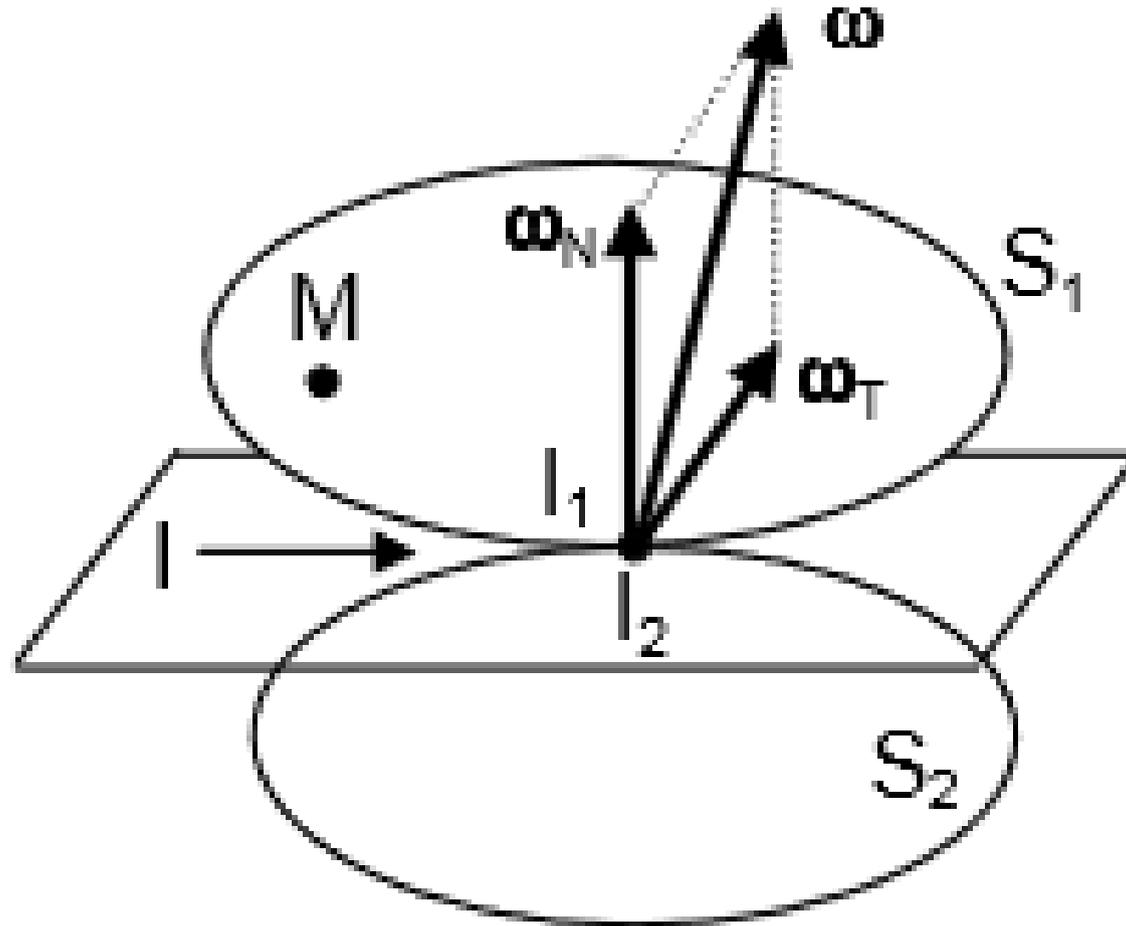


Contact ponctuel

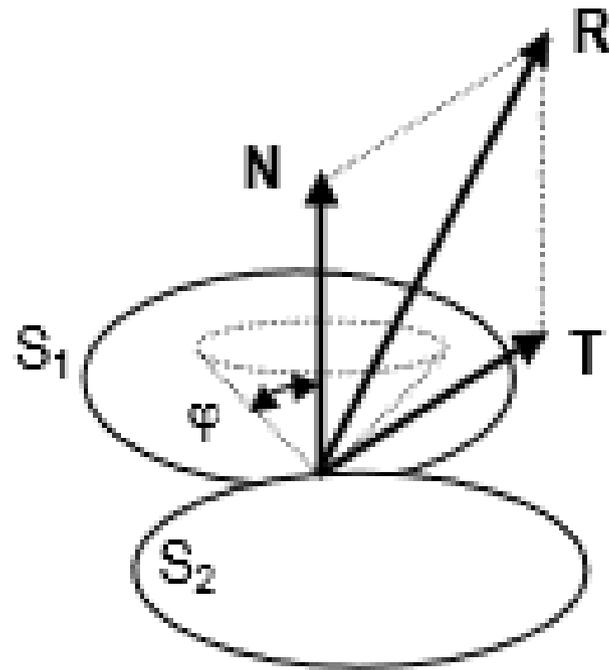
Vitesse de glissement



Mouvements de roulement et de pivotement

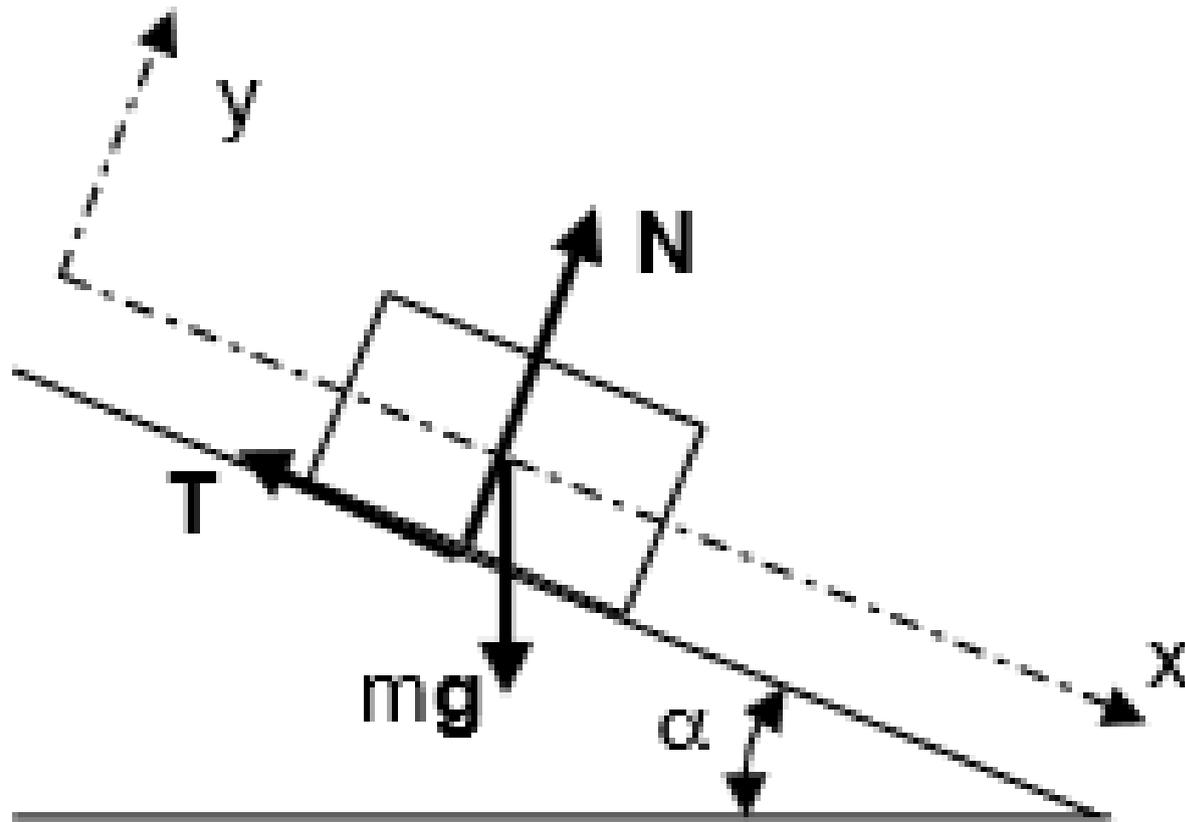


Action de S_2 sur S_1

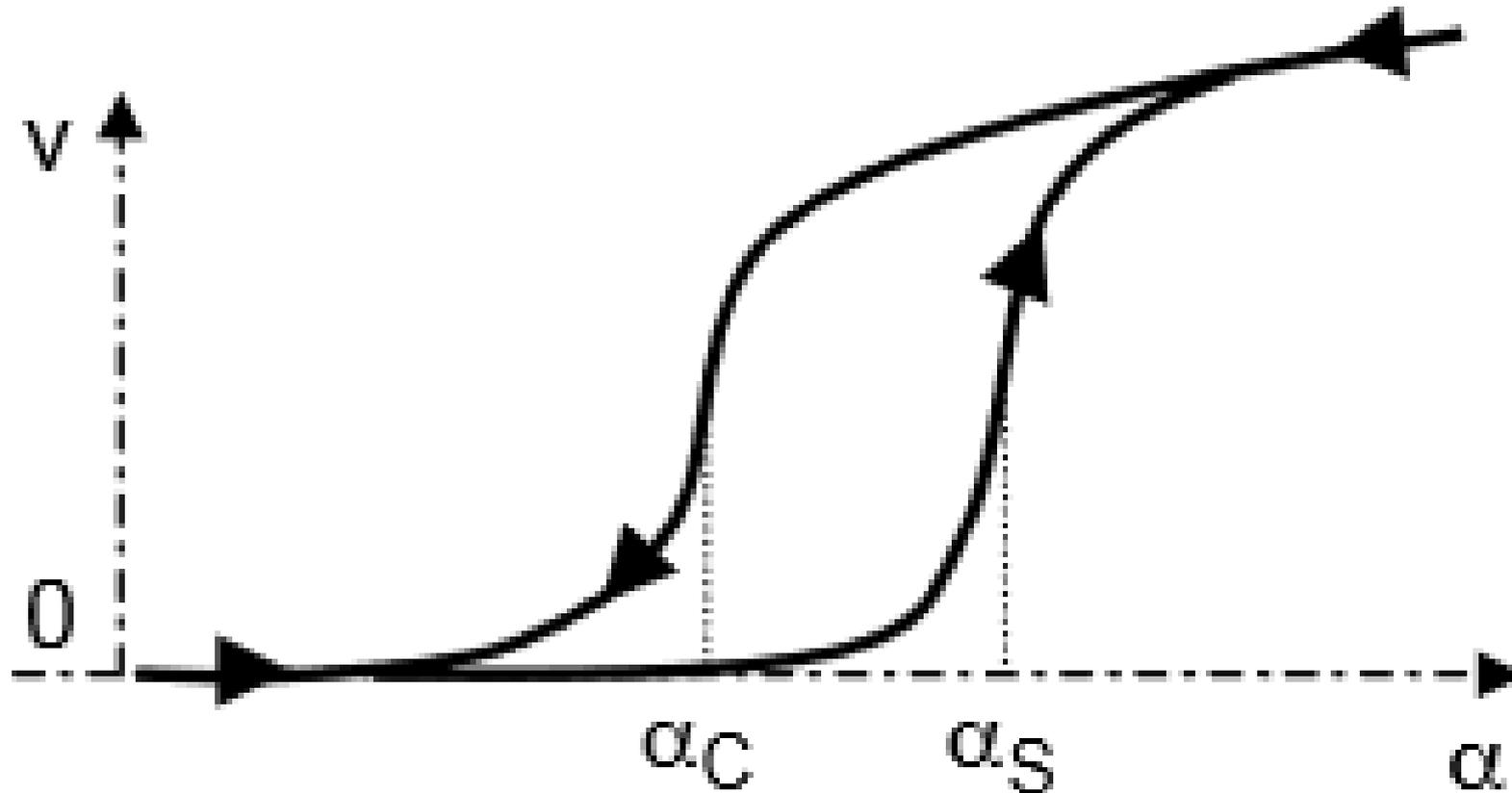


Détermination de μ et μ_s

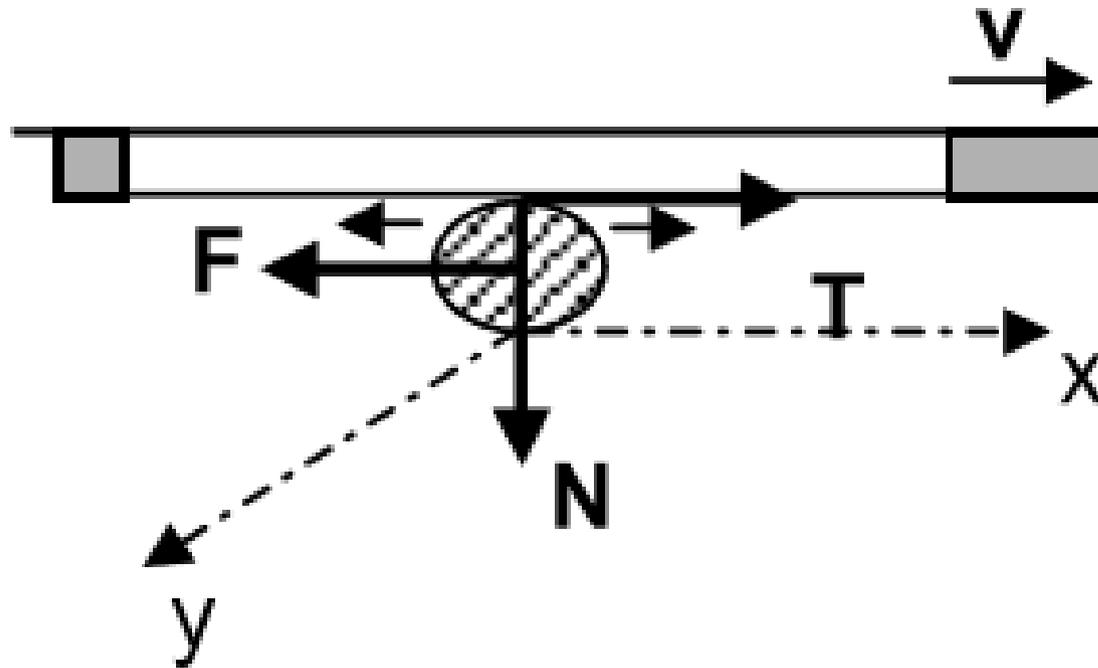
Plan incliné



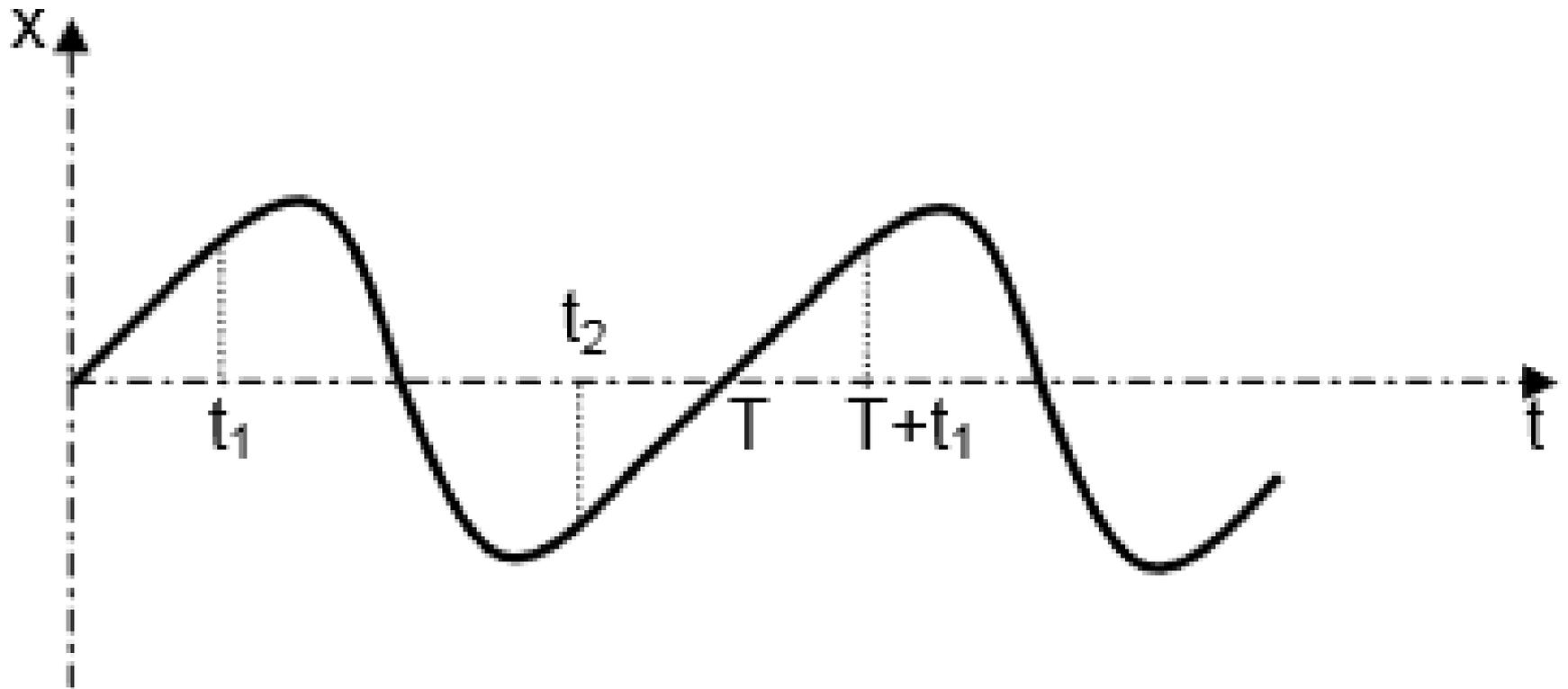
Cycle d'hystérésis de $v(\alpha)$



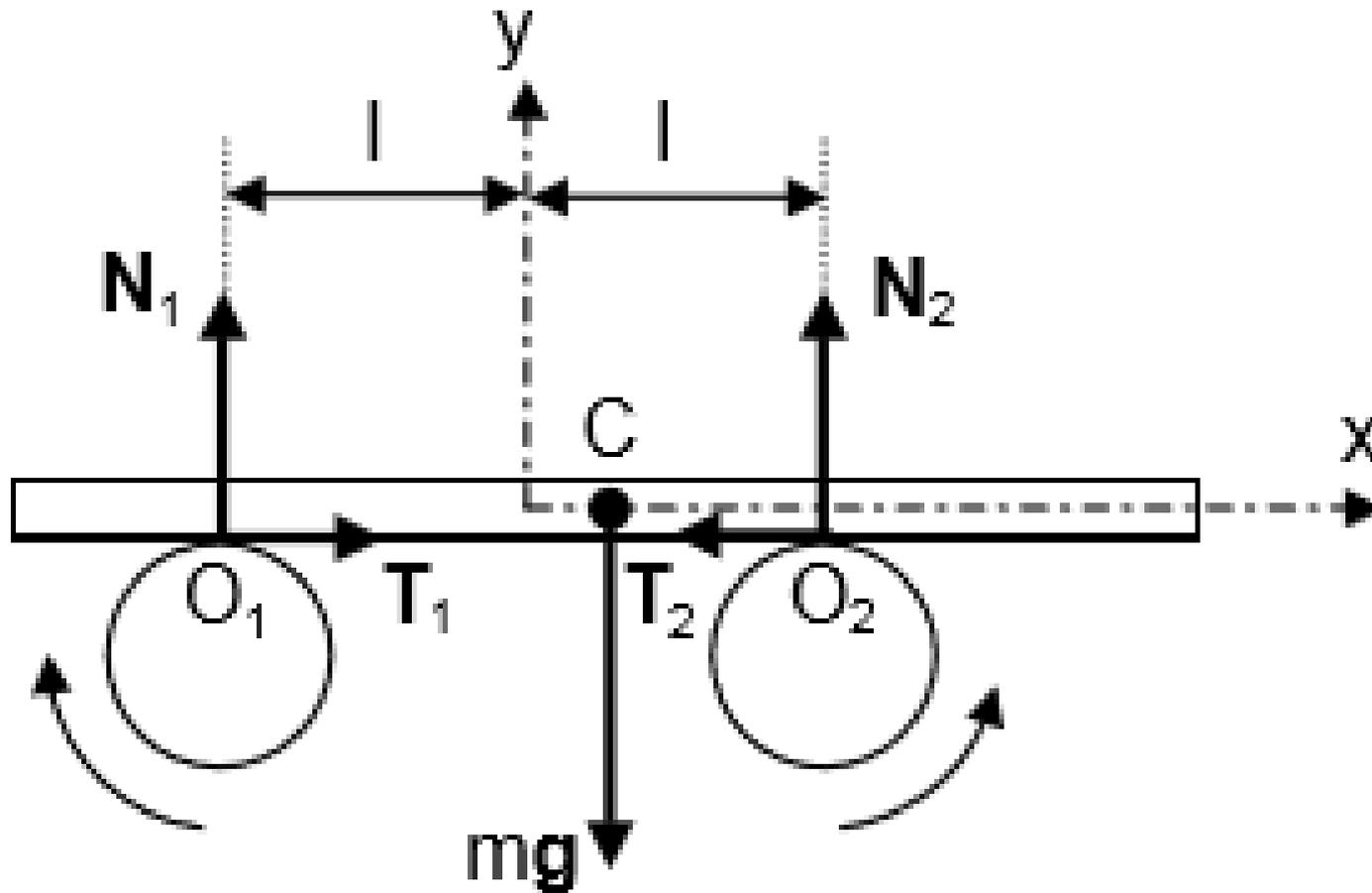
Application 1: Archet de violon



Position latérale de la corde $x(t)$

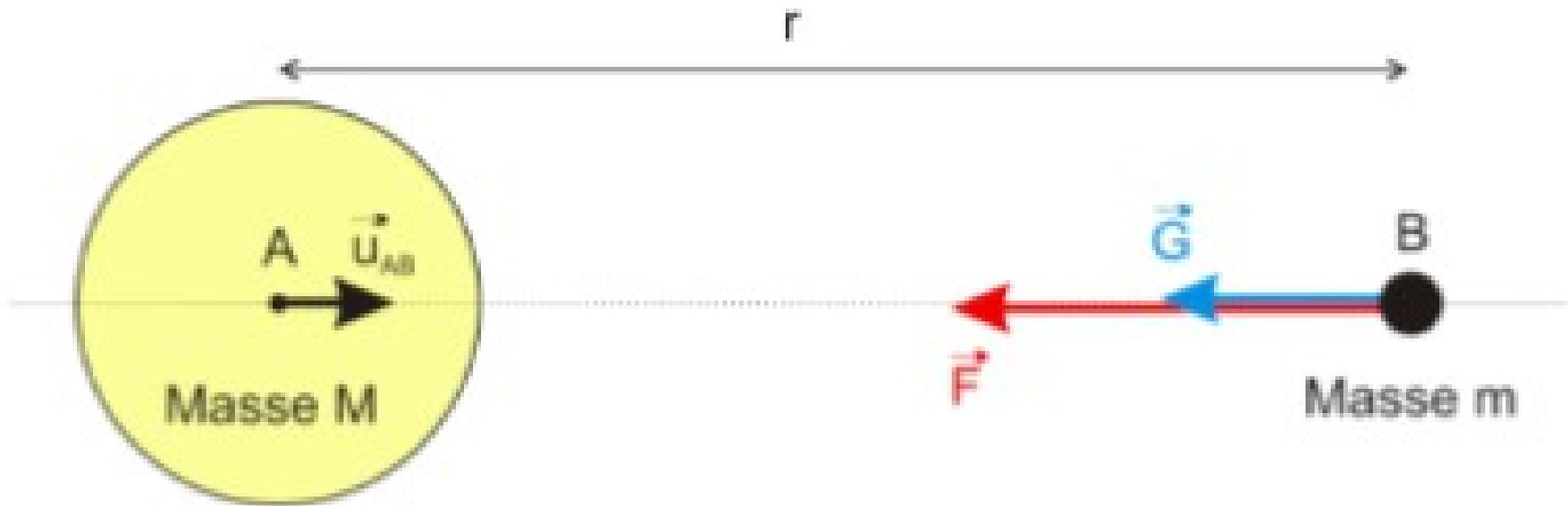


Application 2: Expérience de Timochenko

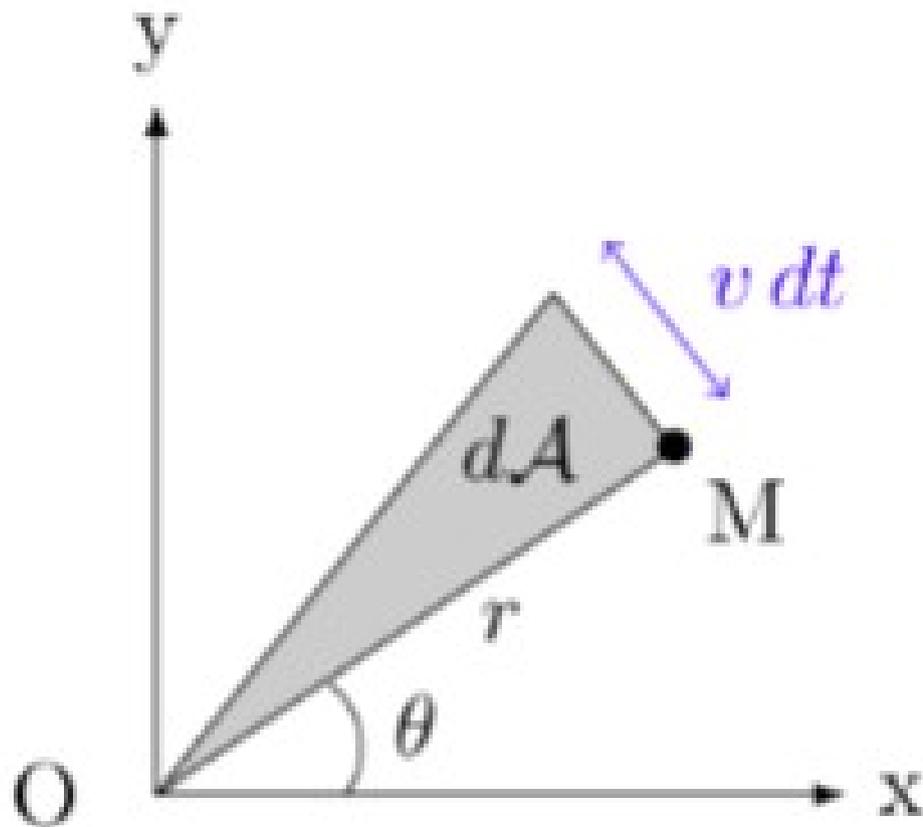


LA GRAVITATION

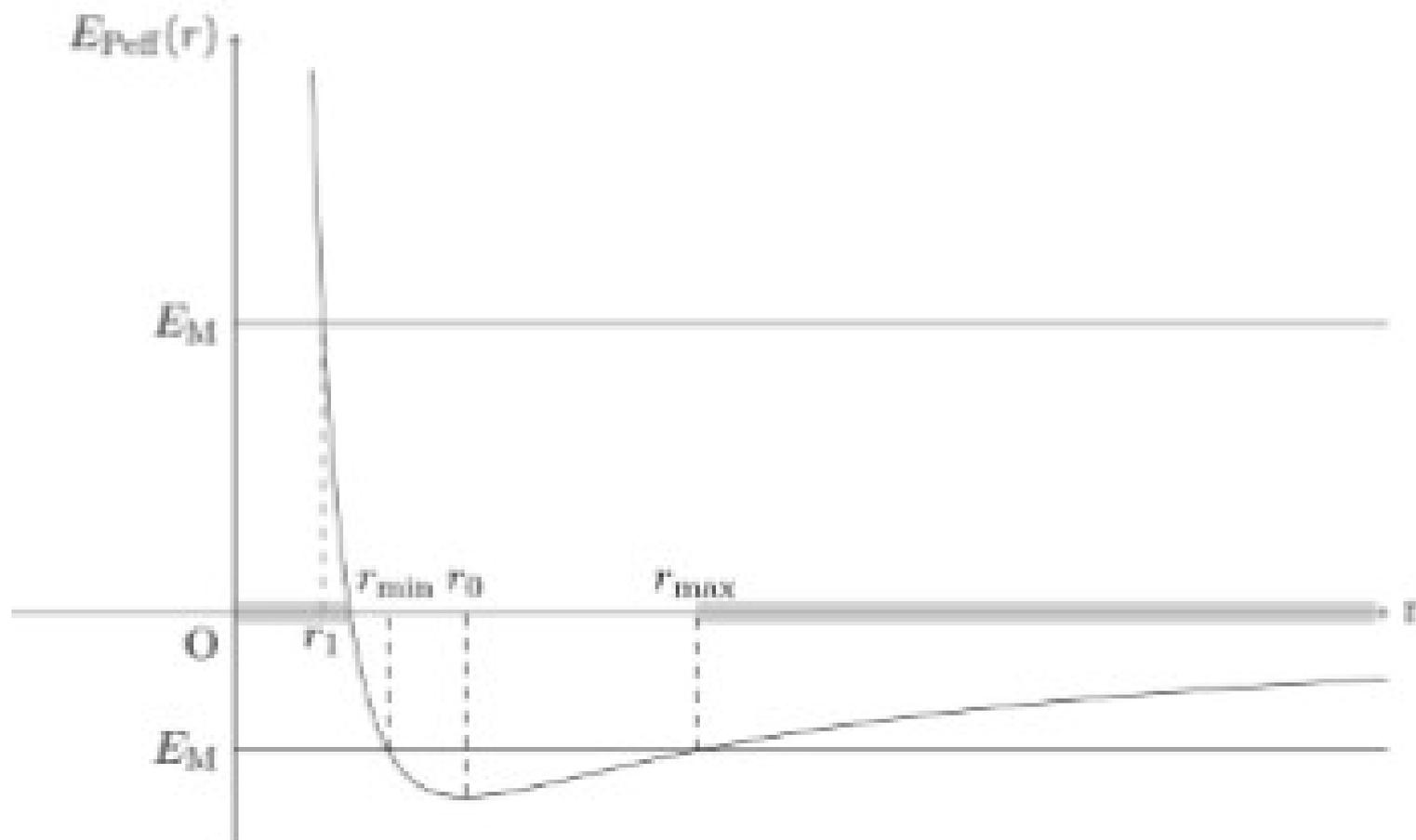
Attraction gravitationnelle



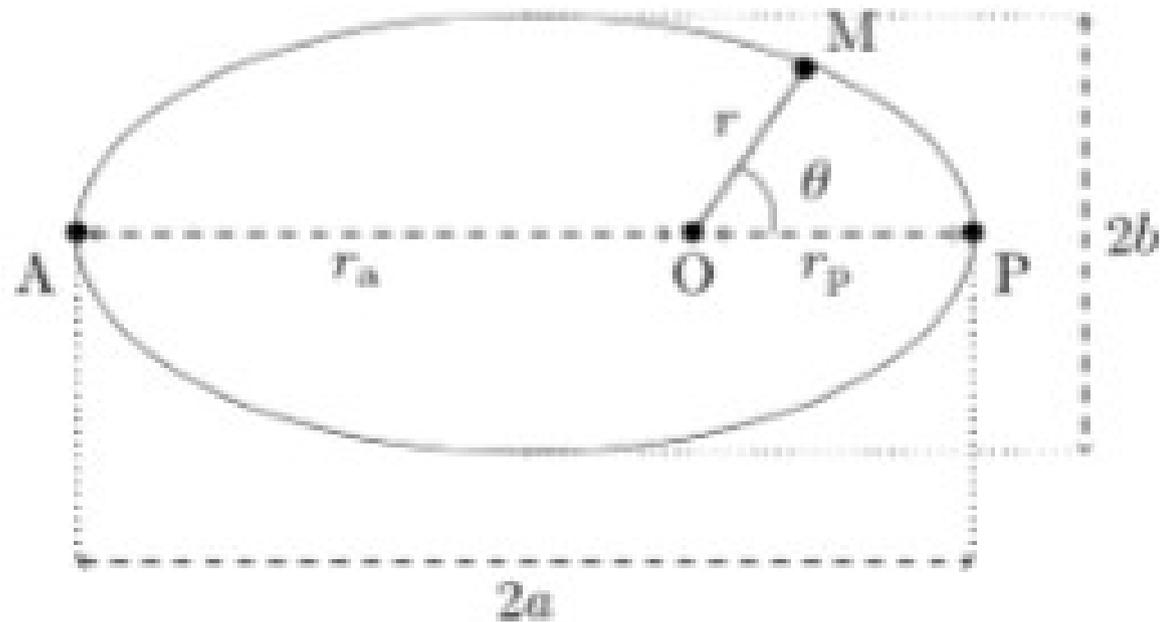
Aire balayée



Energie potentielle effective / Energie Mécanique



Ellipse / coordonnées polaires



LP 02 : GRAVITATION

Pré-requis

Introduction

I-La gravitation: une force centrale conservative

I-1 Expression de la force gravitationnelle

I-2 Définition

II-Mouvement général d'un point M soumis à la gravitation

II-1 Moment cinétique

II-2 Energie mécanique

- Conservation de l'énergie mécanique
- Définition d'une énergie potentielle effective
- Etude des mouvements possibles et conditions
- Equation polaire de la trajectoire
- Energie mécanique et trajectoires

III-Etudes de trajectoires particulières

III-1 Trajectoire parabolique et vitesse de libération

III-2 Trajectoire elliptique et lois de Kepler

- Expression de la vitesse sur la trajectoire
- Troisième loi de Kepler

Conclusion

LP 03 : CARACTERE NON GALILEEN DU REFERENTIEL TERRESTRE

Pré-requis

Introduction

I-Référentiels non galiléens

I-1 Théorème de la résultante cinétique dans un référentiel galiléen

I-2 Différents référentiels

II-Rotation du référentiel terrestre par rapport au référentiel géocentrique supposé galiléen

II-1 Variation du champ de gravitation terrestre avec la latitude

II-2 Déviation vers l'Est

II-3 Pendule de Foucault

II-4 Autres exemples

III-Mouvement du référentiel géocentrique par rapport au référentiel héliocentrique supposé galiléen

III-1 Terme de marée

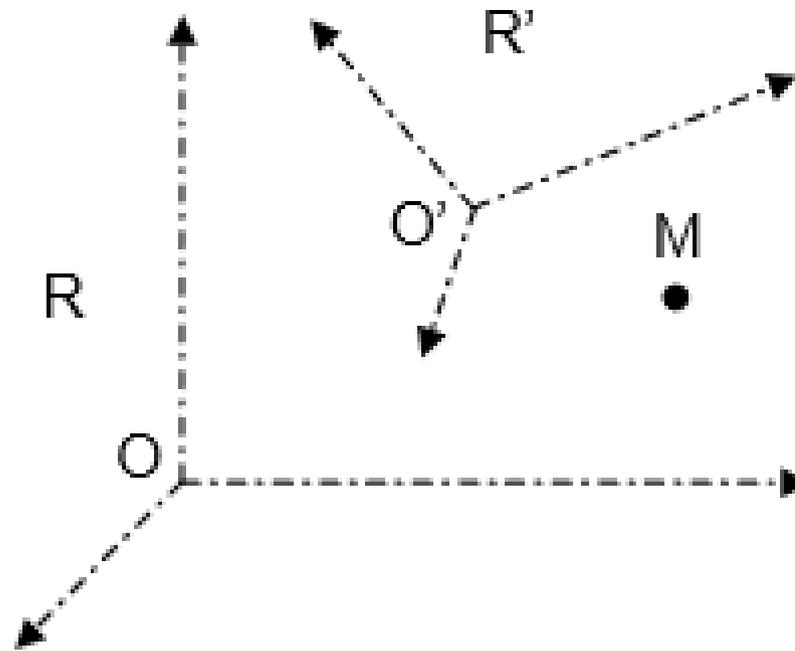
III-2 Expression du terme de marée, ordre de grandeur

Conclusion

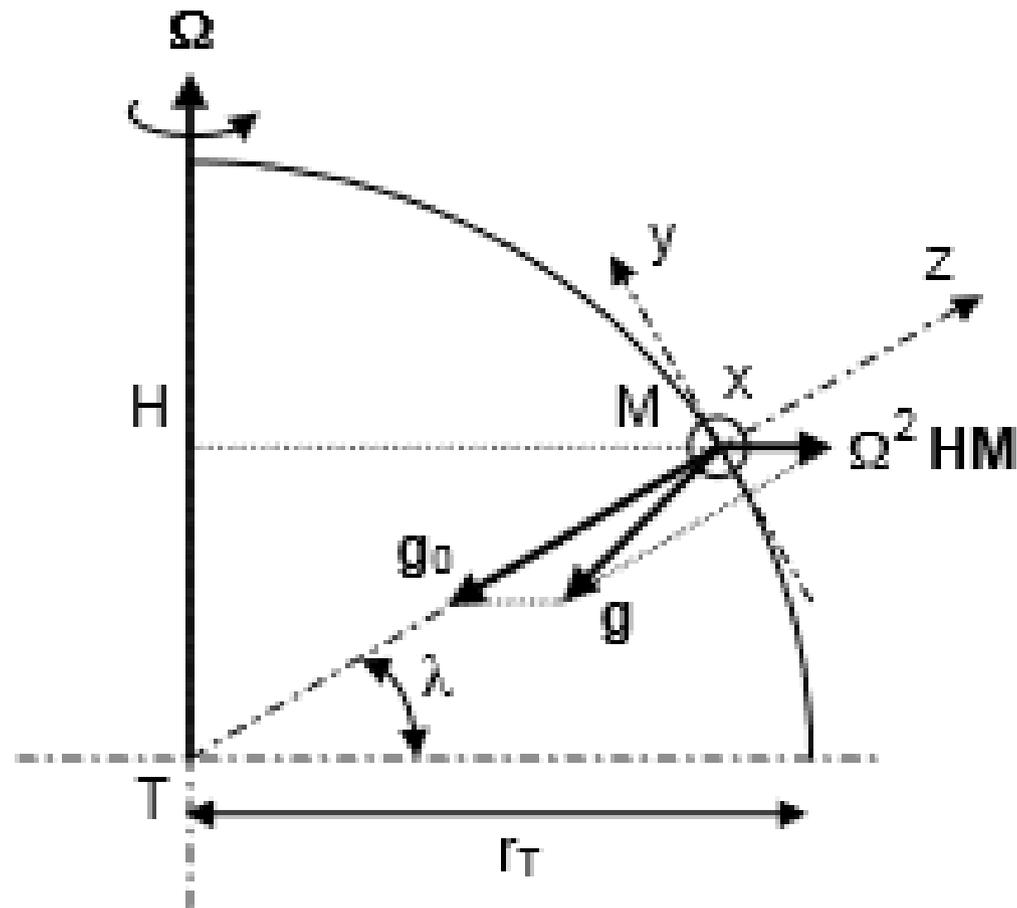
CARACTÈRE NON GALILÉEN DU RÉFÉRENTIEL TERRESTRE

Ecriture du TRC dans un Référentiel

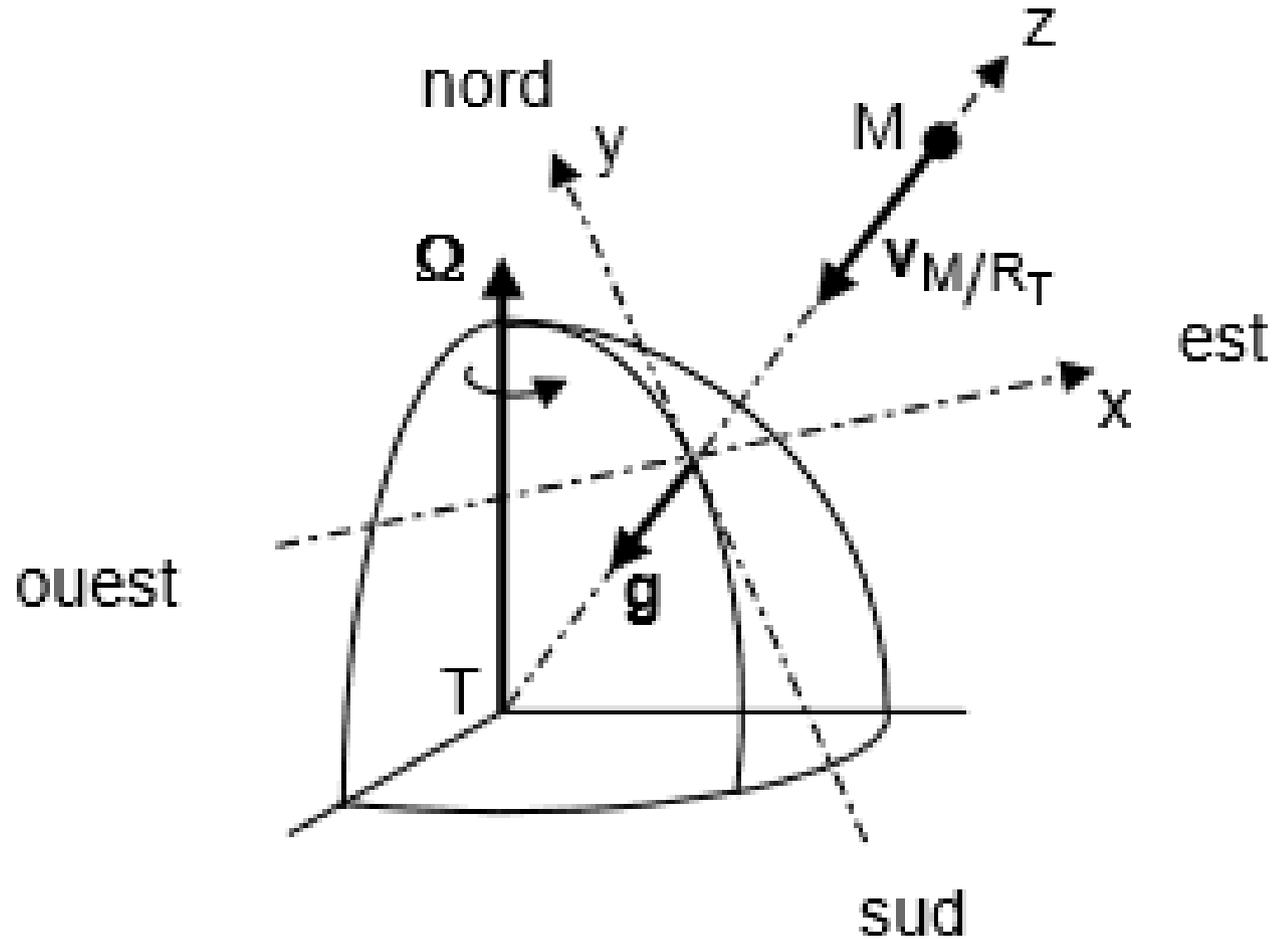
$$m\vec{a}_{M/R} = \vec{R}$$



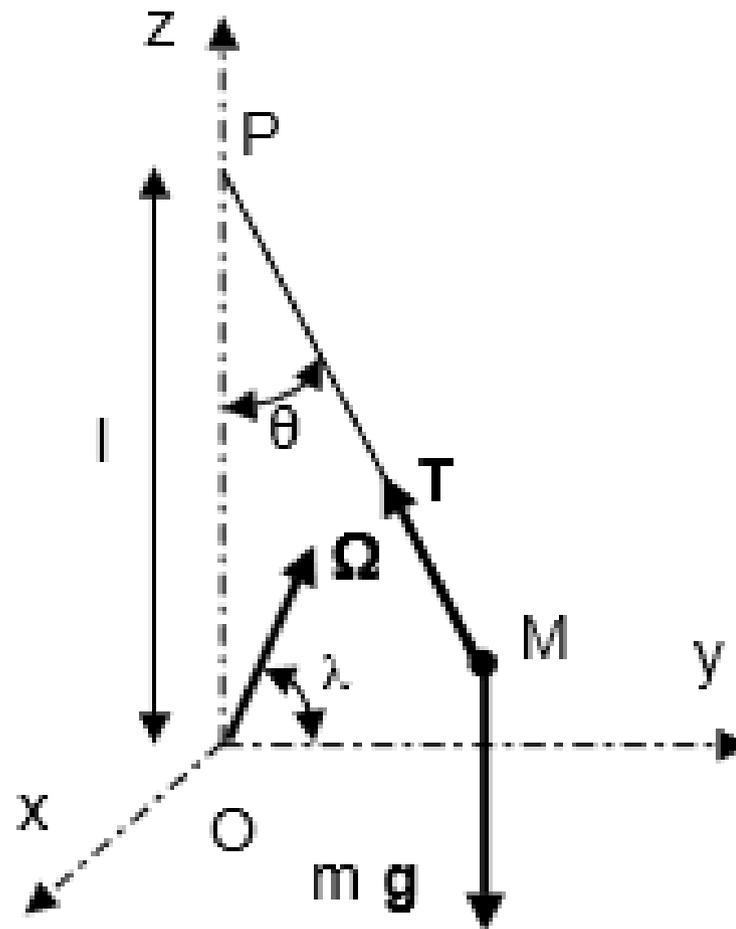
Variation du champ de gravitation avec la latitude



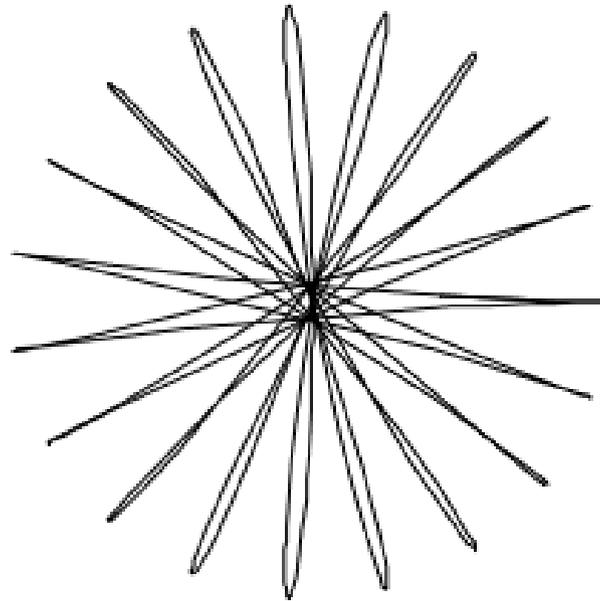
Déviatation vers l'Est



Pendule de Foucault



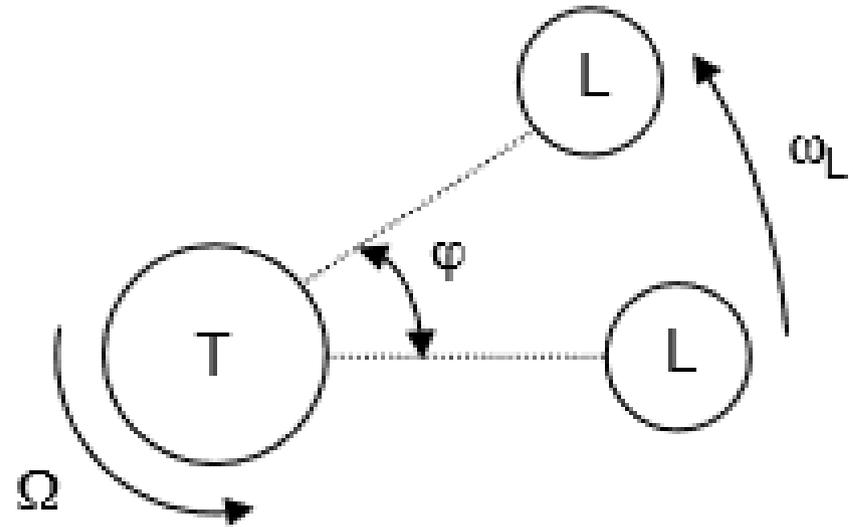
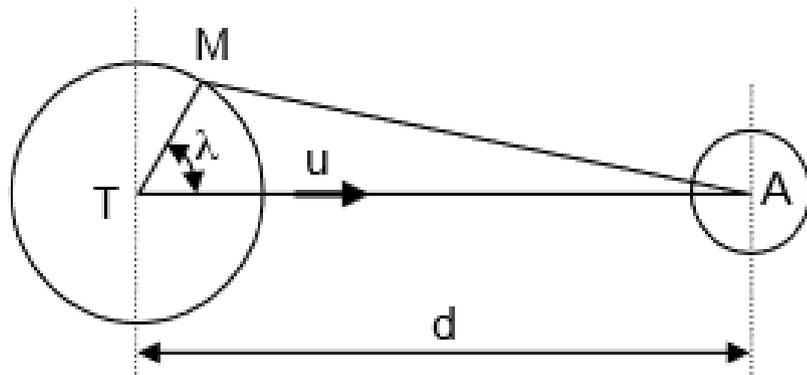
Oscillations 2D – Équations horaires



$$x = x_0(\cos \Omega_0 \cos \omega_0 t + \frac{\Omega_0}{\omega_0} \sin \Omega_0 t \sin \omega_0 t)$$

$$y = x_0(-\sin \Omega_0 \cos \omega_0 t + \frac{\Omega_0}{\omega_0} \cos \Omega_0 t \sin \omega_0 t)$$

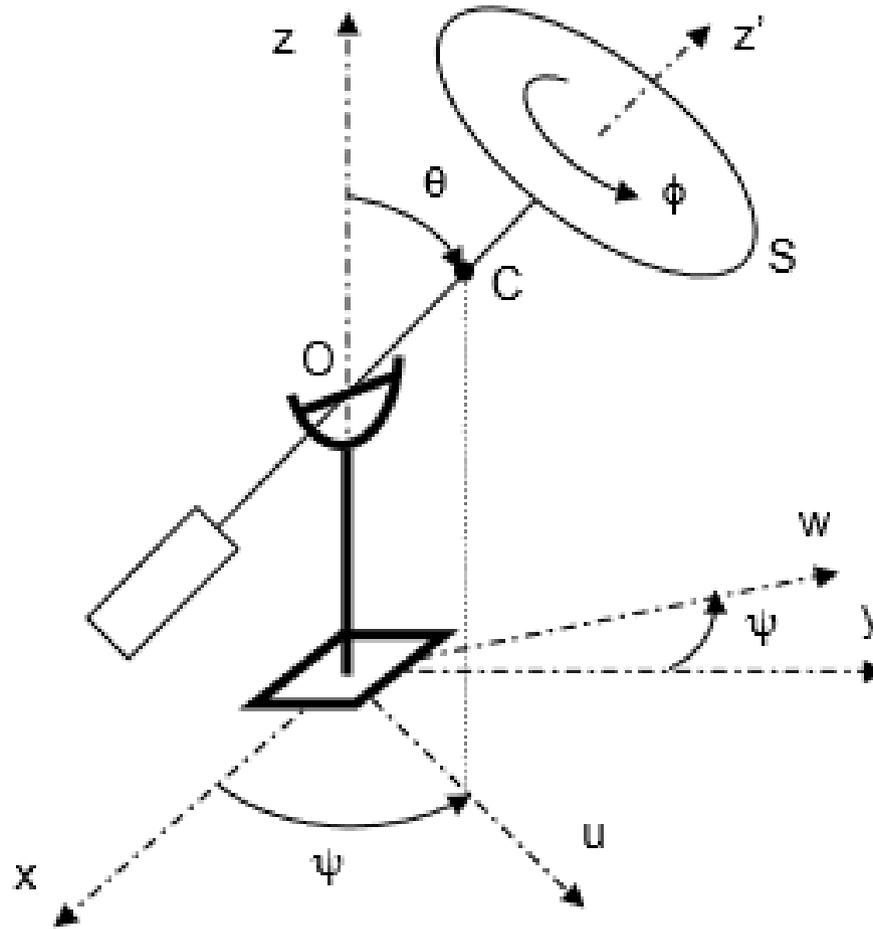
Terme de marée



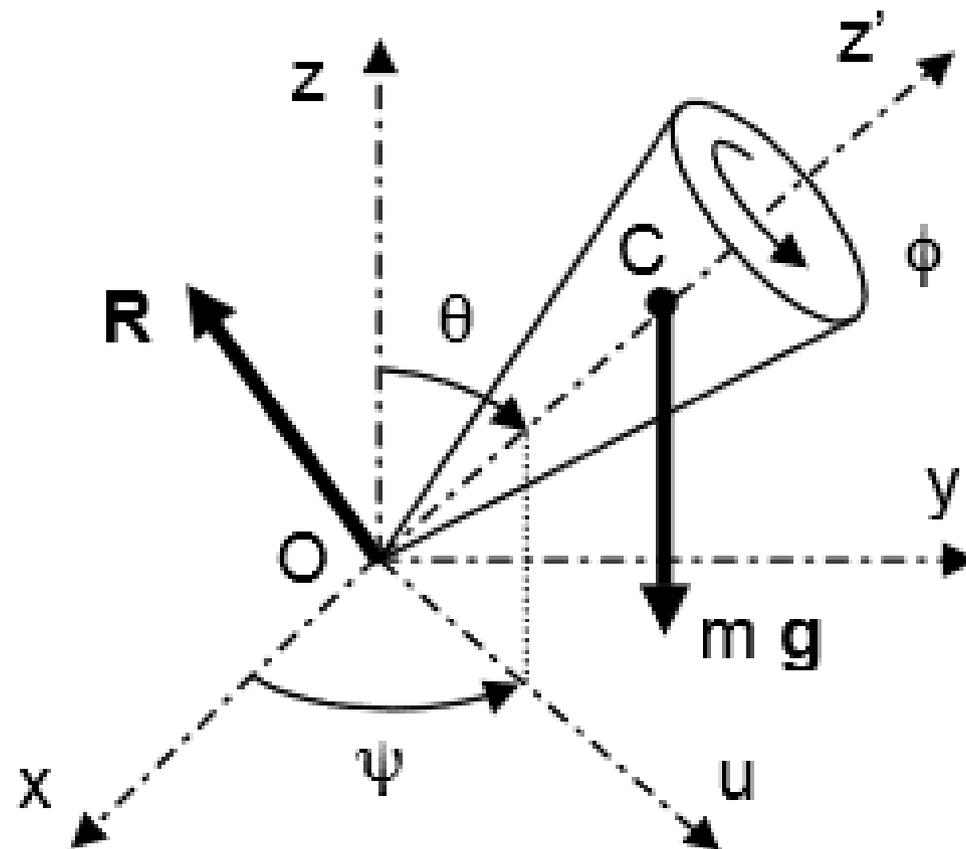
PRÉCESSION DANS LES DOMAINES

MACROSCOPIQUE
ET
MICROSCOPIQUE

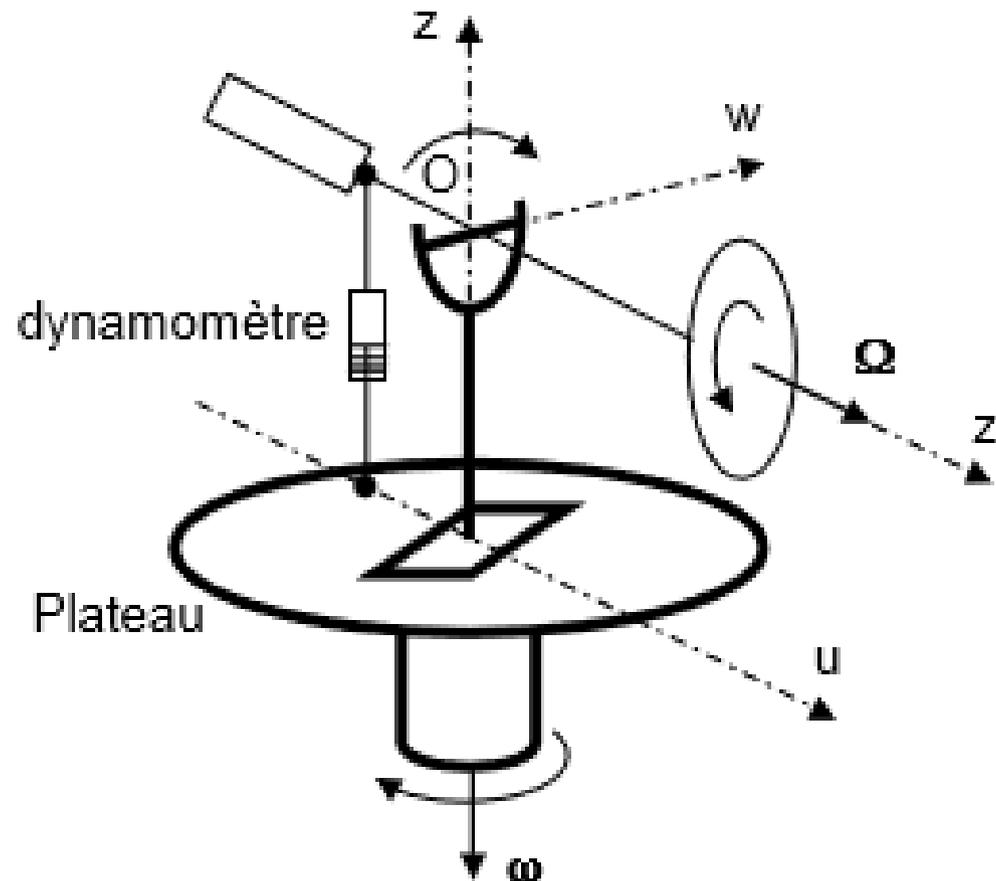
Approximation gyroscopique



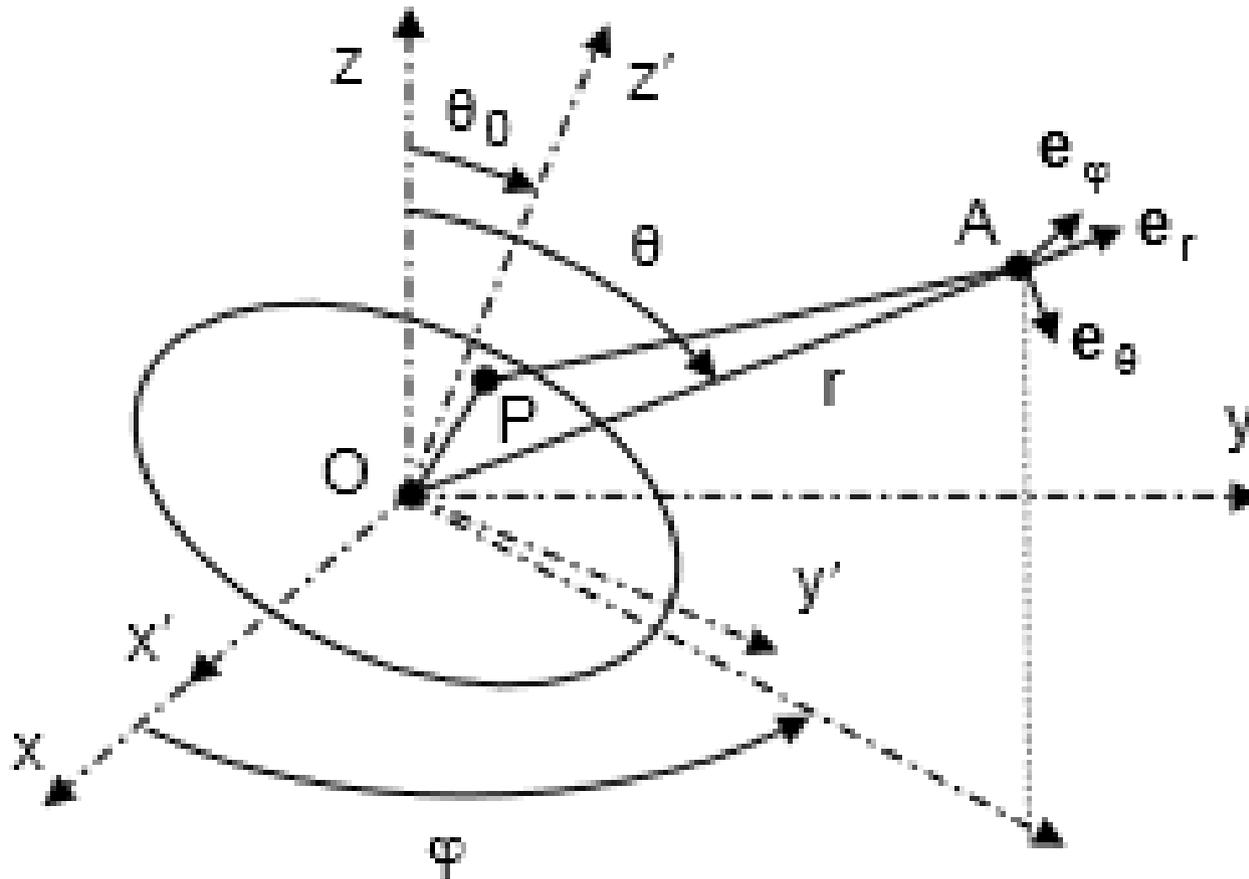
Modèle de la toupie



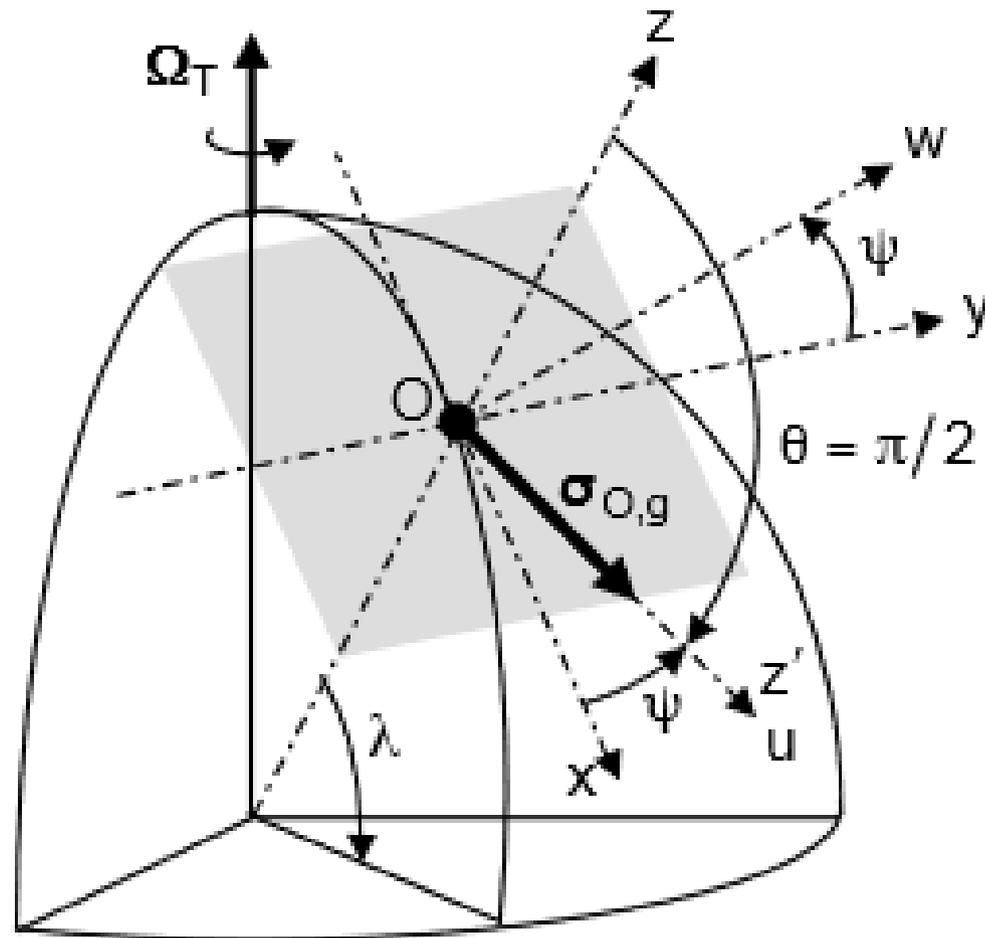
Gyroscope équilibré



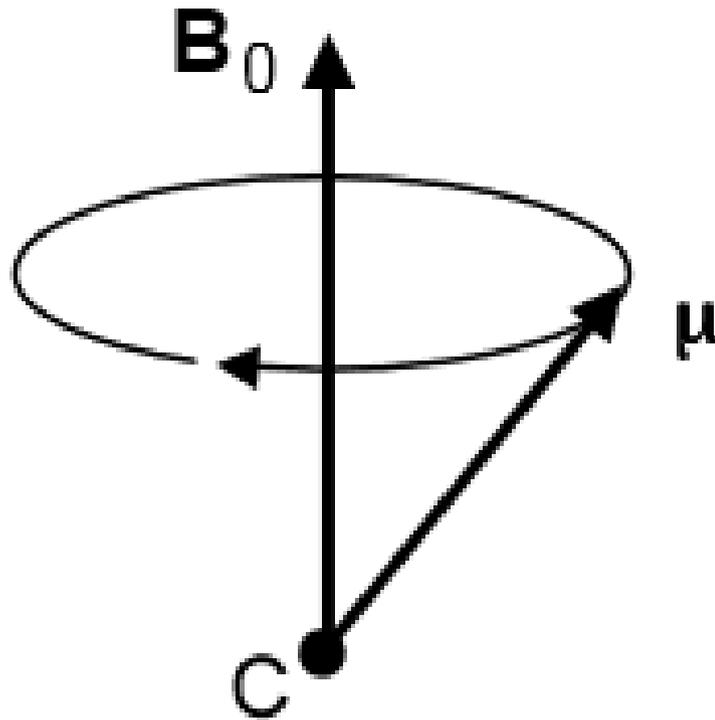
Précession des équinoxes



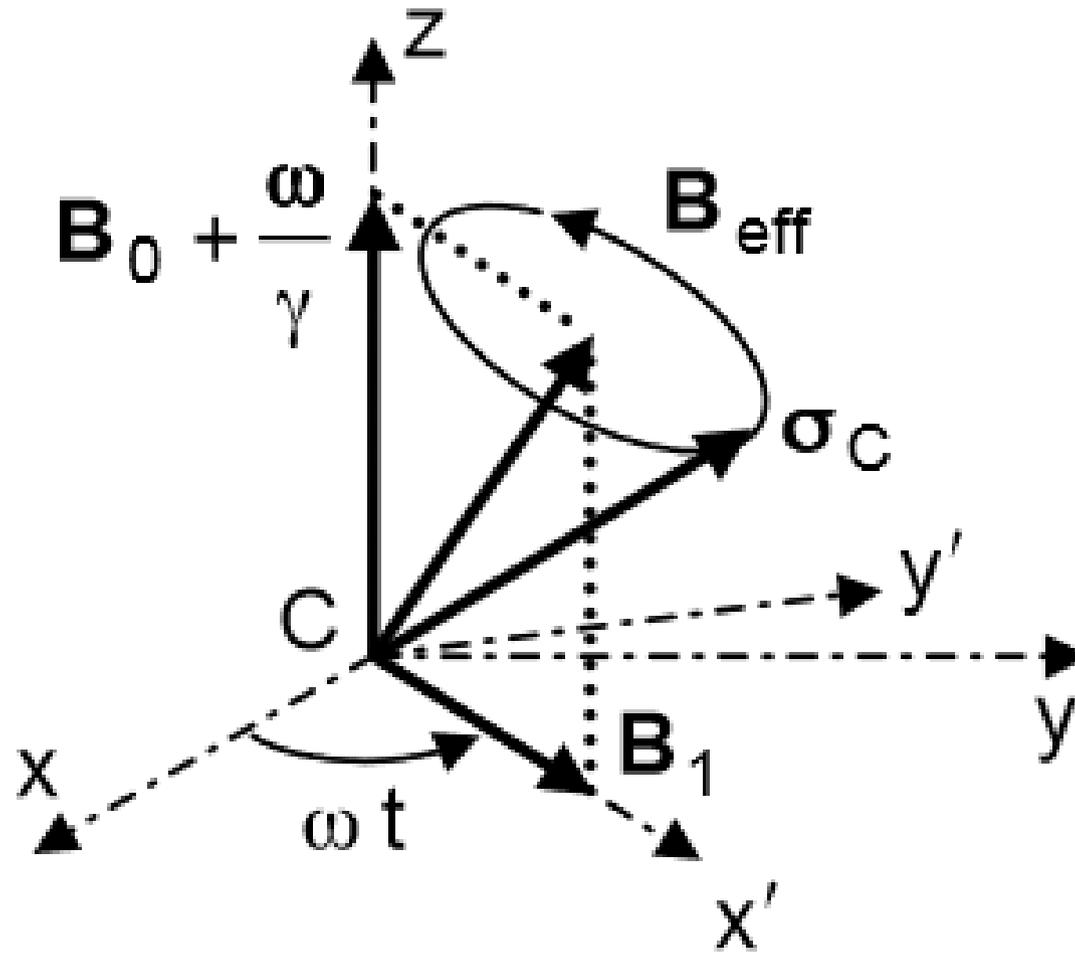
Compas gyroskopique ou gyrocompas



Précession d'un moment magnétique



Résonance magnétique



LP 04 : PRECESSION DANS LES DOMAINES MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE

Pré-requis

Introduction

I-Approximation gyroscopique

I-1 Généralités

I-2 Approximation gyroscopique

I-3 Gyroscope déséquilibré

Expérience

Application

I-4 Gyroscope équilibré

Expérience

II-Précession dans les domaines macroscopiques

II-1 Précession des équinoxes

II-2 Compas gyroscopique ou gyrocompas

III-Précession dans les domaines microscopiques

III-1 Précession d'un moment magnétique

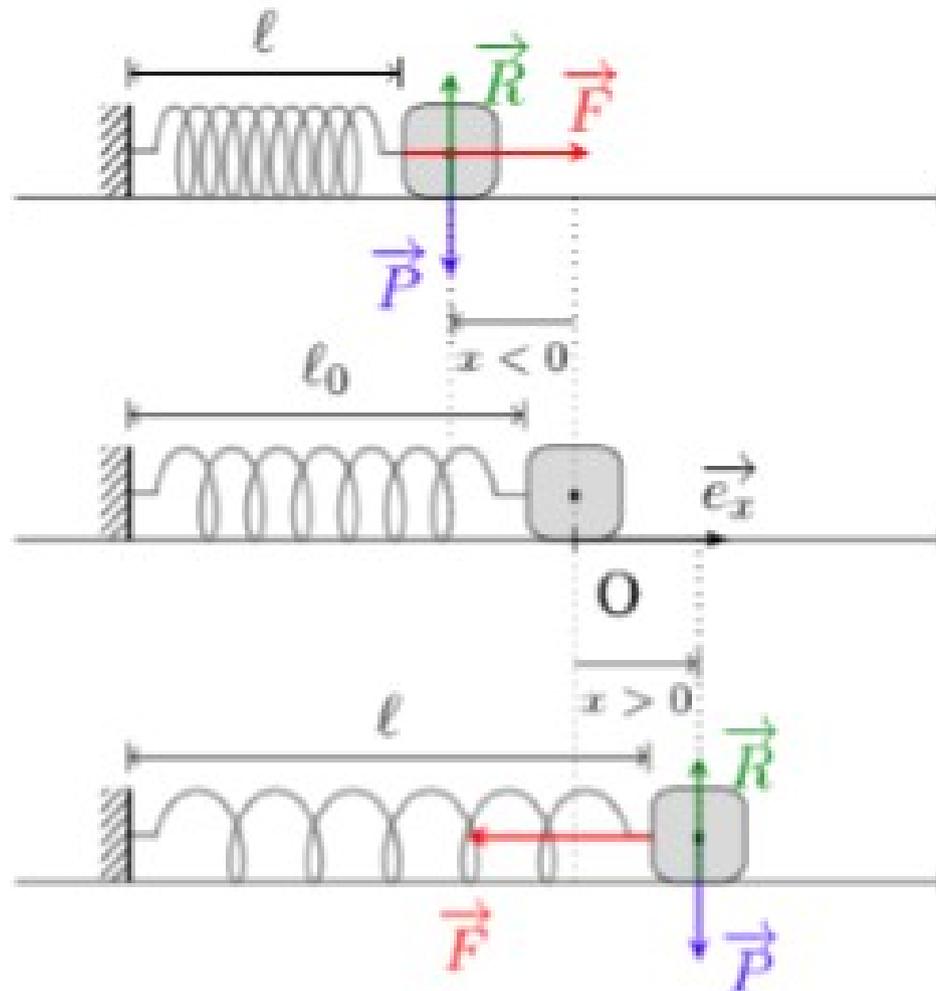
III-2 Résonance magnétique

Conclusion

LOIS DE CONSERVATION EN MÉCANIQUE

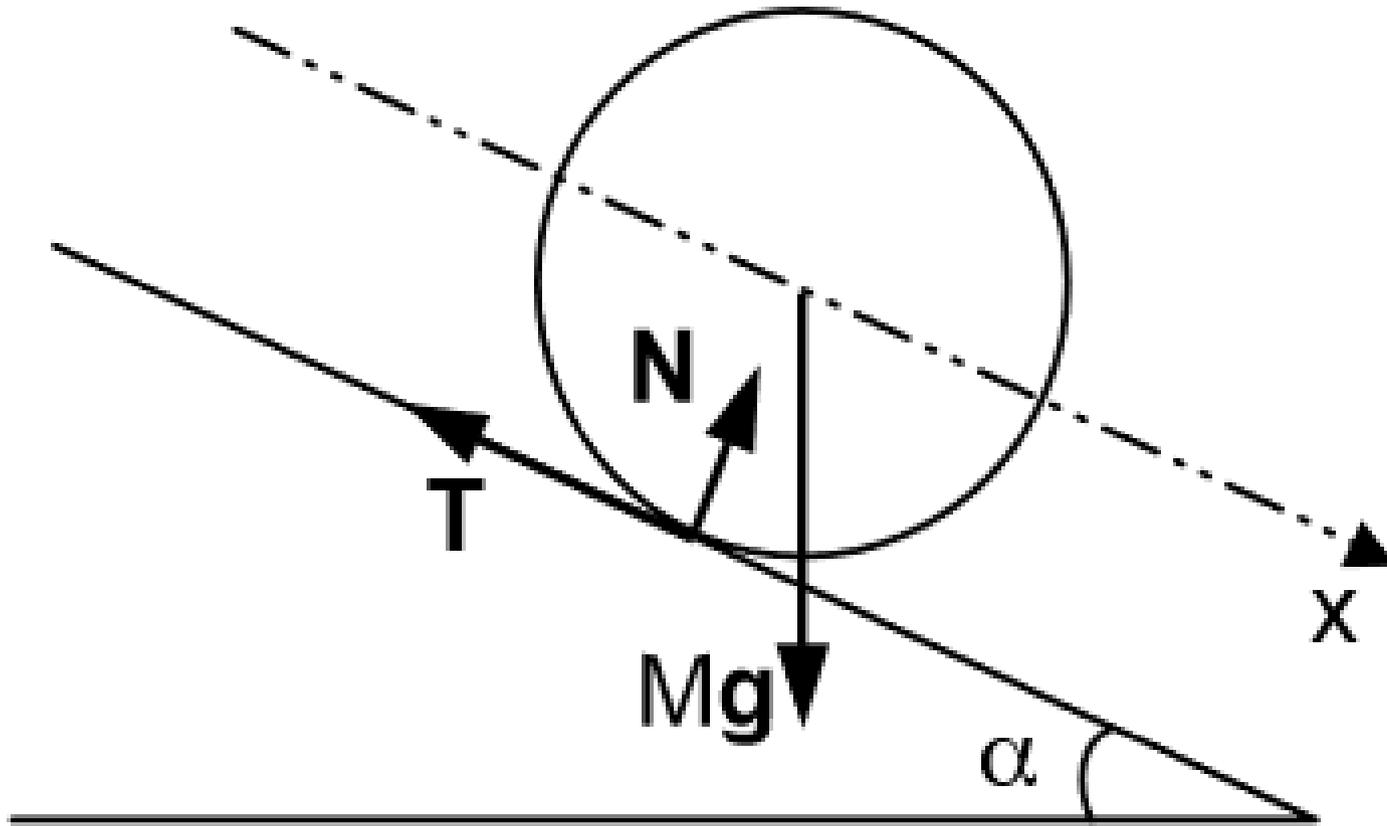
Conservation de l'énergie – 1

Oscillations de ressort



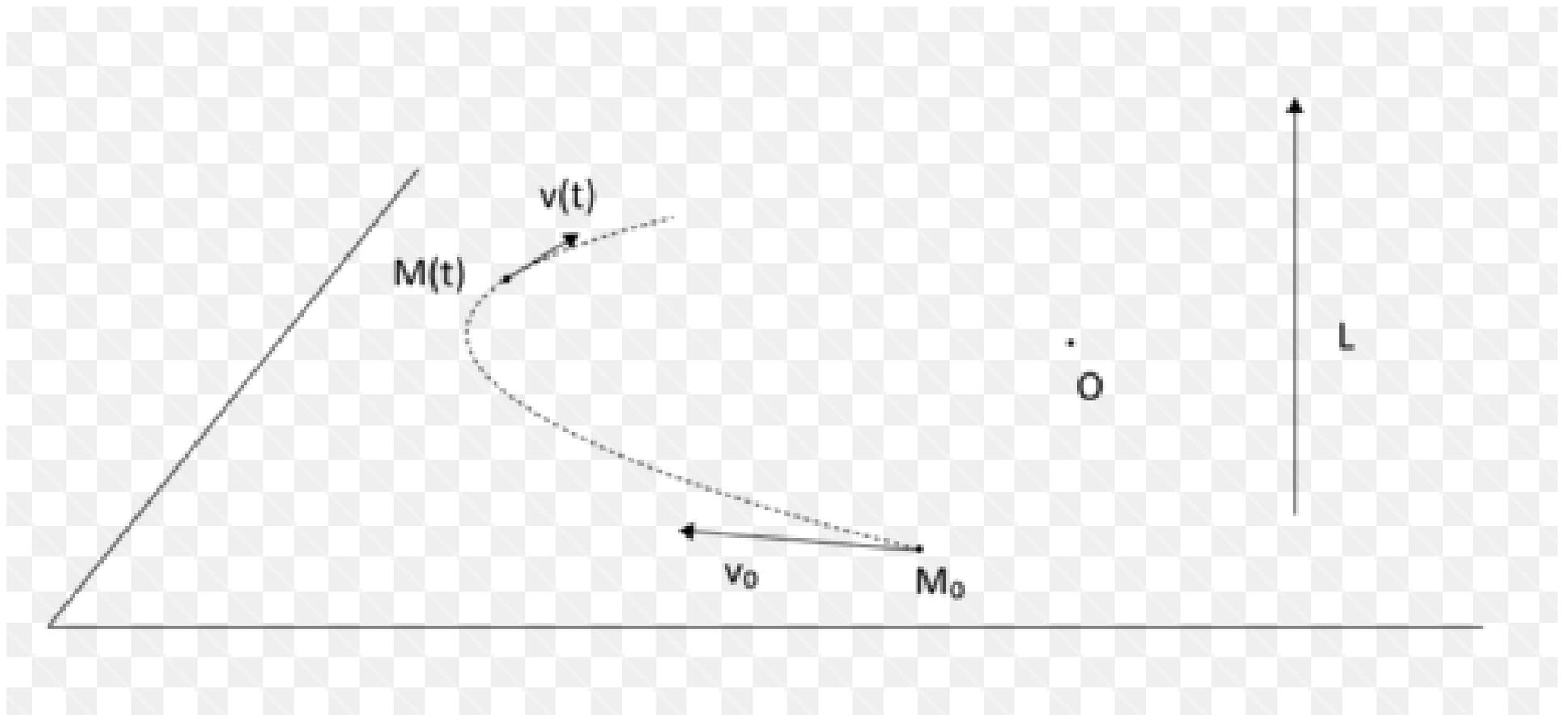
Conservation de l'énergie – 2

Roulement de cylindre



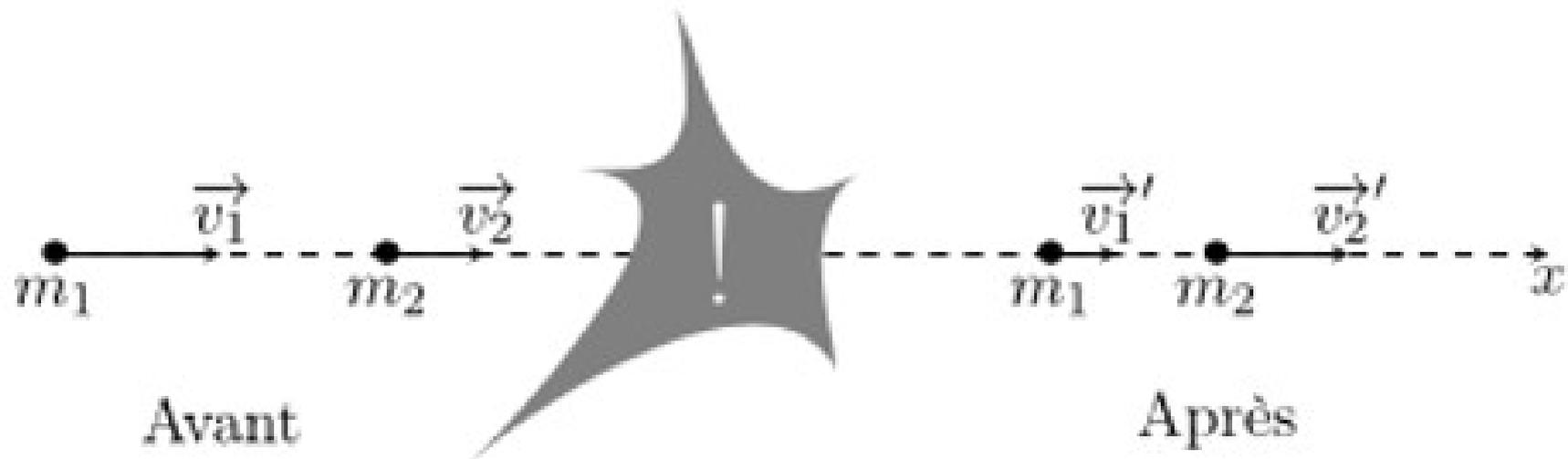
Conservation du moment cinétique

Mouvements à force centrale



Cons. de la quantité de mouvement

Choc élastique



LP 05 : LOIS DE CONSERVATION EN DYNAMIQUE

Pré-requis

Introduction

I-Conservation de l'énergie

I-1 Forces conservatives

I-2 Exemples d'application

L'oscillateur {masse + ressort}
Roulement d'un cylindre

I-3 Forces de contact non conservatives

II-Conservation du moment cinétique

II-1 Mouvement à accélération centrale

Problème à deux corps

II-2 Moment cinétique par rapport à un axe, solide en rotation

III-Conservation de la quantité de mouvement

III-1 Systèmes isolés, chocs élastiques

III-2 Systèmes pseudo-isolés

Expérience

III-3 Systèmes ouverts, propulsion

TRC
Propulsion

III-4 Référentiels non galiléens, apesanteur

Apesanteur

Conclusion

LP 06 : CINEMATIQUE RELATIVISTE

Pré-requis

Introduction

I-Rappels historiques

I-1 Mécanique classique et transformation de Galilée

I-2 Mise en défaut de la transformation de Galilée

Incompatibilité avec l'électromagnétisme
Expérience de Michelson et Morley

II-Postulats de la Relativité restreinte et transformation de Lorentz

II-1 Postulats de la Relativité restreinte

1er postulat
2ème postulat

II-2 Expériences de pensée, conséquences immédiates

II-3 Evènements et intervalles

II-4 Transformation spéciale de Lorentz

II-5 Composition des vitesses

III-Temps propre, longueur propre

III-1 Temps propre

III-2 Longueur propre

III-3 Exemples

Expérience de Michelson et Morley
Expérience de pensée
Autres exemples

IV-Interprétation géométrique et quadrivecteurs

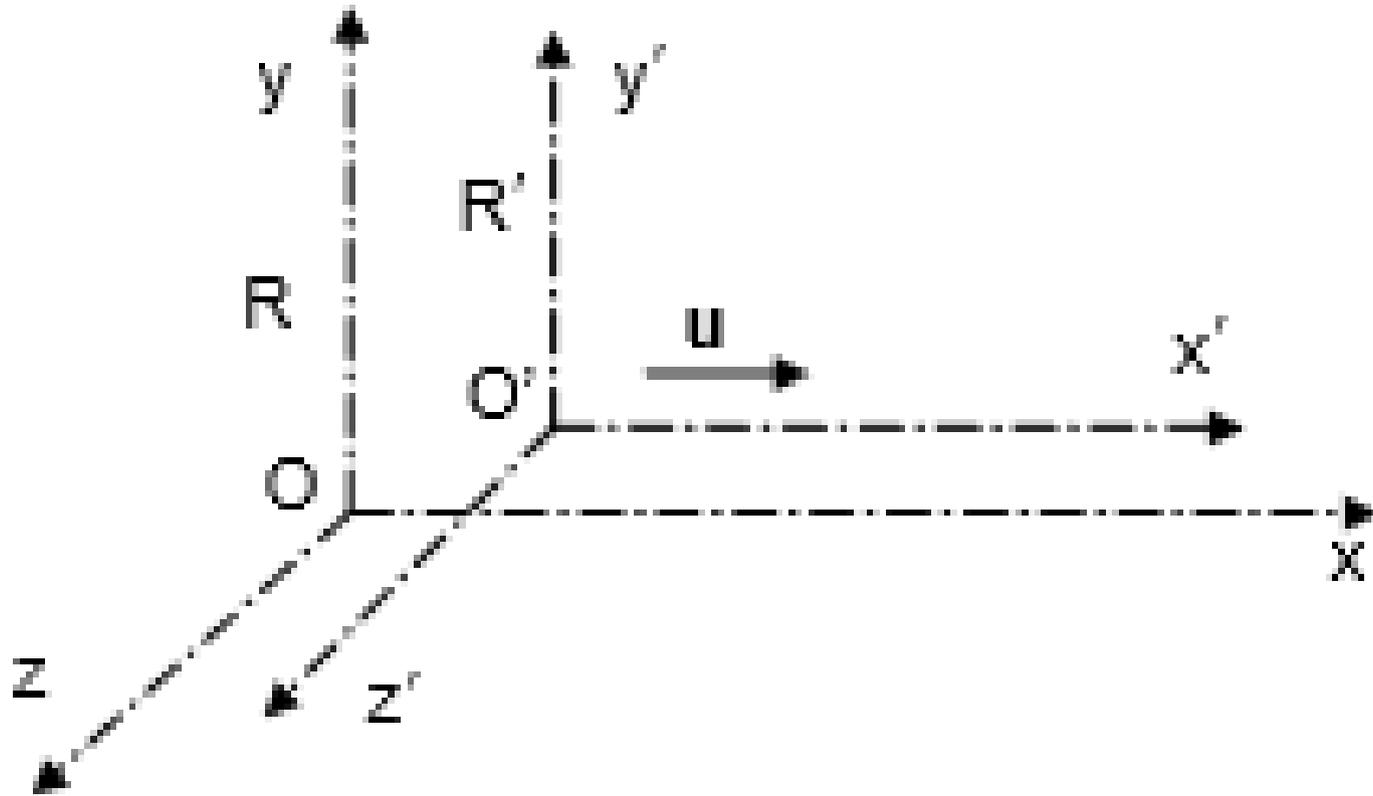
IV-1 Interprétation géométrique et quadrivecteur "position"

IV-2 Quadrivecteur vitesse

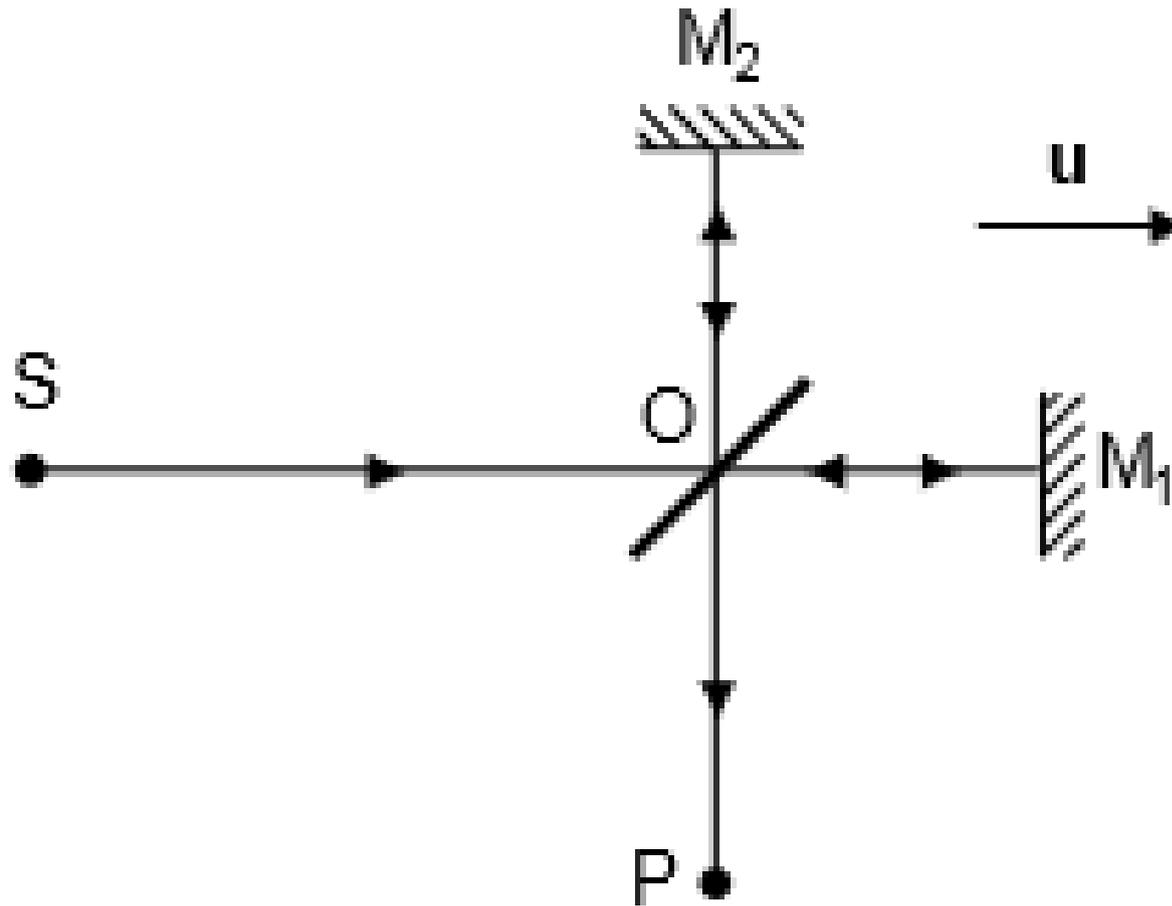
Conclusion

CINÉMATIQUE RELATIVISTE

Invariant relativiste

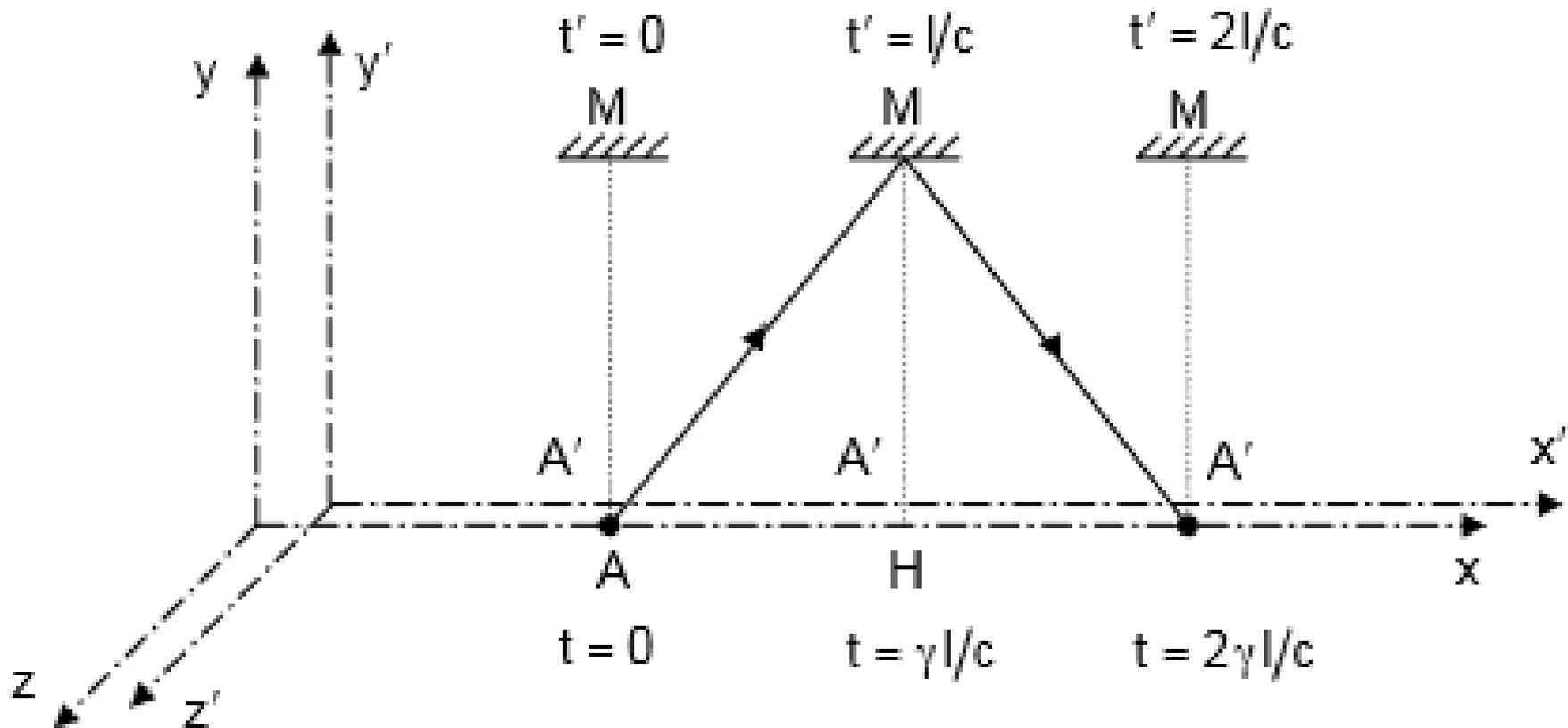


Expérience de Michelson et Morley



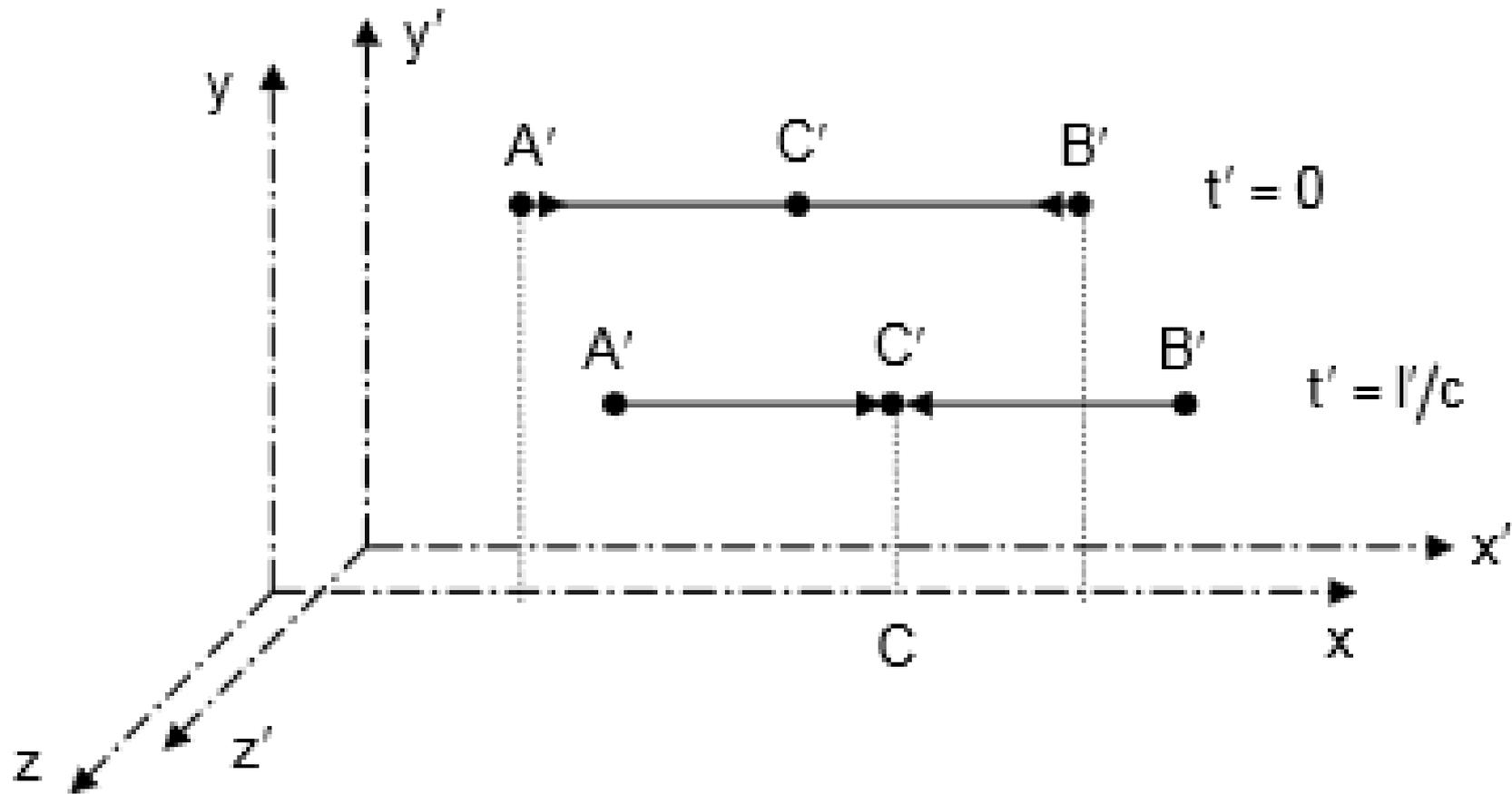
Relativité du temps

Expérience de pensée 1

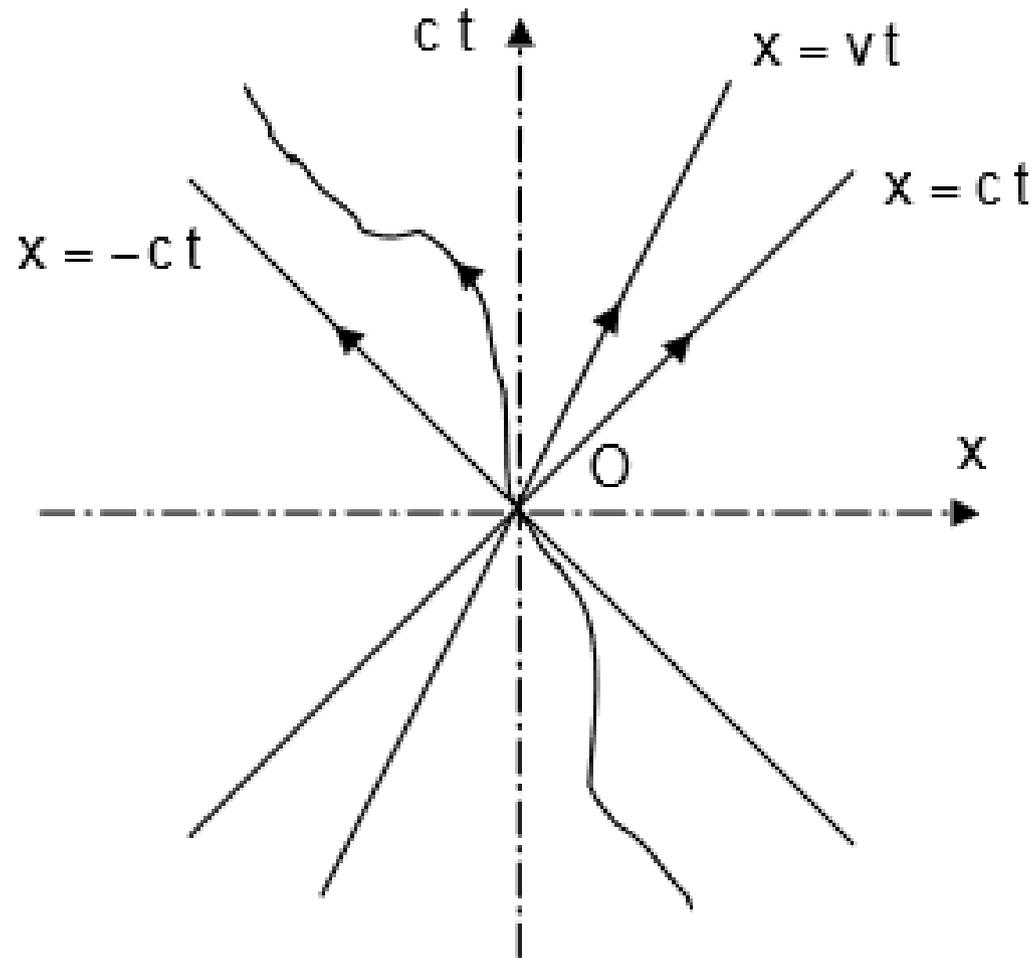


Relativité du temps

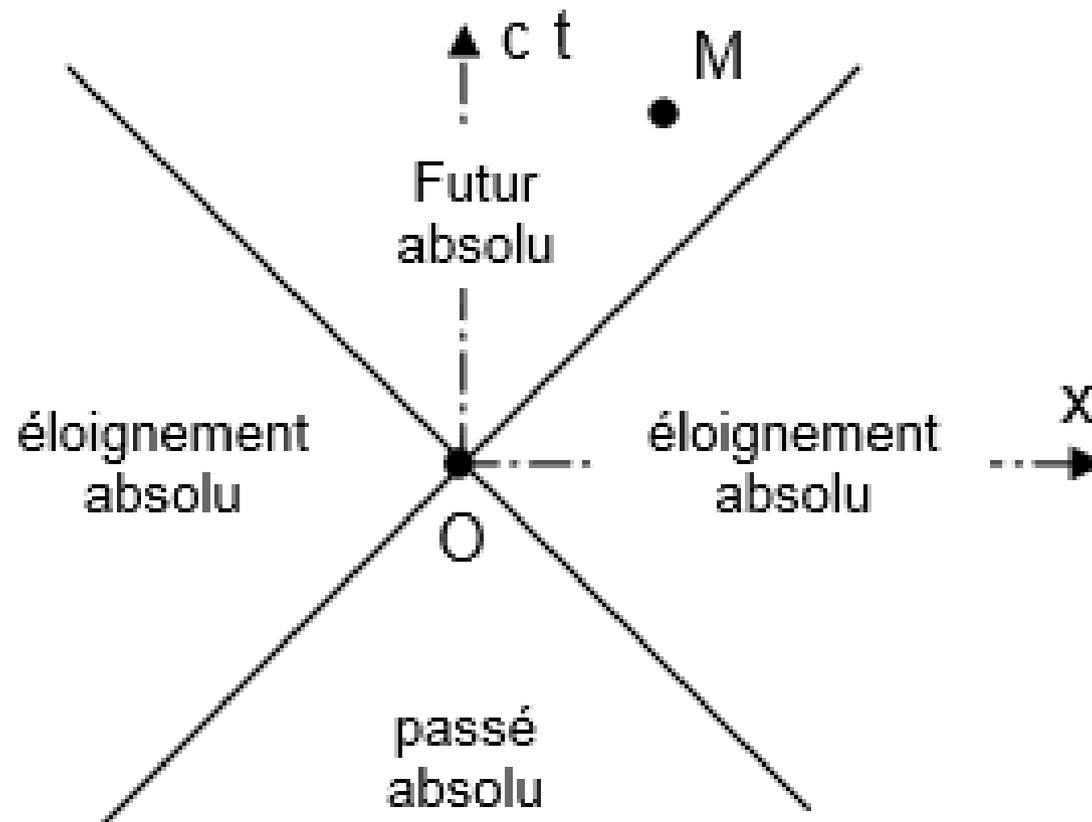
Expérience de pensée 2



Cône de lumière



Intervalles

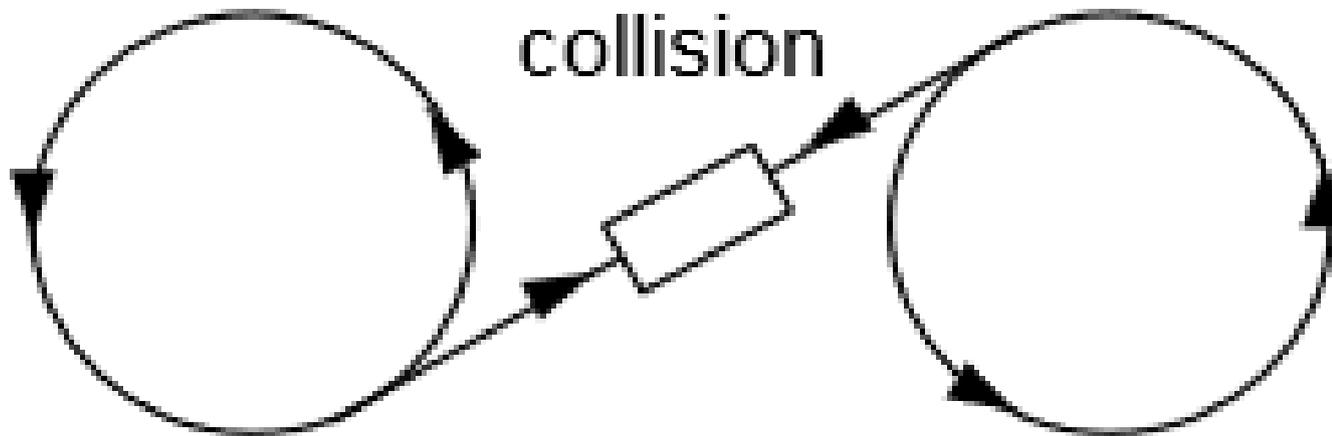


DYNAMIQUE RELATIVISTE

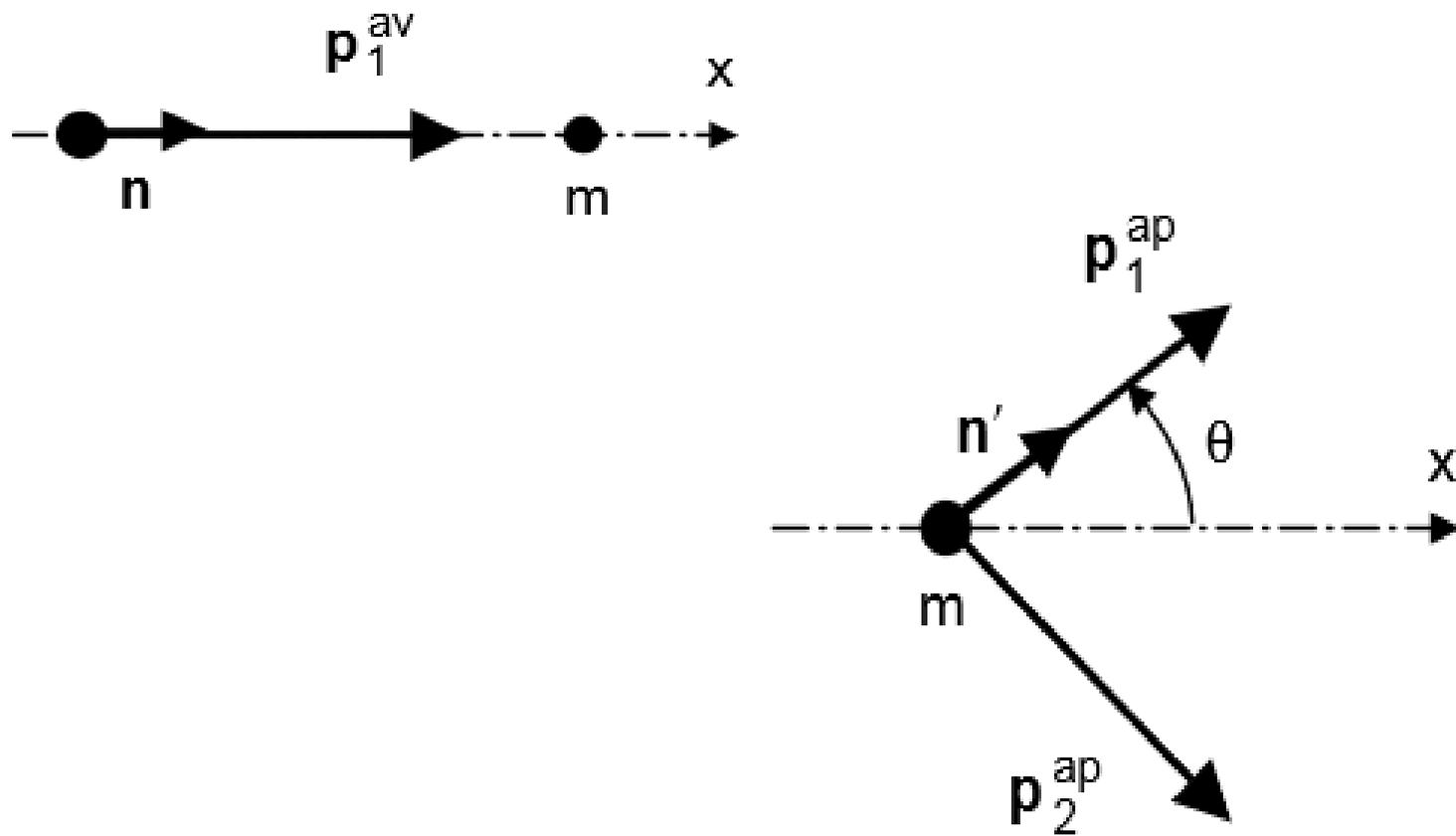
Transformation spéciale de Lorentz

$$\begin{pmatrix} E'/c \\ p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

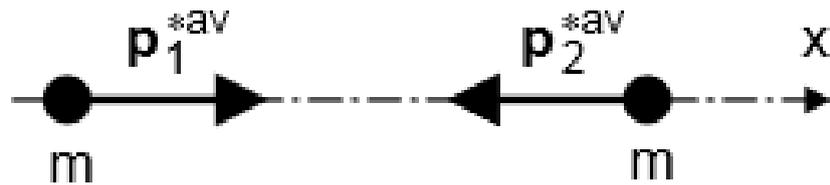
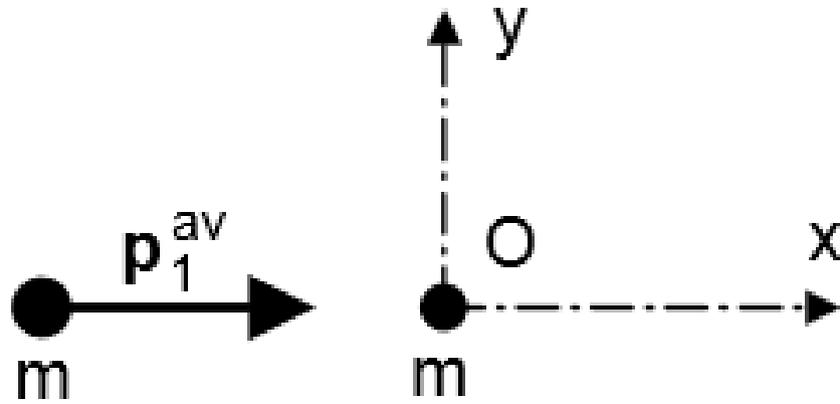
Anneaux collisionneurs



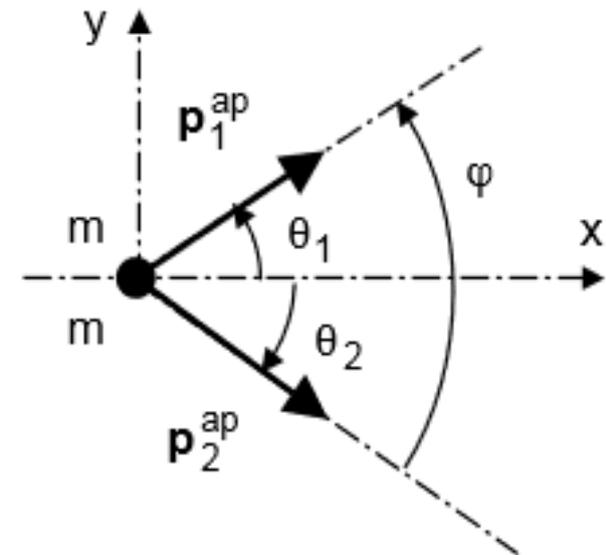
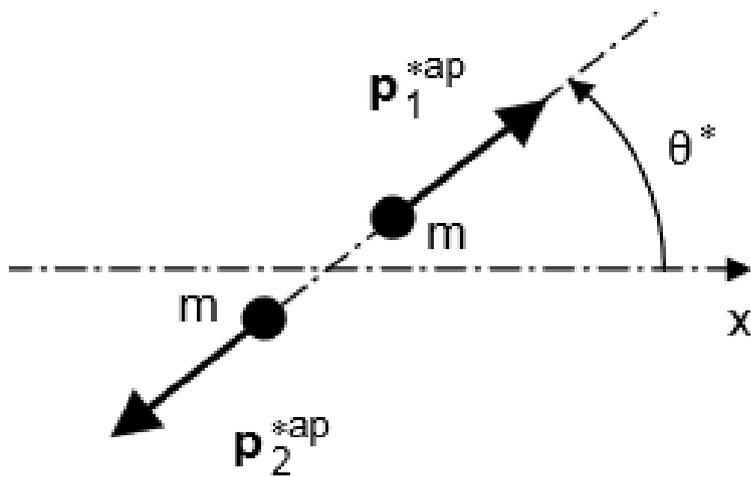
Effet Compton



Choc élastique de deux particules identiques

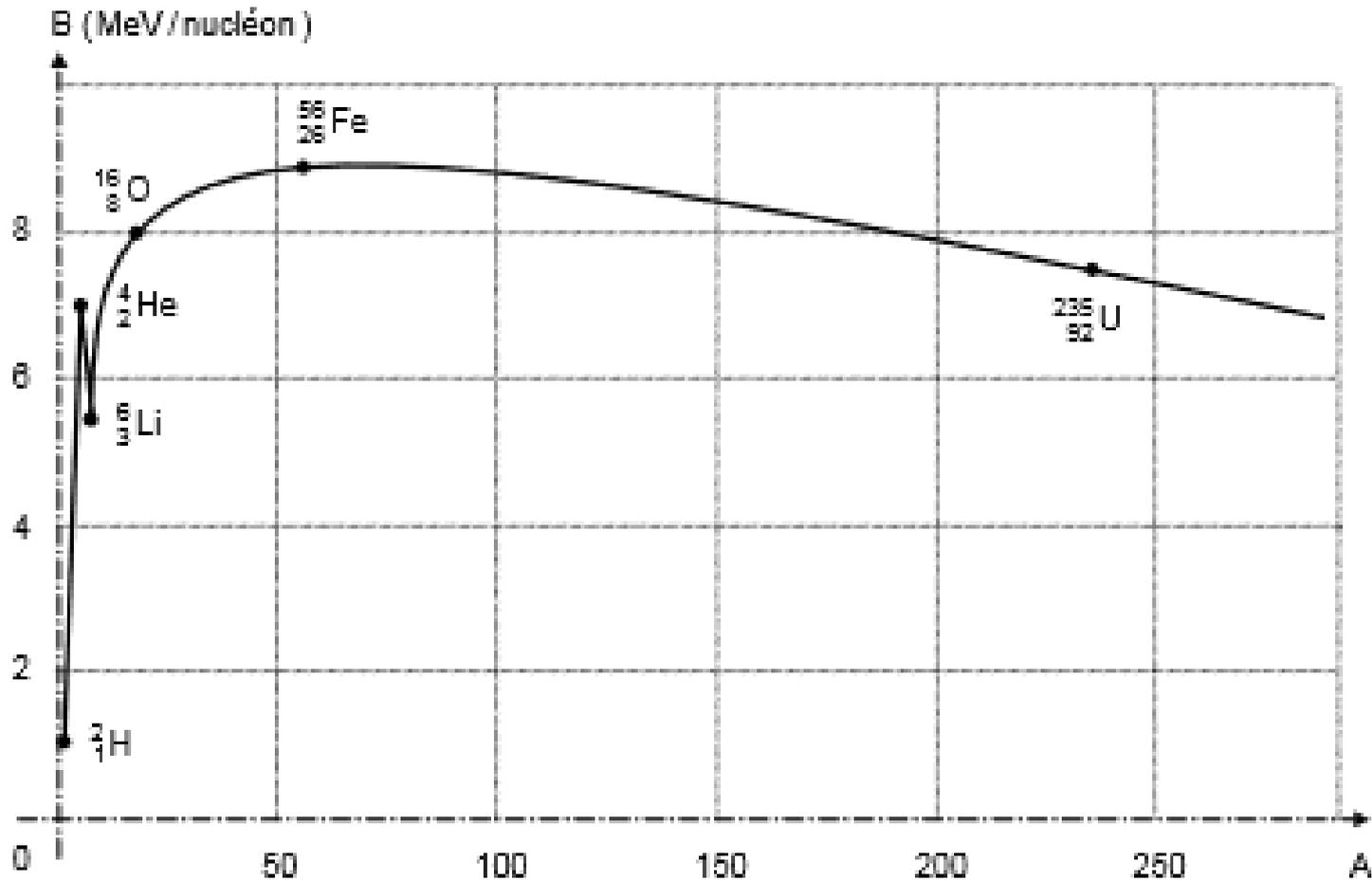


Choc particules – après le choc



Courbe d'Aston

Énergie de liaison par nucléon



LP 07 : DYNAMIQUE RELATIVISTE

Pré-requis

Introduction

I-Dynamique relativiste

I-1 Quadrivecteur énergie-impulsion

I-2 Quadrivecteur force

I-3 Le photon, particule de masse nulle

I-4 Le référentiel du centre de masse

II-Chocs élastiques

II-1 Définition et propriétés générales

Définition

II-2 Effet Compton

II-3 Choc élastique de deux particules identiques, l'une en mouvement, l'autre immobile

III-Chocs inélastiques

III-1 Définition et propriétés générales

Définition

III-2 Energie de seuil

Définition

Applications

III-3 Désintégration d'une particule instable

Applications

III-4 Etude des noyaux

Noyaux stables

Applications

Les réactions de fission nucléaire

Les réactions de fusion nucléaire

Noyaux instables

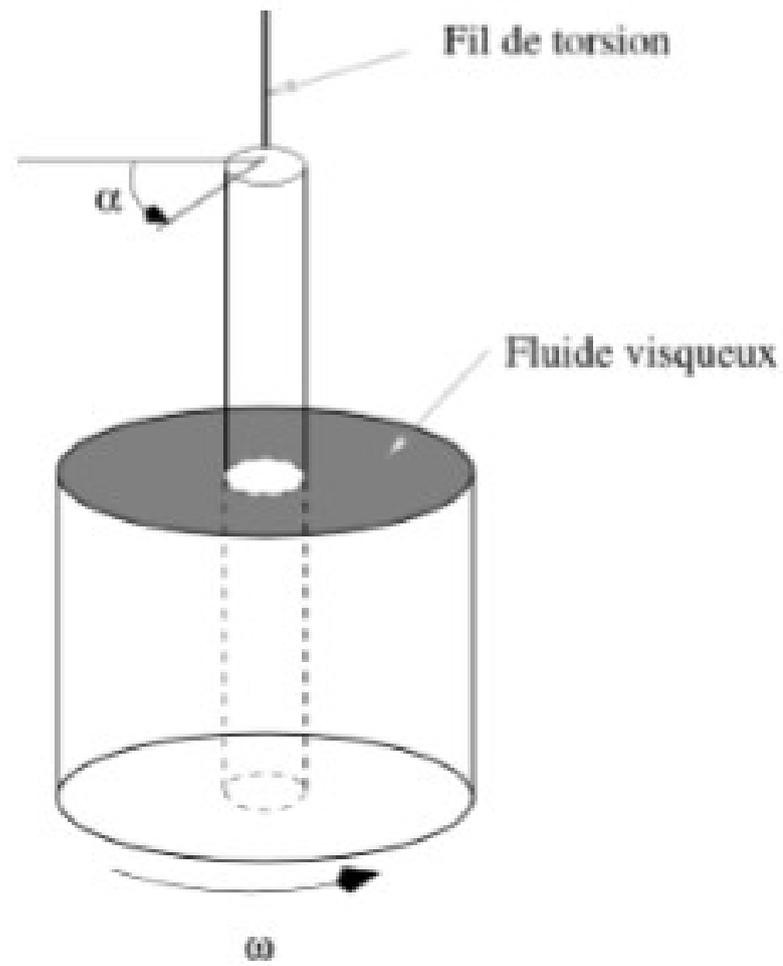
Applications

Conclusion

NOTION DE VISCOSITE D'UN FLUIDE

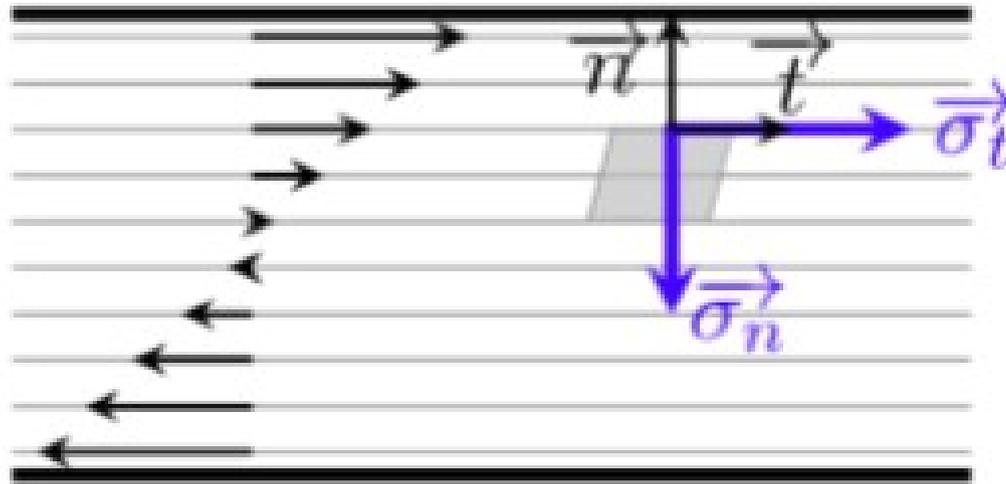
ECOULEMENT D'UN FLUIDE

Expérience de Couette

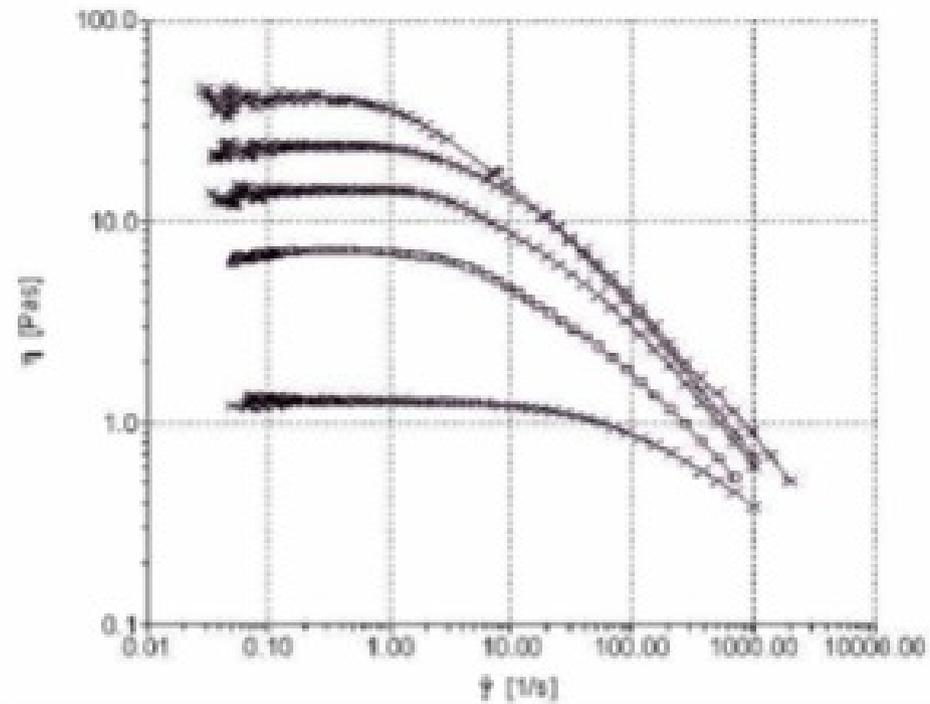


Expérience de Couette

Gradient de vitesse



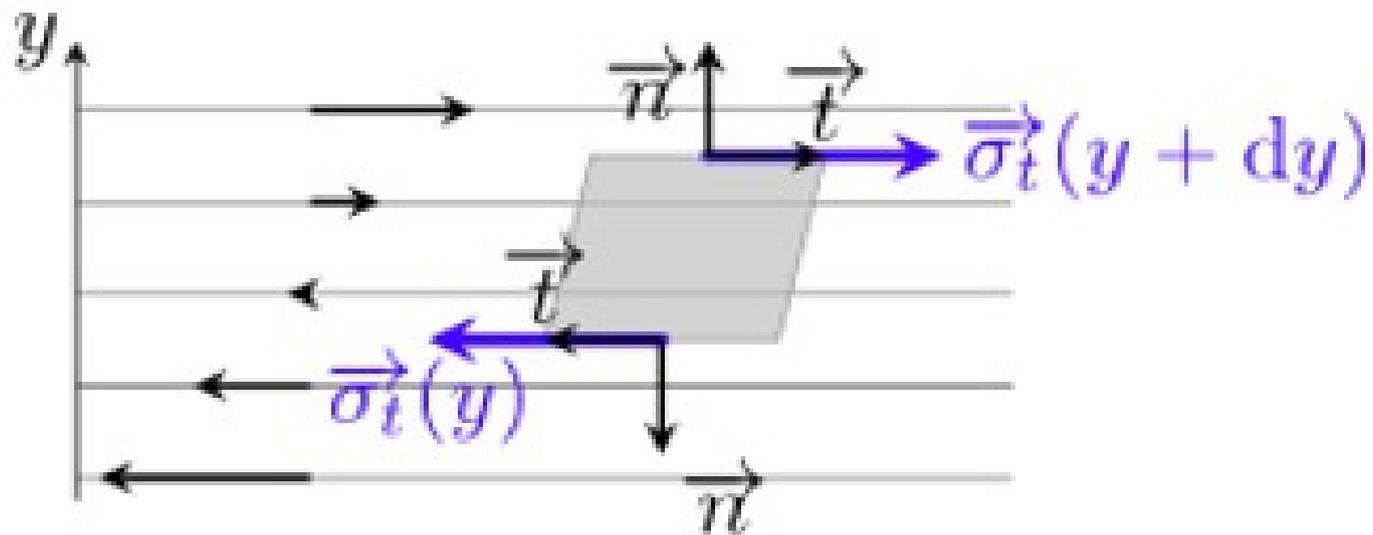
Fluides non newtoniens contrainte / déformation



Temps de relaxation

Matériaux	τ_{re} (s)
eau (20°C)	1 ns
verre à vitre (400°C)	32 ans
verre à vitre (20°C)	$10^{26} - 10^{30}$ s
bitume (-5°C)	10 s
bitume (40°C)	1 ms

Résultante des forces visqueuses

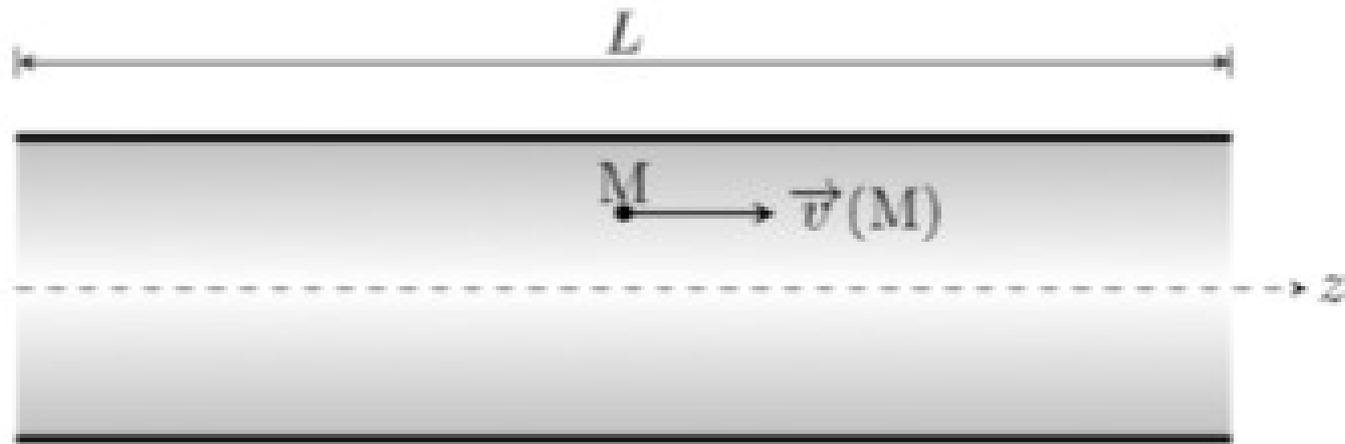


Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\text{terme convectif}}{\text{terme visqueux}} = \frac{\mu v D}{\eta}$$

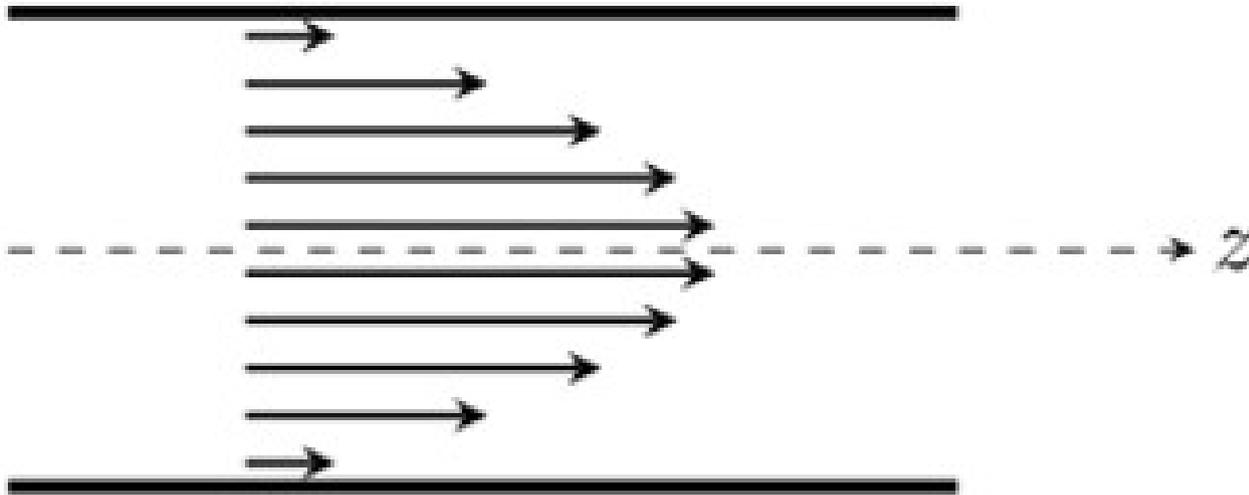
Type d'écoulement	Nombre de Reynolds
Écoulement atmosphérique	$Re \approx 10^{11}$
Écoulement sanguin dans l'aorte	$Re \approx 10^4$
Écoulement sanguin dans les capillaires	$Re \approx 10^{-3}$
Domaine de l'aéronautique	$Re \approx 10^7$
Domaine de la microfluidique	$Re \approx 10^{-3} - 1$

Écoulement de Poiseuille



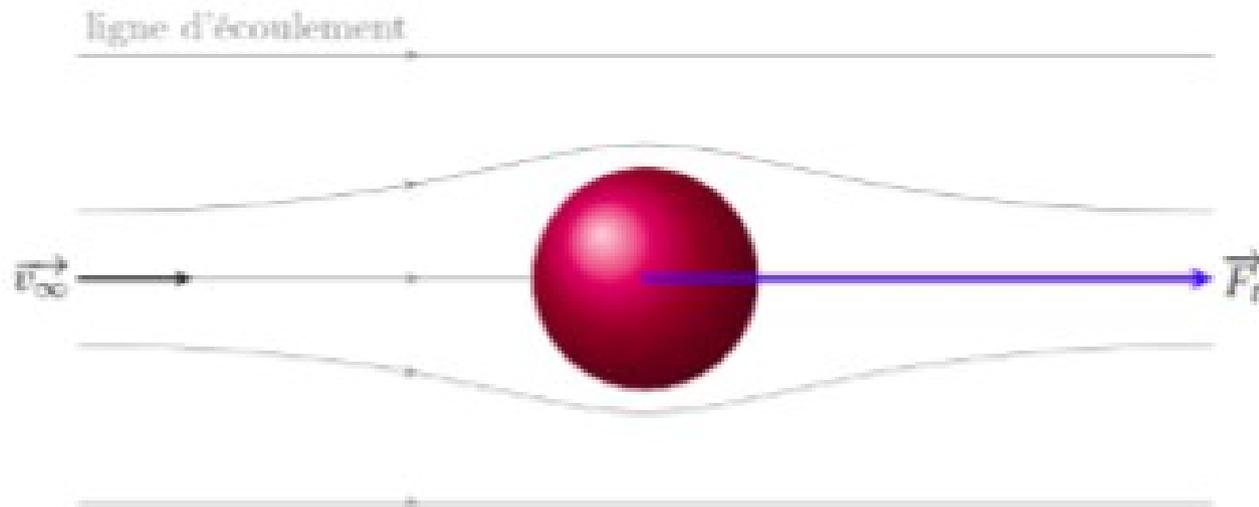
Écoulement de Poiseuille

Profil des vitesses



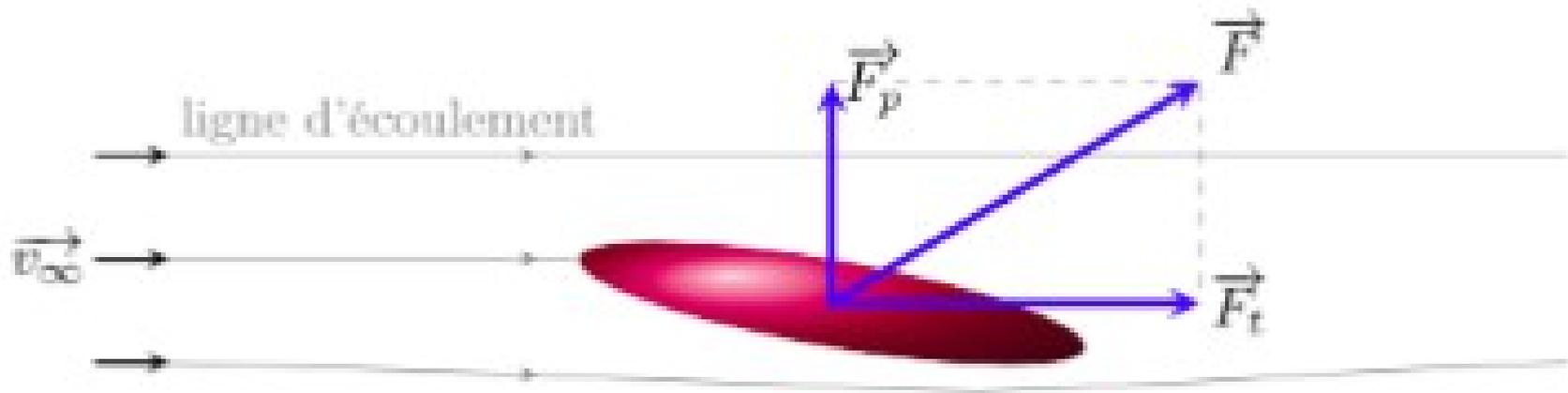
Écoulement autour d'une sphère

Force de traînée



Coefficients aérodynamiques

Traînée et portance



LP 08 : NOTION DE VISCOSITE D'UN FLUIDE. ECOULEMENT D'UN FLUIDE

Pré-requis

Introduction

I-Notion de viscosité

I-1 Fluides newtoniens

Expérience de Couette

Interprétation

Fluide newtonien

Définition (contrainte visqueuse – viscosité dynamique)

I-2 Mesure de viscosité

Ordres de grandeur

I-3 Fluides non newtoniens

Comportement non linéaire

Comportement visco-élastique; exemples

II-Dynamique d'un écoulement visqueux

II-1 Bilan des forces

II-2 Equation de Navier-Stokes

Conditions aux limites

II-3 Le nombre de Reynolds; exemples

Écoulement turbulent

Exercice

II-4 Exemple: loi de Poiseuille

Hypothèses de travail

Calcul du champ de vitesses

Calcul du débit volumique

II-5 Trainée et portance

Formule de Stokes

Vitesse de sédimentation

Coefficients aérodynamiques

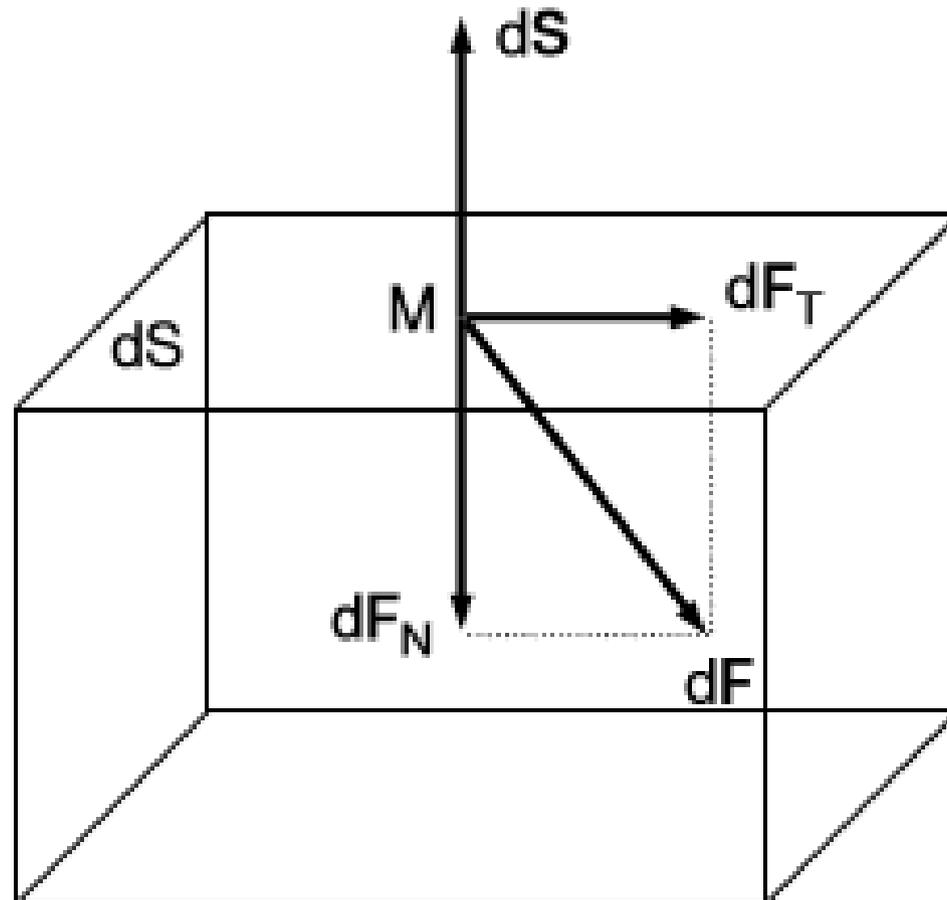
Coefficient de trainée

Coefficient de portance

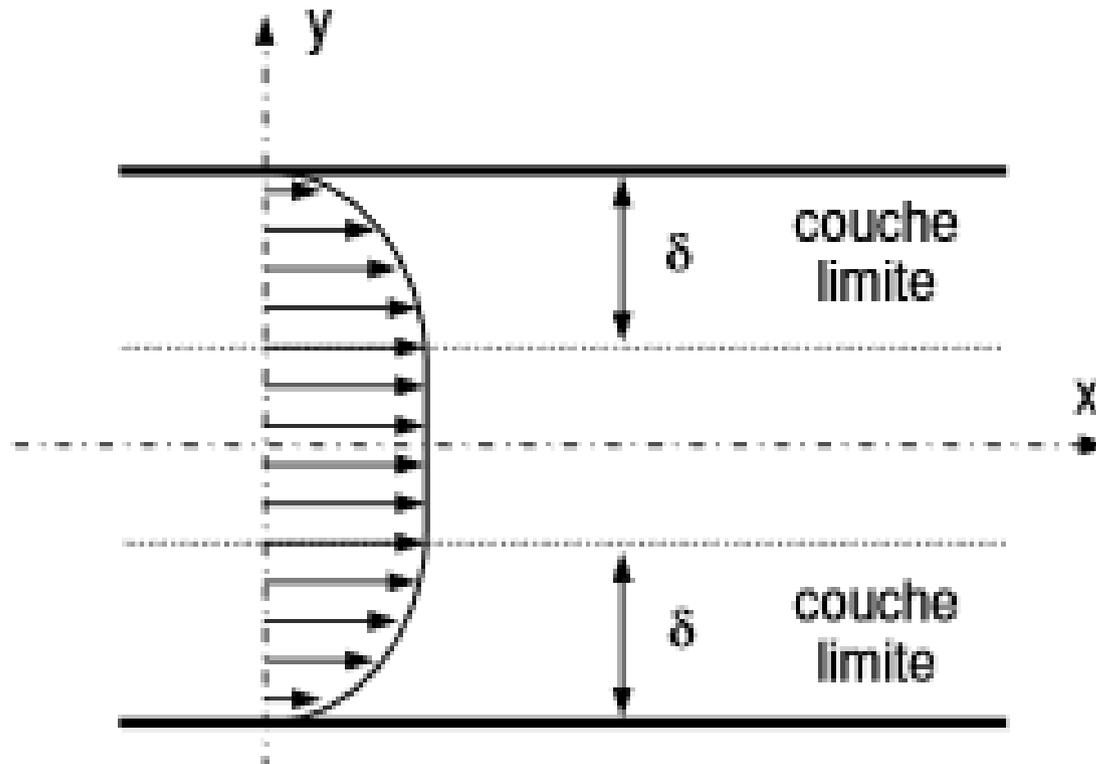
Conclusion

MODELE DE L'ÉCOULEMENT PARFAIT D'UN FLUIDE

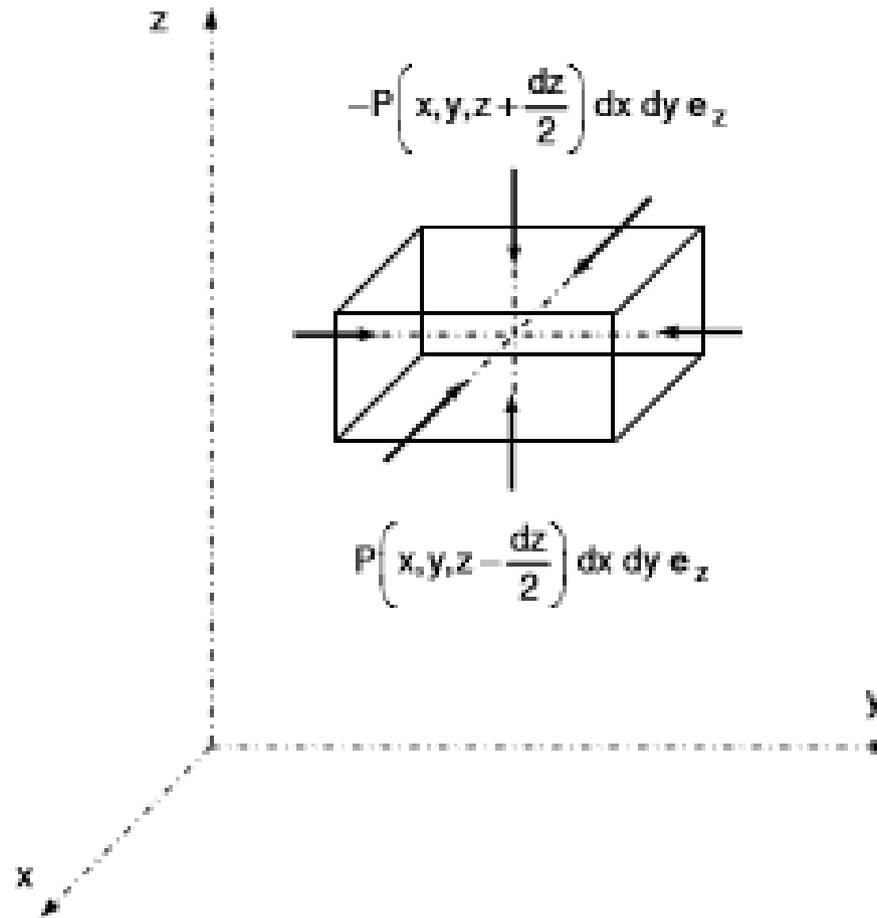
Forces de pression



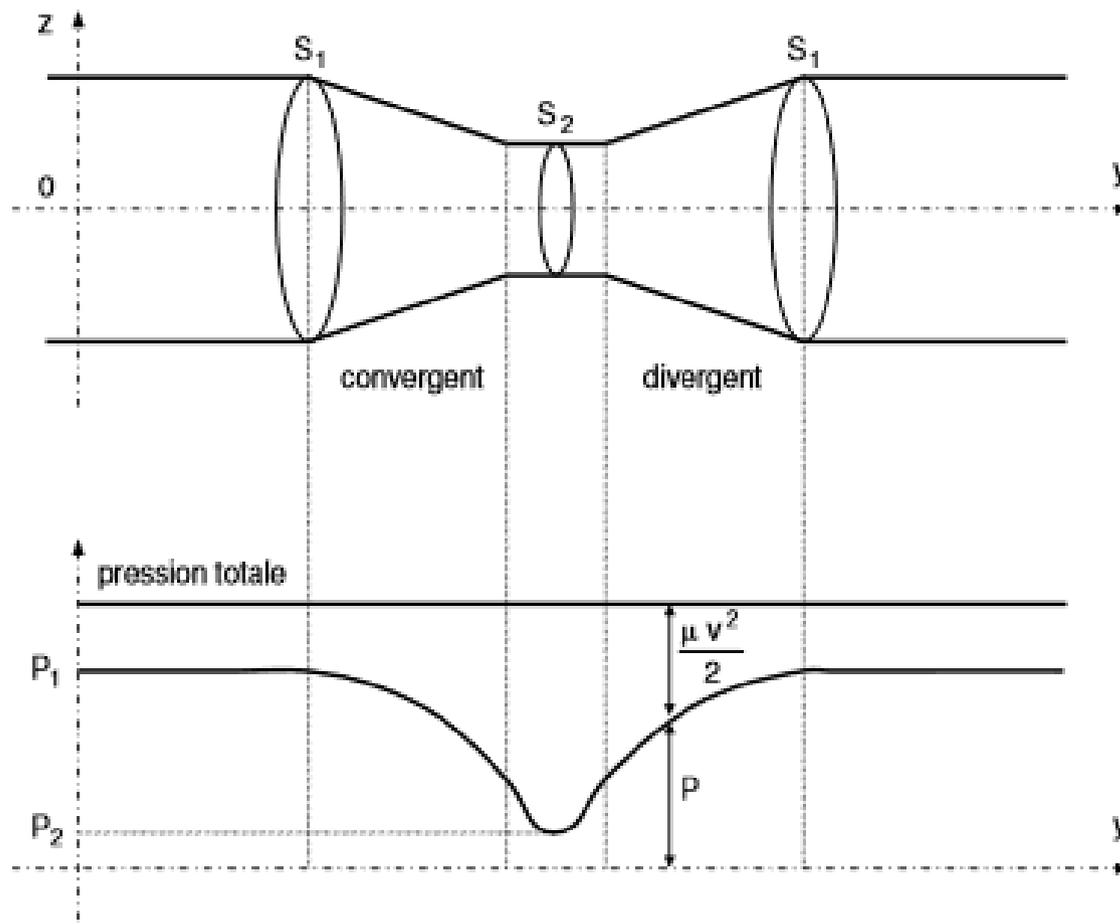
Écoulement parfait - validité



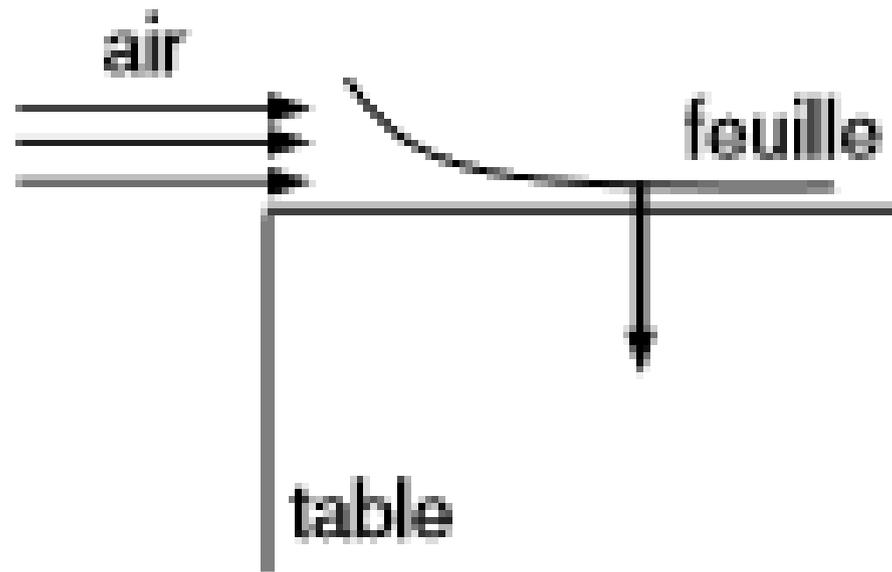
Gradient de pression



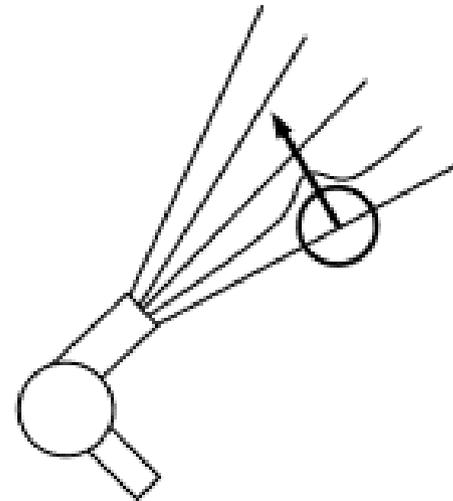
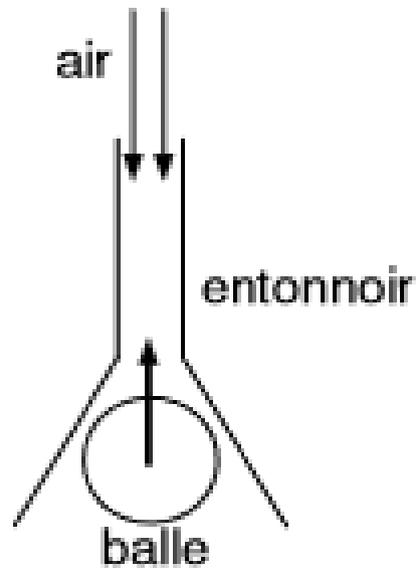
Effet Venturi



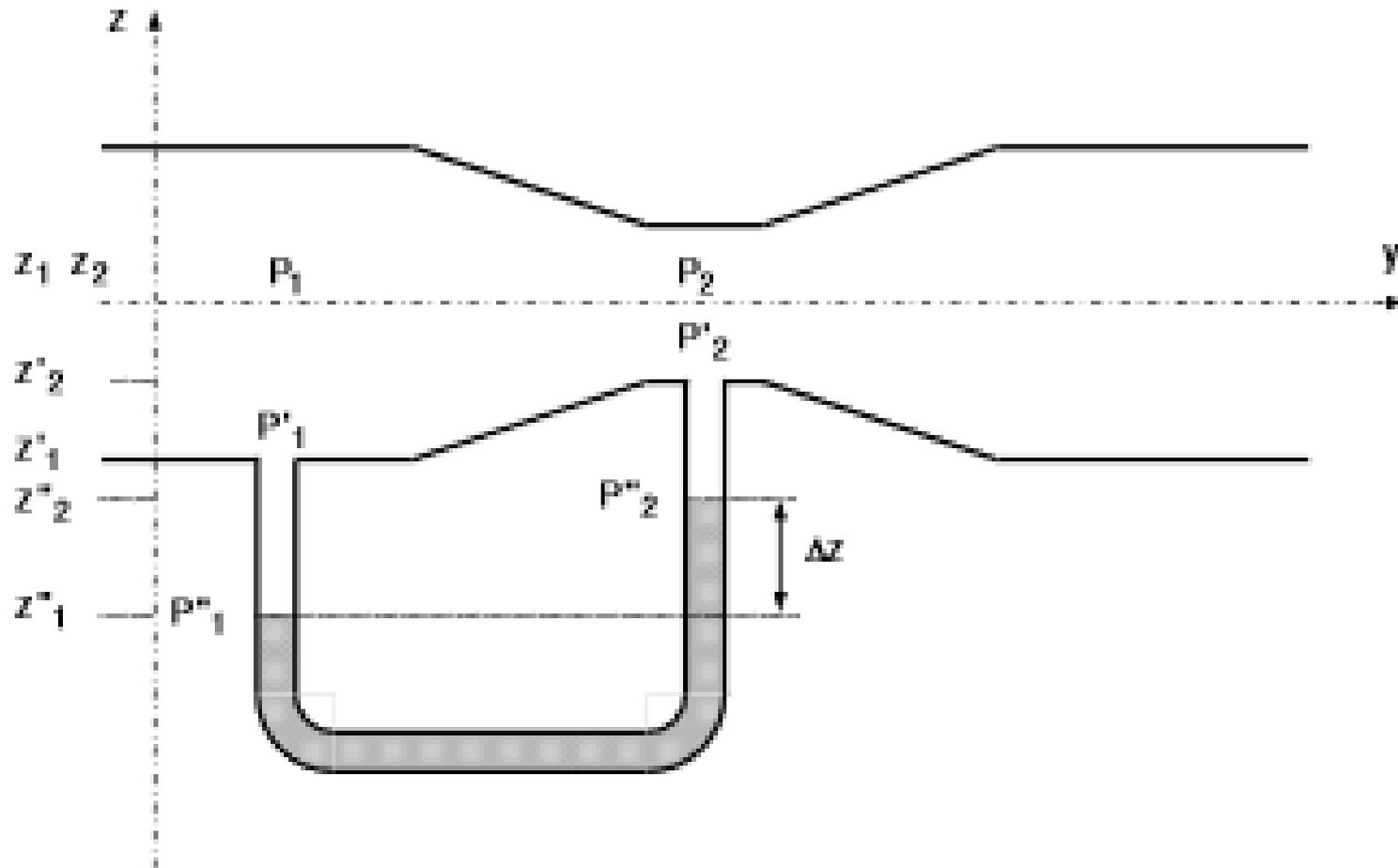
Application 1



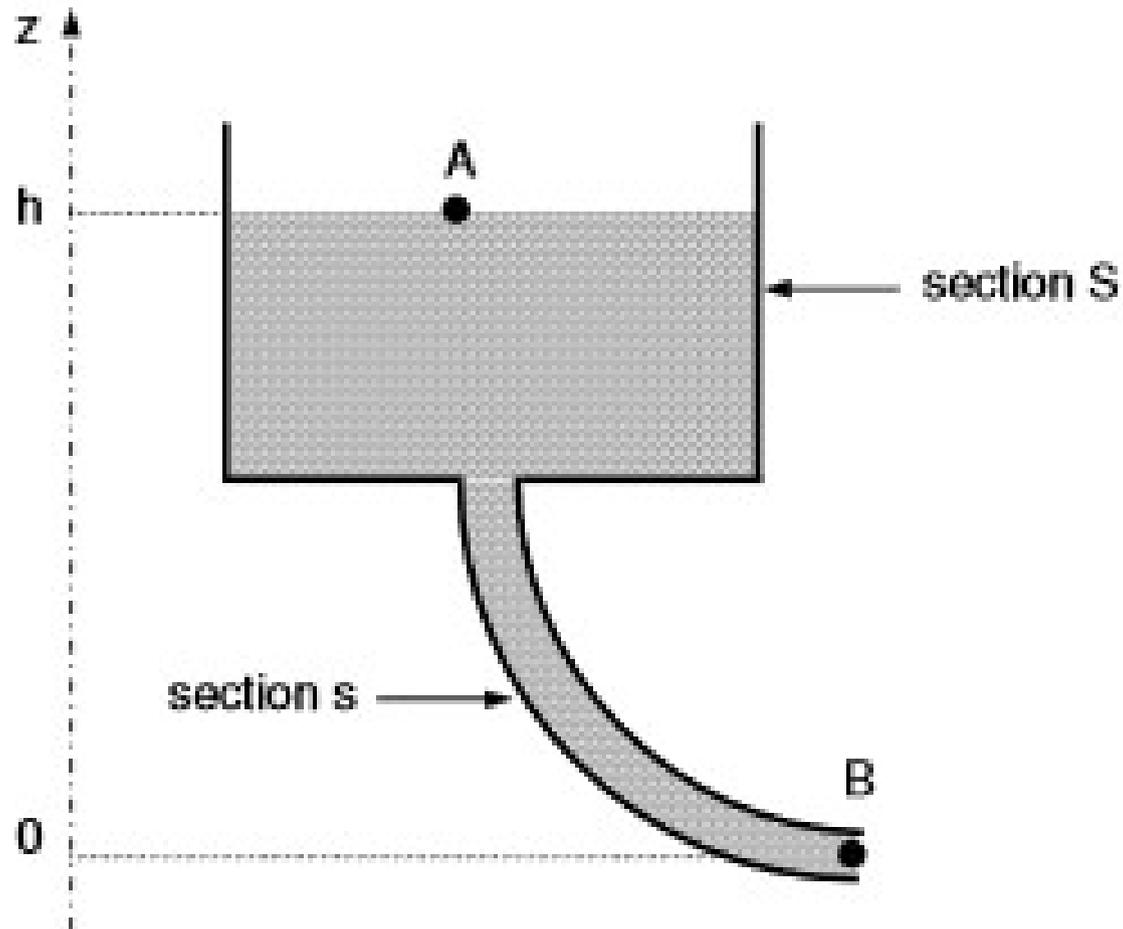
Application 2 - aspiration



Tube de Venturi – Mesure de débit



Formule de Torricelli



LP 09 MODELE DE L'ECOULEMENT PARFAIT D'UN FLUIDE

Pré-requis

Introduction

I-Ecoulement d'un fluide parfait

I-1 Forces de contact

I-2 Ecoulement parfait; validité

II-Equation d'Euler et Théorème de Bernoulli

II-1 Equation d'Euler

II-2 Relations de Bernoulli

Écoulement stationnaire

Écoulement irrotationnel

Interprétation

III-Applications

III-1 Effet Venturi

Principe de l'effet Venturi

Expériences

Feuilles de papier

Balle de ping-pong

Mesure d'un débit avec un tube de Venturi

III-2 Vidange d'un réservoir; formule de Torricelli

Écoulement laminaire

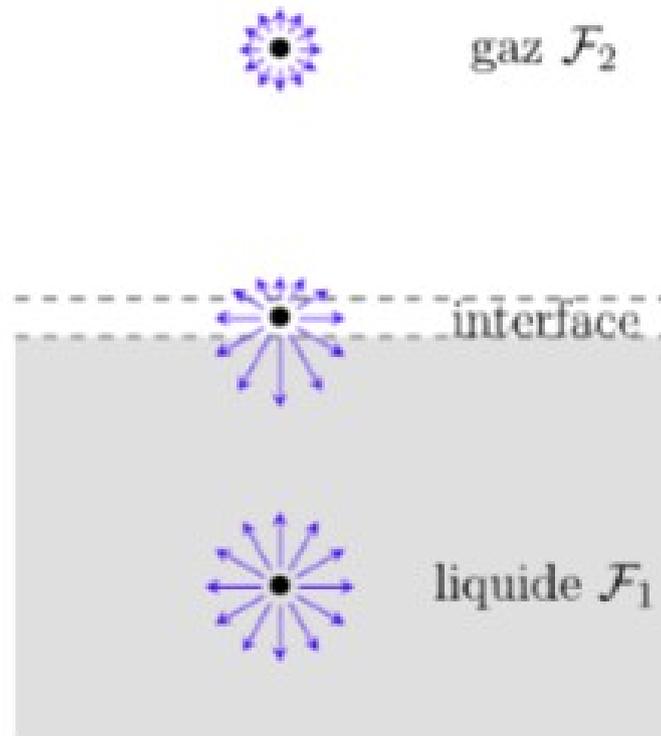
Écoulement en régime non stationnaire

III-3 Autres applications

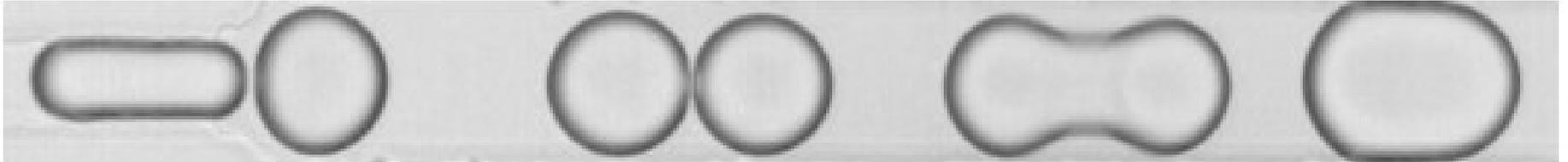
Conclusion

**PHENOMENES INTERFACIAUX
IMPLIQUANT LES FLUIDES**

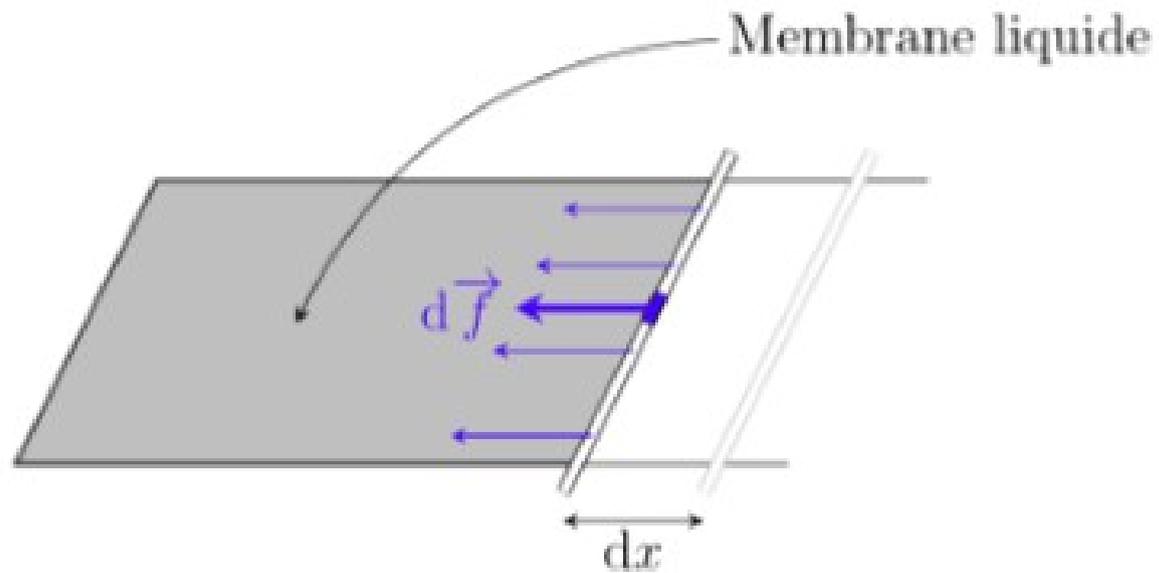
Interface gaz – liquide



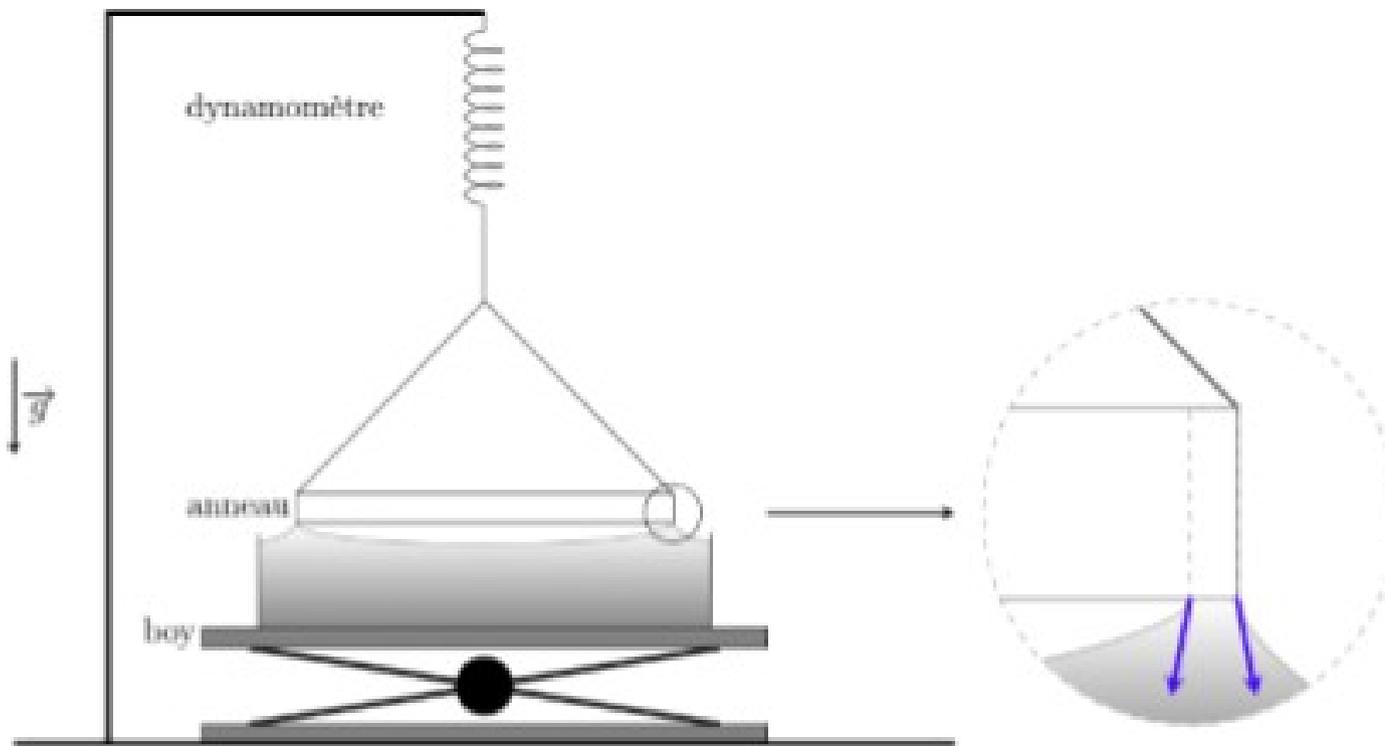
Coalescence



Force capillaire



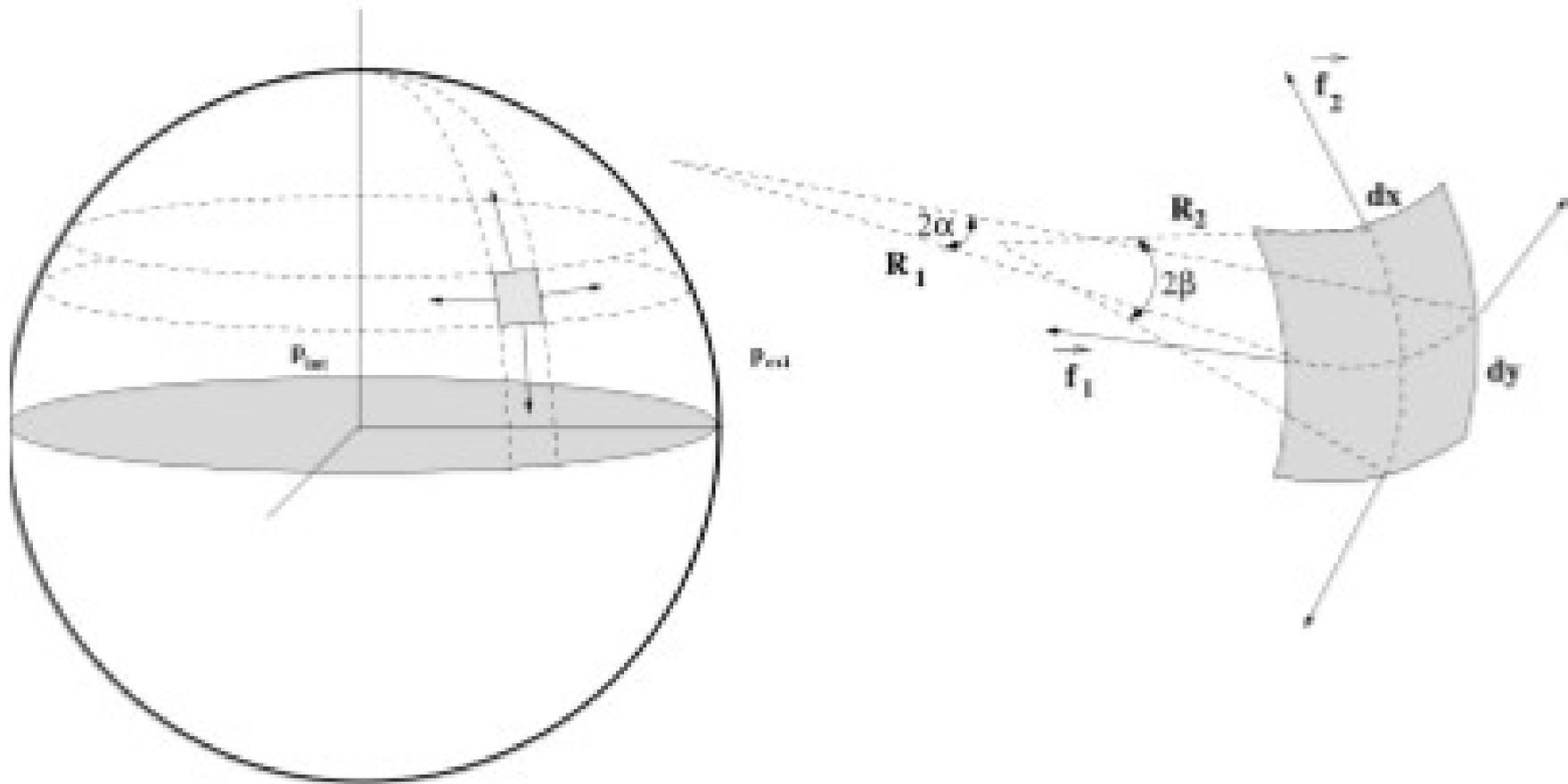
Méthode de l'anneau



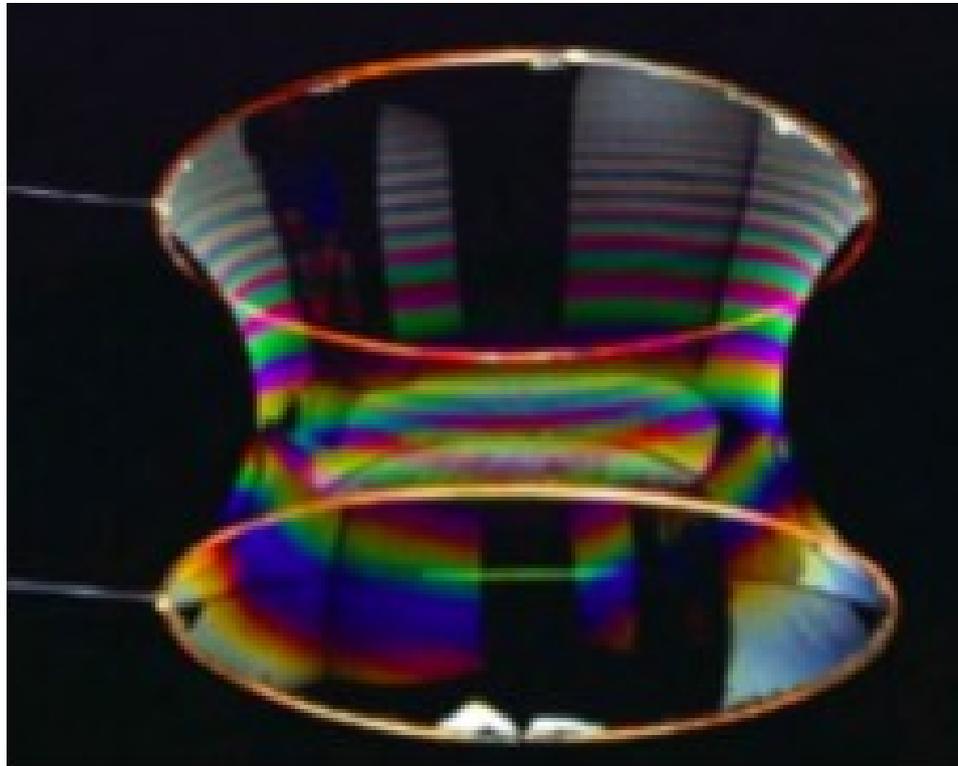
Tension superficielle, en mN/m

Liquide	Température	Tension superficielle mN/m
Mercure	18°C	475
Eau	20°C	73
Eau	80°C	62
Huile d'olive	20°C	32

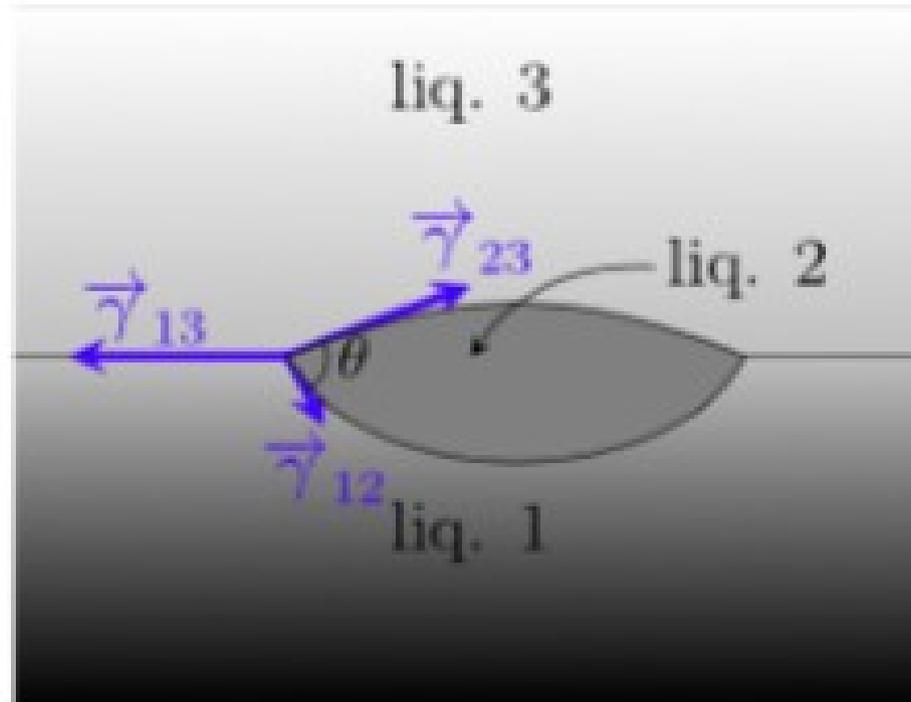
Théorème de Laplace



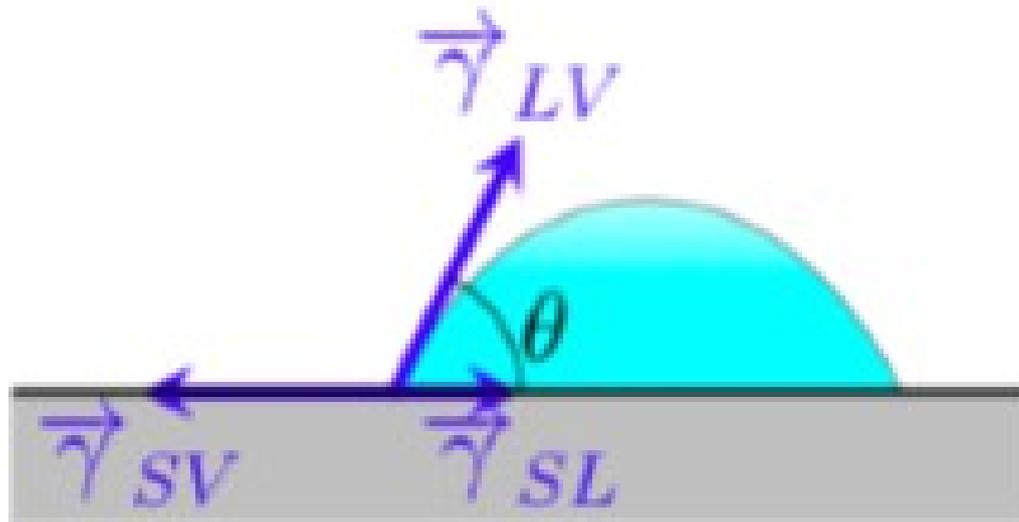
Surface minimale



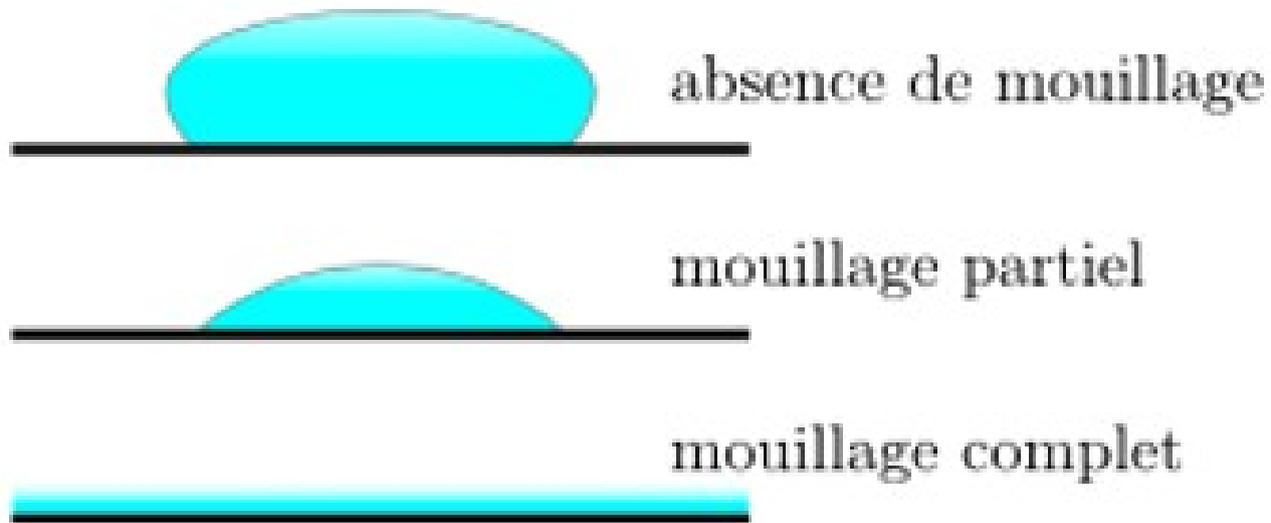
Équilibre au contact de trois fluides



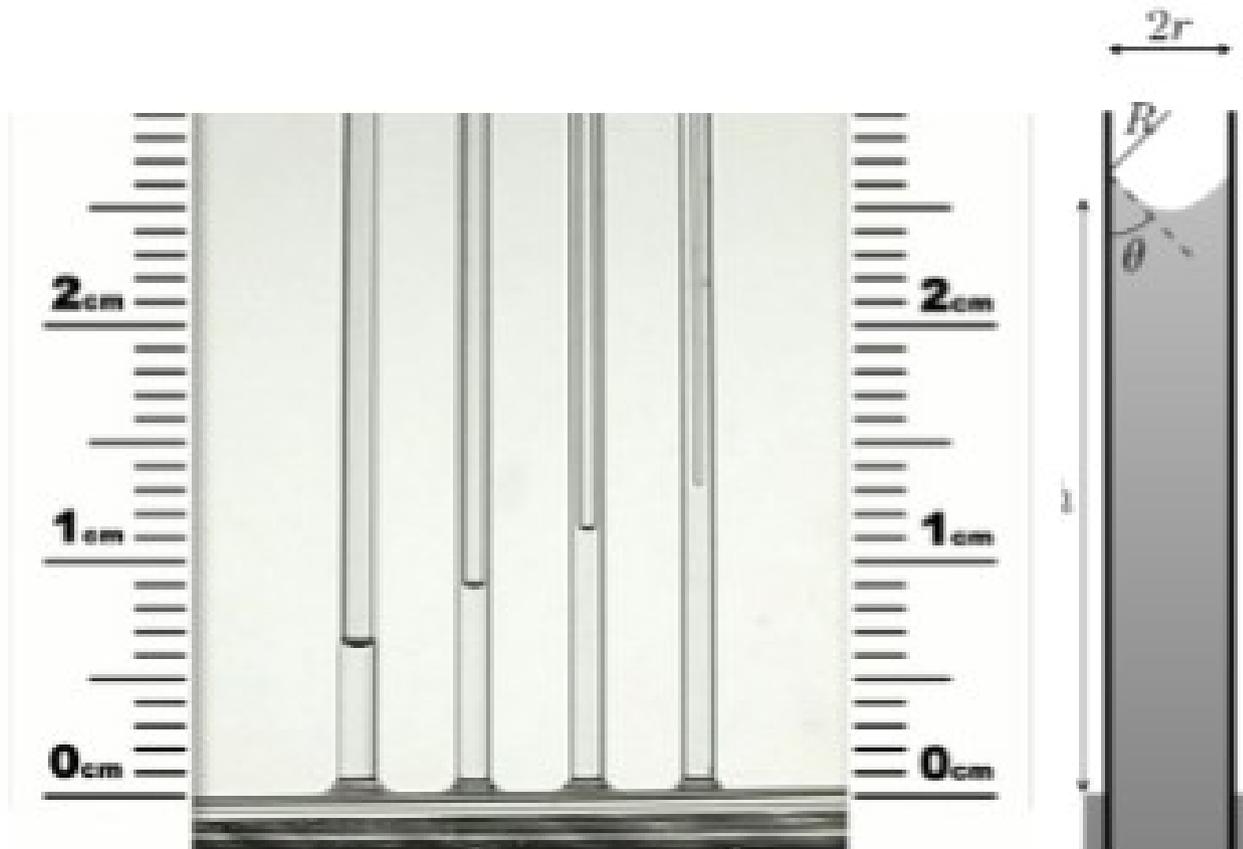
Équilibre d'un liquide au contact d'un solide



Liquide – solide. Mouillages



Loi de Jurin



LP 10 : PHENOMENES INTERFACIAUX IMPLICANT LES FLUIDES

Pré-requis

Introduction

I-Energie de surface

I-1 Notion de tension de surface

I-2 Conséquences expérimentales

Forme des bulles et des gouttes
Coalescence; Exercice
Retard des changements d'état

I-3 Rôle des tensio-actifs

II-Forces capillaires

II-1 Expression de la force capillaire

Expérience
Remarque

II-2 Mesure et propriétés de la tension superficielle

Méthode de l'anneau
Ordres de grandeur

II-3 Théorème de Laplace

Ordre de grandeur
Mûrissement d'une mousse
Surface minimale

III-Mouillage

III-1 Angle de contact

Equilibre au contact de 3 fluides; Exercice
Equilibre d'un liquide au contact d'un solide; Remarque

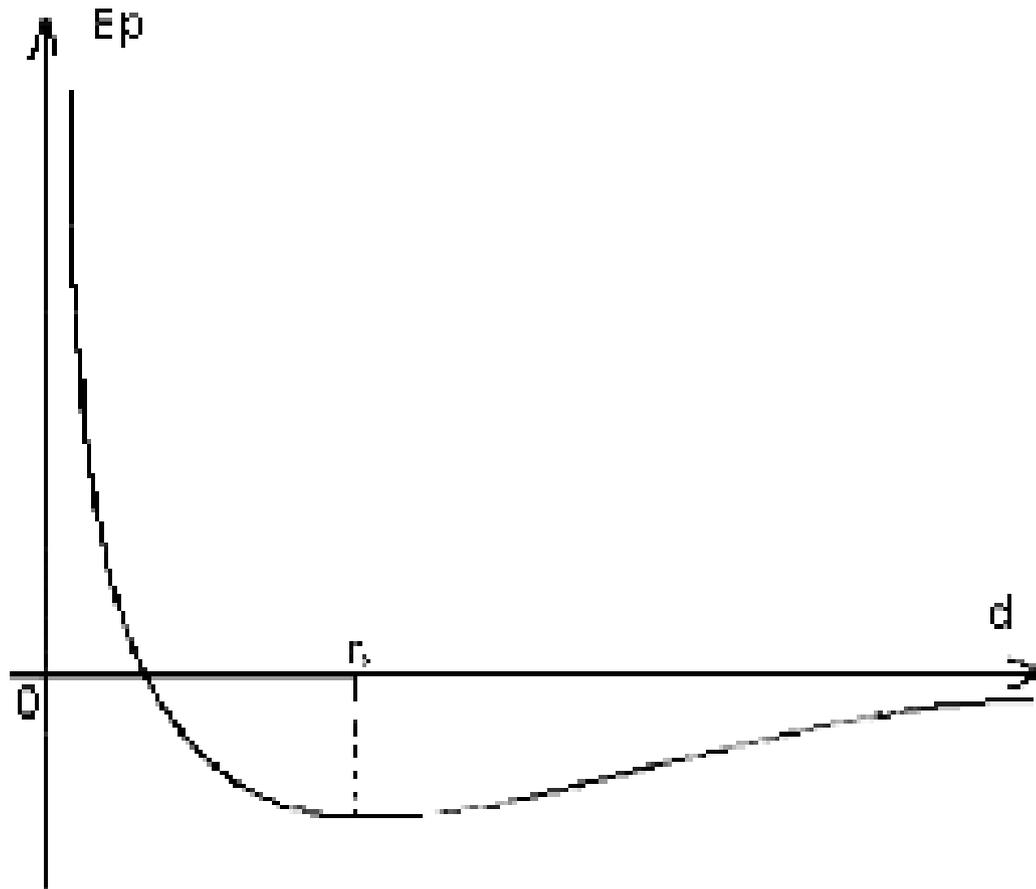
III-2 Ascension capillaire

Loi de Jurin
Exemple
Remarque

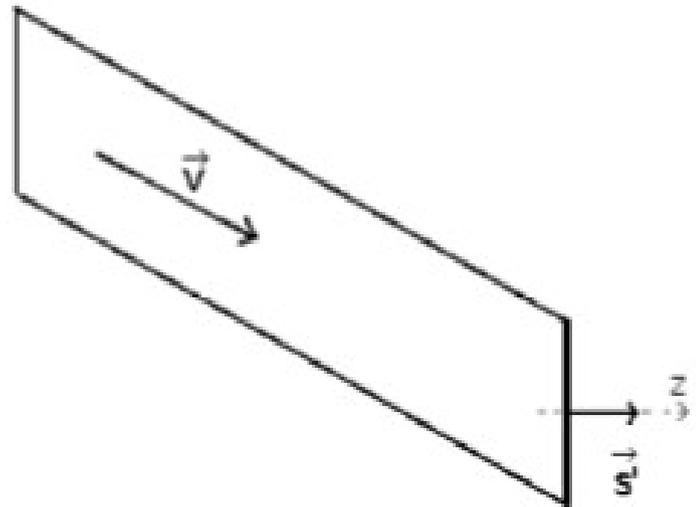
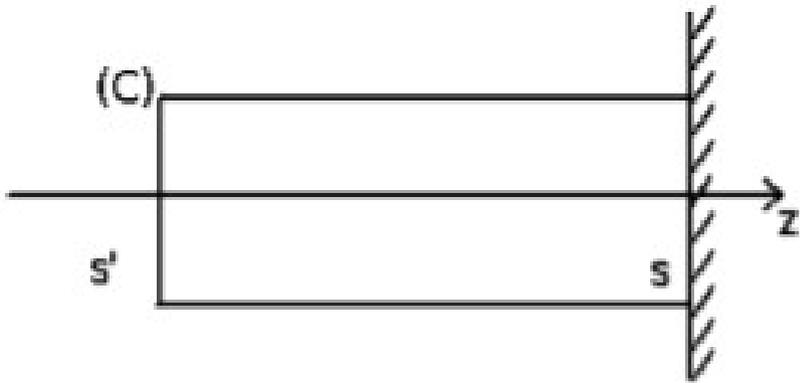
Conclusion

GAZ PARFAITS, GAZ RÉELS

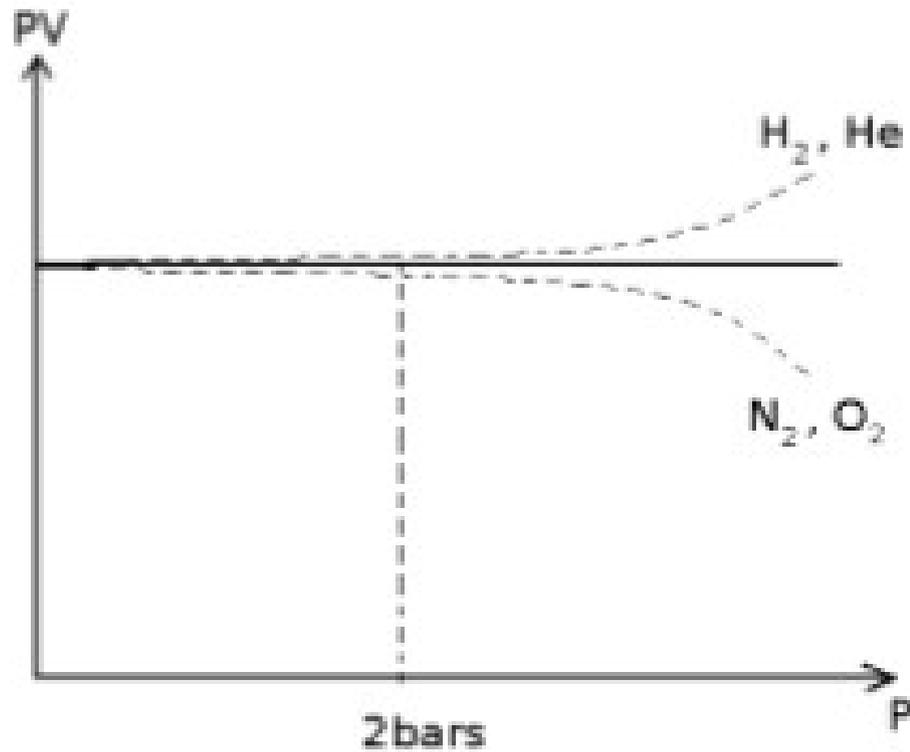
Energie potentielle d'interaction



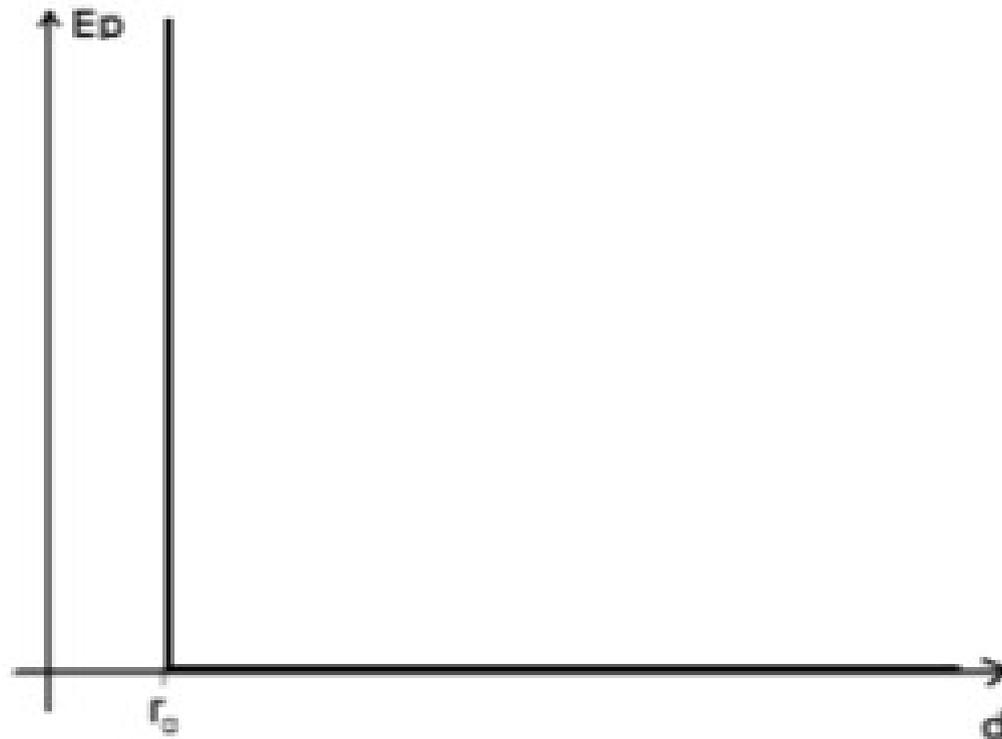
Pression cinétique



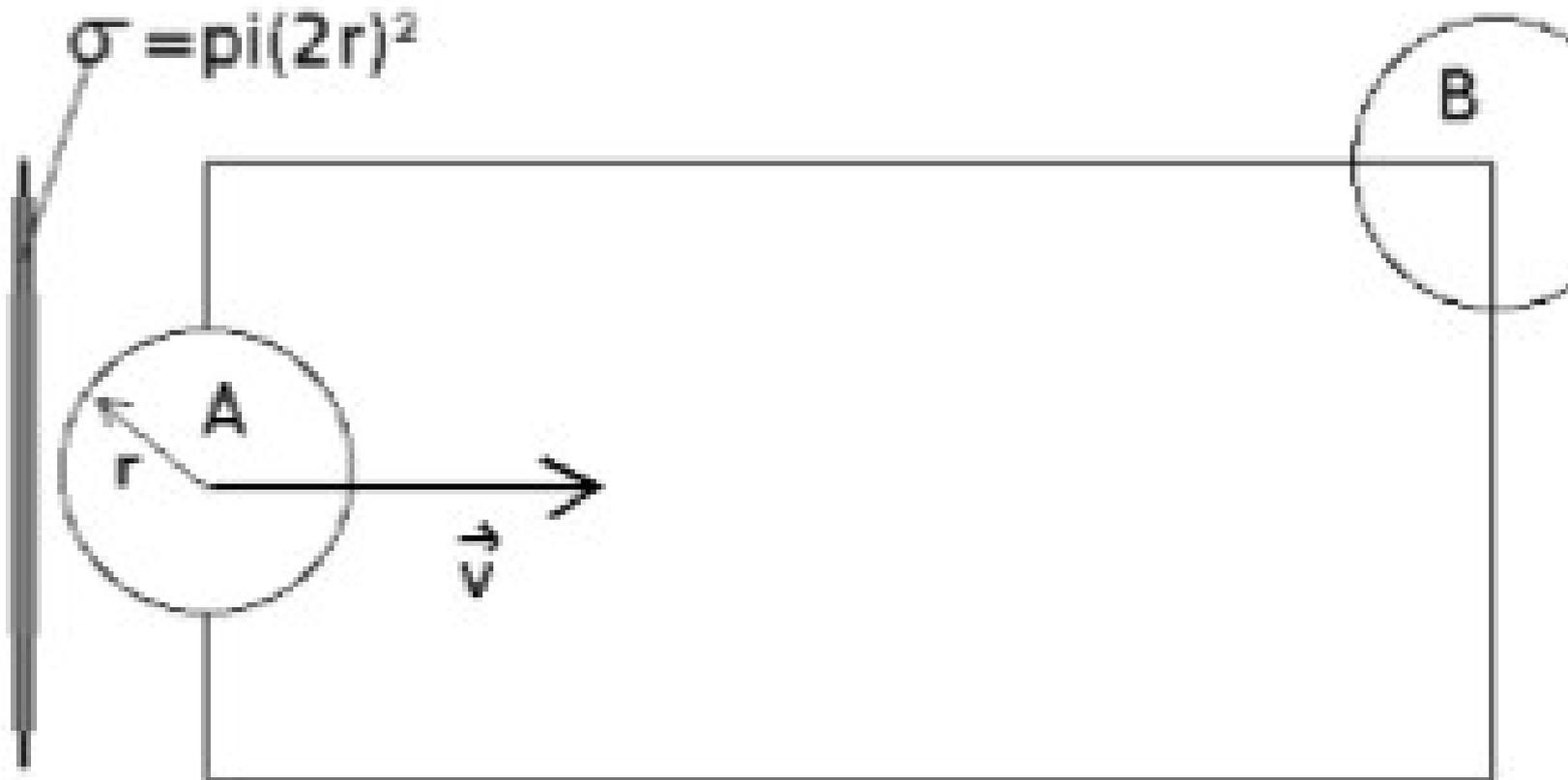
Limites du modèle des gaz parfaits



Le modèle des sphères dures



Calcul du libre parcours moyen



LP 11 : GAZ PARFAITS, GAZ REELS

Pré-requis

Introduction

I-L'état gazeux

I-1 Caractérisation expérimentale des gaz à basse pression

Loi de Boyle-Mariotte (1660)

Loi de Charles (1795)

Loi de Gay-Lussac (1802)

Loi d'Avogadro (1811)

Synthèse: loi des gaz parfaits

I-2 Caractérisation des gaz réels

I-3 Définition d'un gaz parfait

II-Grandeurs macroscopiques et équation d'état du gaz parfait

II-1 Pression cinétique PC

Définition

Expression microscopique; Remarques

II-2 Température cinétique TC

Interprétation microscopique

Application

II-3 Equation d'état d'un gaz parfait

II-4 Energie interne U

III-Du gaz parfait au gaz réel

III-1 Les limites du gaz parfait

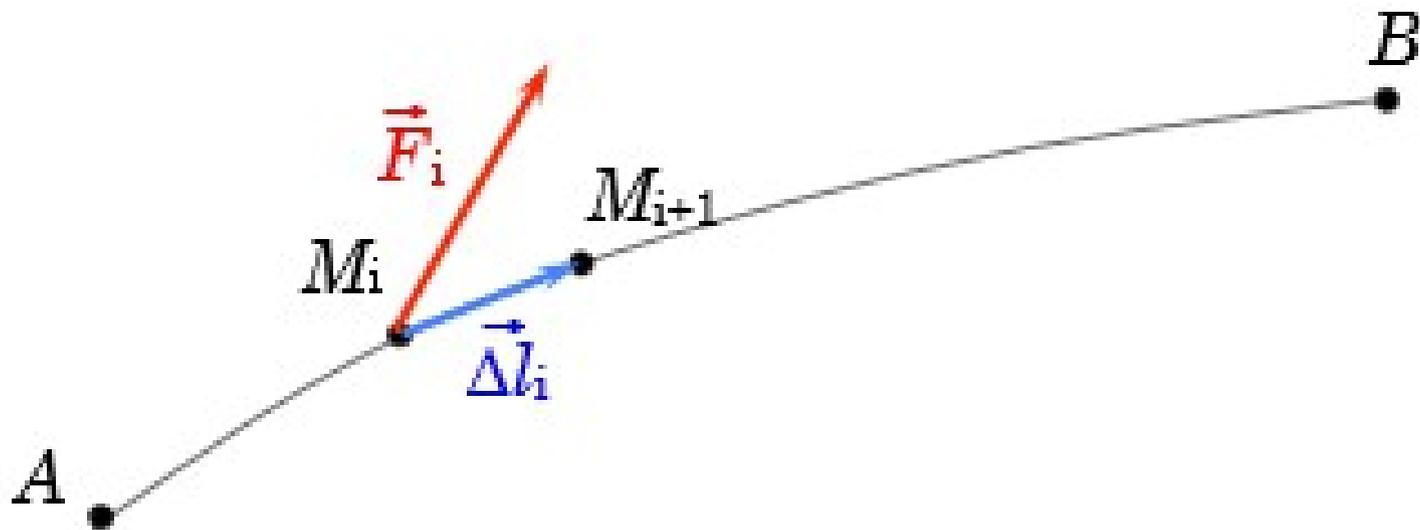
III-2 Le modèle des sphères dures

Calcul du libre parcours moyen; Application numérique

Conclusion

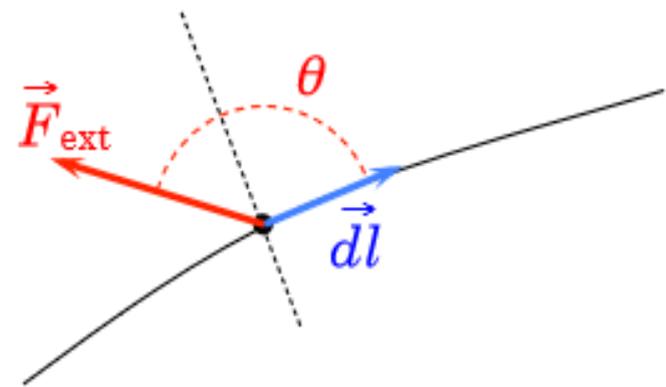
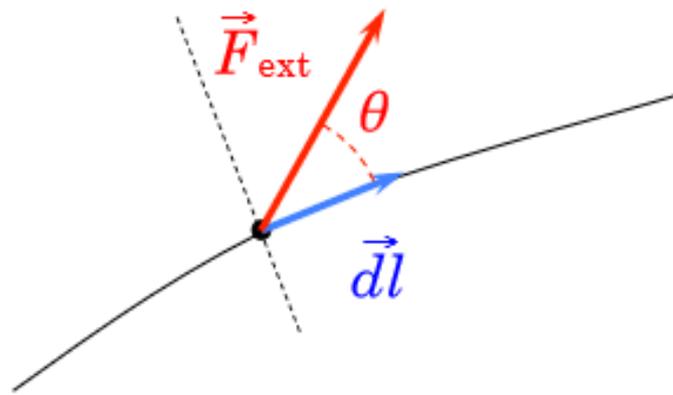
PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

Travail W

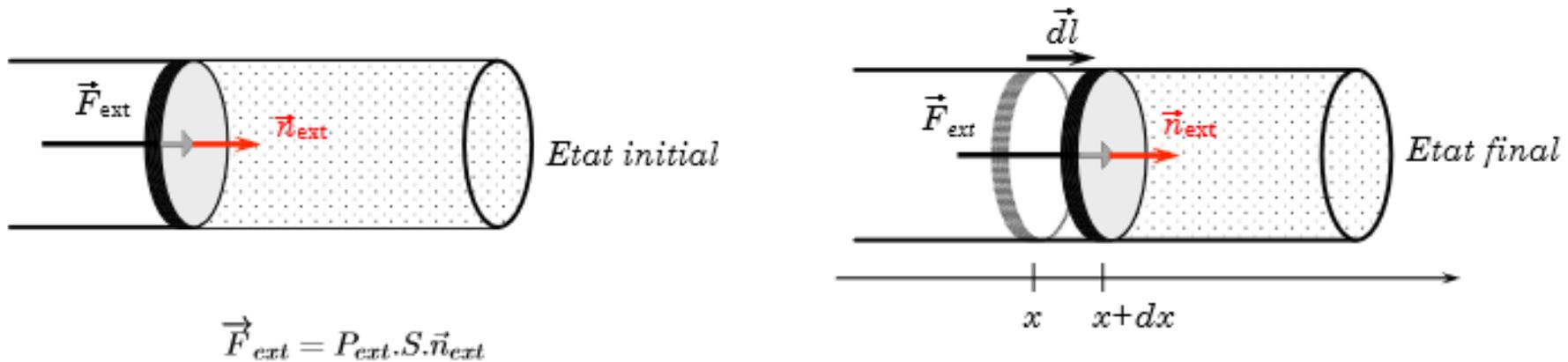


$$W = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_i^n \vec{F}_i \cdot \vec{\Delta l}_i = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

Travail W

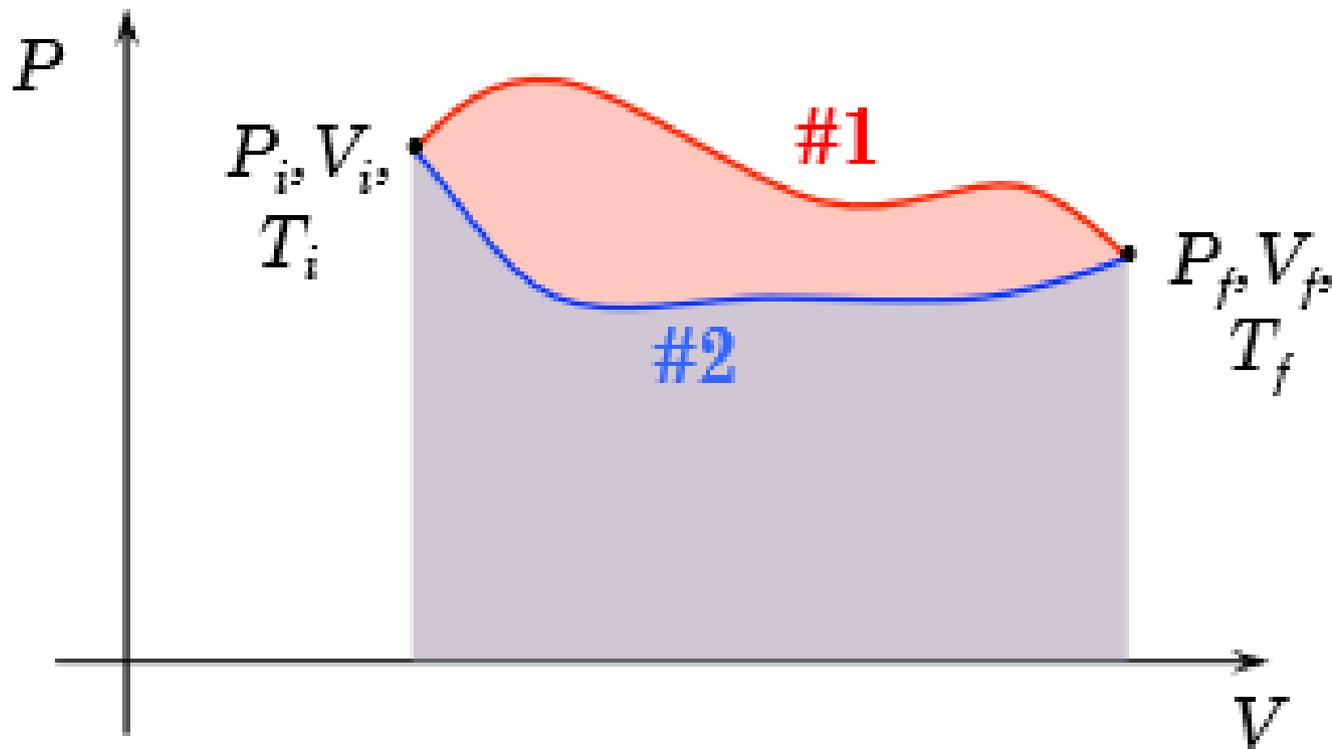


Travail des forces de pression sur un fluide

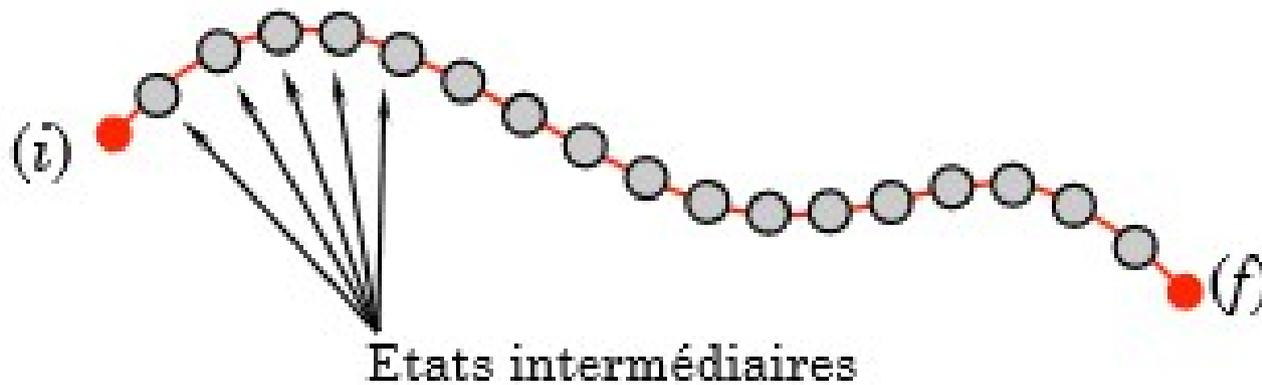


$$\delta W = \vec{F}_{ext} \cdot \vec{dl} = P_{ext} \cdot S \cdot dx = P_{ext} \cdot dV_{ext}$$

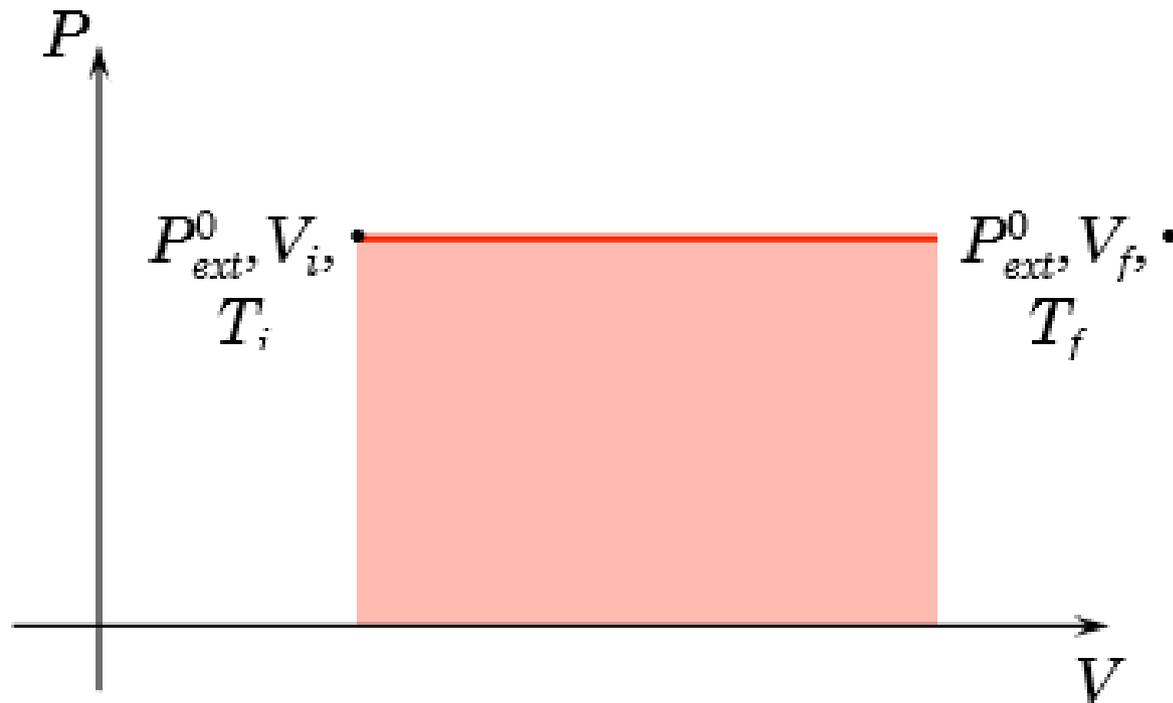
W et diagramme de Clapeyron



Transformation quasi-statique

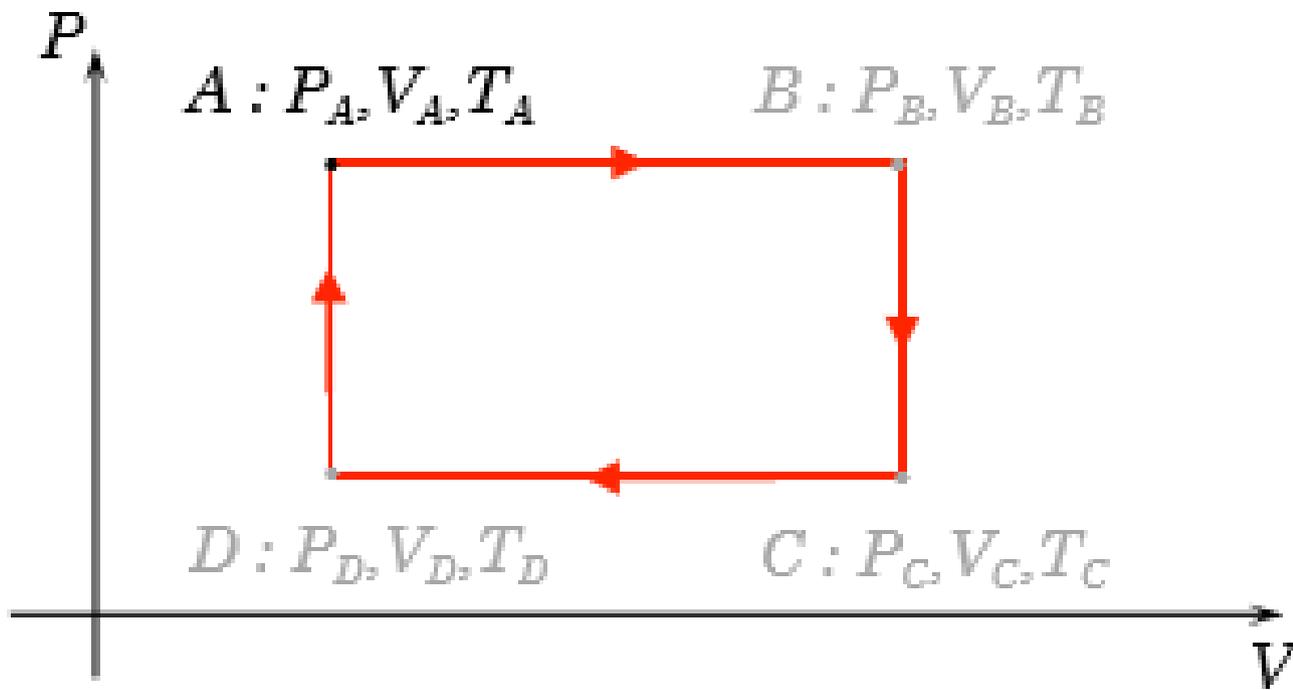


W : Transformation isobare

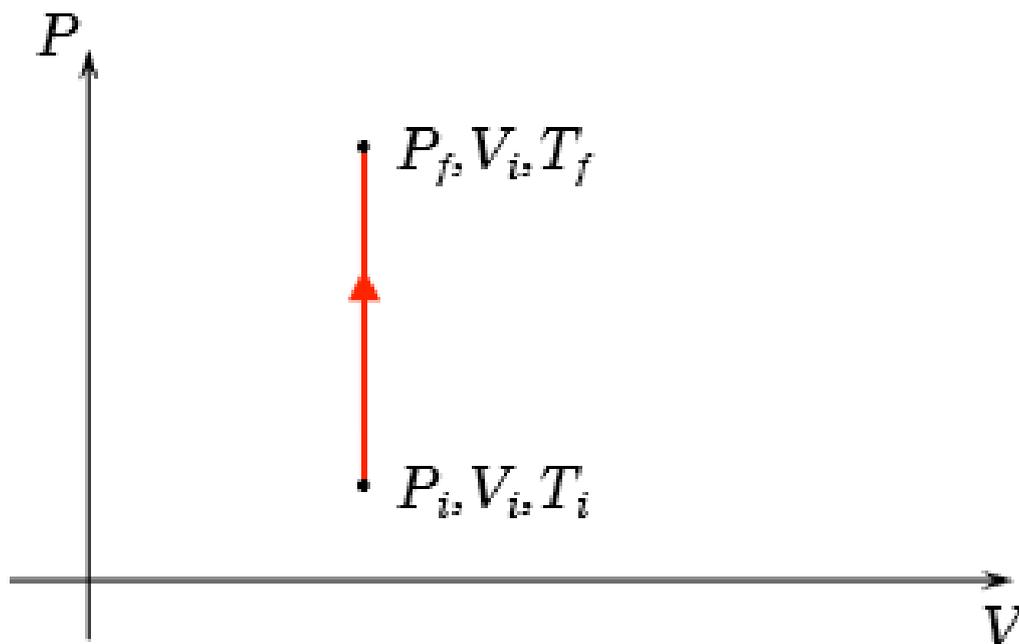


$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P_{ext}^0 dV = -P_{ext}^0 (V_f - V_i)$$

Calculs avec U sur un cycle

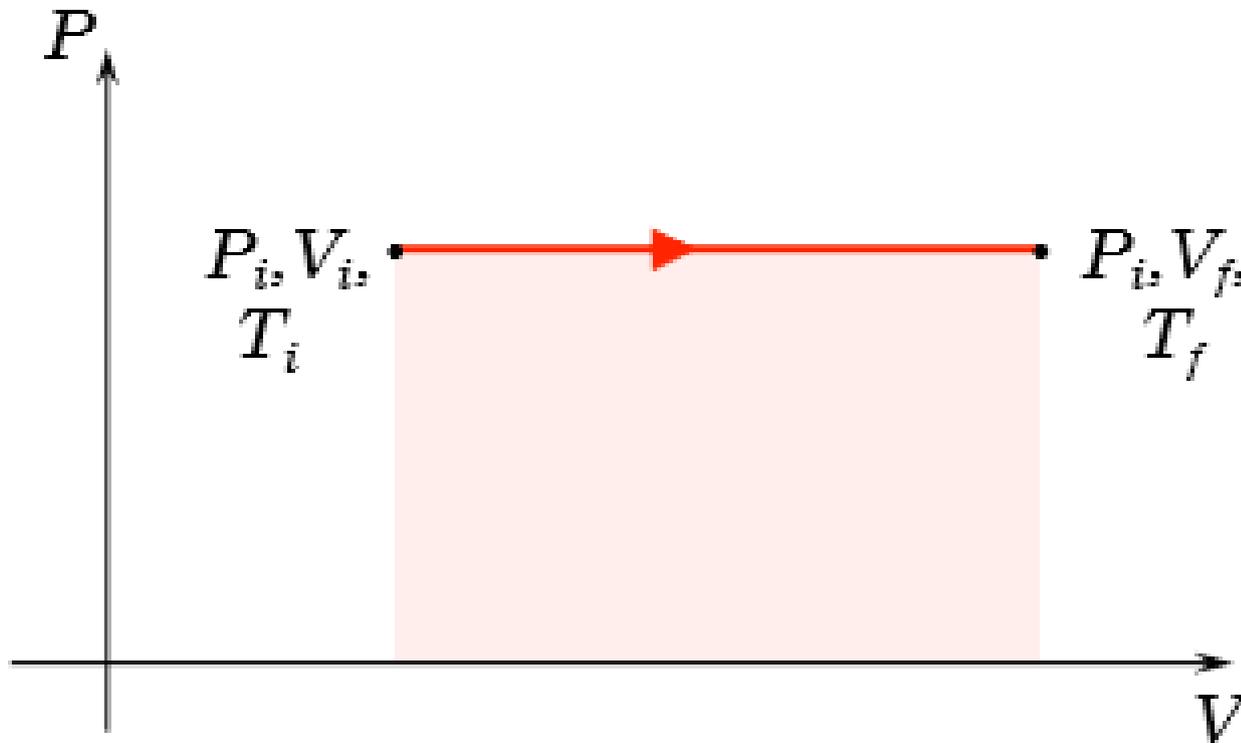


Gaz parfait : transformation isochore

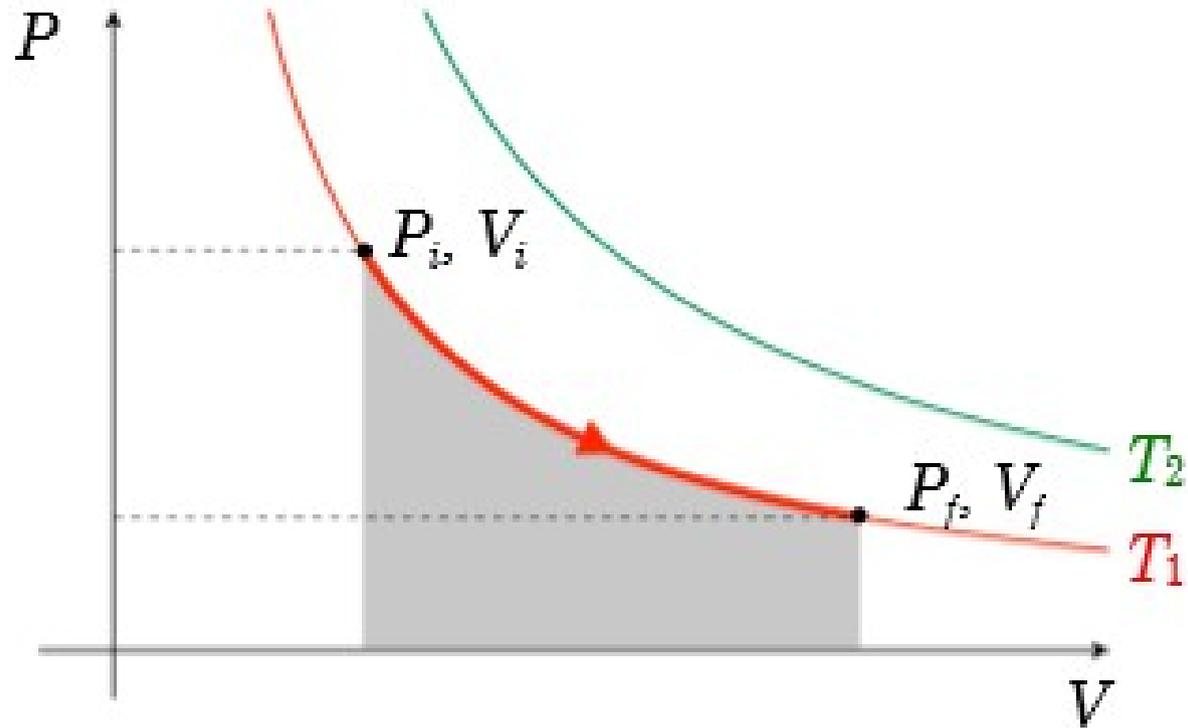


$$\frac{P}{T} = \frac{P_f}{T_f} = \frac{P_i}{T_i} = \frac{nR}{V} = \text{Constante}$$

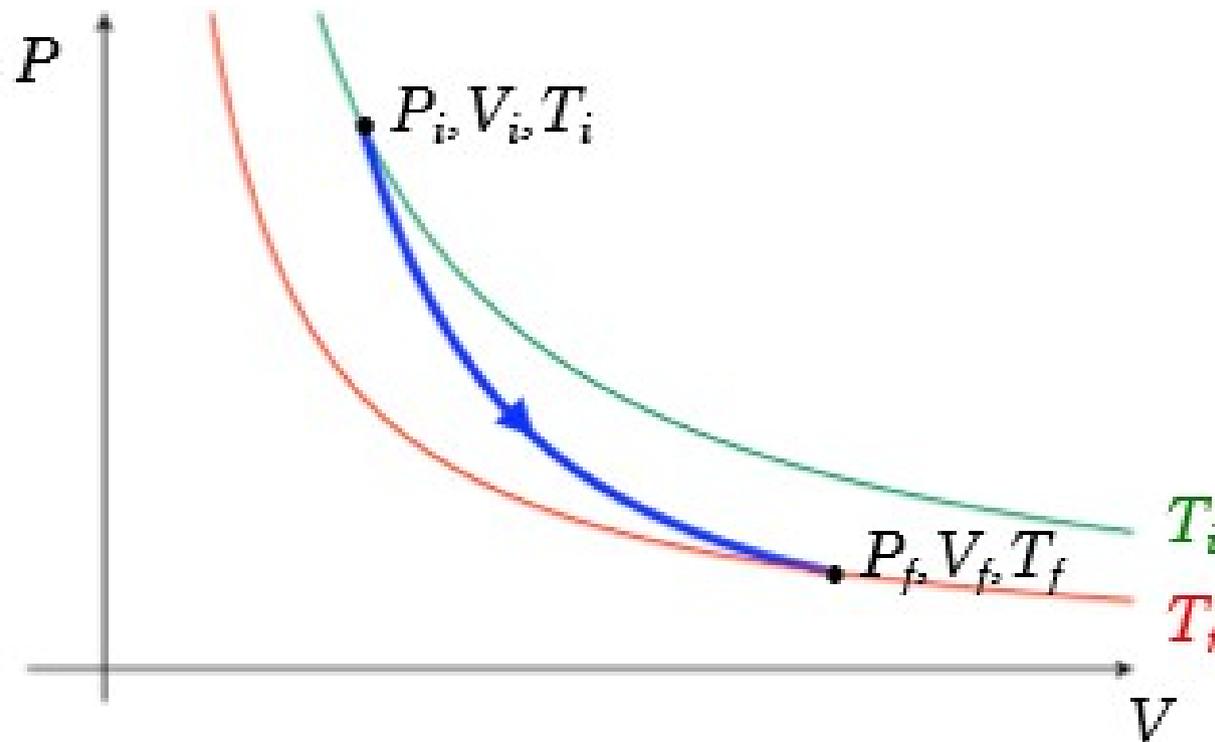
Gaz parfait : transformation isobare



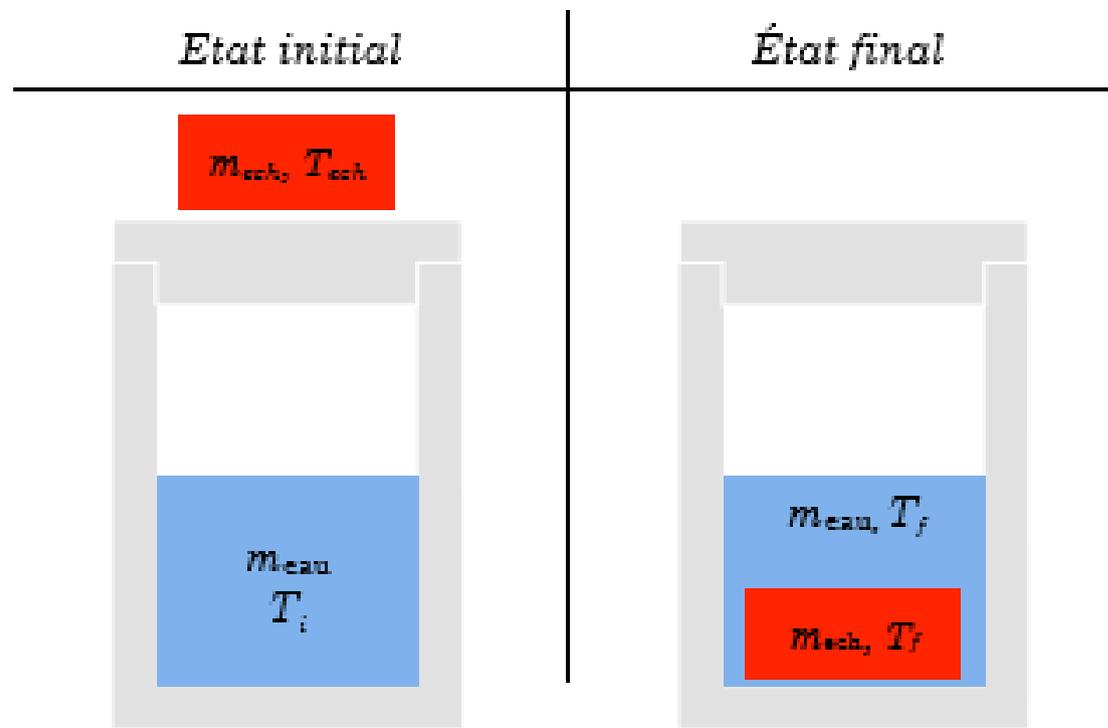
Gaz parfait : transformation isotherme



Gaz parfait : transformation adiabatique



Calorimétrie : mélanges



LP 12 : PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

Pré-requis

Introduction

I-Travail W

Définition
Dimension, unité

I-1 Travail reçu, travail fourni

Travail des forces de pression sur un fluide
Remarques

I-2 Transformation quasi-statique

Définition
Exemple

II-Chaleur Q

Définition
Dimension, unité
Remarques
Capacité calorifique et chaleur spécifique
Remarques

III-Energie interne d'un système U

III-1 Définition, exemples

III-2 U: Fonction d'état du système

Propriétés
Remarques

IV-Premier principe de la Thermodynamique

Enoncé
Remarques

V-Transformations remarquables d'un gaz parfait

V-1 Transformation isochore d'un gaz parfait ($V=cte$)

Quel est le lien entre les variables P et T?
Travail
Variation d'énergie interne

V-2 Transformation isobare d'un gaz parfait ($P=cte$)

Quel est le lien entre les variables V et T?
Travail
Variation d'énergie interne
Chaleur échangée
Remarques

V-3 Transformation isotherme d'un gaz parfait ($T=cte$)

Quel est le lien entre les variables P et V?

Variation d'énergie interne
Travail et chaleur échangés

V-4 Transformation adiabatique d'un gaz parfait ($Q=0$)

Variation d'énergie interne
Travail

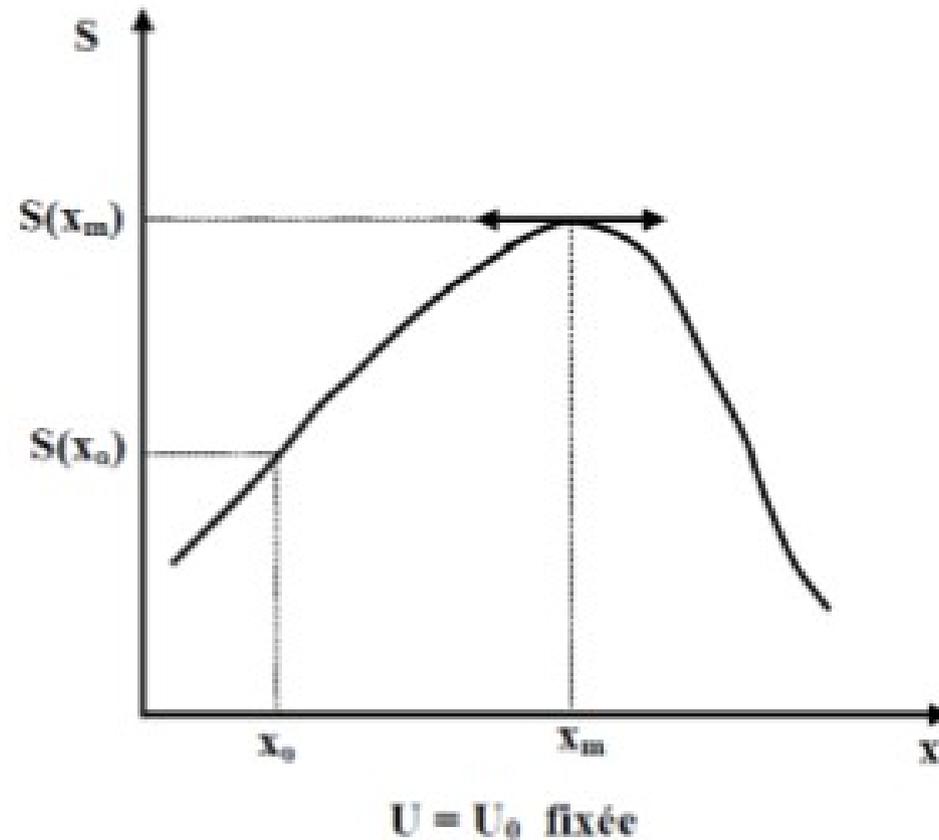
VI-Calorimétrie

Définition
Méthode des mélanges
Caractéristiques thermodynamiques de l'expérience

Conclusion

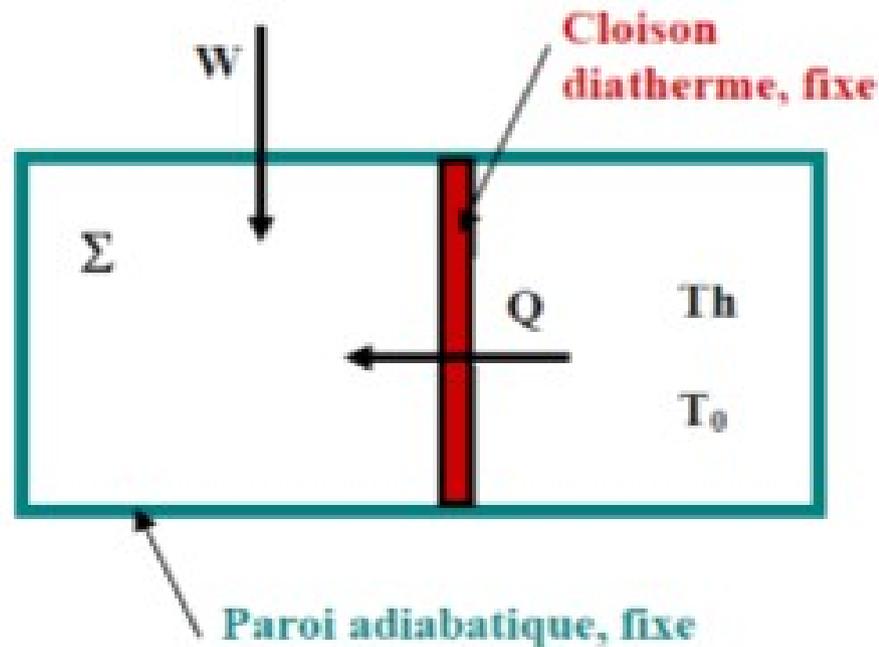
ÉVOLUTION ET
CONDITION D'ÉQUILIBRE
D'UN SYSTÈME THERMODYNAMIQUE
FERMÉ

Potentiels thermodynamiques cas de l'entropie

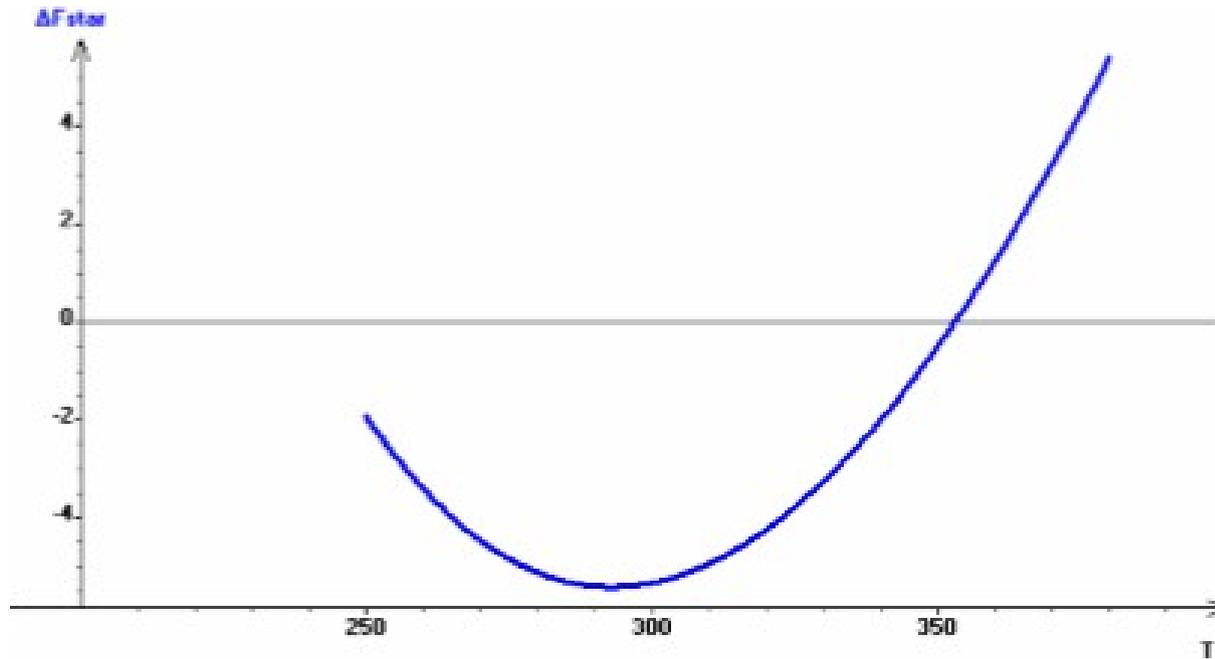


*Un état d'équilibre correspond à un maximum de S (un minimum de $-S$)
pour une énergie interne constante donnée.*

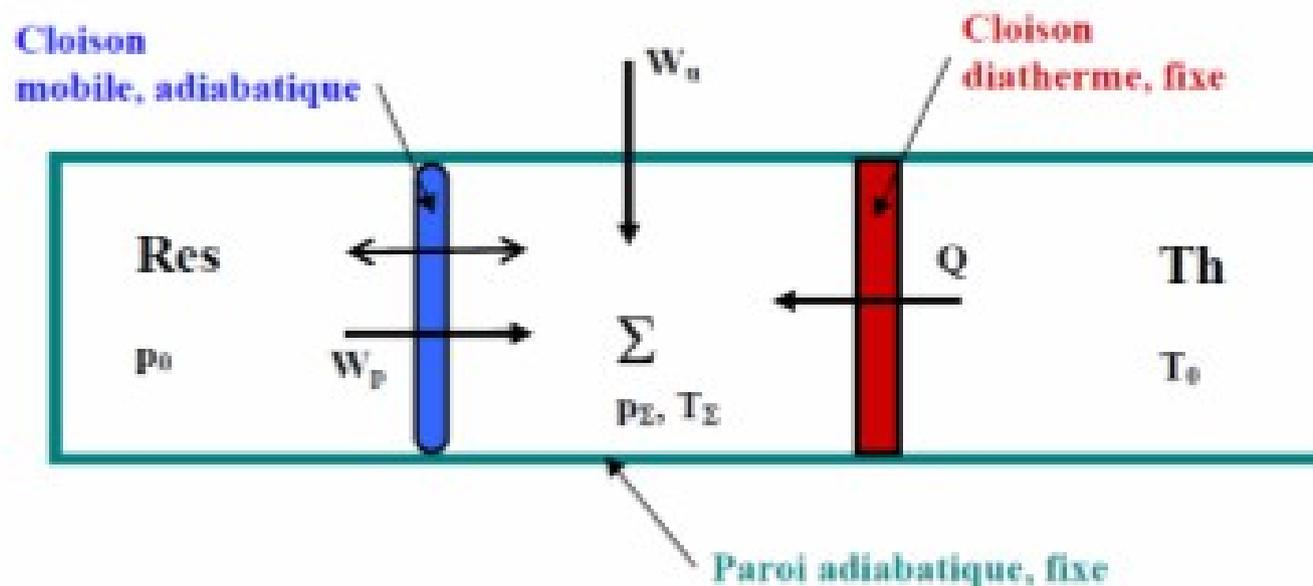
Potentiel thermodynamique F ou F^* pour une transformation monotherme



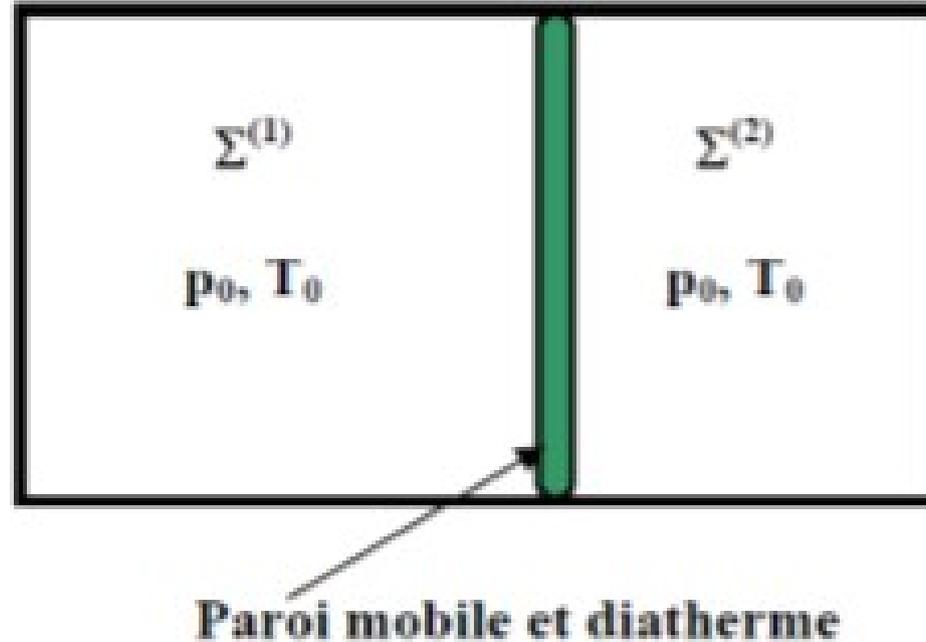
Minimum de F^* pour $T = T_0$



Potentiel thermodynamique G ou G^* transformation monotherme et monobare



Exemple : paroi mobile et diatherme



LP 13 : EVOLUTION ET CONDITION D'EQUILIBRE D'UN SYSTEME THERMODYNAMIQUE FERME

Pré-requis

Fonction d'état
Premier et second principe de la Thermodynamique
Transformations monotherme et monobare
Energie potentielle d'un système mécanique

Introduction

I-Rappel sur la notion de potentiel

I-1 En mécanique

I-2 Exemple de l'entropie

Second principe
Application

II-Définition des potentiels thermodynamiques F^* et G^* et des fonctions d'état F et G

Définition
Remarques
Exemples
En particulier

II-1 Evolutions monothermes, potentiel thermodynamique F^* et fonction énergie libre F

II-2 Système soumis à des transformations monothermes

Lien avec le travail reçu par l'extérieur
Potentiel thermodynamique pour les transformations monothermes sans échange de travail avec l'extérieur
Exemple d'application (exercice)
Cas particulier des systèmes en équilibre avec un thermostat

II-3 Evolutions monothermes et monobares potentiel thermodynamique G^* et fonction enthalpie libre G

Système soumis à des transformations monothermes et monobares
Lien avec le travail autre que forces de pression reçu par l'extérieur
Potentiel thermodynamique pour les transformations monothermes et monobares sans échange de travail avec l'extérieur
Exemples d'application
Ex 1: Cas particulier des systèmes en équilibre avec le thermostat et le réservoir
Ex 2: 1 mole de GP dans un récipient fermé par un piston

III-Quelques exemples et applications

III-1 Exercice: Etude d'une pile isobare et isotherme (travail utile)

III-2 Equilibre chimique et condition d'équilibre

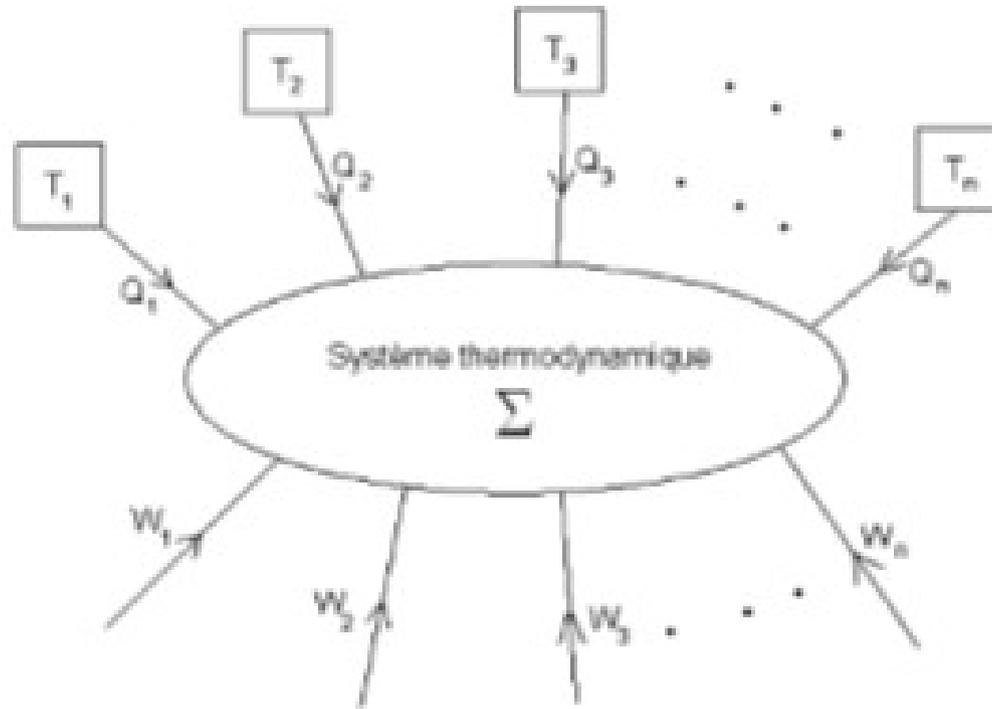
III-3 Application au corps pur sous deux phases

Condition d'équilibre et d'évolution
Formule de Clapeyron

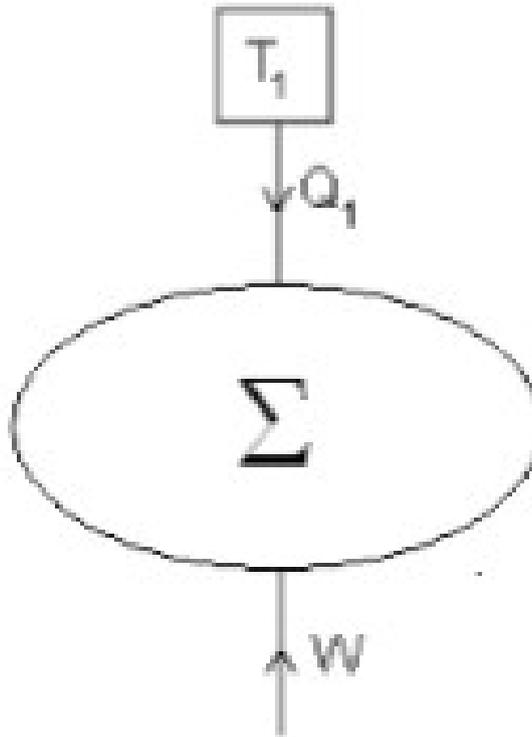
Conclusion

MACHINES THERMIQUES RÉELLES

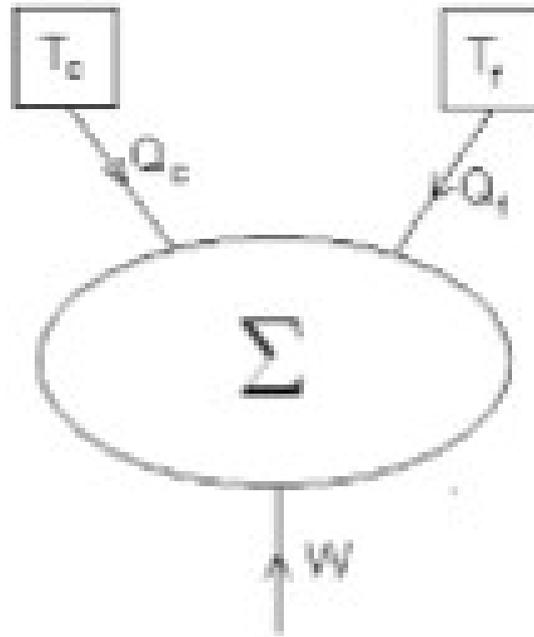
Efficacité thermodynamique



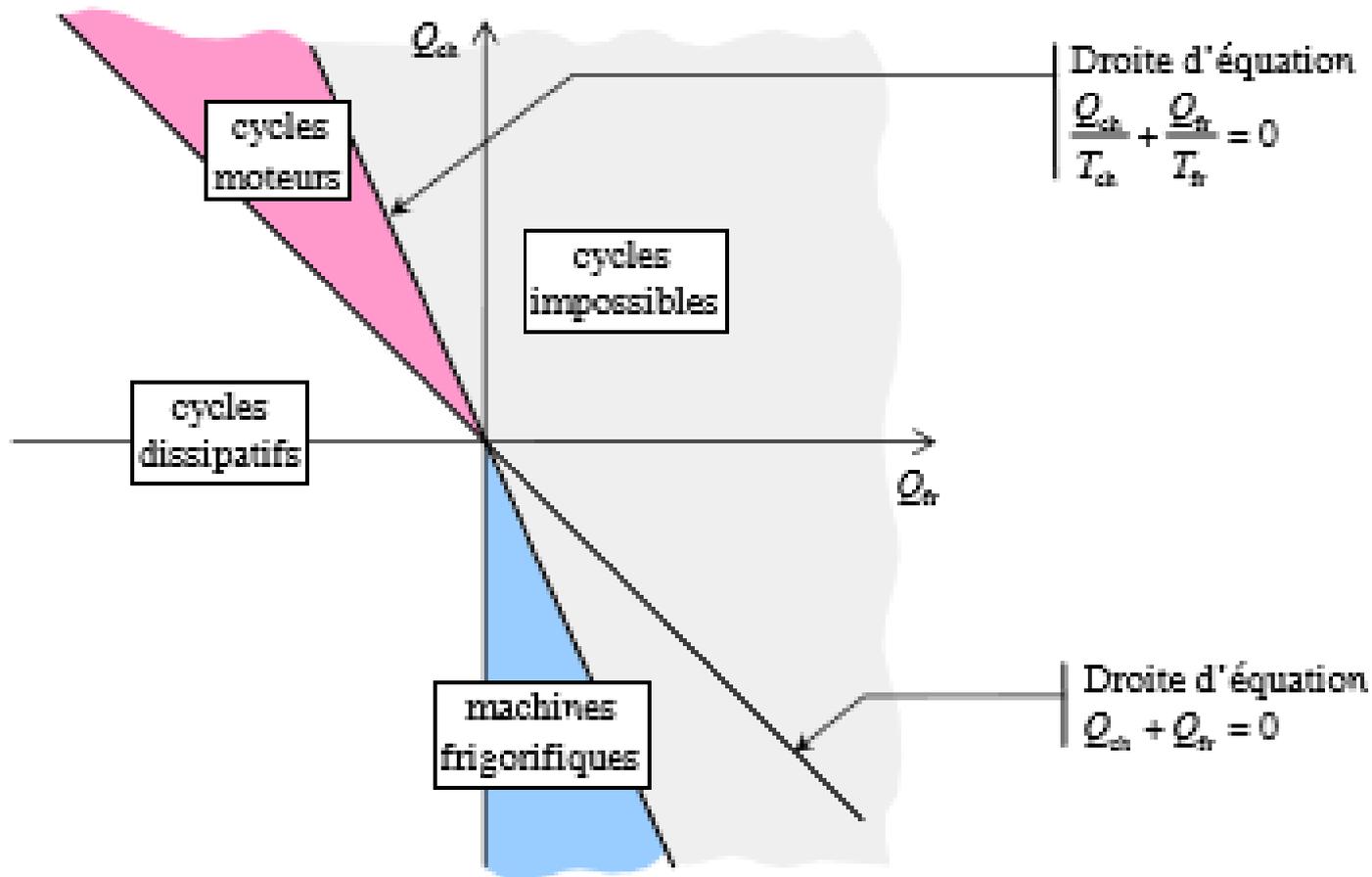
Machines monothermes



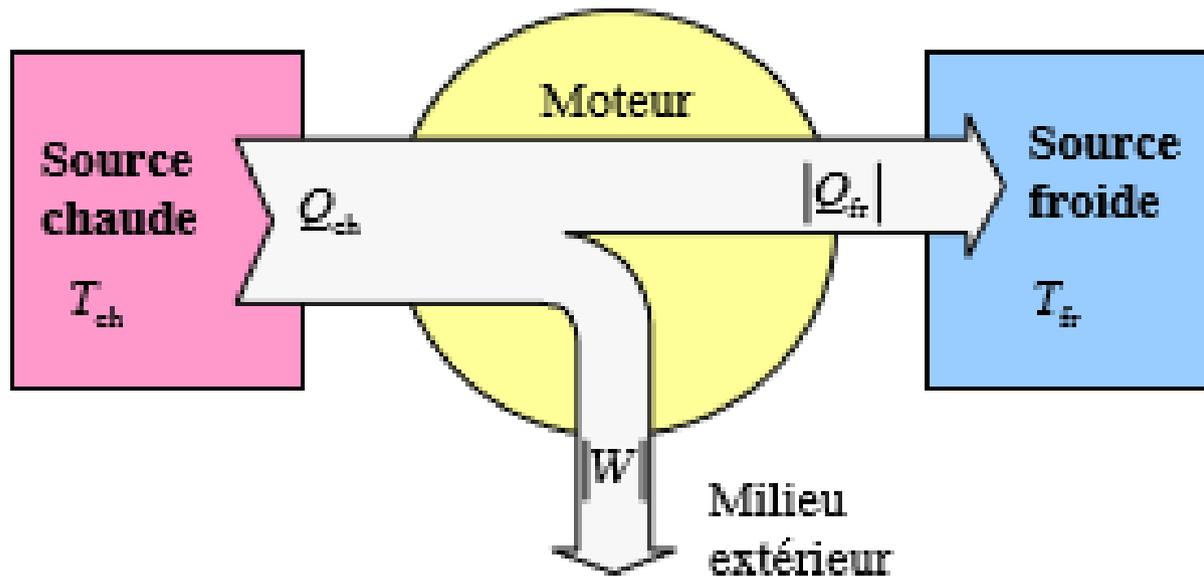
Machines thermiques (deux sources)



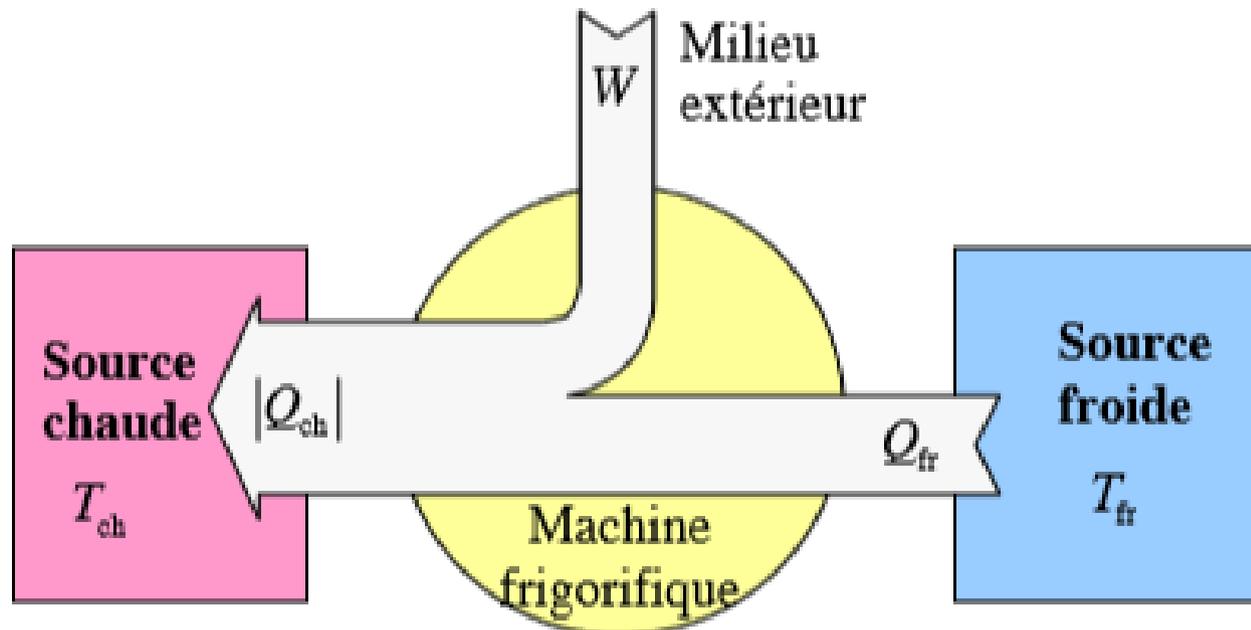
Différentes machines thermiques



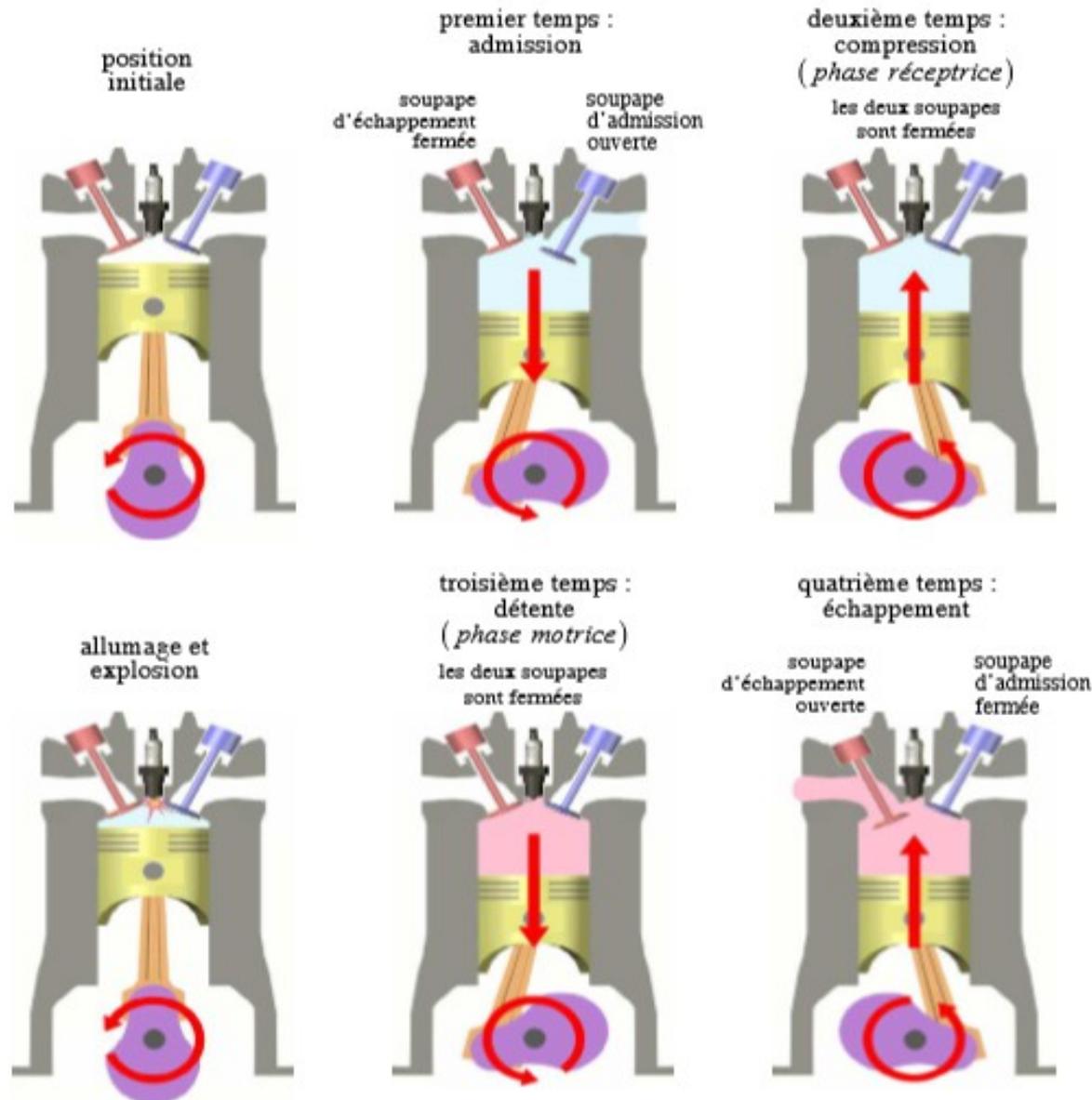
Moteurs dithermes



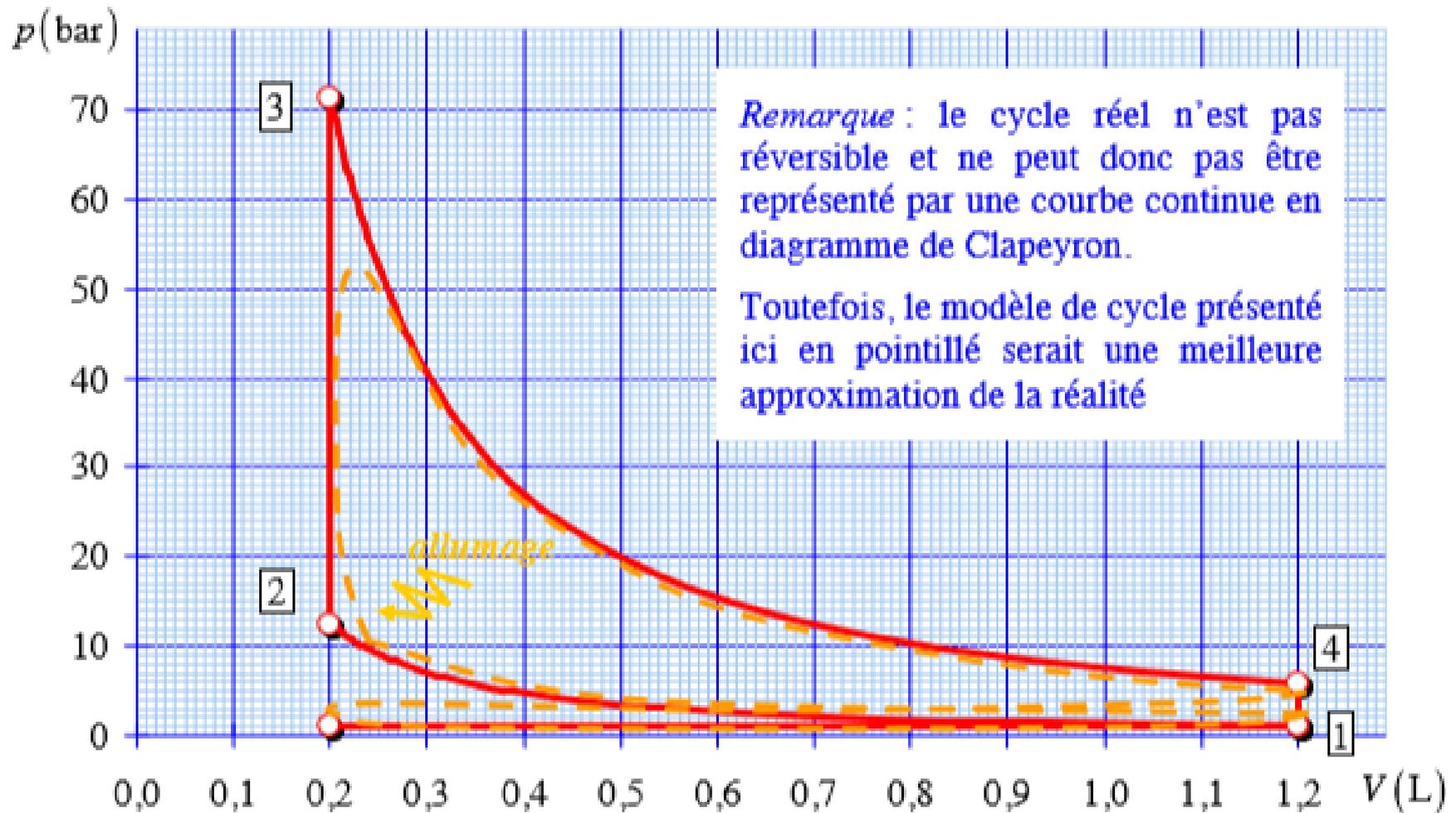
Les récepteurs



Cycle de Beau de Rochas

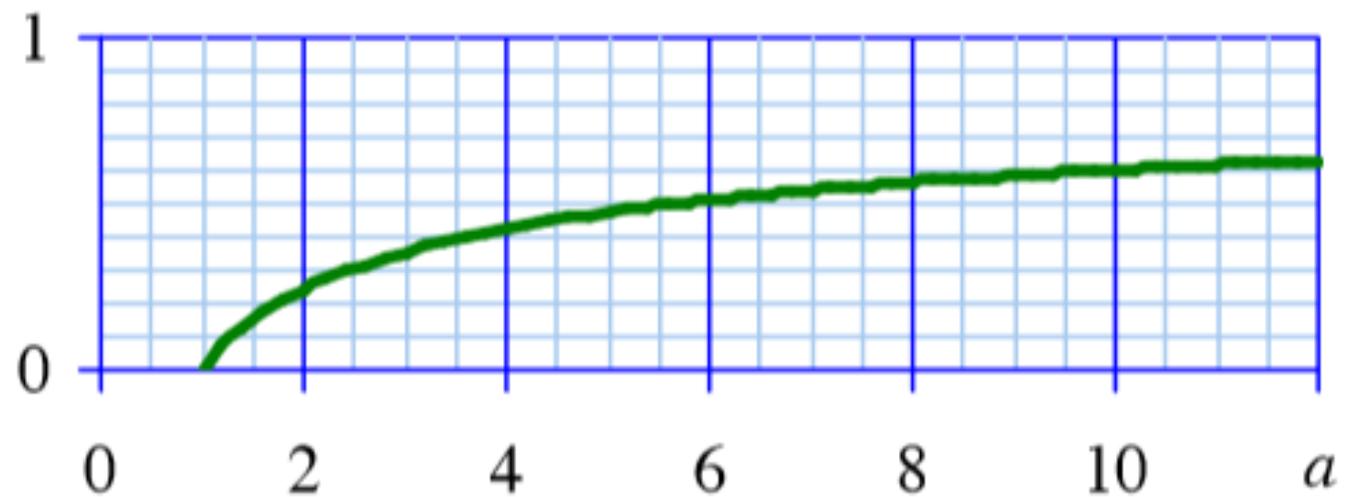


Cycle GP et cycle réel

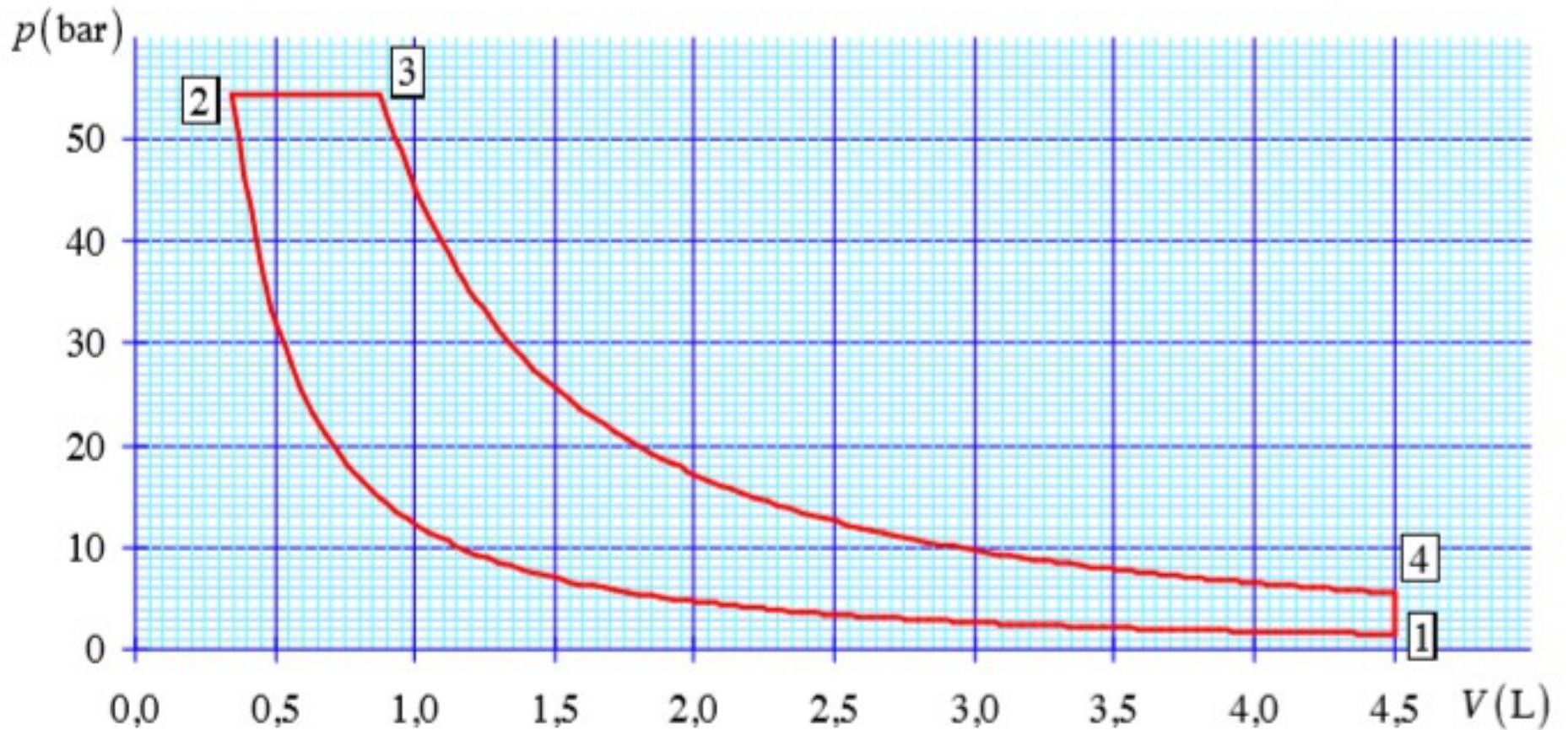


Rendement et rapport volumétrique

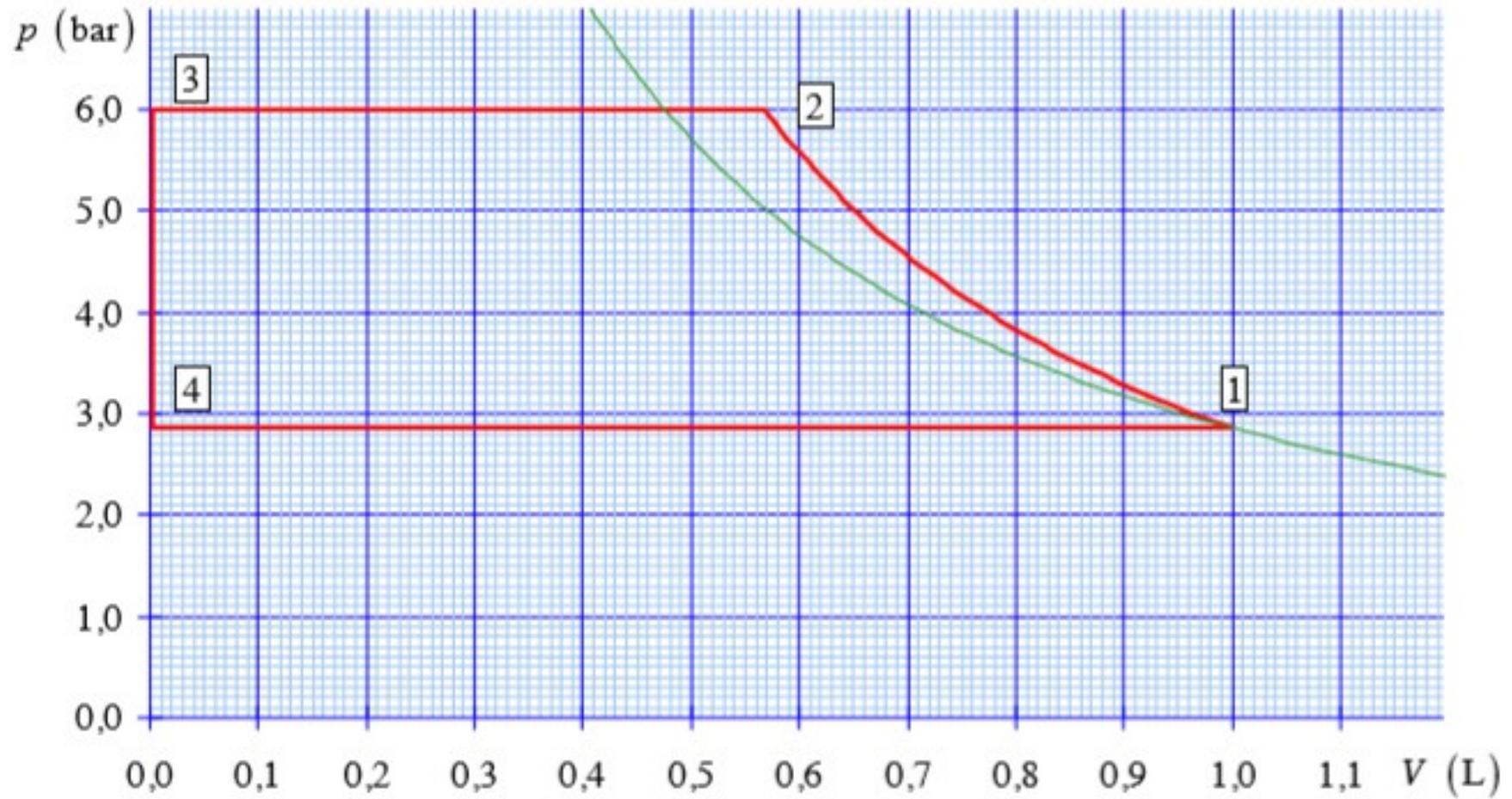
$$\rho(a) = 1 - \frac{1}{a^{\gamma-1}}$$



Cycle Diésel idéal (GP)



Réfrigérant à ammoniac



LP 14: MACHINES THERMIQUES REELLES

Pré-requis

Introduction

I-Les machines thermiques: définitions et équations utiles

I-1 Caractérisation expérimentale des gaz à basse pression

Définition (Bilan énergétique, efficacité)

I-2 Application du premier principe de la thermodynamique aux machines thermiques

I-3 Application du deuxième principe aux machines thermiques

II-Types de machines thermiques

II-1 Les machines monothermes (et conclusion deuxième principe selon Kelvin)

II-2 Les machines thermiques

III-Etude des machines thermiques

III-1 Les moteurs dithermes

III-2 Les récepteurs

Réfrigérateur ditherme

Pompe à chaleur

IV-Exemples demachines thermiques réelles

IV-1 Le cycle de Beau de Rochas

Principe de fonctionnement

Premier temps: admission et carburation

Deuxième temps: compression et allumage

Troisième temps: détente

Quatrième temps: l'échappement

Modélisation par un cycle réversible de gaz parfait

Premier temps: admission et carburation

Deuxième temps: compression et allumage

Troisième temps: détente

Quatrième temps: l'échappement

Redement énergétique

IV-2 Le cycle Diesel

Principe de fonctionnement d'un moteur suralimenté par turbocompresseur

Premier temps: admission turbocompressée

Deuxième temps: compression

Troisième temps: carburation et détente motrice

Quatrième temps: l'échappement

Modélisation par un cycle (réversible) de gaz parfait

Premier temps: admission turbocompressée

Deuxième temps: compression

Troisième temps: carburation et détente motrice

Quatrième temps: l'échappement

Redement énergétique

IV-3 Réfrigérant à ammoniac

Principe de fonctionnement

Première phase: la compression

Deuxième phase: la condensation

Troisième phase: la détente

Quatrième phase: la vaporisation

Modélisation par un cycle réversible

Première phase: la compression

Deuxième phase: refroidissement et condensation

Troisième phase: la détente

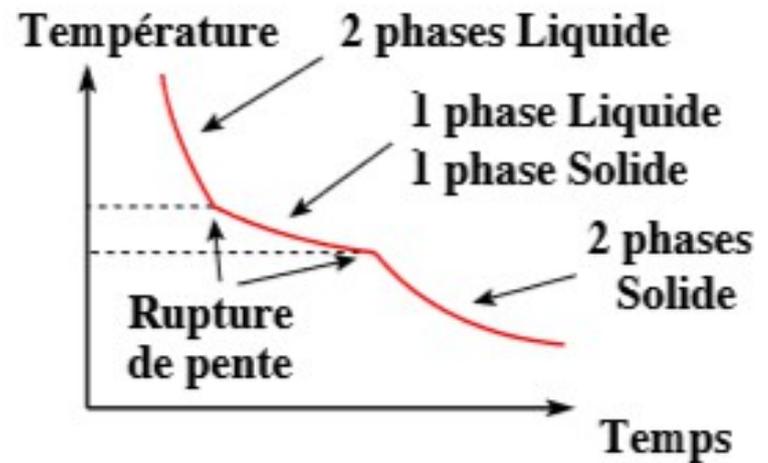
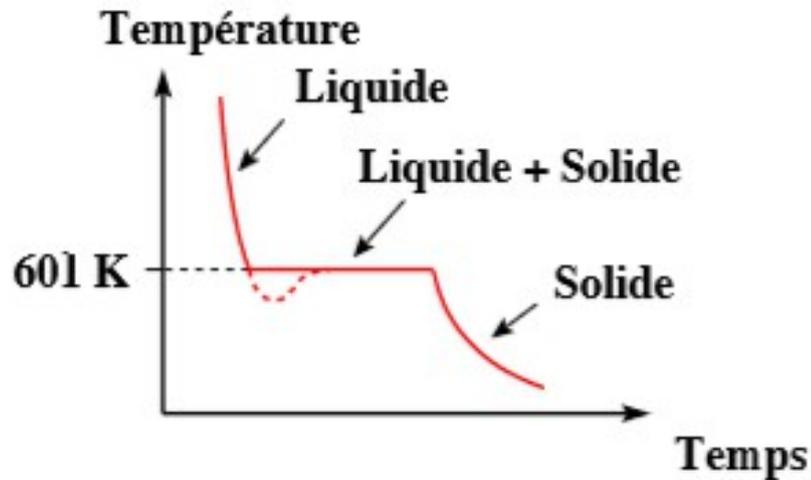
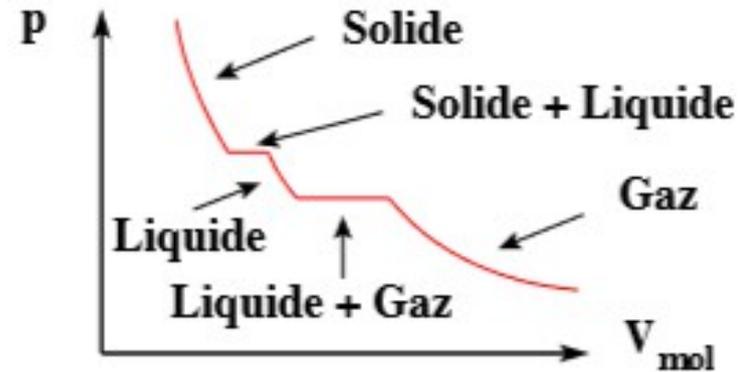
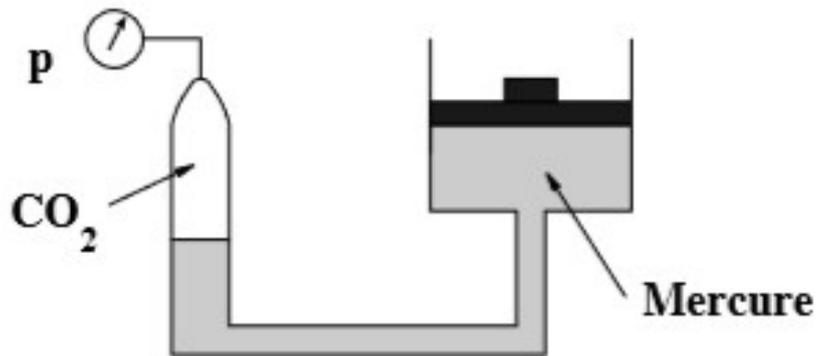
Quatrième phase: la vaporisation

Efficacité énergétique

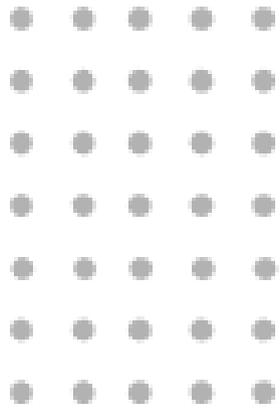
Conclusion

TRANSITIONS DE PHASE

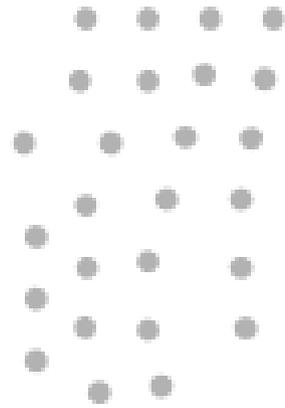
Exp. D'Adrews sur le CO_2



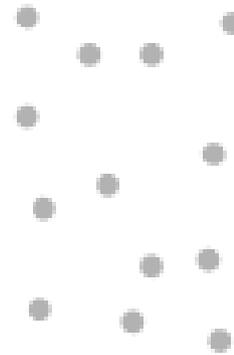
États de la matière



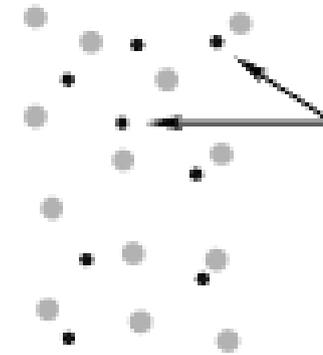
Solide



Liquide



Gaz



Plasma

Electron

Changements d'état et variance

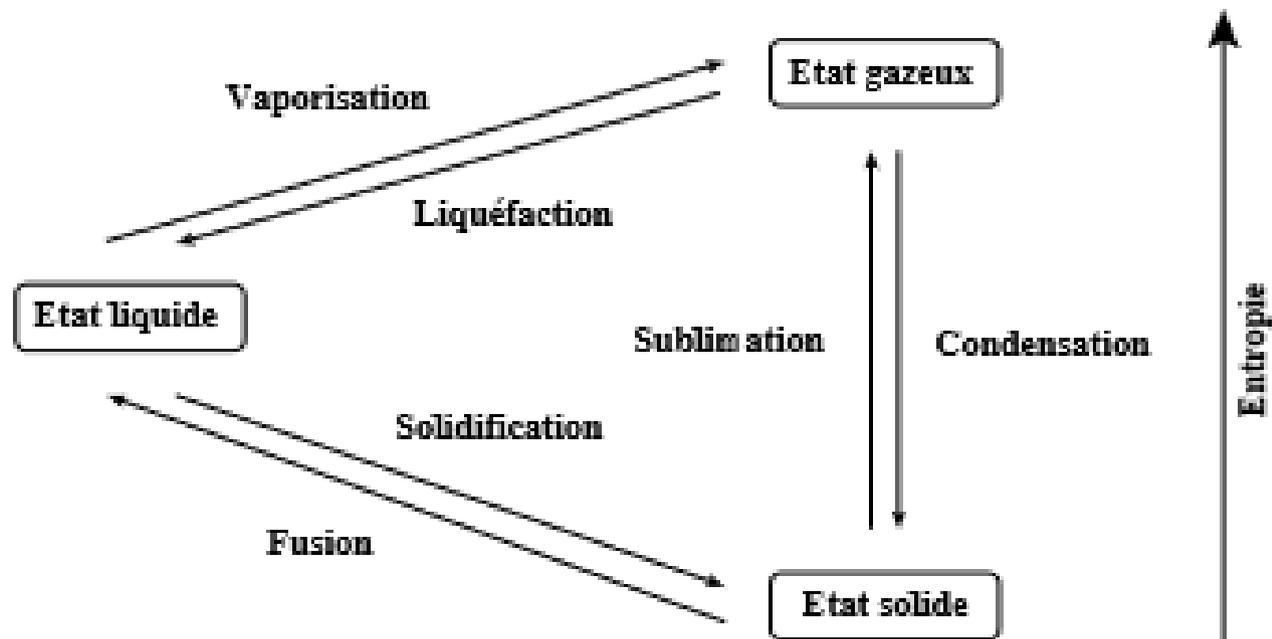
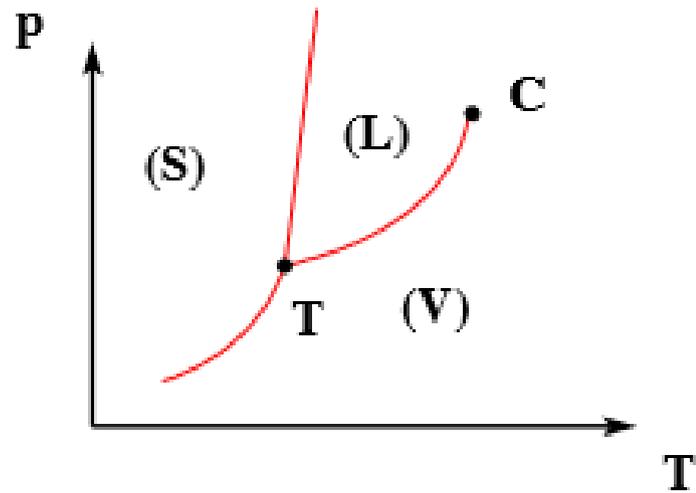
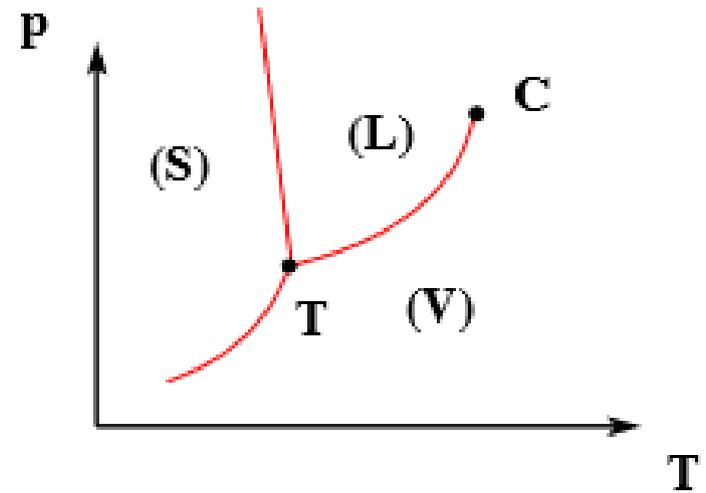


Diagramme (P,T)



Cas général



Eau, bismuth

Diagramme (P,V)

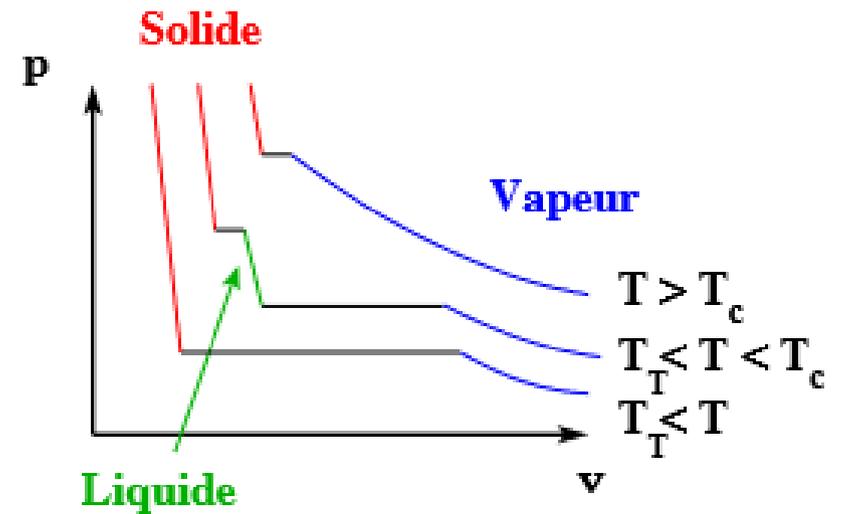
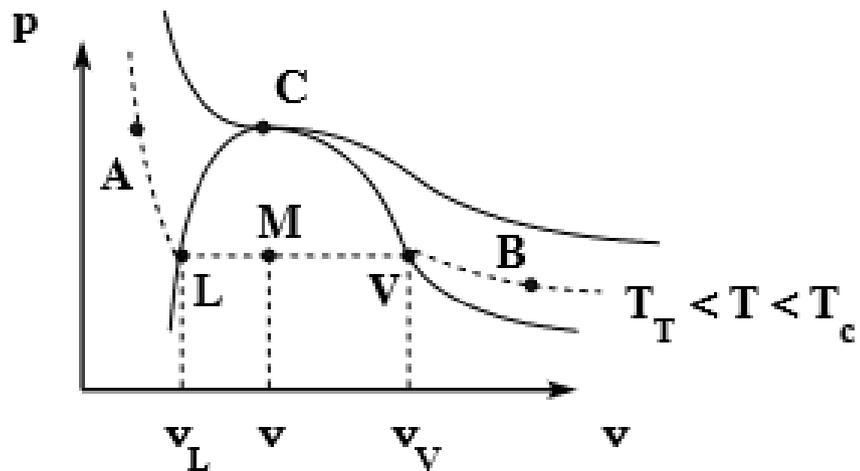


Diagramme (T,s)

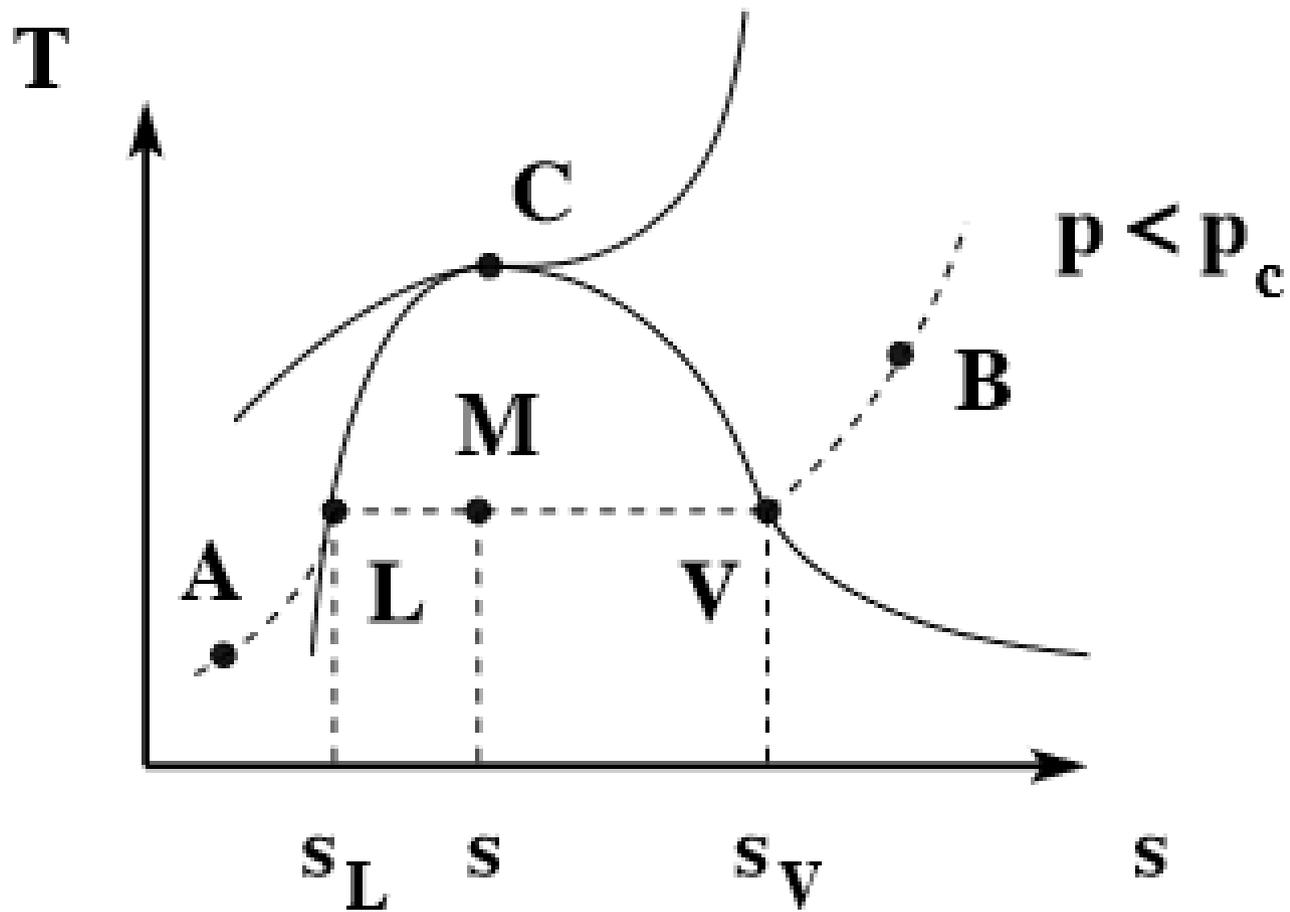
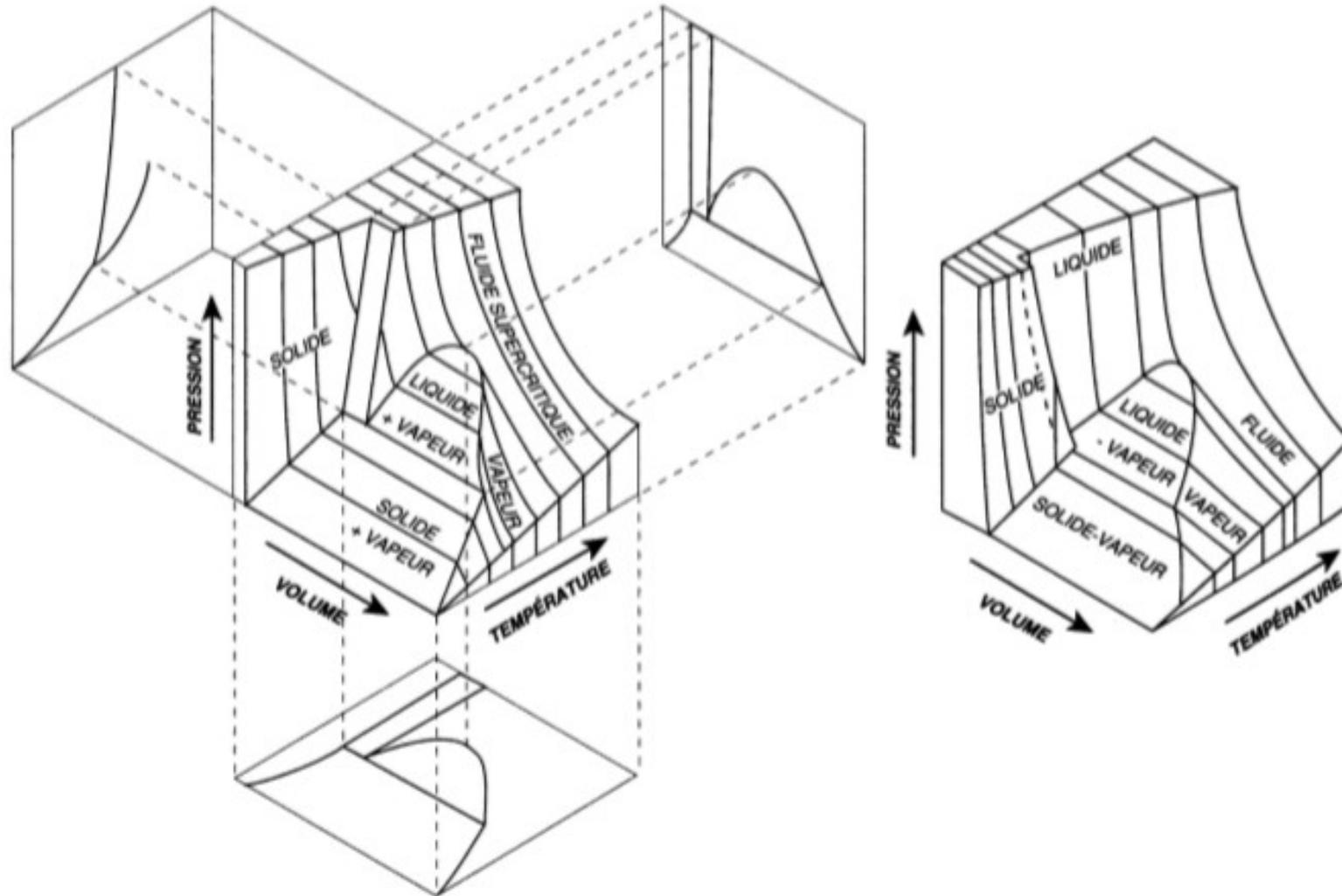
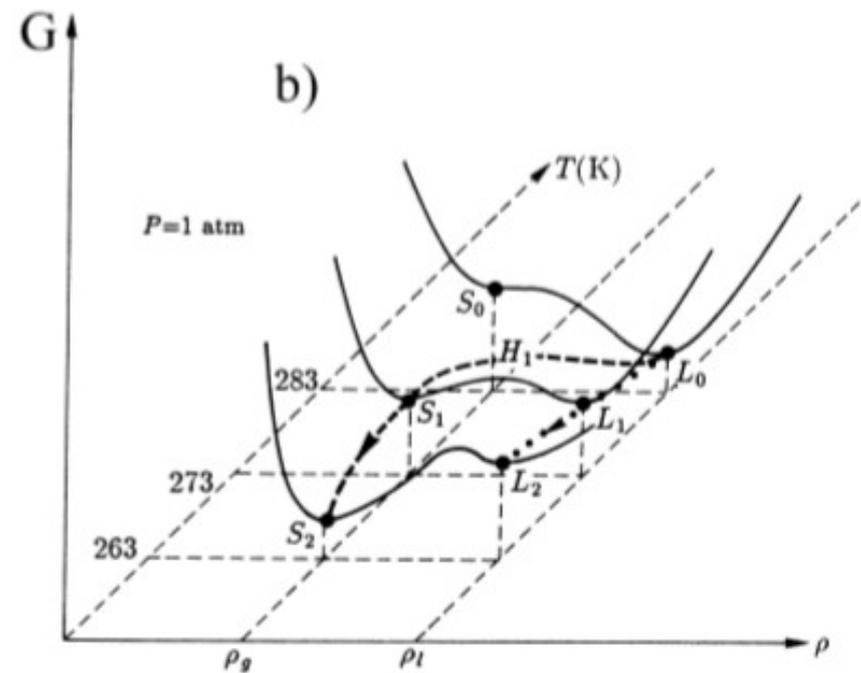
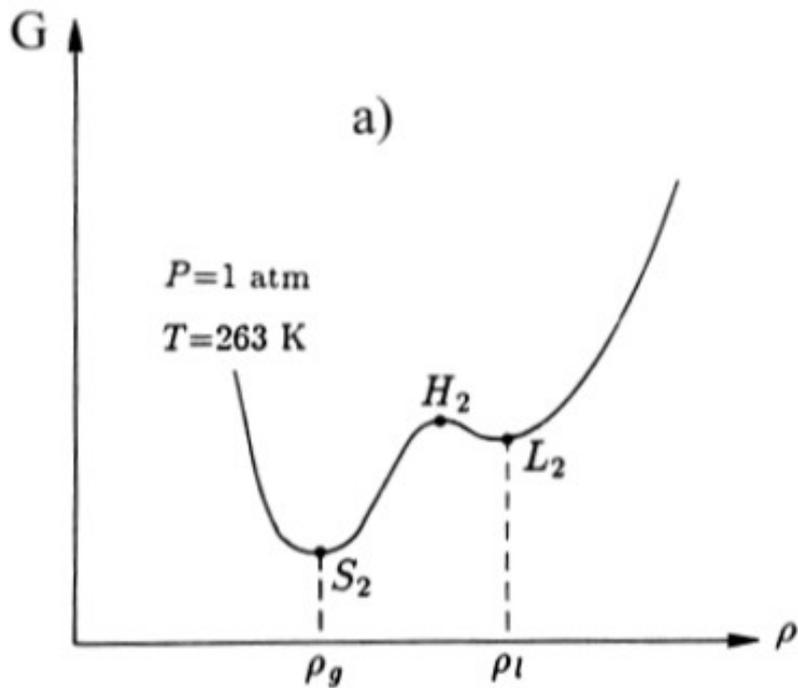


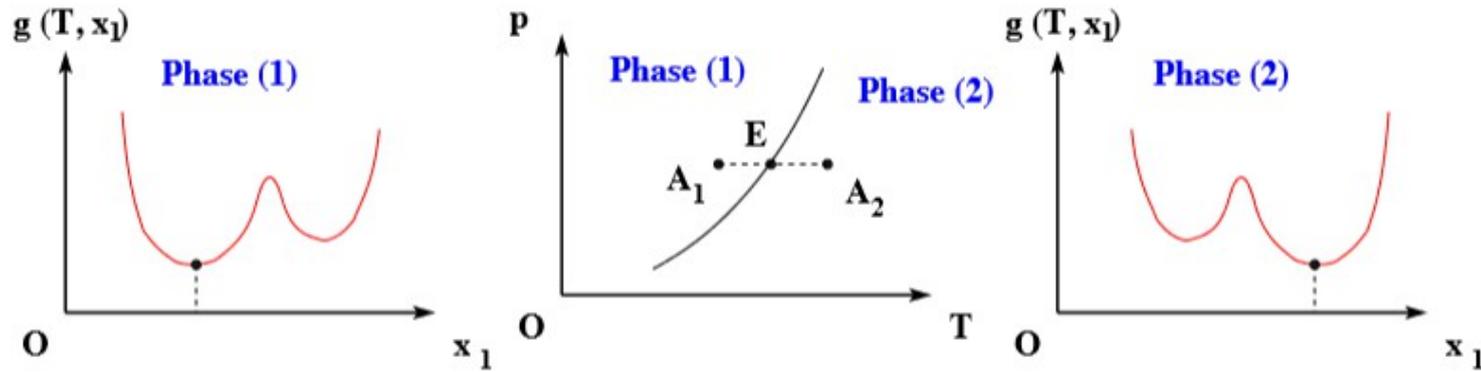
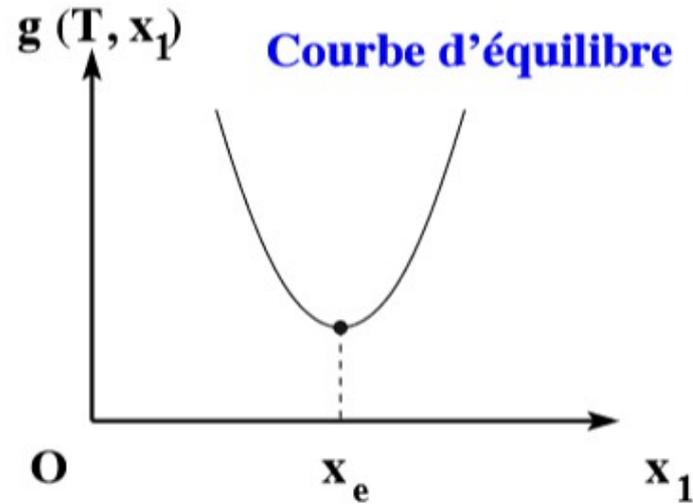
Diagramme (P, v, T)



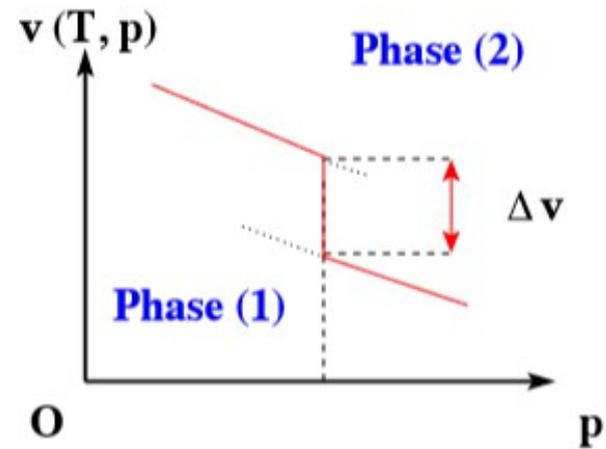
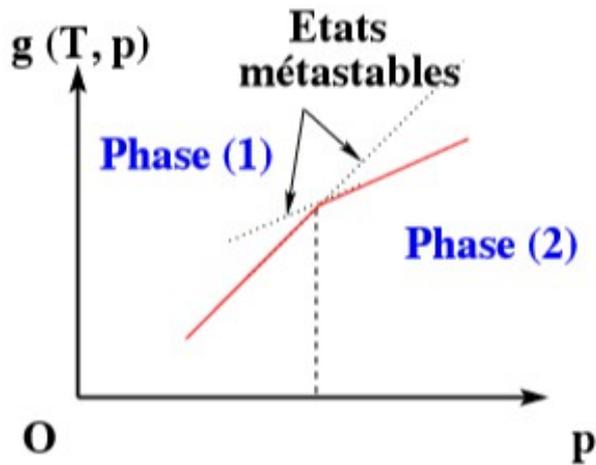
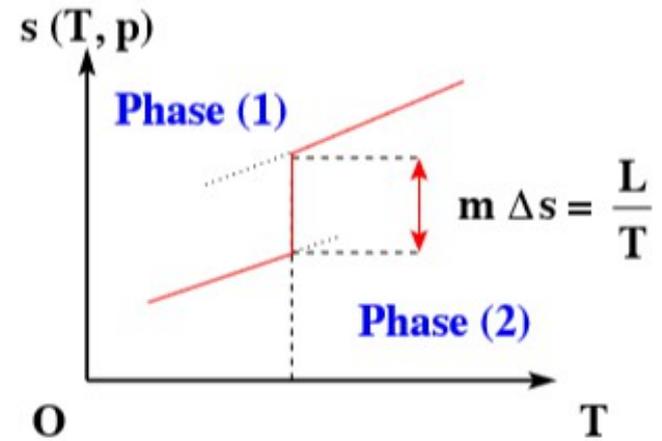
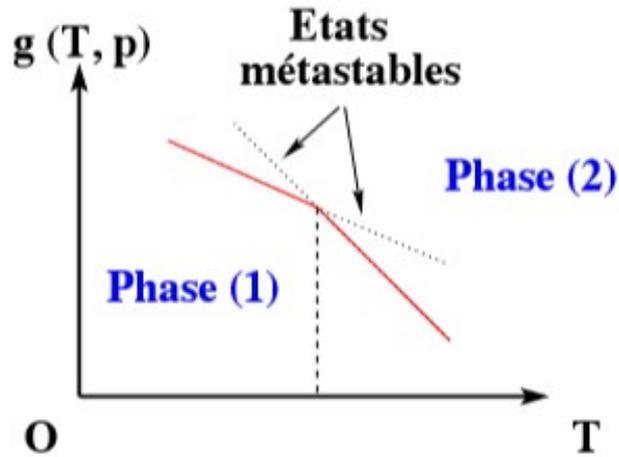
Retards à la transition de phase



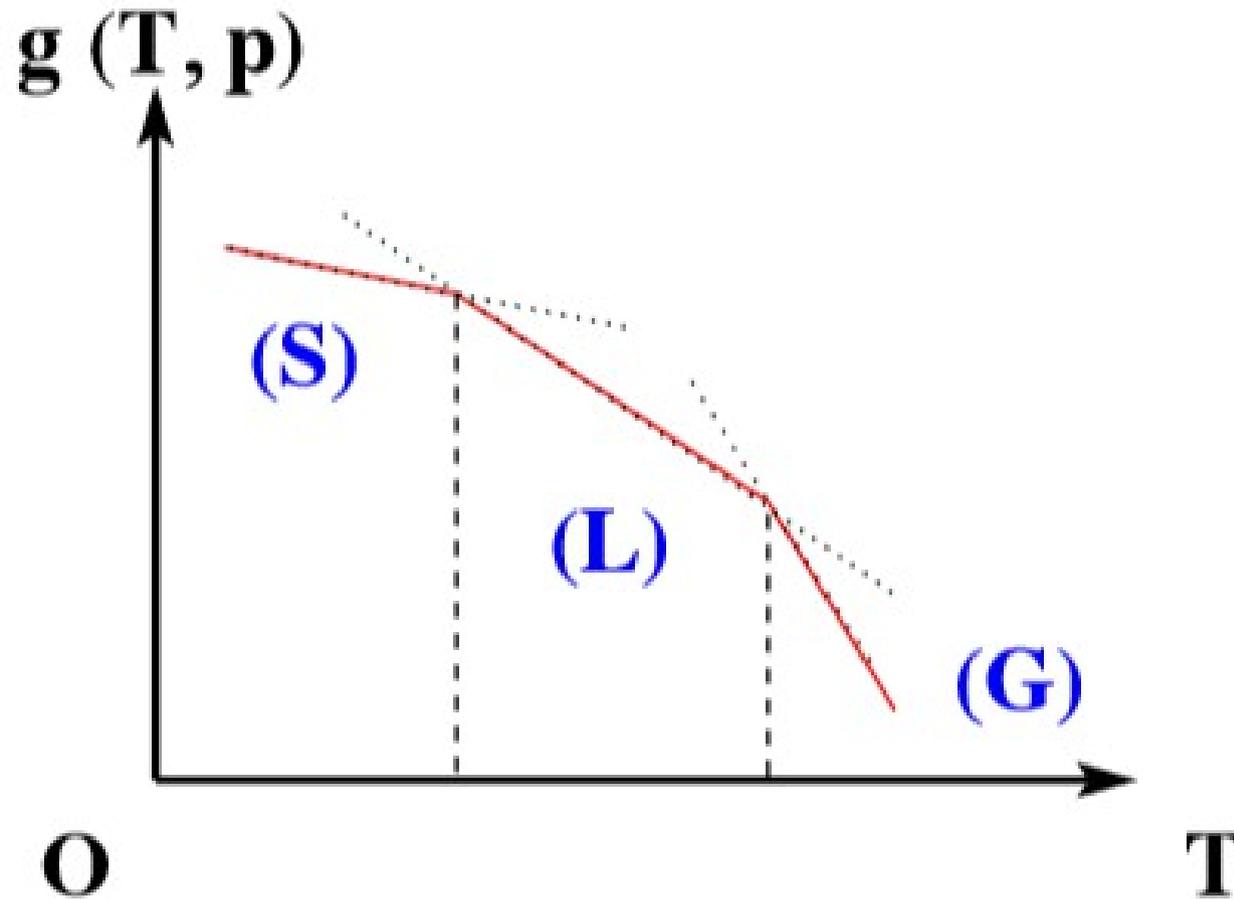
Equilibre d'un corps pur sous deux phases



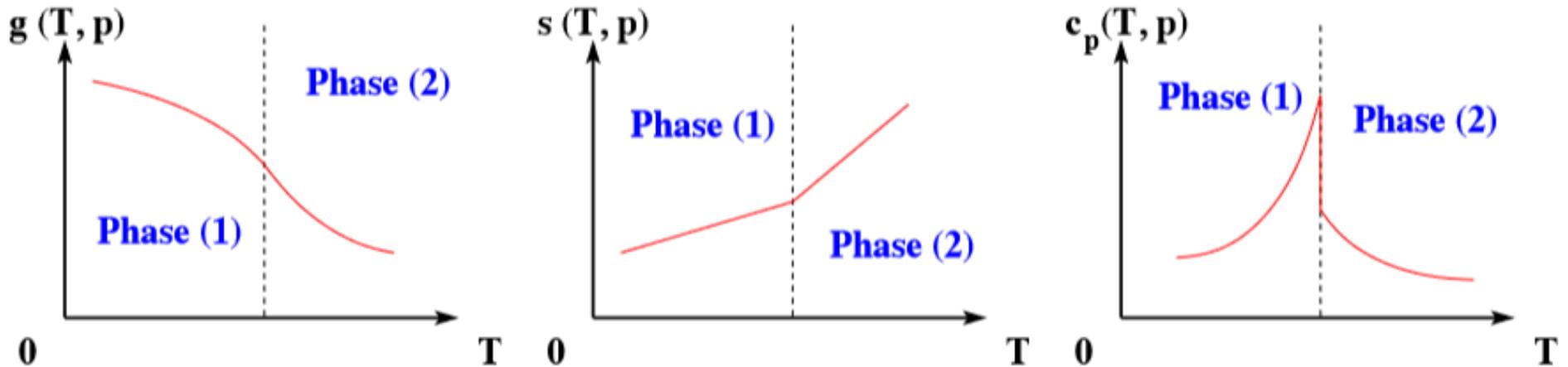
Transitions de phase de 1ère espèce



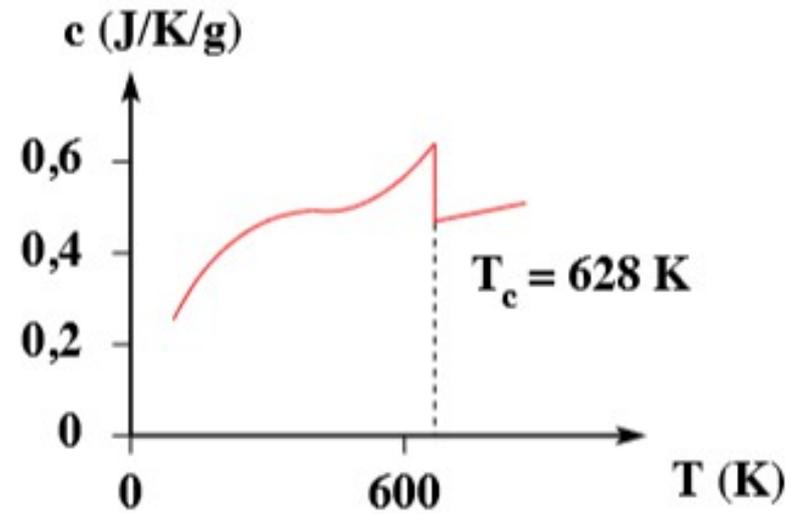
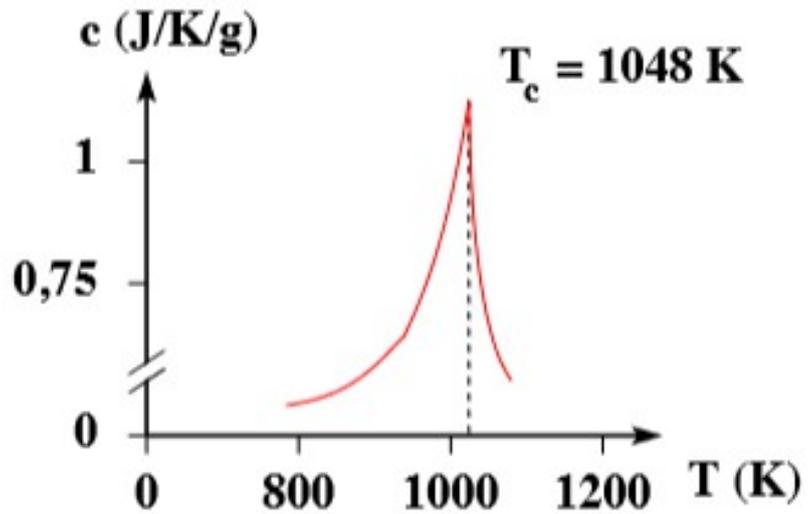
Transitions de phase de 1ère espèce



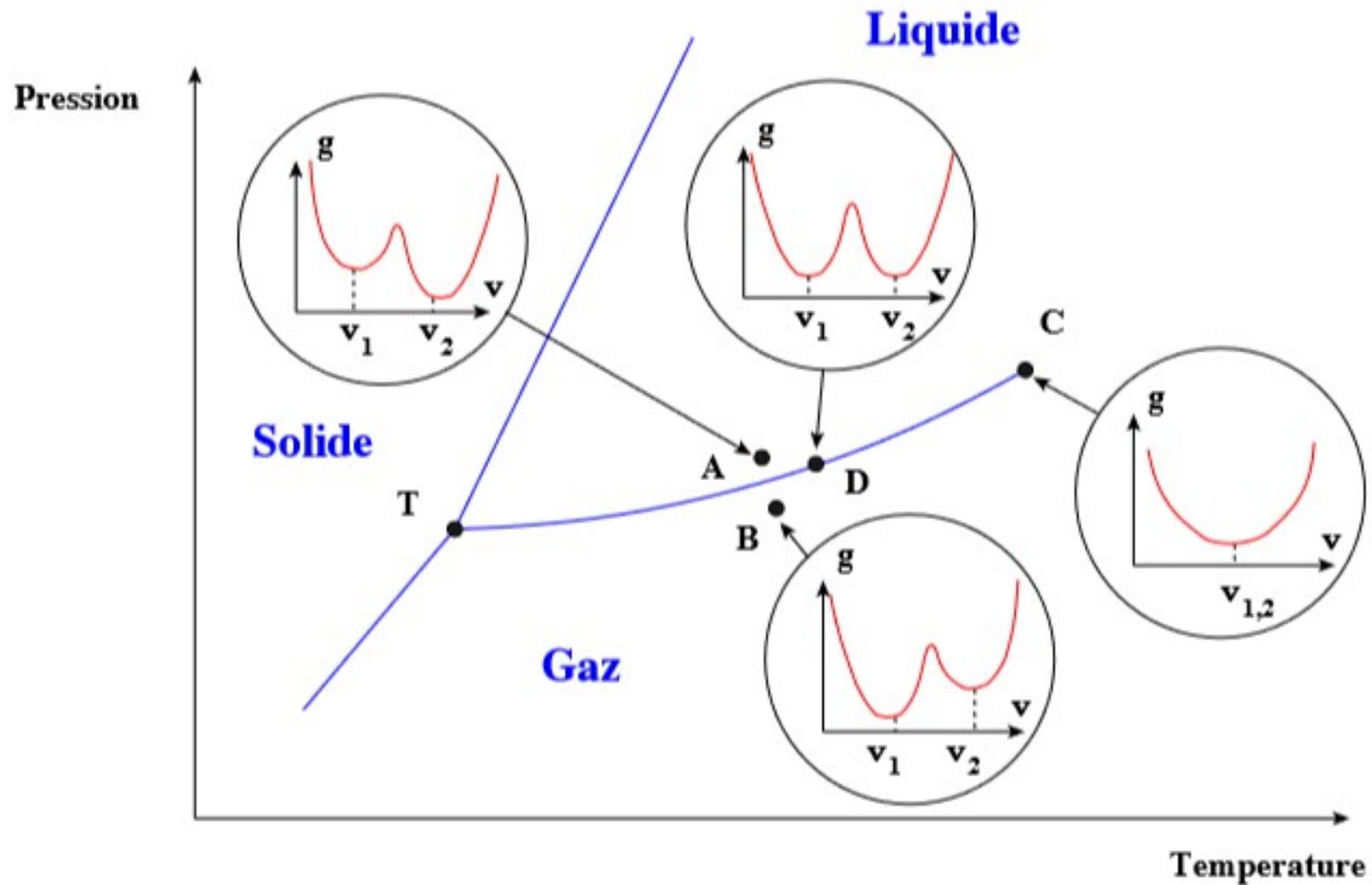
Transitions de 2ème espèce et au-delà



Transitions d'ordre élevé



Ex. de transition liquide-vapeur



LP 15 : TRANSITION DE PHASES

Pré-requis

Introduction

I-Généralités

I-1 Mise en évidence expérimentale

I-2 Les états de la matière

I-3 Définitions

I-4 Variance

I-5 Les différents diagrammes

Le diagramme (P, T)

Le diagramme (P, V)

Le diagramme (T, s)

Le diagramme (P, v, T)

II-Retards aux transitions de phase

II-1 Retard à la solidification (sursaturation)

II-2 Retard à la liquéfaction (vapeur sursaturante)

II-3 Retard à la vaporisation (surchauffe)

II-4 Compatibilité avec le 2ème principe – Exemple de la glace

III-Equilibre d'un corps pur sous plusieurs phases

III-1 Equilibre d'un corps pur sous deux phases

III-2 Fonctions d'état d'un corps pur diphasé

Fonctions d'état

Enthalpie de transition de phase

Entropie de transition de phase

Relation entre enthalpie et entropie de transition de phase

III-3 Equilibre d'un corps pur sous trois phases

IV-Classification de Ehrenfest des transitions de phase

IV-1 Les dérivées de la fonction enthalpie libre massique

IV-2 Transitions de phase de 1ère espèce

Généralités

Formule de Clapeyron

IV-3 Transitions de phase de 2ème espèce et au-delà

Généralités

Formules d'Ehrenfest

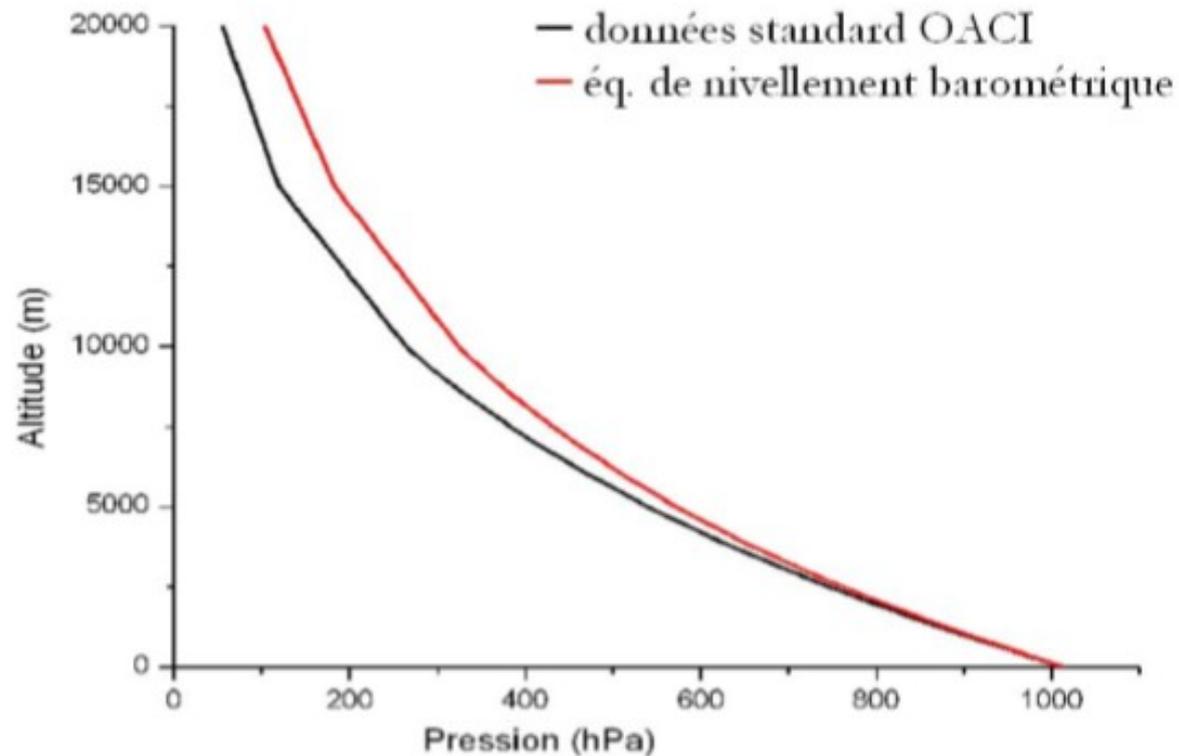
Exemples de transitions d'ordre élevé

IV-4 Exemple de la transition liquide-vapeur d'un fluide

Conclusion

FACTEUR DE BOLTZMANN

Pression dans une atmosphère isotherme



Facteur de Boltzmann niveaux discrets d'énergie

$$N_i = A e^{-\frac{\epsilon_i}{k_B T}}$$

$$N(\epsilon) = \sum_{\epsilon_i = \epsilon} A e^{-\frac{\epsilon_i}{k_B T}} = A g(\epsilon) e^{-\frac{\epsilon}{k_B T}}$$

$$p_i = e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$$

$$P(E) = \sum_{E_i = E} A e^{-\frac{E_i}{k_B T}} = A g(\epsilon) e^{-\frac{E}{k_B T}}$$

Facteur de Boltzmann répartition continue d'énergie

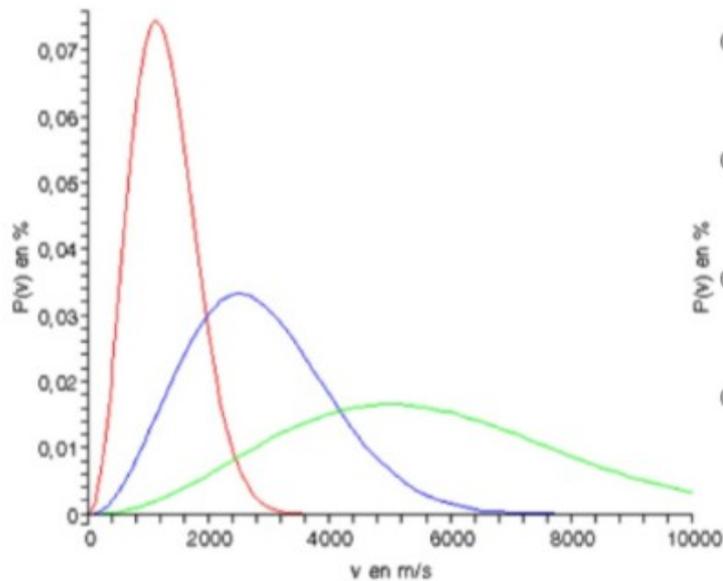
$$dN = A e^{-\frac{\epsilon(\vec{r}; \vec{v})}{k_B T}} dx dy dz dv_x dv_y dv_z$$

Distribution des vitesses de Maxwell

$$P(v) = C v^2 e^{-\frac{mv^2}{k_B T}}$$

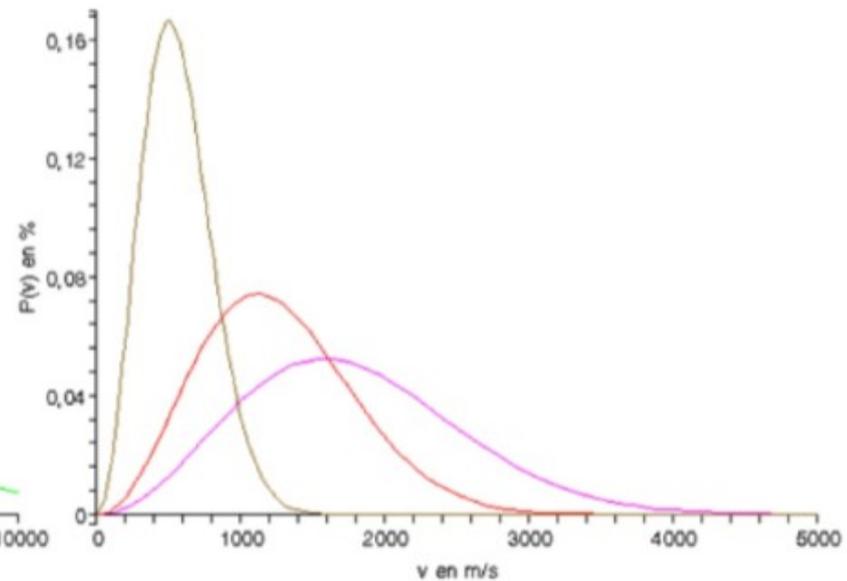
Influence de la température
pour un gaz d'Helium :

- T = 300 K
- T = 1500 K
- T = 6000 K



Influence de la masse molaire
pour des gaz à 300 K :

- Ne : M = 20 g/mol
- He : M = 4 g/mol
- H₂ : M = 2 g/mol



LP 16 : FACTEUR DE BOLTZMANN

Pré-requis

Introduction

I-Atmosphère en équilibre isotherme

I-1 Modèle

I-2 Equation de nivellement barométrique

I-3 Ordres de grandeur et limites du modèle isotherme

Ordre de grandeur

Limites du modèle isotherme

II-Facteur de Boltzmann

II-1 Interprétation statistique de l'équation de nivellement barométrique

II-2 Généralisation du facteur de Boltzmann

Cas de niveaux d'énergie discrets

Cas d'un système macroscopique

Cas d'une répartition continue des niveaux d'énergie

II-3 Limites d'utilisation du facteur de Boltzmann

Non interaction entre particules

Remarques

Limite quantique

Equilibre avec un thermostat

III-Applications du facteur de Boltzmann

III-1 Système à deux niveaux: paramagnétisme de Brillouin

III-2 Distribution des vitesses des particules dans un gaz; remarques

III-3 Séparation isotopique des configurations

Conclusion

RAYONNEMENT D'EQUILIBRE DU CORPS NOIR

Densité spectrale du rayonnement d'équilibre thermique

$$\delta^2 U = u_\nu d\nu d\tau$$

$$u_\nu(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

Densité spectrale du rayonnement d'équilibre thermique – Loi de Planck

$$u_\lambda = -\frac{c}{\lambda^2} u_\nu$$

$$u_\lambda(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

Loi de déplacement de Wien (maximum de u_λ)

$$x = \frac{hc}{k_B T}$$

$$e^x - 1 = \frac{x}{5} e^x$$

$$\lambda_m T \approx 2898 \text{ } \mu\text{m.K}$$

Loi de Stefan

$$\varphi_p = \varphi_i = \int_0^{\infty} \varphi_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = \frac{2\pi^2 k_B^4}{15h^3 c^2} = 5,67.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

Définition du corps noir

$$\phi_i = \phi_a$$

$$\phi_r = 0$$

LP 17 : RAYONNEMENT D'EQUILIBRE DU CORPS NOIR

Pré-requis

Introduction

I-Rayonnement d'équilibre thermique

I-1 Corps transparents, corps opaques, notion de flux

I-2 Rayonnement d'équilibre thermique dans une enceinte isotherme fermée

I-3 Densité spectrale du rayonnement d'équilibre thermique

Transparent 1: Comparaison de courbes données par la loi de Planck pour des températures allant de celles des fours (3000 K) au piège à atomes (10-6 K)

Loi du déplacement de Wien

Loi de Stephan

Expérience: lumière QI focalisée sur spectromètre, faire varier la puissance QI, observer le déplacement du maximum du spectre.

II-Corps noir

II-1 Définition du corps noir

II-2 Corps noir à l'équilibre thermique local

II-3 Corps opaques quelconques

III-Applications

III-1 Applications à la vie courante

Vase Dewar

Chauffage par cheminée

Doner Kebab

III-2 Pyrométrie à disparition de filament

III-3 Refroidissement des fusées

III-4 Rayonnement à 3 K

Conclusion

PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT

Phénomènes de diffusion

- Particules
 - Chaleur
 - Charge électrique
 - Quantité de mouvement
-
- Tableau comparatif

Diffusion de particules

Phase	Gaz	Gaz	Gaz	Liquide	Liquide	Solide
Support	Air	Air	H ₂	H ₂ O	H ₂ O	Cu
Diffusant	H ₂	O ₂	D ₂	O ₂	Sucre	Al
D (m ² s ⁻¹)	7,12 10 ⁻⁵	2,06 10 ⁻⁵	1,24 10 ⁻⁵	1,80 10 ⁻⁹	0,52 10 ⁻⁹	1,30 10 ⁻³⁰

Loi de Fick

$$J_n = -D \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

$$\vec{J}_n = -\vec{\nabla} \rho$$

Équation de diffusion

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \sigma_n$$

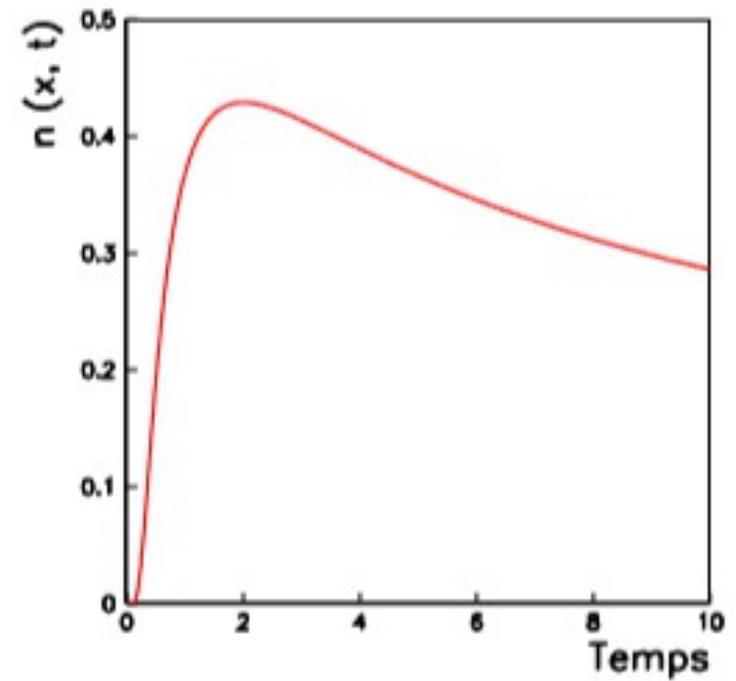
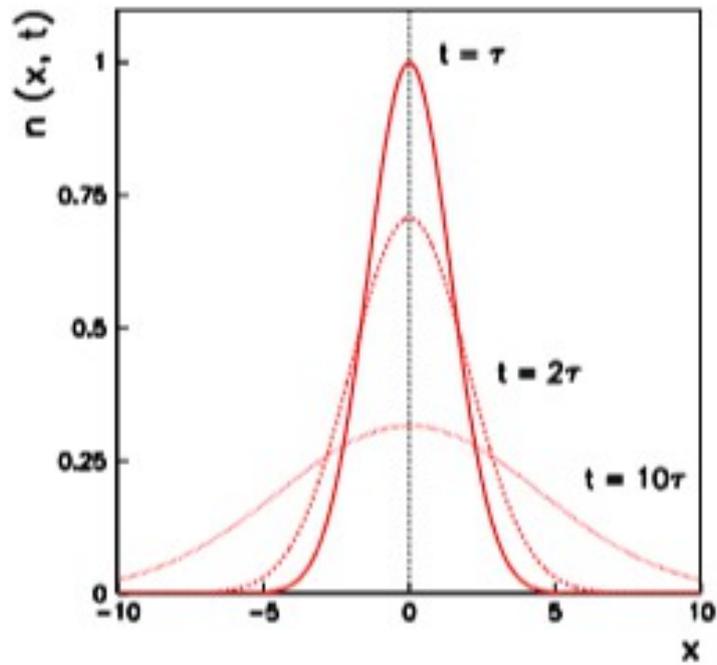
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \Delta \rho + \sigma_n$$

Solution sans terme de production

$$\rho(x, t) = \frac{N_0}{S\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

$$L_{1/2} = \sqrt{4Dt \ln 2}$$

Diffusion en régime quelconque



Échelles caractéristiques

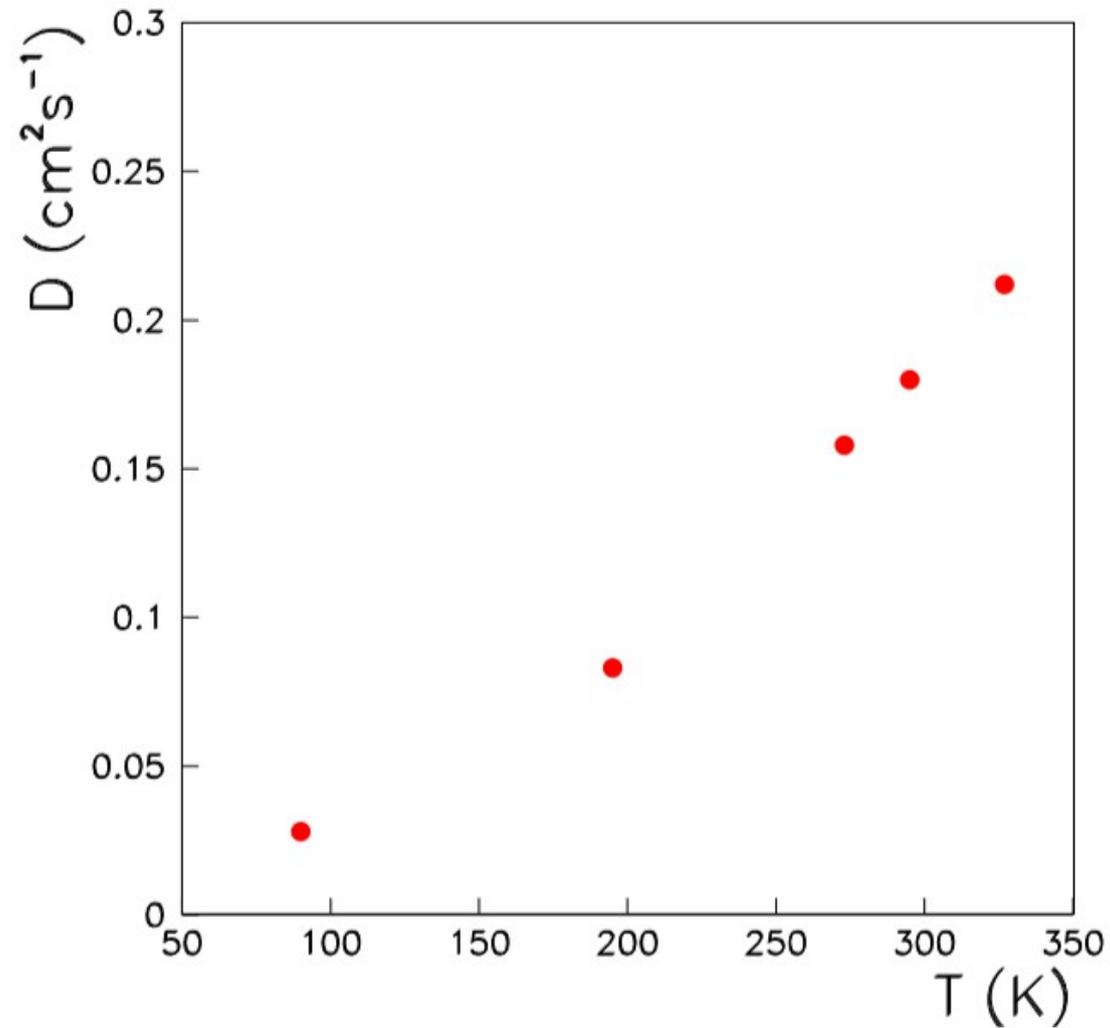
$$L^2 = D\tau$$

Approche microscopique

$$D = \frac{1}{3}lv^*$$

$$D = \frac{k_B^{3/2}}{\pi\sqrt{3m}(r_s + r_d)^2} \frac{T^{3/2}}{p}$$

Diffusion moléculaire dans les liquides



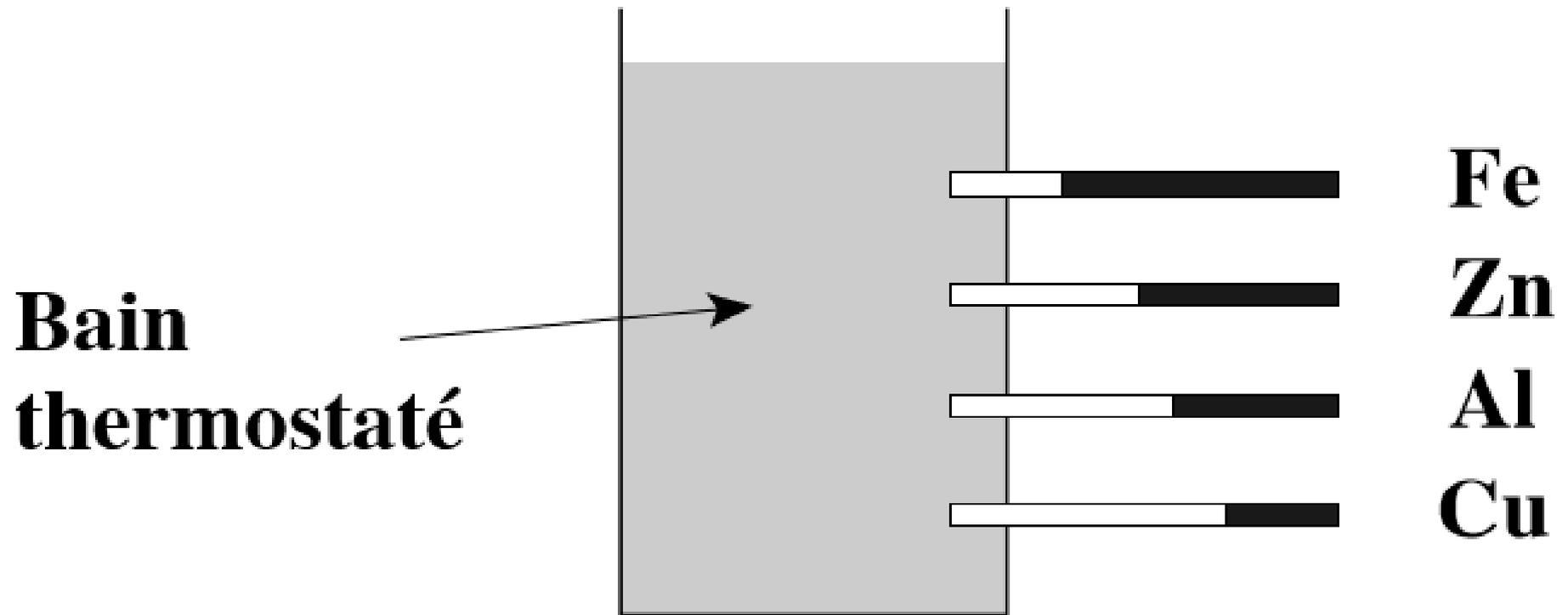
Mouvement Brownien

$$\vec{F} = -\frac{\vec{v}}{\mu} \quad \text{avec} \quad \mu = \frac{1}{6\pi\eta r}$$

$$D = \mu k_B T \quad \text{soit encore} \quad D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R}$$

Diffusion thermique

Mise en évidence expérimentale



Diffusion thermique – Loi de Fourier

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_u + \sigma_u \quad \vec{J}_u = -\lambda \vec{\nabla}(T)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla}(T)) + \sigma_u = \lambda \Delta T + \sigma_u$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{\lambda}{\rho c_v} \Delta T + \frac{\sigma_u}{\rho c_v} \quad \kappa = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

$$L^2 \approx \kappa \tau$$

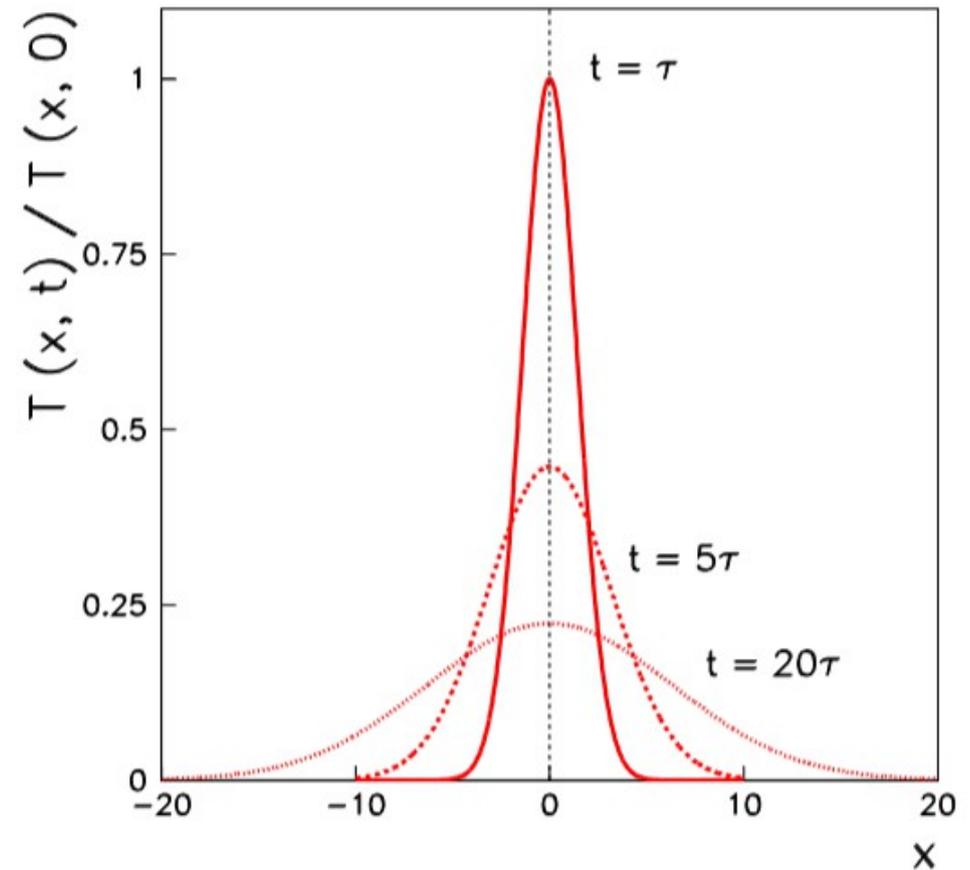
Grandeurs mesurées

	Cuivre	Acier inox	Verre	Corps humain	Bois	Air
λ (W/m/K)	389	16	1,2	0,5	0,23	$24 \cdot 10^{-3}$
κ ($10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)	114	4	0,58	0,1	0,45	
β (10^3 SI)	36,5	8	1,58	1,6	0,34	

En régime quelconque sans terme de production

$$T(x, t) = \frac{\text{cte}}{\sqrt{4\pi\kappa t}} e^{-\frac{x^2}{4\kappa t}}$$

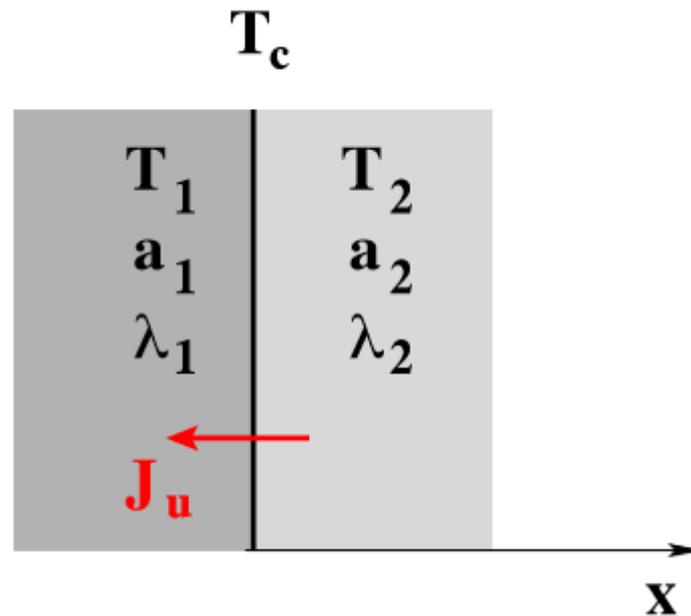
$$L_{1/2} = 2\sqrt{4\kappa t \ln 2}$$



Conductance et résistance thermique

$$\varphi = G_u \Delta T \quad \text{et} \quad R_u = \frac{1}{G_u}$$

Température de contact (Régime sinusoïdal – effet de peau)



$$-\lambda_1 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_1 (0) = -\lambda_2 \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_2 (0)$$

Diffusion de charges

$$\vec{J}_e = -\gamma \vec{\nabla} \phi \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_e = 0 \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\gamma}{\epsilon_0} \rho = 0$$

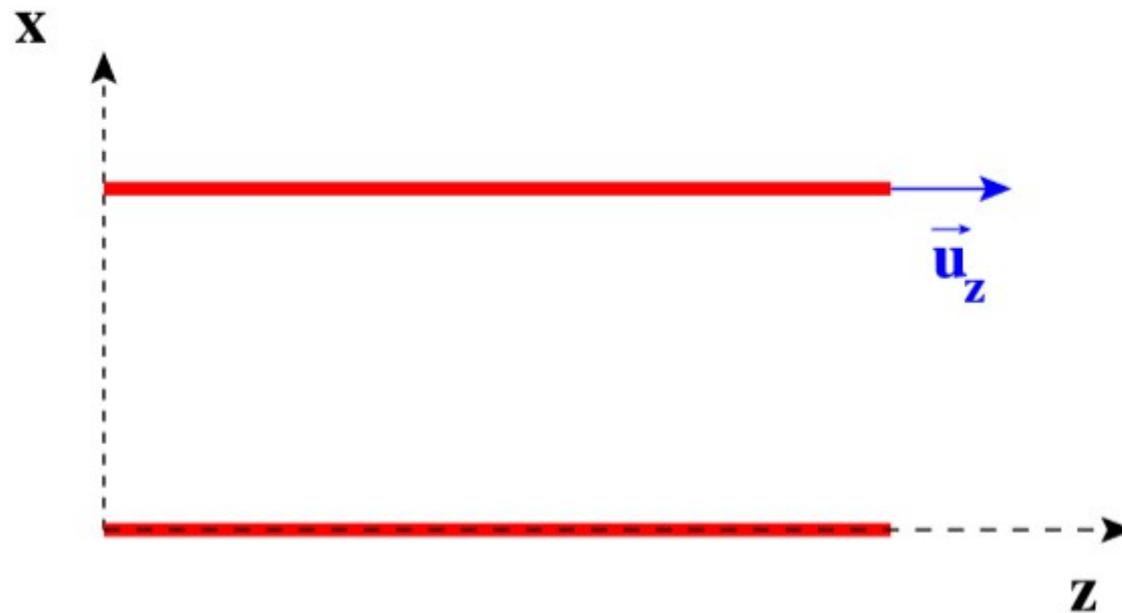
Loi d'Ohm

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \frac{\pi^3}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 T = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ T}$$

Loi de Wiedemann et Franz

Diffusion de quantité de mouvement

$$\vec{J}_p = -\frac{1}{3}n_v l n_m \frac{\partial(mv_z)}{\partial x} \vec{u}_x$$



Viscosité dynamique et équation de diffusion

$$\vec{J}_p = -\eta \frac{\partial v_z}{\partial x} \vec{u}_x$$

$$\eta = \frac{1}{6\pi^{3/2}} \frac{\sqrt{mk_B T}}{R^2}$$

Distribution de Maxwell
Sphères dures

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 v_z}{\partial t^2} \quad \text{avec} \quad \nu = \frac{\eta}{\rho}$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \nu \Delta \vec{v}$$

Résumé sur les phénomènes de diffusion

- L'origine du phénomène est une inhomogénéité d'une grandeur intensive (densité volumique de particules, température, potentiel électrique)
- Le phénomène de transport est irréversible car les équations ne sont pas invariantes par renversement du temps et va dans le sens d'un retour à l'équilibre
- Le courant volumique de la quantité transportée est proportionnel au gradient de la grandeur intensive qui est la cause du transport

Résumé sur les phénomènes de diffusion

	Loi de conservation	Loi phénoménologique	Equation de la diffusion
Diffusion de particules	$\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_n) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = \sigma_n$	$\vec{J}_n = -D \vec{\nabla}(\rho)$ (Loi de Fick)	$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \Delta \rho + \sigma_n$
Diffusion de la chaleur	$\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_u) + \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma_u$	$\vec{J}_u = -\lambda \vec{\nabla}(T)$ (Loi de Fourier)	$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \Delta T + \frac{\sigma_u}{\rho c_v}$
Diffusion de charges	$\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_e) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$	$\vec{J}_e = -\gamma \vec{\nabla}(\phi)$ (Loi d'Ohm)	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\gamma}{\epsilon_0} \rho = 0$
Diffusion de quantité de mouvement		$\vec{J}_p = -\eta \vec{\nabla}(v)$	$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \nu \Delta \vec{v}$

LP 18 : PHENOMENES DE TRANSPORT

Pré-requis

Introduction

I-Diffusion moléculaire

I-1 Mise en évidence expérimentale

I-2 Approche macroscopique

Définitions

Loi de conservation

Loi de Fick

Equation de la diffusion moléculaire

Solution en régime stationnaire sans terme de production

Solution en régime quelconque sans terme de production

Conditions aux limites

Echelles caractéristiques

I-3 Approche microscopique de la diffusion gazeuse

Calcul du coefficient de diffusion

Cas d'un gaz parfait

Cas de l'autodiffusion

I-4 Diffusion moléculaire dans les liquides

II-Diffusion thermique

Les trois modes de transferts d'énergie sous forme thermique: conduction, convection, rayonnement

Mise en évidence expérimentale

II-1 Approche macroscopique

Définitions

Loi de conservation

Loi de Fourier

Variation de la conductivité thermique avec la température

les métaux

les solides non métalliques et les liquides

les gaz

Equation de la diffusion thermique

Conditions aux limites

Echelles caractéristiques

Solution en régime stationnaire sans terme de production

Solution en régime quelconque sans terme de production

Conductances et résistances thermiques

II-2 Applications

Régime sinusoïdal

Température de contact

III-Diffusion de charges

III-1 Diffusion de quantité de mouvement

III-2 Diffusion macroscopique de la viscosité

III-3 Equation de diffusion de la quantité de mouvement

IV-Résumé sur les phénomènes de diffusion

IV-1 Généralités

IV-2 Phénomènes de transport et irréversibilité

IV-3 Remarque sur les phénomènes de propagation et par ondes

Conclusion

LP 19 : BILANS THERMIQUES : FLUX DIFFUSIFS, CONVECTIFS ET RADIATIFS

Pré-requis

Introduction

Introduction

Définitions: Conduction, Convection, Rayonnement

I-Flux diffusif

I-1 Mise en évidence expérimentale

I-2 Loi de Fourier

II-Flux convectif

II-1 Description et modélisation

II-2 La loi de Newton

Loi

Remarque

III-Flux radiatif

III-1 Mise en évidence expérimentale

III-2 Loi de Stefan-Boltzmann

Energie volumique spectrale

Loi de Stefan-Boltzmann

IV-Applications

IV-1 Equation de la chaleur

Cas unidimensionnel

Cas tridimensionnel

Conditions aux limites

IV-2 Notion de résistance thermique; analogie électrique

Etablissement de la relation

Associations

Analogie électrique

Exercice: double vitrage

Influence de la convection

Influence du rayonnement

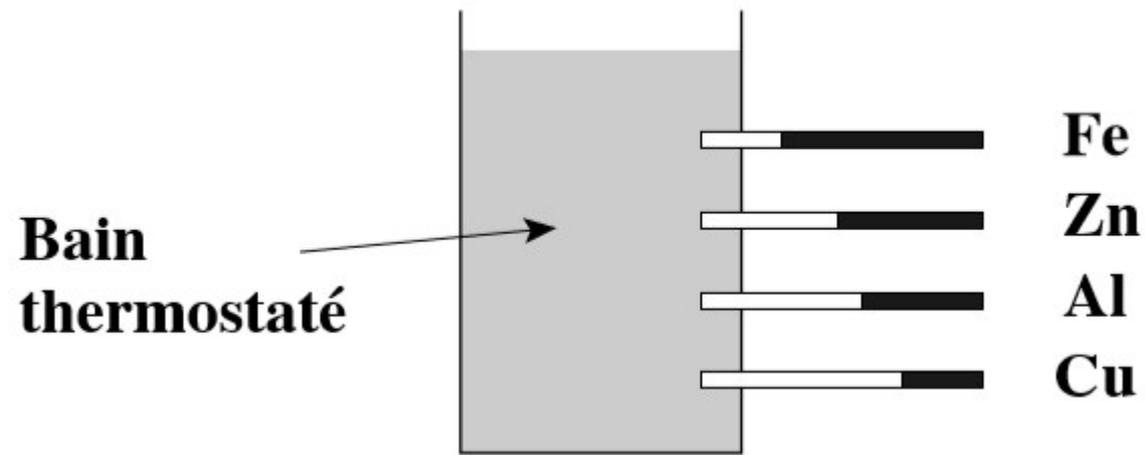
Exercice: intérêt d'une combinaison de plongée

Conclusion

BILANS THERMIQUES
FLUX DIFFUSIFS, CONVECTIFS
ET RADIATIFS

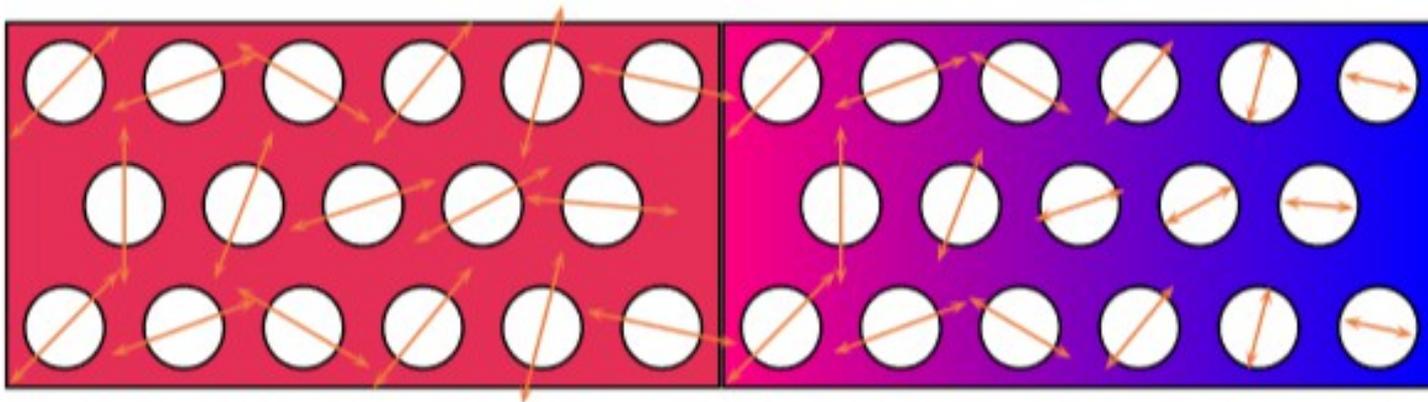
Flux diffusif

Mise en évidence expérimentale



Exp. J. Ingen Housz (1789)

Loi de Fourier

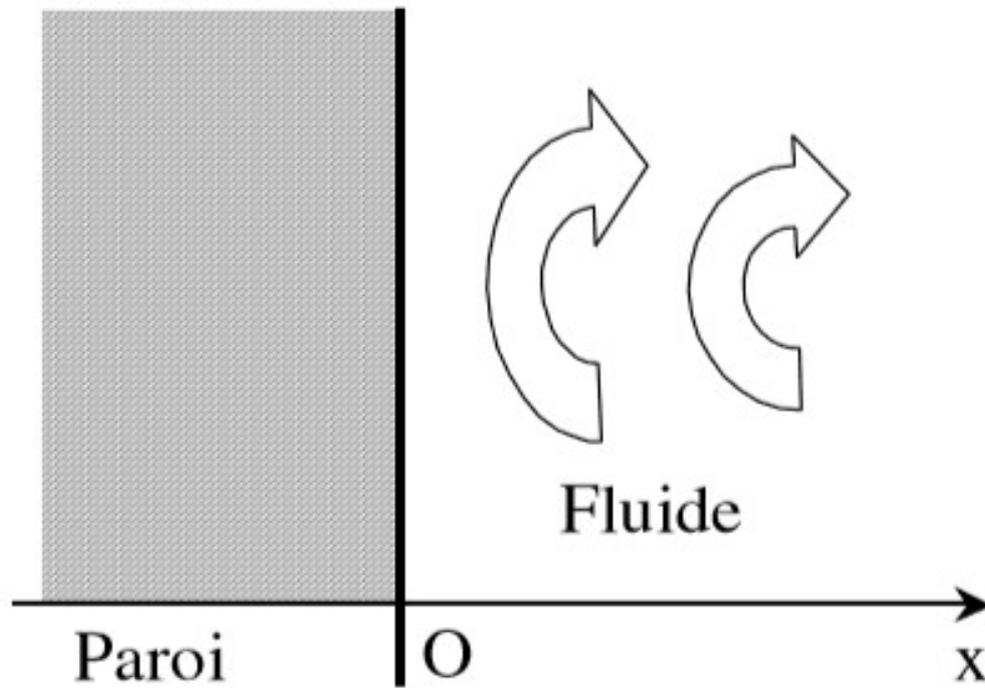


$$\vec{\phi}_{cond} = -\lambda \vec{\nabla}(T)$$

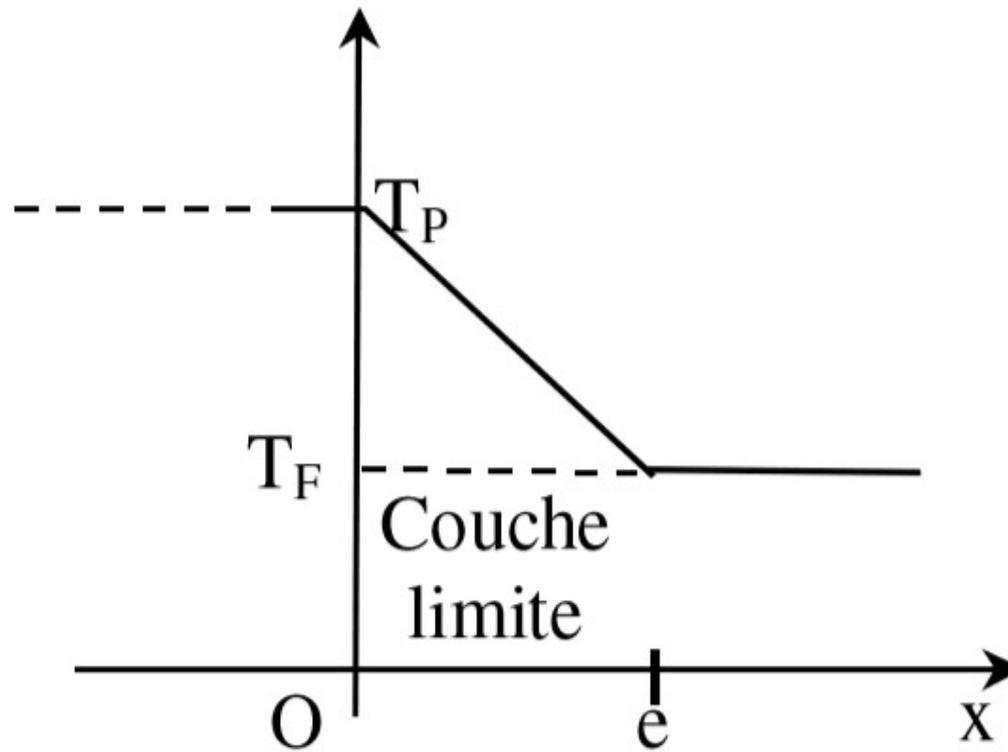
Conductivités thermiques

Matériaux	Conductivité	Matériaux	Conductivité
Cuivre	390	Verre	0,2
Fer	80	Bois	0,15
Titane	10	Carton	0,07
Granite	2,2	Laine de verre	0,04
Béton	0,9	Polystyrène	0,036
Eau	0,6	Air	0,026

Flux convectif



Couche limite thermique

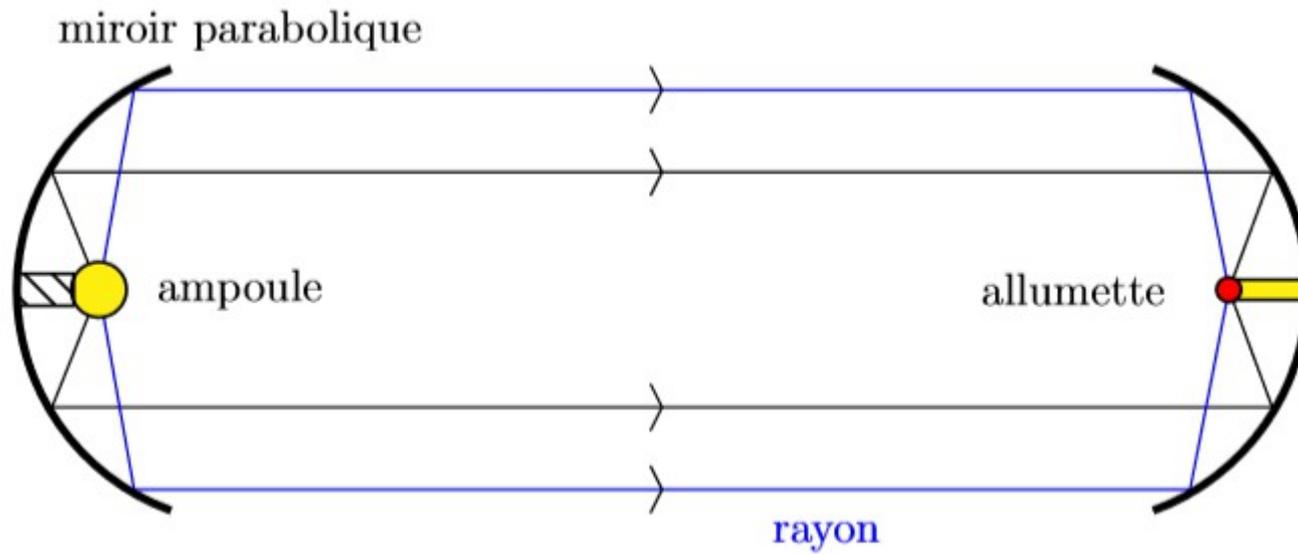


Loi de Newton

$$\vec{\phi}_{conv} = h(T_P - T_F)\vec{n}$$

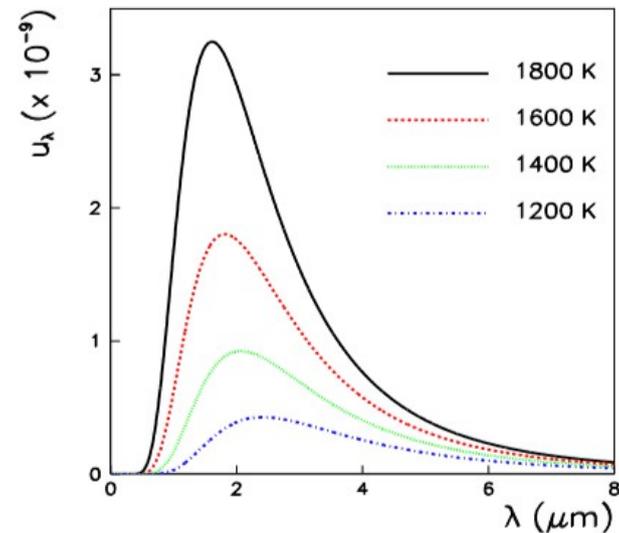
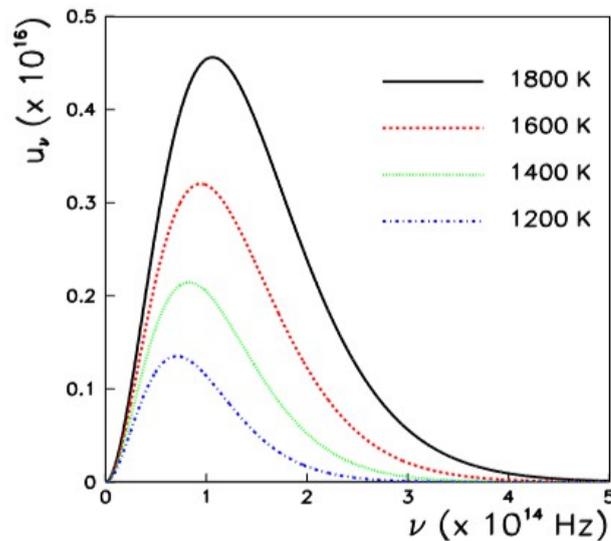
avec $h = \frac{\lambda_F}{e}$

Flux radiatif



Loi de Planck

$$u_\nu(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\beta h\nu} - 1} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{1}{k_B T}$$



$$u_\lambda = -u_\nu \frac{\nu}{d\lambda} = u_\nu \frac{c}{\lambda^2}$$

$$u_\lambda(\lambda, T) = \frac{8\pi c}{\lambda^5} \frac{hc}{e^{\beta hc/\lambda} - 1}$$

Loi de Stefan-Boltzmann

$$u = \sigma T^4 \quad \text{avec} \quad \sigma = \frac{8\pi^5}{15} \frac{k_B}{(hc)^3}$$

$$\vec{\phi}_{rad} = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_e^4) \vec{n}$$

Applications 1

Equation de la chaleur

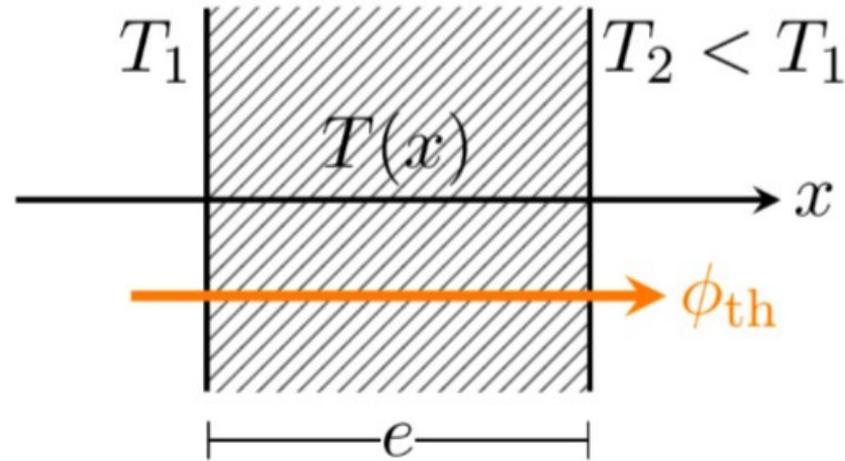
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\mu c_v} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1D)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\mu c_v} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3D)$$

Rq: Conditions aux limites en température et en flux thermique

Applications 2

Notion de résistance thermique



$$\phi_{\text{th}} = \iint_{(S)} \vec{j}_{\text{th}} \cdot \vec{dS} = \frac{\lambda(T_1 - T_2)}{e} S$$

$$T_1 - T_2 = R_{\text{th}} \phi_{\text{th}} \quad \text{avec} \quad R_{\text{th}} = \frac{e}{\lambda S} \quad [\text{K.W}^{-1}]$$

Applications 2

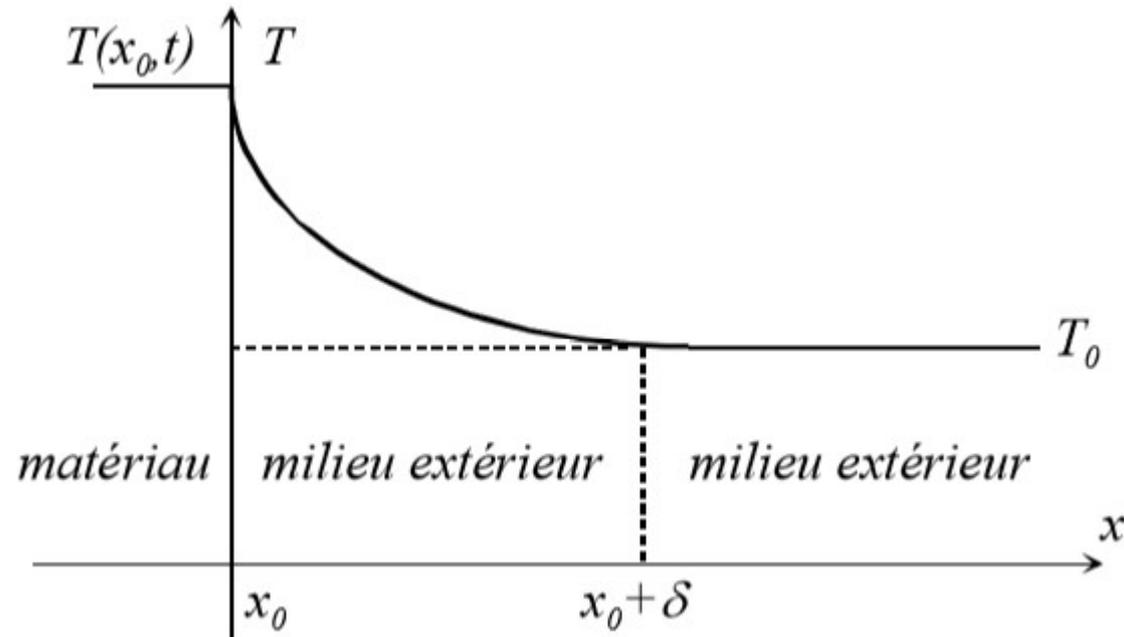
Notion de résistance thermique

	Électricité	Thermodynamique
Cause	différence de potentiel ΔU	différence de température ΔT
Effet	I intensité	Φ flux thermique
Résistance	R en Ω	R_{th} en $W.m^{-1}.K^{-1}$
Loi	$\Delta U = RI$ (loi d'Ohm)	$\Delta T = R_{th}\Phi$

$$R_{eq} = \sum_i R_i \quad (\text{résistances en série}) \quad \frac{1}{R_{eq}} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (\text{résistances en parallèle})$$

Exercice 1

Influence de la convection



Exercice 2

Influence du rayonnement

LP 20 : CONVERSION DE PUISSANCE ELECTROMECHANIQUE

Pré-requis

Introduction

I-Mise en évidence du couplage électromécanique

I-1 Définition

II-Le haut-parleur électrodynamique

II-1 Description du système

II-2 Mise en équation

Etude mécanique

Etude électrique

III-Bilan énergétique

IV-La machine à courant continu

IV-1 Modélisation

IV-2 Spire en rotation dans un champ magnétique statique

Etude mécanique

Etude électrique

Bilan énergétique

IV-3 Le moteur à excitation indépendante: application à l'entraînement d'une charge

Conclusion

LP 21 : INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

Pré-requis

Introduction

I-Le phénomène d'induction

I-1 Faits expérimentaux

Illustration cas circuit mobile B permanent

Cas d'un champ variable

Définition

I-2 Loi de Lenz

I-3 Loi expérimentale de Faraday

II-Champ électromoteur et force électromotrice sur une portion de circuit

II-1 Loi d'Ohm

II-2 Force électromotrice induite sur une portion de circuit

III-Cas d'un circuit fixe dans un champ variable (cas de Neumann)

III-1 Loi de Faraday

III-2 Application pour les circuits filiformes: Induction mutuelle

III-3 Application au chauffage par induction

IV-Cas d'un circuit mobile dans un champ variable

IV-1 Application: cas du haut-parleur / microphone électrodynamique

IV-2 Freinage par induction

Conclusion

LP 22 : RETROACTION ET OSCILLATIONS

Pré-requis

Introduction

I-Systèmes bouclés linéaires, invariants

I-1 Définition

Formule de Black

Définition

Exemples

I-2 Comportement et stabilité d'un système

Définition

I-3 Cas des systèmes bouclés

Exemples

Critère de Nyquist

II-Systèmes asservis

II-1 Définition

Définition

Exemple: la douche

II-2 Critères d'asservissement (Exemple sur Machine Courant Continu)

Robustesse

Nécessité d'un système robuste

Précision (Déf. Erreur statique)

Rapidité (Déf. Erreur dynamique)

II-3 Correcteurs

Proportionnel (P)

Proportionnel Dérivé (PD)

Proportionnel Intégral (PI)

Proportionnel Intégral Dérivé (PID)

III-Systèmes oscillants – oscillateurs

III-1 Système oscillant et pertes

Ex. Pendule

Ex. Circuit LC

III-2 Système oscillant et démarrage

Conclusion

LP 23 : ASPECTS ANALOGIQUE ET NUMERIQUE DU TRAITEMENT D'UN SIGNAL.

ETUDE SPECTRALE

Pré-requis

Résolution d'équations différentielles linéaires du second ordre
Electrocinétique, notation complexe pour les signaux

Introduction

I-Analyse fréquentielle d'un signal électrique

I-1 Système électrique linéaire invariant dans le temps

I-2 Fonction de transfert harmonique

I-3 Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier

I-4 Exemple de décomposition: le signal créneau

II-Les filtres linéaires

II-1 Définitions

II-2 Comment représenter la fonction de transfert d'un filtre: diagramme de Bode

II-3 Le filtre passe-bas du 1er ordre: exemple du circuit RC

II-4 Le filtre passe-bande du 2nd ordre

III-Application: détection synchrone

III-1 Principe de la détection synchrone

III-2 Application à la mesure d'une fonction de transfert d'un système linéaire

III-3 Action d'une non-linéarité sur le filtrage

QUID pour les aspects NUMERIQUES ? Et ANALOGIQUES ?

Conclusion

LP 24 : ONDES PROGRESSIVES. ONDES STATIONNAIRES

Pré-requis

Mécanique classique
Oscillateurs couplés

Introduction

I-Etude de la corde vibrante

I-1 Modèle

I-2 Etude du mouvement

I-3 Solution de l'équation de d'Alembert

I-4 Aspects énergétiques de la propagation

Etude
Ondes stationnaires
Oscillations libres d'une corde fixée à ses extrémités

II-Systèmes discrets

II-1 Chaîne infinie d'oscillateurs couplés; remarques

II-2 Chaîne de pendules couplés

Conclusion

LP 25 : ONDES ACOUSTIQUES

Pré-requis

Thermodynamique classique
Mécanique des fluides (description Eulérienne, équation d'Euler du fluide parfait)
Equation de d'Alembert, corde vibrante et ondes planes

Introduction

I-Approximation acoustique

I-1 Hypothèses

I-2 Linéarisation des équations de mécanique des fluides

Equation d'Euler
Conservation de la masse
Compressibilité

II-Equation de propagation

II-1 Equation de propagation

II-2 Célérité des ondes sonores

Interprétation: ondes sonores et corde vibrante
Remarque
Expérience
Application au gaz parfait
loi de Laplace
Equation d'état
célérité pour les gaz parfaits

II-3 Aspect énergétique: bilan local

II-4 Solution générale de l'équation de propagation

III-Ondes acoustiques planes progressives monochromatiques

III-1 Structure longitudinale

III-2 Aspect énergétique

Energie acoustique
Valeur moyenne
Vecteur densité de puissance sonore

III-3 Ordres de grandeur et validité de l'approximation acoustique

Vitesse
Surpression
Perturbation à la masse volumique
Hypothèse du milieu continu

Conclusion

LP 26 : PROPAGATION AVEC DISPERSION

Pré-requis

Introduction

I-Propagation dans un milieu dispersif

I-1 Mise en défaut de l'équation de d'Alembert

Rappel : exemple de la corde vibrante
Corde vibrante non idéale

I-2 Equation de dispersion

Détermination de l'équation
Signification de k_1 et k_2
dispersion
absorption
Exemple: plasmas
Le prisme

II-Paquet d'ondes planes

II-1 OPPM = outil mathématique

II-2 Représentation de la propagation d'un paquet d'ondes

II-3 Vitesse de groupe et évolution

Exemples
Les vagues
Plasma

Conclusion

LP 27 : PROPAGATION GUIDEE DES ONDES

Pré-requis

Introduction

I-Le guide d'ondes

I-1 Description des guides d'ondes

Introduction

Les différents modes

Mode TEM

Mode TM

Mode TE

I-2 Propagation de modes TE dans un guide d'ondes à section rectangulaire

II-La fibre optique

II-1 Mise en équation et résolution

Conditions aux limites et solutions pour les ondes TE

Conditions aux limites et solutions pour les ondes TM

II-2 Discussion des solutions – notion de mode

II-3 Distribution de l'amplitude et de l'intensité

II-4 Atténuation et dispersion

Conclusion

LP 28 : ONDES ELECTROMAGNETIQUES DANS LES MILIEUX DIELECTRIQUES

Pré-requis

Optique ondulatoire, électromagnétisme
Aspect corpusculaire de la lumière
Mécanique du point

Introduction

I-Ondes électromagnétiques dans les milieux diélectriques

I-1 Rappels des équations de Maxwell dans les milieux

I-2 Approximation des milieux linéaires, homogènes et isotropes (DLHI)

Susceptibilité complexe
Approximations

I-3 Equation de propagation dans un DLHI

Equation de propagation
Relation de dispersion
Exploitation de la relation de dispersion

II-Modélisations microscopiques

Hypothèses
Ordres de grandeur et simplification
Equation différentielle vérifiée par \mathbf{P}
Susceptibilité et indice

II-1 Autres types de polarisation

Polarisation ionique
Polarisation d'orientation

III-Applications

III-1 Spectroscopie: dispersion de la lumière dans un prisme

Conclusion

LP 29 : ONDES ELECTROMAGNETIQUES DANS LES MILIEUX CONDUCTEURS

Pré-requis

Introduction

I-Propagation d'une onde électromagnétique dans un conducteur

I-1 Equation de propagation

I-2 Effet de peau

I-3 Le modèle du conducteur parfait

II-Réflexion sur un conducteur parfait

II-1 Onde incidente et onde réfléchie

II-2 Courant de surface

II-3 Onde stationnaire

II-4 Bilan de puissance

II-5 Conducteur réel

III-Cavité électromagnétique

III-1 Introduction

III-2 Cavité à une dimension sans perte

Définition

Modes propres

Conclusion

LP 30 : RAYONNEMENT DIPOLAIRE ELECTRIQUE

Pré-requis

Introduction

I-Caractéristiques du rayonnement dipolaire électrique

I-1 Cadre d'étude – Approximations

I-2 Expression des champs

I-3 Propriétés remarquables du rayonnement dipolaire électrique

I-4 Calcul de la puissance rayonnée

II-Application aux antennes

II-1 Approximation dipolaire de l'antenne

II-2 Résistance au rayonnement

II-3 Réseaux d'antennes linéaires

III-Diffusion de la lumière solaire

III-1 Résultats expérimentaux

III-2 Diffusion de la lumière par les molécules de l'air

III-3 Atténuation de la lumière

III-4 Polarisation par diffusion

Conclusion

LP 31 : PRESENTATION DE L'OPTIQUE GEOMETRIQUE **A PARTIR DU PRINCIPE DE FERMAT**

Pré-requis

Equations de Maxwell
Diffraction

Introduction

Trouver un modèle pour décrire la propagation de la lumière

I-Le modèle du rayon lumineux

I-1 Approche expérimentale

I-2 Notion de rayon lumineux

II-Principe de Fermat et conséquences

II-1 Enoncé du principe de Fermat (1650)

II-2 Formulation mathématique

II-3 Conséquences

Milieu homogène
Retour inverse de la lumière
Phénomènes de réflexion et de réfraction
 Réflexion
 Réfraction
Théorème de Malus
Equation du rayon lumineux

III-Lien avec le modèle ondulatoire

IV-Application

IV-1 Réflexion totale

IV-2 Mirages et principe des lentilles

IV-3 Fabrication d'un système rigoureusement stigmatique

Conclusion

LP 32 : MICROSCOPIES OPTIQUES

Pré-requis

Toute l'optique géométrique
Notions de diffraction
Notions sur les aberrations

Introduction

I-Présentation du microscope et étude géométrique

I-1 Caractéristiques d'un instrument d'optique

Grossissement, grandissement, puissance
Champ
Limite de résolution

I-2 Eléments constitutifs

I-3 Schéma des rayons

Objectif
Oculaire

I-4 Conjugaison et latitude de mise au point

Conjugaison oculaire
Conjugaison objectif, A.Num

I-5 Grossissement, grandissement et puissance

Grossissement du microscope
Puissance du microscope

II-Luminosité, résolution et champ

II-1 Eclairage et luminosité

Eclairage
Ouverture numérique de l'objectif
Cercle oculaire

II-2 Pouvoir de résolution

Résolution théorique
Limite de résolution par l'oeil

II-3 Champ transverse et longitudinal

Profondeur de champ
Champ transverse et diaphragme de champ

III-Correction des aberrations géométrique et chromatique

III-1 Condition de stigmatisme rigoureux

III-2 Correction de l'aberration chromatique

III-3 Autres aberrations à corriger

Conclusion

LP 33 : INTERFERENCES A DEUX ONDES EN OPTIQUE

Pré-requis

Notion de vibration lumineuses, de déphasage et de chemin optique
Ondes électromagnétiques et polarisation de ces ondes

Objectifs

Introduction

Expériences

I-Obtention d'interférences à deux ondes en optique

I-1 Les détecteurs en optique

I-2 Superposition de deux ondes monochromatiques

Position du problème, remarque
Calcul de l'intensité résultante
Interférences

I-3 Condition d'obtention d'interférences

Condition d'interférences (condition 1)
Calcul du terme d'interférences pour $\omega_1 = \omega_2$

I-4 Notion de contraste

Définition
Expression du contraste en fonction de I_1 et I_2

I-5 Exemple: expérience des trous d'Young

II-Cohérence temporelle

II-1 Modèle des trains d'onde (point de vue temporel)

Modèle des trains d'onde
Ordres de grandeur
Incohérence de deux sources indépendantes (condition 2)
Cohérence de deux sources secondaires

II-2 Largeur de raie (point de vue spectral)

Largeur de raie d'une source lumineuse
Retour au modèle des trains d'onde
Nouveau critère (condition 3 (cohérence temporelle))

III-Introduction à la cohérence spatiale

Trous d'Young éclairés par une source primaire étendue (condition 3 bis (cohérence spatiale))

Conclusion

LP 34 : INTERFEROMETRIE A DIVISION D'AMPLITUDE

Pré-requis

Interférences à 2 ondes
Interféromètres à division d'amplitude
Cohérence spatiale et cohérence temporelle

Introduction

I-Interféromètre à 2 ondes

I-1 Interférences sur des lames

Lame à faces parallèles
Lame dont les faces font un angle α
Applications

I-2 Interféromètre de Michelson

Principe
Différentes configurations du Michelson
Manip en lame d'air
Manip en coin d'air

I-3 Applications de l'interféromètre de Michelson

Spectroscopie par transformée de Fourier
Etude d'objets placés sur un bras de l'interféromètre
Tomographie optique cohérente (OCT)
Projet VIRGO

II-Interféromètre à N ondes

II-1 Lames à N ondes

II-2 Interféromètre de Fabry-Pérot

II-3 Applications de l'interféromètre de Fabry-Pérot

Spectroscopie
Filtre interférentiel
Cavité Laser

Conclusion

LP 35 : DIFFRACTION DE FRAUNHOFER

Pré-requis

Optique géométrique
Notions d'optique ondulatoire (onde plane, onde sphérique, interférences)
Savoir manipuler la transformée de Fourier

Introduction

Expérience

I-Interprétation ondulatoire

Amplitude
Facteur de transmission

II-Diffraction de Fraunhofer

II-1 Définition

3 conditions
justification de la dernière condition

II-2 Méthode d'observation

II-3 Formule de Fraunhofer

II-4 Exemple du trou rectangulaire

III-Rôle de la diffraction dans la formation d'images

IV-Applications

IV-1 Filtrage spatial

IV-2 Effet Speckle

IV-3 Autres exemples possibles

Conclusion

LP 36: DIFFRACTION STRUCTURE PERIODIQUES

Pré-requis

Interférences, diffraction de Fraunhofer
Onde plane progressive stationnaire
Cristallographie (réseau direct, réseau réciproque, plans de Bragg)

Introduction

I-Diffraction par un réseau sinusoïdal – décomposition en ondes planes

I-1 Réseau sinusoïdal

Définition
Expérience de cours
Interprétation

I-2 Diffraction par un réseau 1D quelconque

Calculs
Expérience : diffraction par un réseau à fentes
Exploitation

I-3 Application

Microscope à champ lointain
Microscope à champ proche
Les réseaux dans la vie de tous les jours

II-Diffraction d'électrons de basse énergie

III-Diffraction de rayons X et cristallographie

III-1 Présentation

III-2 Observation

III-3 Calcul

Condition de Laue

IV-Application à la détermination de l'orientation d'un cristal

Conclusion

LP 37 : EMISSION ABSORPTION DE LUMIERE

Pré-requis

Introduction

I-Interaction matière-rayonnement : modèle d'Einstein

Hypothèses de travail

Atomes à 2 niveaux

Système fermé

Champ électromagnétique

Constatation : les états stationnaires ne le sont pas. Il existe un couplage qui donne une durée de vie finie dans l'état excité.

I-1 Processus élémentaires

I-2 Absorption

Emission spontanée

Emission induite (ou stimulée)

I-3 Bilan des populations

I-4 Equilibre thermodynamique matière-rayonnement

I-5 Bilan de puissance

I-6 Limites du modèle

II-Le LASER

II-1 Système à trois niveaux

II-2 Cavité résonante

II-3 Une application : refroidissement d'atomes par LASER

Pression de radiation

II-4 Le Lidar

Conclusion

LP 38 : ASPECTS CORPUSCULAIRES DU RAYONNEMENT. NOTION DE PHOTON

Pré-requis

Introduction

I-L'apparition de la quantification de l'énergie

I-1 Expérience de Hertz (1887) et Halbwachs (1888)

I-2 Rayonnement du corps noir

II-L'apparition du photon, ses caractéristiques

II-1 Einstein et l'effet photoélectrique

Expérience

Explication par la quantification

II-2 Effet Compton

Expérience

Démonstration par le calcul

Résultats

II-3 Caractéristiques du photon

III-Interaction rayonnement-matière

III-1 Absorption de photon

III-2 Emission de photon

Conclusion

LP 39 : ASPECTS ONDULATOIRES DE LA MATIERE.
NOTION DE FONCTION D'ONDE

Pré-requis

Optique ondulatoire, électromagnétisme
Aspect corpusculaire de la lumière
Mécanique du point

Introduction

I-Comportement ondulatoire de la matière

I-1 Rappels

I-2 L'expérience de Franck et Hertz

I-3 Les ondes de De Broglie

II-Description quantique ondulatoire de la matière

II-1 Expérience de pensée : interférences d'électrons

II-2 Description en termes de probabilité de présence : notion de fonction d'onde

III-Dynamique de la fonction d'onde

III-1 Equation de Schrödinger

III-2 Paquet d'onde

III-3 Inégalités d'Heisenberg

Conclusion

LP 40 : CONFINEMENT D'UNE PARTICULE ET QUANTIFICATION D'ENERGIE

Pré-requis

Bases de la Mécanique Quantique (fonction d'onde, équation de Schrödinger)

Introduction

I-Les débuts de la Mécanique Quantique

I-1 Faits expérimentaux et lois empiriques

Rayonnement du corps noir

Spectres de raies

Expérience

I-2 Le modèle de Bohr

Modèle de Thomson

Modèle de Rutherford

Modèle de Bohr (ajout des 4 hypothèses au modèle planétaire)

II-L'apport de la mécanique quantique

II-1 Description de l'atome

II-2 Quantification des niveaux

II-3 Classification

Définition des nombres quantiques

Notation spectroscopique

III-Preuve expérimentale

III-1 Expérience de Franck et Hertz

III-2 Application: horloges à atomes froids

Conclusion

LP 41 : EFFET TUNNEL

Pré-requis

Introduction

I-Traversée d'une barrière de potentiel

I-1 Généralités: barrière quelconque

Régions I et III

I-2 Transparence d'une barrière rectangulaire

Région II

Raccordement

Remarque

II-Applications

II-1 Traversée classique

Données

Application numérique

II-2 Microscope à effet tunnel

II-3 Radioactivité α

Position du problème

Modèle de Gamow

Données

Application numérique

Conclusion

LP 42 : FISSION, FUSION

Pré-requis

Introduction

Partant des caractéristiques du noyau, on se propose ici d'étudier les réactions nucléaires de fission et de fusion.

I-Caractéristiques du noyau

I-1 Composition

I-2 Les isotopes

I-3 L'énergie de liaison nucléaire

Exemple

Courbe d'Aston

I-4 Le modèle de la goutte liquide

II-Fission

Définition

Deux types: spontanée et induite

Historique

Equation de réaction

Traitement des neutrons

III-Fusion

Définition

Intérêt

Applications (Laser Mégajoule, Iter)

Conditions de réaction (interpénétration des noyaux)

Equations de réaction

Perspectives

Conclusion

LP 43 : EVOLUTION TEMPORELLE D'UN SYSTEME QUANTIQUE A DEUX NIVEAUX

Pré-requis

Introduction

I-Résonance magnétique nucléaire (RMN)

I-1 Spin 1/2 dans un champ magnétique périodique

I-2 Oscillations de Rabi

I-3 Principes de l'IRM et de la RMN

II-La molécule d'ammoniac

II-1 La molécule d'ammoniac comme système à deux niveaux

II-2 La molécule dans un champ électrique: le Maser à ammoniac

II-3 Transitions hors résonance

III-Atome à deux niveaux

III-1 Absorption et émission des photons

Conclusion

LP 44 : CAPACITES THERMIQUES: DESCRIPTION, INTERPRETATIONS MICROSCOPIQUES

Pré-requis

Théorie cinétique des gaz parfaits
1er et 2ème principe de la Thermodynamique
Facteur de Boltzmann
Définition de la capacité thermique en Thermodynamique classique
Etude de la chaîne linéaire infinie d'oscillateurs harmoniques

Introduction

I-Rappels de Thermodynamique classique

I-1 La capacité thermique

I-2 Loi de distribution de Boltzmann

Probabilité et fonction de partition
1er cas : niveaux d'énergie discrets
2ème cas : répartition continue de l'énergie

Théorème de l'équipartition de l'énergie

I-3 Le système à deux niveaux

II-Capacité thermique des gaz

II-1 Théorème d'équipartition de l'énergie

II-2 Capacité thermique molaire des gaz parfaits

II-3 Données expérimentales

III-Capacité thermique des solides

III-1 Loi de Dulong et Petit

III-2 Comportement à basse température

Modèle d'Einstein (1907)
Modèle de Debye (1912)
Modèle de Sommerfeld

Conclusion

LP 45 : PARAMAGNETISME ET FERROMAGNETISME: **APPROXIMATION DU CHAMP MOYEN**

Pré-requis

Définition de l'aimantation et de la susceptibilité magnétique
Physique statistique dans l'ensemble canonique
Quantification du moment cinétique en mécanique quantique, notion de spin, théorème de Wigner-Eckart

Introduction

On s'intéresse ici au comportement magnétique des substances à l'état liquide ou solide. En 1895, dans sa thèse, Pierre Curie effectue une étude expérimentale...

I-Origine du magnétisme microscopique: moments magnétiques

I-1 Moment magnétique d'origine orbital

Approche classique
Approche quantique

I-2 Moment magnétique dû au spin

I-3 Moment magnétique orbital

II-Interprétation microscopique du paramagnétisme

II-1 Modèle semi-classique de Langevin

Présentation
Aimantation
Approximation classique
Aimantation à saturation

II-2 Prise en compte de la quantification : modèle de Brillouin

Expression de l'aimantation
Aimantation à saturation
Approche classique, loi de Curie
Calcul complet

II-3 Application: refroidissement par désaimantation adiabatique

III-Ferromagnétisme à l'échelle microscopique. Approximation du champ moyen

III-1 Modèle phénoménologique de Weiss

Modèle
Aimantation
Résolution graphique, interprétation (3 cas)
Loi de Curie-Weiss

III-2 Origine du champ moléculaire

Hamiltonien de Heisenberg
Approximation du champ moyen
Limite de l'approximation

Conclusion

LP 46 : PROPRIETES MACROSCOPIQUES DES CORPS FERROMAGNETIQUES

Pré-requis

Introduction

I-Description macroscopiques milieux ferromagnétiques

I-1 Rappel: magnétisme dans la matière

I-2 Aperçu expérimental (bobine à noyau de fer)

I-3 Généralisation: description d'un milieu ferromagnétique

I-4 Aspect énergétique

II-Milieux ferromagnétiques doux

II-1 Confinement des lignes de champ

Modèle du milieu doux idéal

Confinement des lignes de champ

II-2 Application: l'électroaimant

III-Milieux ferromagnétiques durs

III-1 Aimant permanent

III-2 Les mémoires magnétiques

Enregistrement analogique

Méthode numérique magnétique

Conclusion

LP 47 : MECANISME DE LA CONDUCTION ELECTRIQUE DANS LES SOLIDES

Pré-requis

Notions générales d'électromagnétisme (champs électrique et magnétique, force électromagnétique)
PFD

Introduction

Les mécanismes dont il va être question sont à la base du fonctionnement du monde moderne depuis la révolution industrielle (la fée électricité), mais aussi de développements technologiques plus récents (semiconducteurs, supraconducteurs).

I-Le courant électrique

Définition de l'intensité
Ordres de grandeur
Remarque

Question: comment le courant est-il créé? Quelle relation entre excitation et réponse?

II-Loi d'Ohm

II-1 Modèle

Hypothèses
Limitations

II-2 Conducteurs, semiconducteurs, isolants

II-3 Expression intégrale de la loi d'Ohm

II-4 Effet Hall

III-Notion de structure de bandes

III-1 Description

III-2 Rôle de T et des impuretés

Température
Impuretés

Conclusion

LP 48 : PHENOMENES DE RESONANCE DANS DIFFERENTS DOMAINES DE LA PHYSIQUE

Pré-requis

Mécanique classique : PFD
Electrocinétique : circuit RLC
Optique ondulatoire : Fabry-Pérot

Introduction

I-Etude d'un système mécanique résonant

I-1 Etude en position

Etude {masse + ressort} avec moteur et frottement fluide
Applications

I-2 Etude en vitesse

I-3 Aspect énergétique

Etude
Rq sur le facteur de qualité

I-4 Lien avec l'oscillateur libre

II-Généralisation

II-1 Analogie formelle

II-2 Application au RLC série

Etude de la tension aux bornes du condensateur
Etude de l'intensité
Amplitude de l'intensité réelle

II-3 Extension de la définition

Réponse d'un système
Maximum
Pulsation de résonance
Linéarité

III-Du macroscopique au microscopique : du discret au continu

III-1 Oscillateurs couplés

III-2 Cavitité de Fabry-Pérot

Conclusion

LP 49 : OSCILLATEURS : PORTRAITS DE PHASE ET NON LINEARITES

Pré-requis

Oscillateurs linéaires : régimes forcé et libre

Introduction

I-Anharmonicité des oscillations libres du pendule pesant

I-1 Portraits de phase

I-2 Harmonicité du régime linéaire

I-3 Anharmonicité du régime non-linéaire

Approche qualitative

Approche quantitative

II-Oscillations forcées d'un oscillateur non-linéaire

II-1 Rappel: régime linéaire

II-2 Régime non-linéaire

Approche qualitative de la résonance

Approche quantitative

III-Oscillations auto-entretenues

III-1 L'équation de Van der Pol

Ex. Vase de Tantale

III-2 Réalisation expérimentale

Non-linéarité polynomiale cubique

Oscillateur de Van der Pol

III-3 Comportement dynamique

Démarrage des oscillations

Cycle limite

Conclusion