

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

ETATS DE LA MATIERE ET LEUR CARACTERISATION



Pr Christelle Wisniewski

UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques
christelle.wisniewski@umontpellier.fr

2017 - 2018

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Objectifs généraux

UE 3. Organisation des appareils et des systèmes

1. Comprendre les processus physiques à la base des différentes méthodes d'imagerie et d'exploration fonctionnelle

UE3A - Bases physiques des méthodes d'exploration

2. Connaître les bases physiques et physiologiques utiles à la compréhension des échanges et au maintien des équilibres au sein de l'organisme

UE3B - Aspects fonctionnels

Arrêté du 28 octobre
2009 relatif à la PACES



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Programme

UE 3. Organisation des appareils et des systèmes

1. États de la matière et leur caractérisation
2. Méthodes d'étude en électrophysiologie jusqu'à l'ECG
3. Les très basses fréquences du spectre électromagnétique
4. Le domaine de l'optique
5. Rayons X et gamma

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Programme

UE 3. Organisation des appareils et des systèmes

1. États de la matière et leur caractérisation

- **Liquides, gaz, solutions**
- **Potentiel chimique**
- **Changements d'état, pression de vapeur**
- **Propriétés colligatives : osmose, cryométrie, ébulliométrie**
- **Régulation du milieu intérieur et des espaces hydriques et thermo-régulation**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Programme

UE 3. Organisation des appareils et des systèmes

1. États de la matière et leur caractérisation

- **Liquides, gaz, solutions** ⇒ **Mécanique des fluides (statique des fluides)**
- **Potentiel chimique**
- **Changements d'état, pression de vapeur**
- **Propriétés colligatives : osmose, cryométrie, ébulliométrie**
- **Régulation du milieu intérieur et des espaces hydriques et thermo-régulation**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

- 1 LES ETATS DE LA MATIERE**
 - Interactions fondamentales
 - Etats de la matière et changements d'état
- 2 AGITATION THERMIQUE ET PROPAGATION DE LA CHALEUR**
 - Notion de température et chaleur
 - Propagation de la chaleur
- 3 EQUATIONS FONDAMENTALES ET THÉORIES ASSOCIÉES AU FLUIDES**
 - Equation fondamentale de la statique des fluides incompressibles
 - Théorie des gaz parfaits
- 4 PROPRIÉTÉS COLLIGATIVES**
 - Solutions et propriétés colligatives : définitions
 - Expressions des concentrations des solutions
 - Propriétés colligatives des solutions
 - Compléments, exemples et applications

LES ETATS DE LA MATIERE

1

1. Interactions fondamentales

2. Etats de la matière et changements d'état

1. Interactions fondamentales

- ✓ Taille et échelle d'observation...
- ✓ Les interactions fondamentales
- ✓ Les interactions à notre échelle...

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

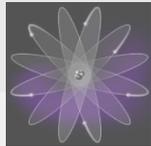
Zone réservée pour
la vidéo

Taille et échelle d'observation

Atome

Noyau et ses nucléons

Electrons



La masse du noyau représente la quasi totalité de la masse de l'atome.

L'espace occupé par un atome peut être assimilé à une sphère de diamètre de 10^{-10} m.

Le noyau peut lui aussi être assimilé une sphère de 10^{-15} m, placée au centre de la précédente.



Molécules **0,1 à 1 nm**

Assemblage d'au moins deux atomes...

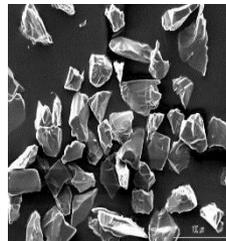
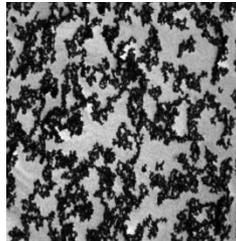
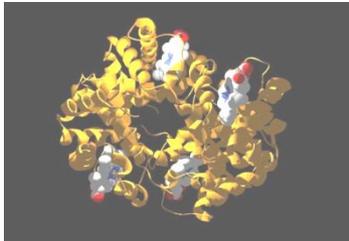
UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Taille et échelle d'observation

Différentes
interactions



nm

μm

m

Molécules ~ 0,1 nm - 1 nm

Macromolécules ~ 1-10 nm

Colloïdes ~ 10 nm - 1 μm

Grains > 1 μm

Etre humain ~ 1 m

Galaxie

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Les interactions fondamentales

INTERACTION FORTE

INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE

INTERACTION FAIBLE

INTERACTION GRAVITATIONNELLE

INTENSITE



Interactions spécifiques différentes en **intensité** et en **rayon d'action**
Non exclusives

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Interaction qui résulte de deux actions réciproques qu'exercent l'un sur l'autre deux systèmes matériels. Elle est responsable, entre autres, de l'attraction terrestre et des phénomènes astronomiques.

INTERACTION GRAVITATIONNELLE

Dominante à l'échelle du cosmos

Interaction newtonienne

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

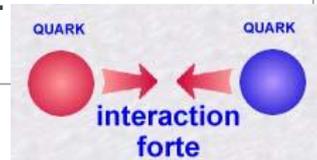
Zone réservée pour la vidéo

Interactions concernant les **noyaux atomiques**

INTERACTION FORTE

L'interaction forte s'applique **uniquement** aux quarks.

L'**interaction forte** est responsable du confinement des protons et des neutrons dans les noyaux atomiques.



Elle affecte toutes les catégories de **fermions connus** (électrons, quarks, neutrinos...).

L'**interaction faible**, ou force nucléaire faible, est responsable de certains **phénomènes de la radioactivité** (e.g. radioactivité β).

Cette force agit à l'intérieur même des nucléons. Elle transforme une espèce de nucléon (proton ou neutron) dans l'autre espèce et vice-versa, provoquant la radioactivité β .

INTERACTION FAIBLE

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE

**Dominante à l'échelle
de l'atome, des molécules, du solide**

Interaction coulombienne

**Elle assure la cohésion des atomes
et des molécules, gouverne toutes
les réactions chimiques et aussi les
phénomènes optiques.**

Elle a une portée infinie, mais, tantôt
attractive, tantôt répulsive; ses effets
cumulatifs sont annulés à grande
distance du fait de la neutralité globale
de la matière.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

INTERACTIONS	PUISSANCE RELATIVE / INTERACTION FORTE	RAYON D'ACTION (m)	RELATION ENTRE INTENSITE ET DISTANCE
FORTE	1	$2,5 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$1/r^7$
ELECTROMAGNETIQUE	10^{-2}	∞	$1/r^2$
FAIBLE	10^{-13}	10^{-18} m	$1/r^7$ à $1/r^5$
GRAVITATIONNELLE	10^{-38}	∞	$1/r^2$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Dans le vide, une particule **B** de charge q_B , séparée par une distance $r = AB$ d'une particule A de charge q_A , subira une force exercée par A d'intensité proportionnelle au produit des charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare ces charges.

$$F_{A \rightarrow B} = \frac{1}{4 \times \pi \times \epsilon_0} \times \frac{|q_A| \times |q_B|}{r^2}$$

K constante de Coulomb = $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$

RELATION ENTRE INTENSITE ET DISTANCE

ELECTROMAGNETIQUE

$1/r^2$

L'interaction électromagnétique combine l'interaction électrique et l'interaction magnétique et s'exerce sur toutes les particules électriquement chargées.

La force magnétique est cependant nulle sur des particules immobiles qui ne sont alors soumises qu'à une interaction électrique dite **électrostatique**.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Dans le vide, un corps **B** de masse m_B , séparé par une distance $r = AB$ d'un corps **A** de masse m_A , subira une force exercée par A d'intensité proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare ces masses.

$$F_{A \rightarrow B} = G \times \frac{|m_A| \times |m_B|}{r^2}$$

RELATION ENTRE INTENSITE ET DISTANCE

G constante gravitationnelle = $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$

GRAVITATIONNELLE

$1/r^2$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Bilan des interactions dominantes à chaque échelle...

Noyau



INTERACTION FAIBLE – **INTERACTION FORTE**
INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE

Dominante

Atome

Molécule

Macromolécules... jusqu'à notre échelle



INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE

A l'échelle astronomique

INTERACTION GRAVITATIONNELLE

La stabilité ou l'instabilité d'un noyau sont le résultat de la compétition entre ces trois interactions.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

INTERACTIONS	CHAMPS D'ACTION	EFFET
FORTE	Noyau atomique	ATTRACTIF
ELECTROMAGNETIQUE	Atome à notre échelle	ATTRACTIF ou REPULSIF
FAIBLE	Noyau atomique	ATTRACTIF ou REPULSIF
GRAVITATIONNELLE	Cosmos	ATTRACTIF

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Les interactions à notre échelle...

INTERACTION ELECTROMAGNETIQUE

Forces inter- et intramoléculaires fortes

Forces inter- et intramoléculaires faibles

Atome

Molécule

Macromolécules... jusqu'à notre échelle

BRIQUES DE LA MATIERE



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Forces de plus forte intensité

Il existe trois principaux types de forces :

- ionique,
- covalente,
- métallique.

L'énergie associée est de l'ordre de 1 eV ou supérieure

Forces de plus faible intensité

Ces forces sont principalement constituées :

- des forces de **Van der Waals**, elles-mêmes se différenciant selon quatre types principaux :
 - forces dipôle–dipôle ou Forces de Keesom,
 - forces ion–dipôle,
 - forces dipôle-induit dipôle ou forces de Debye,
 - forces instantanées dipôle-induit dipôle-induit ou Forces de London,
- des **liaisons hydrogène** bien plus fortes en intensité.

L'énergie associée est de l'ordre de 0,1 eV ou inférieure

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Forces de plus faible intensité

Ces forces sont principalement constituées :

- des forces de **Van der Waals** elles-mêmes se différenciant selon quatre types

- forces de dispersion de London,

- forces de Keesom,

- forces de Debye-Hückel,

- forces instantanées induites de London,

De la famille des forces de Van der Waals, les liaisons hydrogène s'en distinguent par leur intensité : leur énergie de liaison est environ dix fois supérieure!

- des **liaisons hydrogène** bien plus fortes en intensité.

L'énergie associée est de l'ordre de 0,1 eV ou inférieure

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Les particules de la matière (molécules, atomes) sont soumises à :

- des forces électromagnétiques répulsives ou attractives
- **une agitation thermique**

**L'état de la matière résulte de la compétition
entre ces sollicitations**

2. Etats de la matière et changements d'état

- ✓ Définitions et caractéristiques
- ✓ Les changements d'état
- ✓ Exemple d'application biomédicale
 - ... Evaporation et régulation thermique

Définitions et caractéristiques

LIQUIDE

CORPS PUR

Corps dont les atomes et/ou molécules sont relativement mobiles les uns par rapport aux autres.

GAZ

Corps dont les atomes et/ou molécules sont entièrement mobiles les uns par rapport aux autres.

SOLIDE

Corps dont les atomes et/ou molécules sont fortement liés les uns aux autres et demeurent presque immobiles.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

SOLIDE

L'agitation thermique est très faible par rapport aux interactions intermoléculaires.

On retiendra:

- les particules sont accolées les unes aux autres,
- la masse volumique d'un solide est élevée,
- un solide est incompressible,
- le volume V varie peu avec la température T ,
- un solide a une forme propre.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

LIQUIDE

Les forces de cohésion entre les molécules d'un liquide ne sont pas suffisantes pour réaliser un état rigide ; elle suffisent cependant à maintenir les molécules rapprochées tout en leur permettant de glisser les unes sur les autres.

On retiendra:

- les particules sont jointives mais sans ordre spatial,
- la masse volumique d'un liquide est relativement élevée,
- un liquide est incompressible,
- le volume V varie peu avec la température T (plus que pour les solides),
- un liquide n'a pas de forme propre.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

GAZ

L'agitation thermique est très grande par rapport aux interactions intermoléculaires; les forces de cohésion sont nulles.

On retiendra:

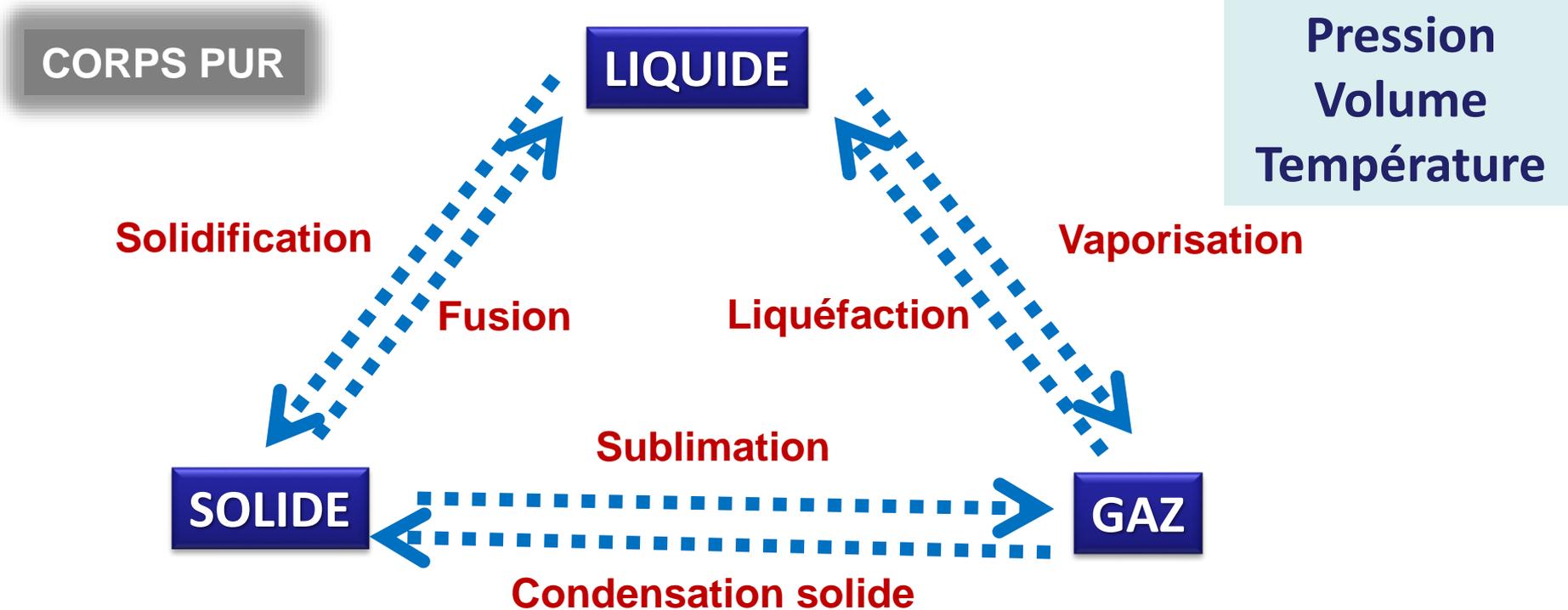
- les particules sont très éloignées les unes des autres,
- la masse volumique d'un gaz est faible,
- un gaz est compressible,
- le volume V varie beaucoup avec la température T ,
- les particules de gaz tendent à occuper tout le volume qui leur est donné.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Les changements d'état



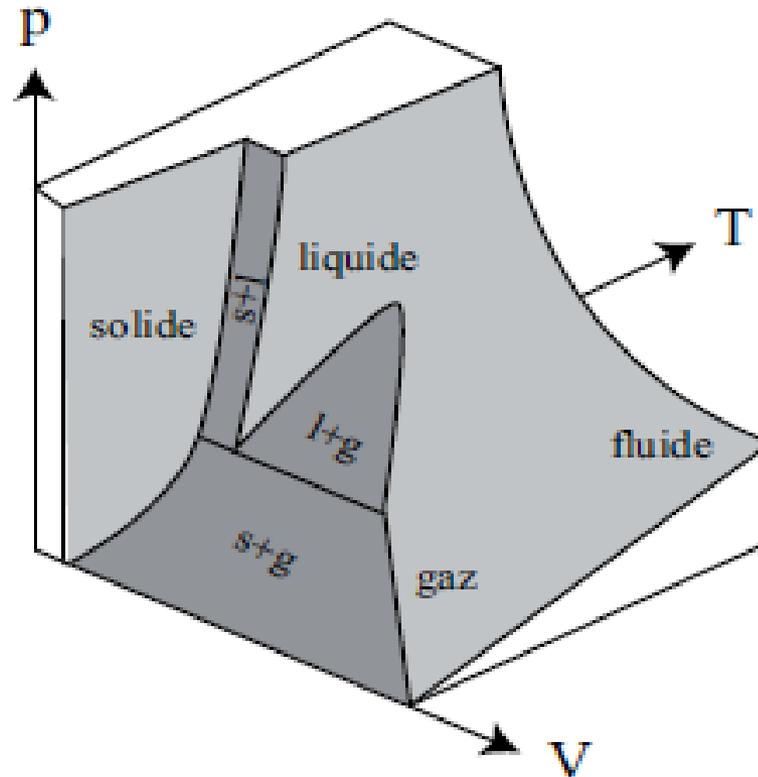
UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Représentation de l'évolution du comportement d'un corps pur dans le cas de changements d'état

CORPS PUR



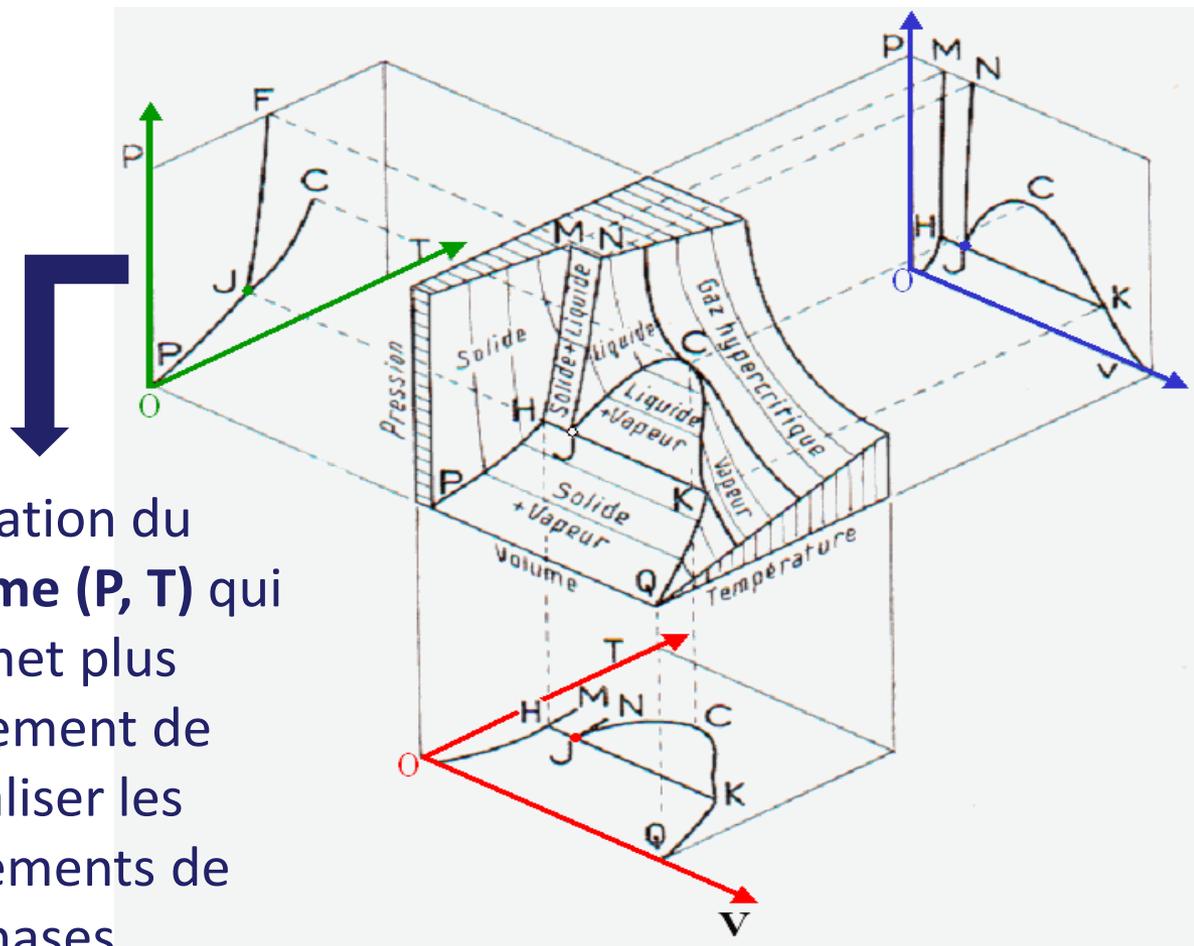
Pression
Volume
Température

Diagramme (P,V,T)

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo



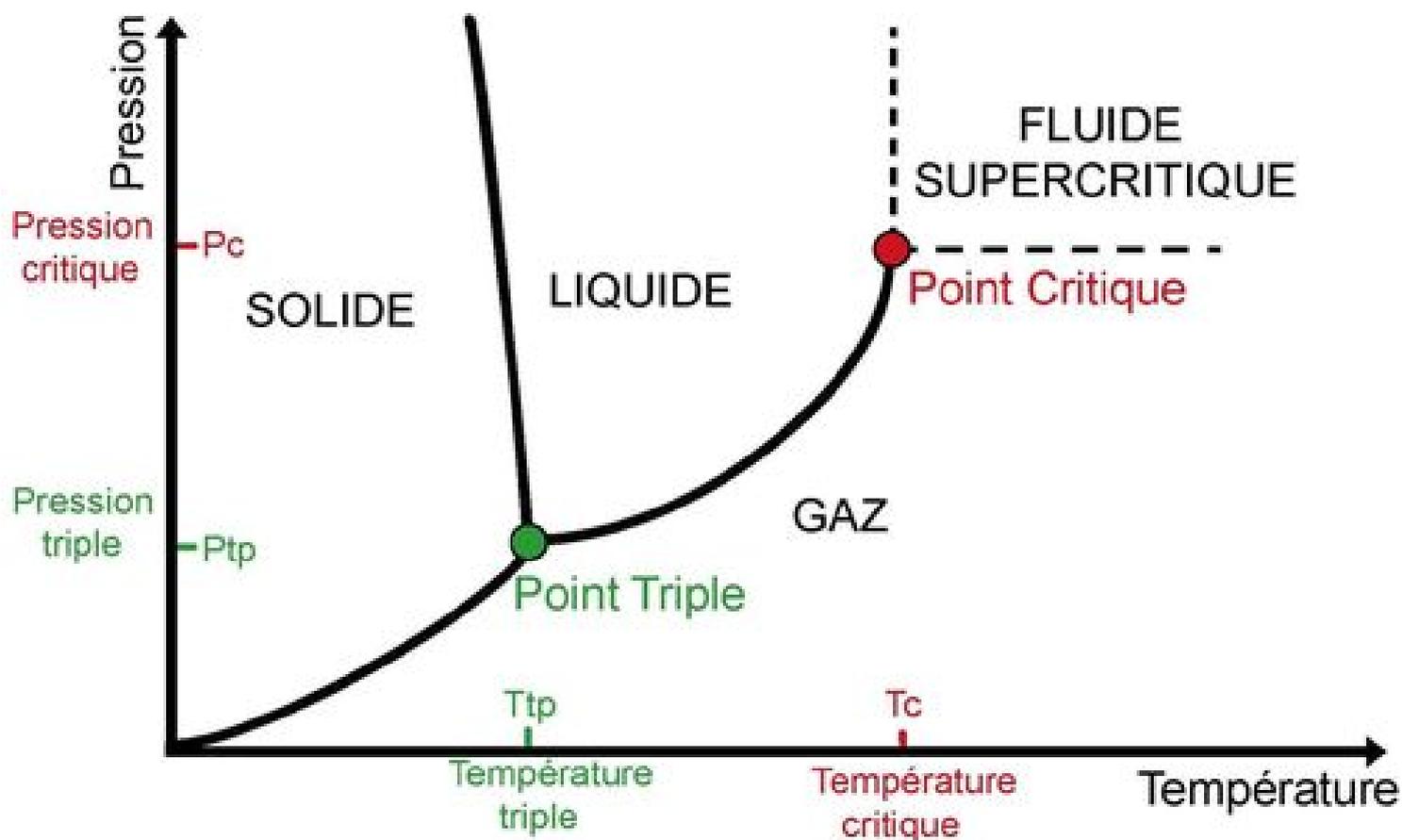
Utilisation du diagramme (P, T) qui permet plus simplement de visualiser les changements de phases

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

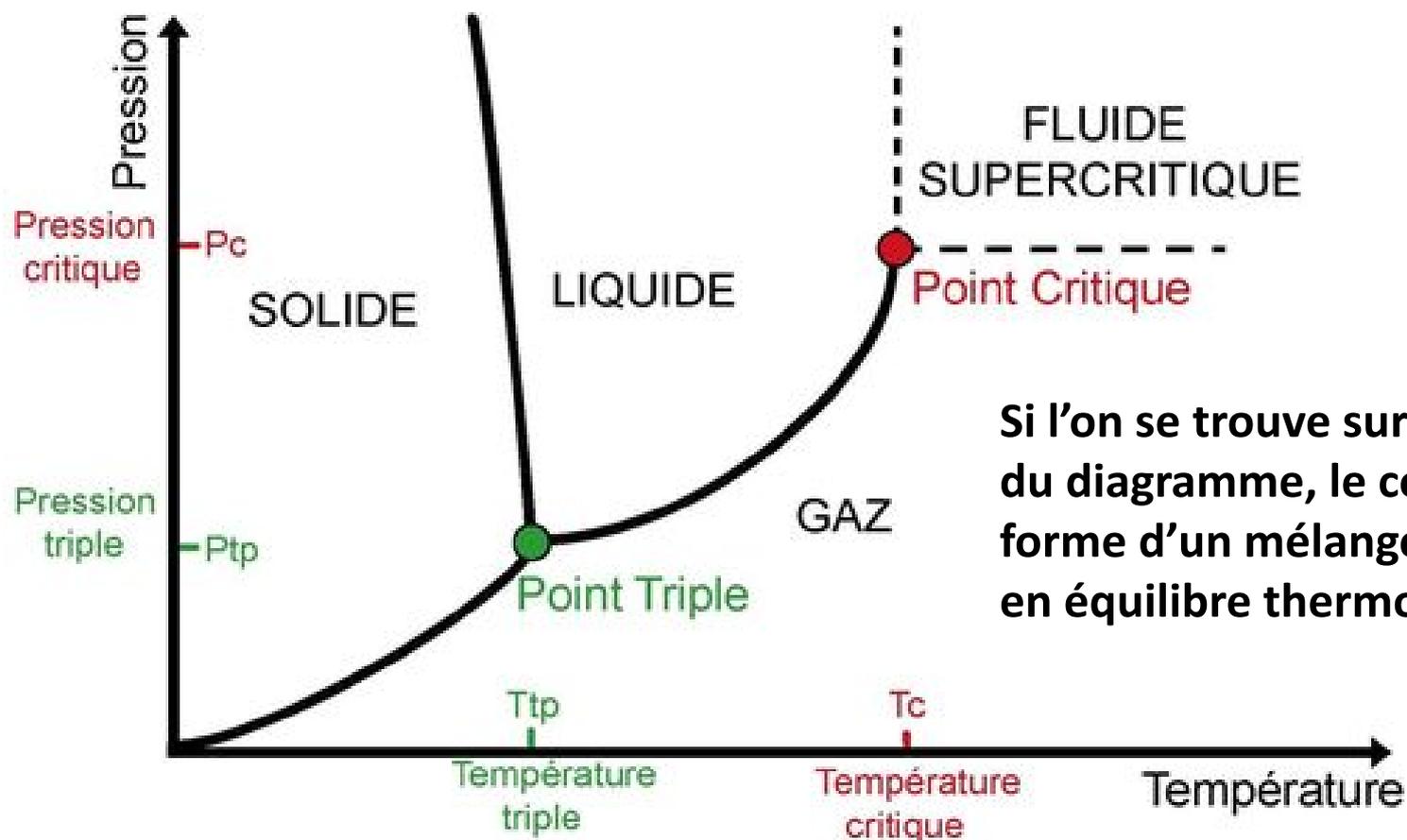
Diagramme (P, T)



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

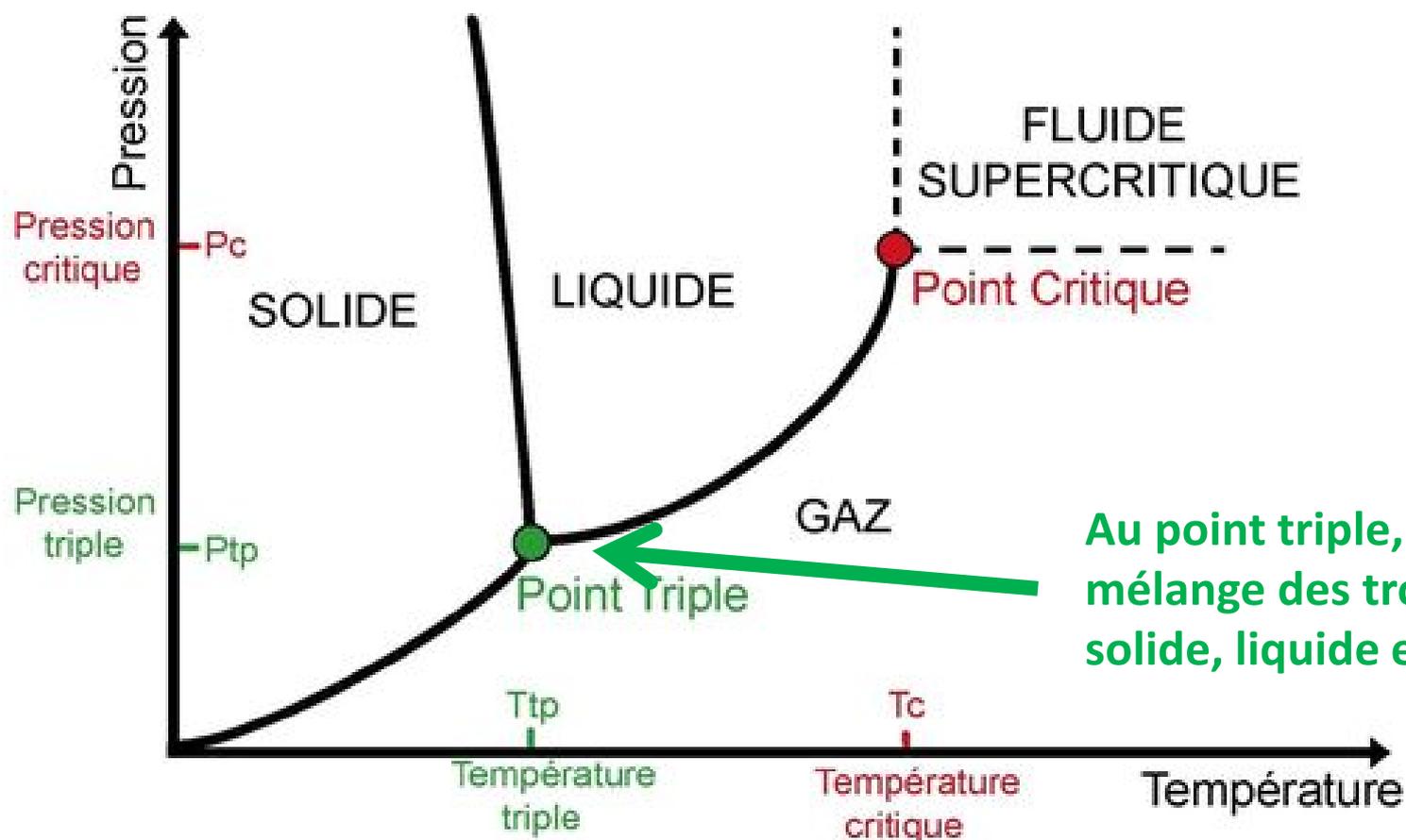


Si l'on se trouve sur une des courbes du diagramme, le corps est sous la forme d'un mélange de deux phases en équilibre thermodynamique.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

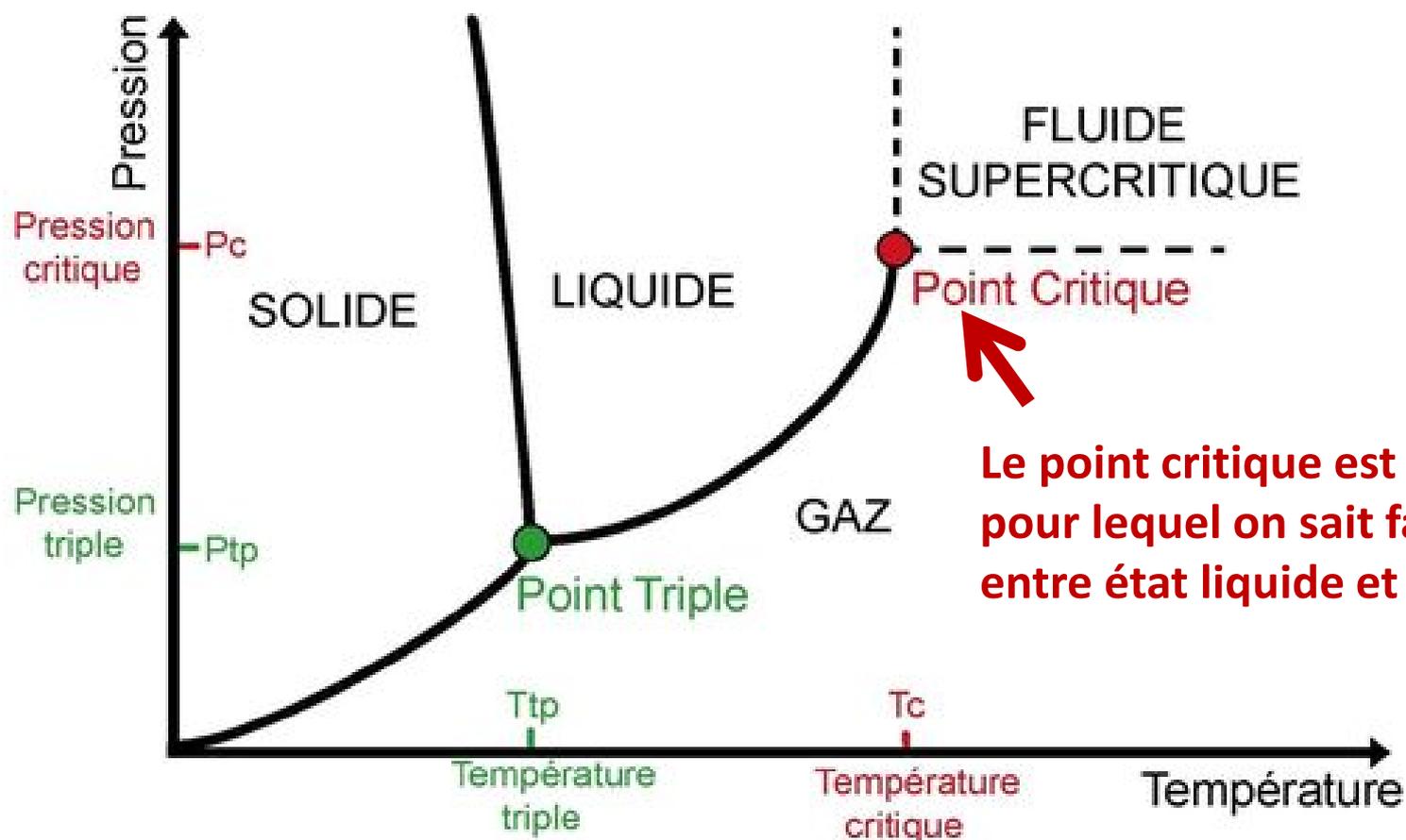


Au point triple, le corps est un mélange des trois phases: solide, liquide et gazeuse.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo



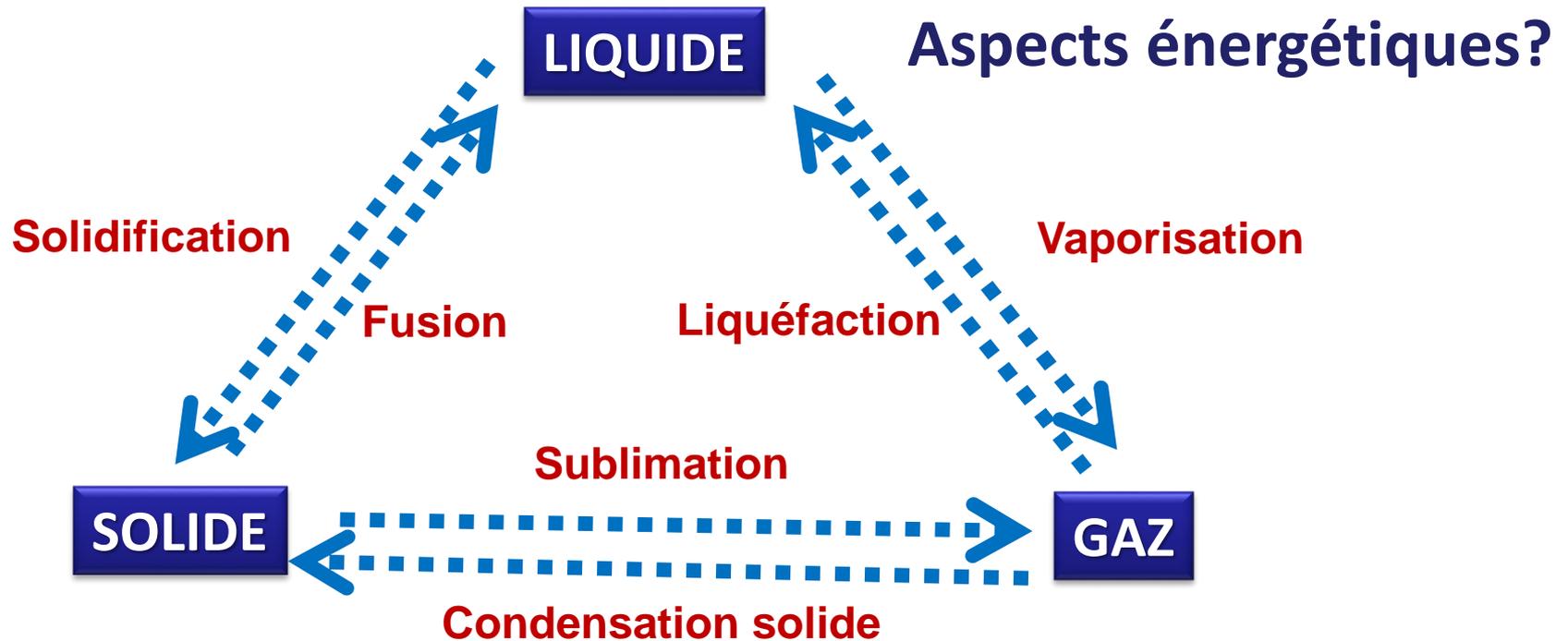
Le point critique est le dernier point pour lequel on sait faire la différence entre état liquide et état gazeux.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Les changements d'état



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

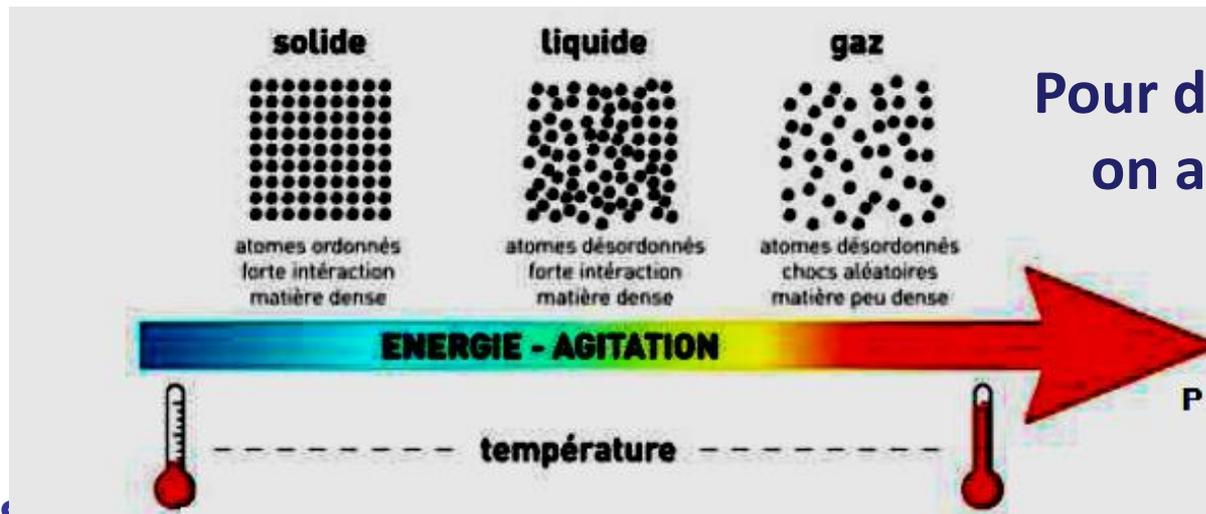
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Les changements d'état – Aspects énergétiques

Les changements d'état mettent en jeu la création ou la destruction de liaisons intermoléculaires extrêmement fortes.

⇒ **Un changement de phase permet notamment le stockage ou le déstockage d'importantes quantités d'énergie.**



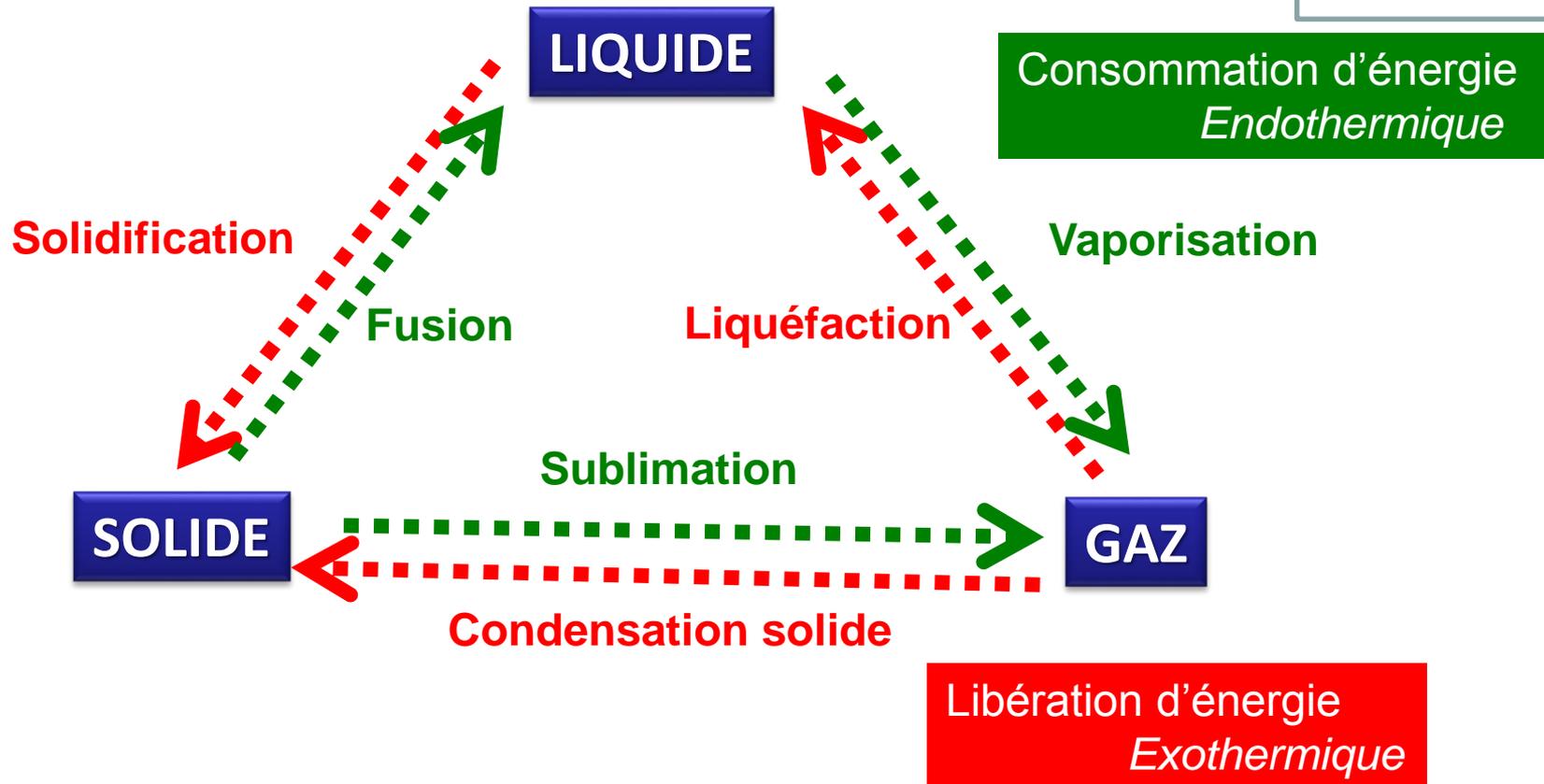
**Pour désordonner...
on apporte de l'énergie!**



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Estimation de l'énergie consommée ou libérée

Soit un changement d'état qui s'opère à **pression constante** et à la **température d'équilibre** correspondant à cette pression



Température de changement d'état
(fusion, vaporisation, sublimation)

*Indépendante du sens de changement d'état,
elle dépend du corps considéré, du type de
changement d'état, de la pression.*

L'énergie qu'il faut fournir
(ou extraire) par unité de
masse est appelée
**chaleur latente de
changement d'état.**

Enthalpie de changement d'état

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Chaleur latente (ou enthalpie) de changement d'état (notée **L**)

exprimée en **J/kg**

dépend du corps considéré, du type de changement d'état.

Ne pas retenir

Substance	Enthalpie fusion kJ/kg	Température fusion °C	Enthalpie vaporisation kJ/kg	Température ébullition °C
Ammoniac	332,17	-77,74	1 369,00	-33,34
Eau	334,00	0,00	2 264,76	100,00
Ethanol	108,00	-114,00	855,00	78,30

Pression atmosphérique

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

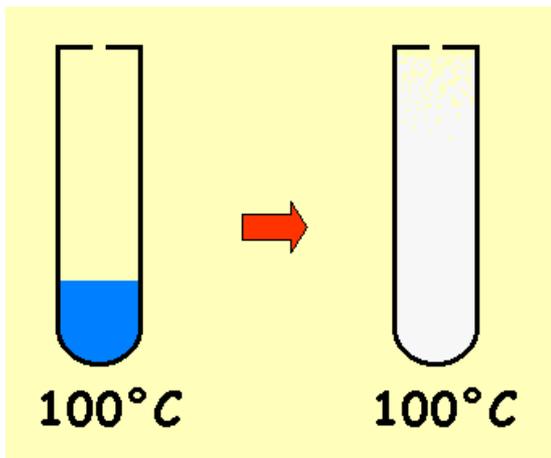
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple

Calculer la chaleur Q à apporter à 10 g d'eau pour les changer en vapeur sous pression atmosphérique.

Chaleur latente de vaporisation de l'eau à 100°C : $L_{\text{vap. eau}} = 2265 \text{ kJ/kg}$



$$Q = L \times m = 2265000 \times 0,010 = \mathbf{22650 \text{ J}}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

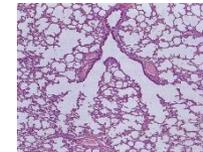
Exemple d'application biomédicale

... Evaporation et régulation thermique



Chez l'homme, l'évaporation de l'eau joue un très grand rôle dans l'élimination de l'excès de chaleur.

Evaporation par les alvéoles



Evaporation par la peau



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

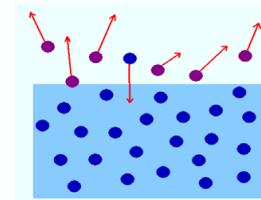
L'évaporation

... un changement d'état particulier

Phénomène surfacique
Phénomène lent

Consommation d'énergie
Réaction endothermique

Passage **progressif**
d'un corps de l'état liquide à l'état gazeux



⚠ évaporation \neq ébullition

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

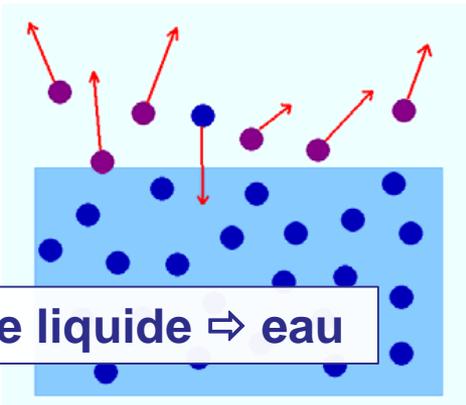
Zone réservée pour la vidéo

Contexte

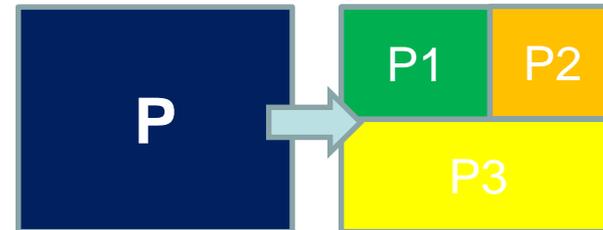
... dont vapeur d'eau

Phase gaz \Rightarrow mélange de gaz

La pression de ce mélange est la somme des pressions de tous les gaz qui le composent (Loi de Dalton)



Phase liquide \Rightarrow eau



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

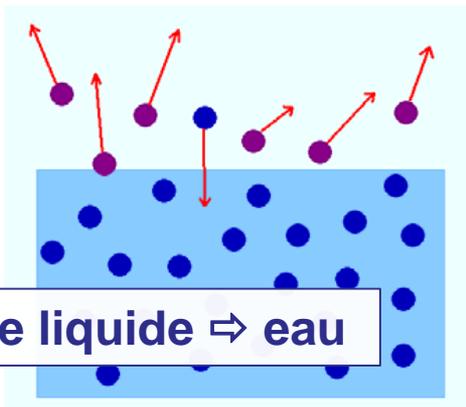
Contexte

... dont vapeur d'eau

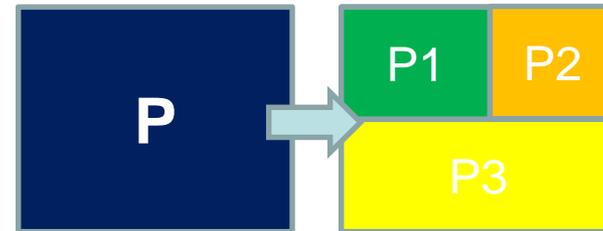
Phase gaz \Rightarrow mélange de gaz

La pression de ce mélange est la somme des pressions des gaz qui le composent (Loi de Dalton)

La pression due à la vapeur d'eau, notée P_v , est appelée **pression de vapeur** ou **pression partielle de vapeur**.



Phase liquide \Rightarrow eau



$$P_1 = P_{\text{eau-vapeur}} = P_v$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

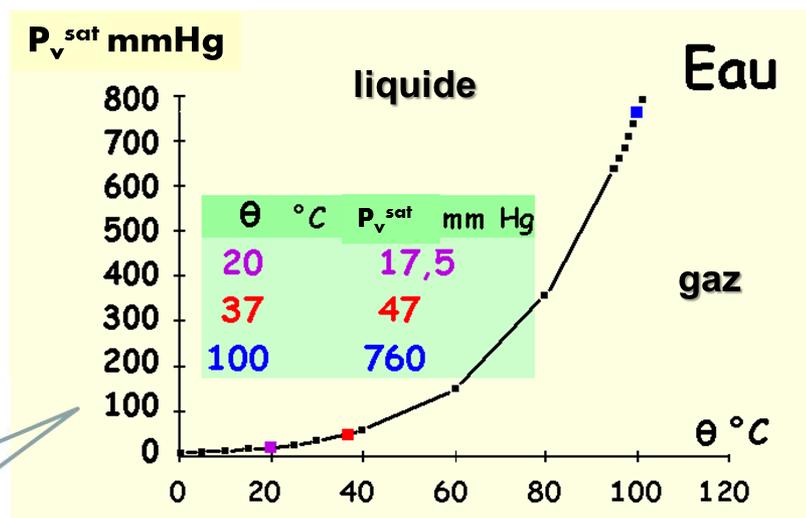
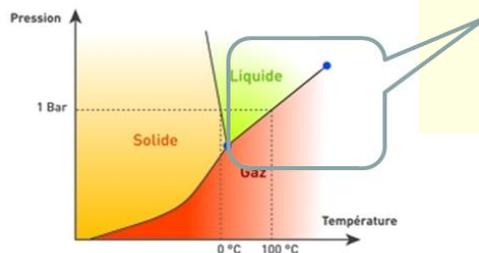
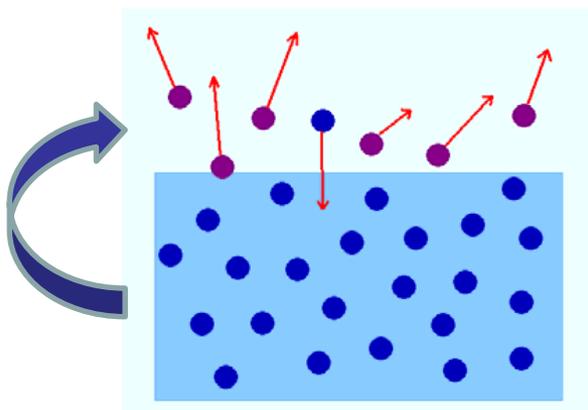
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Principe

L'évaporation consiste au **passage** de molécules d'eau de la **phase liquide** à la **phase gazeuse** afin que la **pression partielle de vapeur** dans le gaz soit égale à la **pression de vapeur saturante**.

$$P_v \nearrow P_v^{sat}$$



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

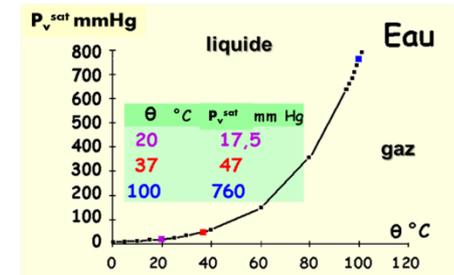
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Définitions

Pression de vapeur saturante (P_v^{sat})

La pression de vapeur saturante est la **pression** à laquelle la phase gazeuse d'une corps est en **équilibre** avec sa phase liquide. Elle dépend exclusivement de la température.



Taux d'humidité relative (HR)

Il s'agit du **rapport** entre la **pression partielle de vapeur** et la **pression de vapeur saturante**.

$$HR = \frac{P_v}{P_v^{sat}}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

En résumé...

- ✓ Il y aura évaporation tant que la **pression partielle de vapeur sera inférieure à la pression de vapeur saturante.**
- ✓ Quand la pression partielle de la vapeur est égale à la pression de vapeur saturante, **les phases gazeuse et liquides sont dites en équilibre.**

*La pression de vapeur saturante est la pression partielle de la vapeur à partir de laquelle on ne peut plus former de molécules sous forme vapeur dans l'air; l'air est **saturé**.*

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Illustration

Evaporation d'une flaque au soleil

Conditions ambiantes de température et de pression

$$T = 293 \text{ K} \quad P = 760 \text{ mmHg}$$

Humidité relative (HR) 50 %

Pression de vapeur saturante à 293 K

$$P_v^{\text{sat}} = 17,5 \text{ mmHg}$$

Evaporation?

$$P_v = 50\% P_v^{\text{sat}} = 8,75 \text{ mmHg}$$

$$P_v < P_v^{\text{sat}} = 17,5 \text{ mmHg}$$

Evaporation possible

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Attention

Ebullition \neq évaporation

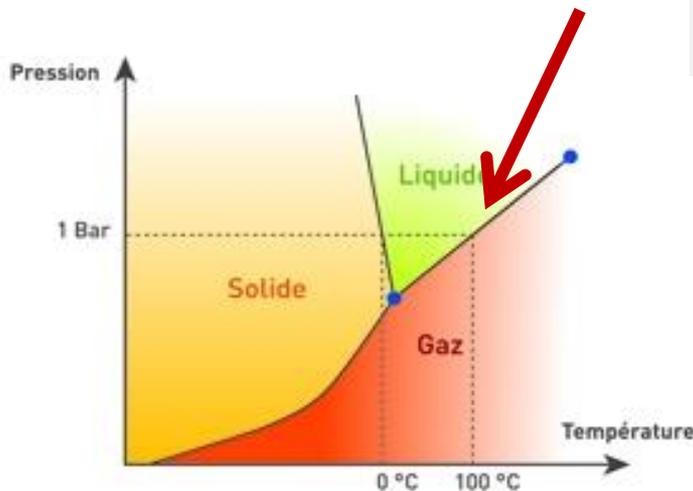
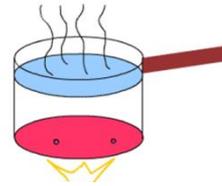
On veut porter de l'eau à ébullition dans une casserole, sous la pression atmosphérique.

Température d'ébullition sous **1 bar**

$T = 373 \text{ K}$

Pression de vapeur saturante à **373 K**

$P_v^{\text{sat}} = 1 \text{ bar (760 mmHg)}$



Formation de bulles de vapeur au sein du liquide

Bulles de vapeur qui viendront augmenter la pression partielle de l'eau gazeuse dans l'atmosphère jusqu'à atteindre le niveau de la pression saturante de l'eau

... ou jusqu'à ce que la casserole soit vide!!

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Vitesse d'évaporation

Pour une pression ambiante et températures fixées, la masse de liquide qui s'évapore par unité de temps est :

$$\frac{dm}{dt} = K \times S \times (P_v^{sat} - P_v)$$

kg.s⁻¹

K, constante en kg.s⁻¹.m⁻².Pa⁻¹

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

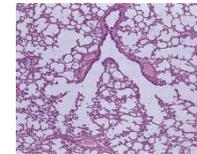
Zone réservée pour
la vidéo

Exemple d'application biomédicale

... Evaporation et régulation thermique



Evaporation par les alvéoles



Evaporation par la peau



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

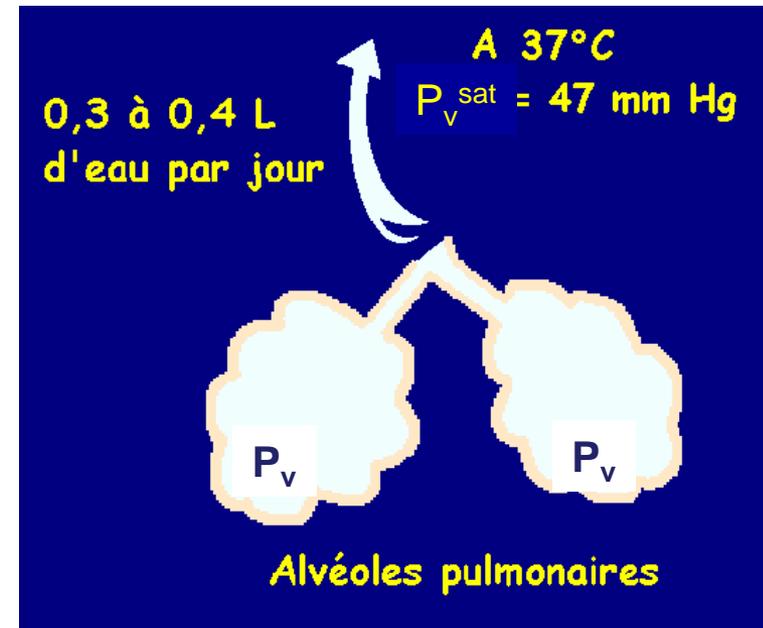
Zone réservée pour
la vidéo

Evaporation par les alvéoles

Cette élimination est de l'ordre de **300 à 400 g d'eau par jour**.

La masse de vapeur d'eau éliminée par la respiration dépend de l'humidité de l'air inspiré :

- Si l'air inspiré est **saturé en vapeur d'eau**, l'élimination de l'eau du corps par les alvéoles pulmonaires sera **nulle**.
- Si l'air inspiré est **sec**, l'élimination sera **maximale**.



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Evaporation par la peau - *Perspiration insensible*



Peau

Perspiration insensible

~ 0,7 L d'eau par jour

C'est un passage de l'eau à travers l'épiderme par simple diffusion.

Cette eau n'est pas sécrétée par les glandes sudoripares : il s'agit d'un phénomène d'évaporation à peu près **constant**, responsable de l'évaporation de 600 à 800 g d'eau par jour.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

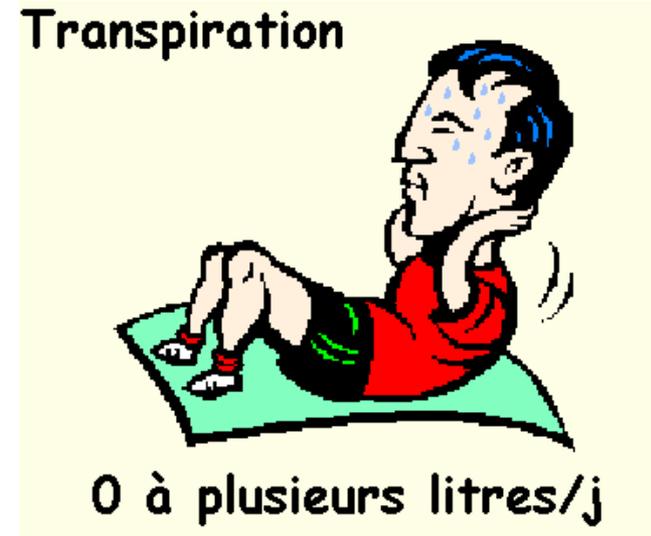
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Evaporation par la peau - *Transpiration*

La sueur est sécrétée par les glandes sudoripares ; composée essentiellement d'eau, elle contient entre autre de l'urée et des sels minéraux.

La transpiration varie fortement suivant les nécessités, pouvant atteindre par exemple **deux litres par heure** en cas de forte sudation.



Ce n'est pas la sécrétion de sueur qui élimine de la chaleur mais l'évaporation de cette sueur à la surface de la peau!

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Aspects énergétiques

Réaction endothermique / consommatrice d'énergie

Exemple

Quelle est la quantité de chaleur Q soustraite au milieu extérieur lorsque 10 g d'eau à 20°C s'évaporent ($L_{\text{vaporisation}} = 2454 \text{ kJ/kg}$ à 20°C)?

$$Q = 2454000 \times 0,010 = 24540 \text{ J} = \mathbf{5,8 \text{ kcal}}$$

L'évaporation par la peau prélève des calories...

**AGITATION THERMIQUE ET
PROPAGATION DE LA CHALEUR**

2

- 1. Agitation thermique, température et chaleur**
- 2. Propagation de la chaleur**

1. Agitation thermique, température et chaleur

L'**agitation thermique** consiste en des mouvements aléatoires et incessants des atomes, des molécules.

3 types de mouvements:

Translation



Rotation



$$\text{Energie cinétique d'une particule : } E_c = E_{c,T} + E_{c,R} + E_{c,V}$$

1. Agitation thermique, température et chaleur

L'agitation thermique correspond à
l'agitation incessante des atomes,

↗ Agitation thermique

↗ Energie cinétique de chaque molécule

↘ Liens qui retiennent les molécules entre elles

3 types de mouvement

Cohésion de la matière amoindrie

$$\text{Energie cinétique d'une particule : } E_c = E_{c,T} + E_{c,R} + E_{c,V}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Au niveau macroscopique, l'agitation thermique est associée à la **chaleur**, et ainsi à la **température**.

Cas des gaz parfaits

La moyenne des E_c des particules est proportionnelle à la température absolue T .

$$\overline{E_c} = \frac{1}{2} \times m \times \overline{v^2} \approx \frac{3}{2} \times k_B \times T$$

Ne pas retenir

k_B , constante de Boltzmann

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

La température

- Grandeur permettant d'évaluer la **chaleur**
- Grandeur repérée par un thermomètre



La température d'un corps donne une indication du degré d'agitation des molécules.

Echelle de température

... définie à l'aide de deux points fixes
appelés «points de référence»

Echelle Celsius
Echelle Fahrenheit
Echelle Kelvin

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Echelle CELSIUS ou centésimale ($^{\circ}\text{C}$)

θ en $^{\circ}\text{C}$

Echelle Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$)

$$T \text{ en } ^{\circ}\text{F} \quad \Rightarrow \quad T = 32 + 1,8 \times \theta$$

Echelle des températures absolues dite KELVIN (K)

Unité SI

$$T \text{ en K} \quad \Rightarrow \quad T = \theta + 273$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

La chaleur

Associée au changement de température d'un corps dans un état donné.

Pour élever (ou baisser) la température d'un corps, il faut lui apporter (ou lui ôter) de la chaleur.

La quantité de chaleur Q à apporter (ou à ôter) dépend :

- de la **nature** du corps et de son **état** (*solide, liquide ou gazeux*),
- de sa **masse m** ,
- de l'élévation (ou baisse) de température **ΔT** .

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Expression de la quantité de chaleur à apporter
(ou ôter)

$$Q = c \times m \times \Delta T$$



Capacité calorifique massique du corps
ou Chaleur spécifique du corps

$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Avec	Q	Quantité de chaleur ou énergie	J
	m	Masse	kg
	ΔT	Température	K

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

$$Q = c \times m \times \Delta T$$

- Plus la chaleur massique d'un corps est grande, plus il est difficile de faire varier sa température.
- La chaleur massique de l'eau est supérieure à celle des autres liquides : on parle de *l'inertie calorifique de l'eau*.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

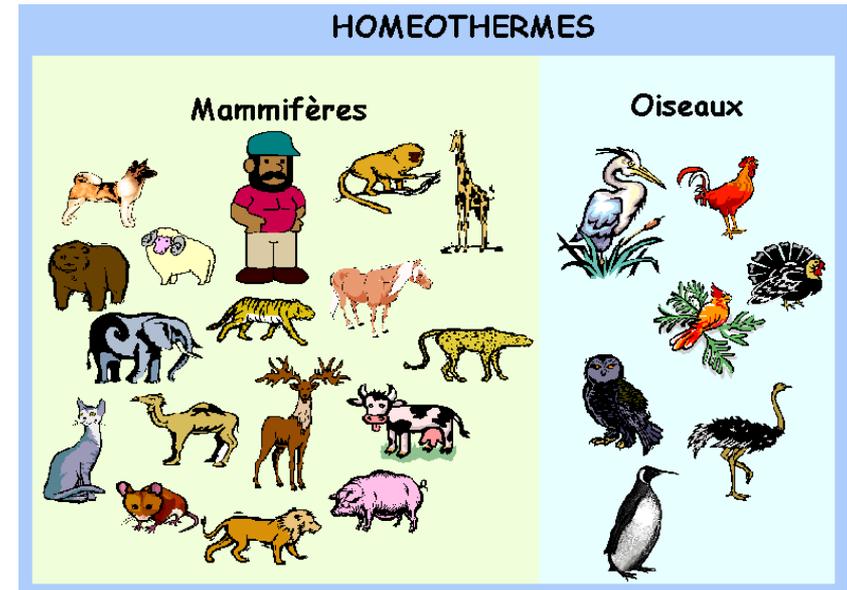
Conséquences de l'inertie calorifique de l'eau

Chez les êtres vivants homéothermes, l'eau contribue à garder constante leur température interne.

Exemples de température interne :

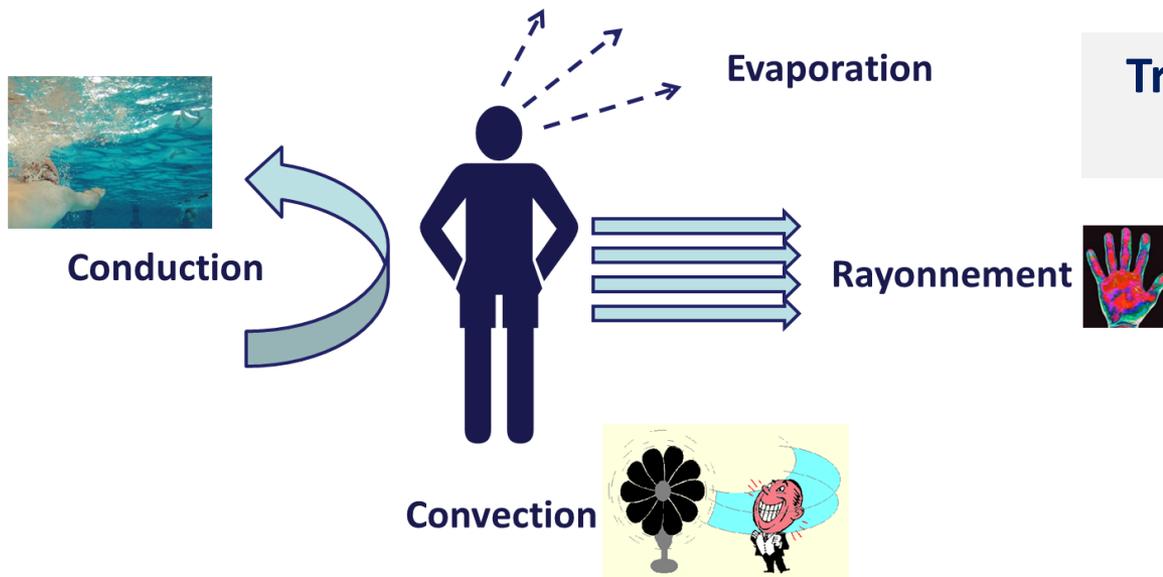
Homme : 37°C

Chien : $38,5^{\circ}\text{C}$



2. Propagation de la chaleur

... Les échanges thermiques du corps humain



Trois modes de propagation
de chaleur

Conduction

Convection

Rayonnement

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

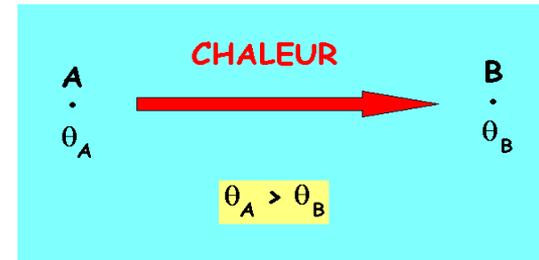
Zone réservée pour
la vidéo

Propagation de la chaleur

⇒ **Transfert d'énergie thermique**

... basé sur les deux premiers principes de la thermodynamique.

Lorsque deux points sont à des températures différentes, de la chaleur a tendance à se déplacer jusqu'à égalisation des températures.



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

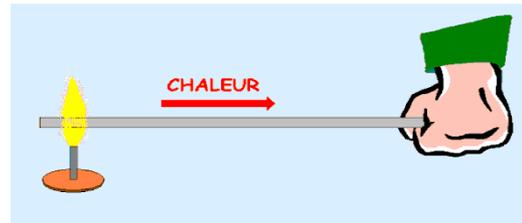
Zone réservée pour
la vidéo

Propagation par **conduction thermique**

L'agitation thermique se propage à l'intérieur de la matière grâce à des *chocs entre les particules*.

Il s'agit du transfert de la chaleur d'un endroit à l'autre d'un milieu, **sous l'influence d'un gradient de température, sans mouvements macroscopiques**.

La conduction caractérise le transfert de chaleur d'un corps à un autre corps en contact physique avec le premier.



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur **dans les solides** ou **entre corps solides contigus**.

La conduction intervient également dans les liquides et les gaz mais son effet est généralement marginal par rapport à celui de la convection.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

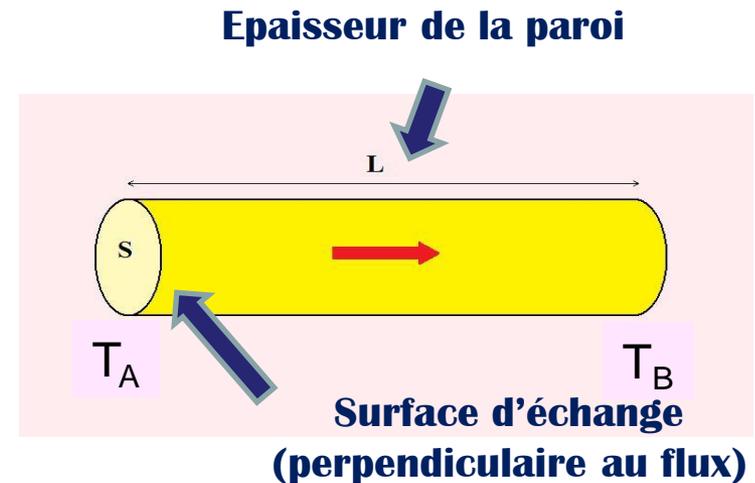
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Expression du flux de chaleur en conduction

Pour quantifier ce phénomène de propagation, en régime permanent et pour des corps de forme géométrique simple, le **flux thermique Φ** peut être quantifié à partir de la **loi de Fourier**.

La **loi de Fourier** traduit la relation existant, en chaque point d'un corps, entre le flux thermique Φ et le gradient de température.



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Loi de Fourier - Cas d'un matériau homogène

$$\Phi = \frac{\sigma_T \times S \times (T_A - T_B)}{L}$$

m^2 K
 m

Puissance
en W

Le sens de l'écoulement de chaleur coïncide avec celui du gradient de température: **l'écoulement de chaleur s'effectue dans le sens des températures décroissantes.**

σ_T est la **conductivité thermique**, en $W.m^{-1}.K^{-1}$

Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre.

σ_T dépend du **matériau** et de la **température**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemples de conductivités thermique

Matériau	σ_T en $W.m^{-1}.K^{-1}$ (37°C)
Cuivre	400
Eau	0,6
Graisse	0,1
Air sec	0,025

Ne pas retenir

Remarque

A température égale, le refroidissement de l'organisme est beaucoup plus rapide dans l'eau que dans l'air sec (20 à 30 fois).

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Propagation par **convection thermique**

La convection caractérise la propagation de la chaleur dans un fluide, gaz ou liquide, dont les **molécules sont en mouvement**.

La convection implique le transport de la chaleur par une partie d'un fluide qui se mélange avec une autre partie.

La convection concerne exclusivement les fluides (gaz ou liquides) puisqu'elle prend sa source dans un **transport macroscopique de matière**.

Remarque

Etude de la convection étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

La **convection** peut être **naturelle** ou **forcée**.

Convection naturelle

Le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide

Convection forcée

Le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

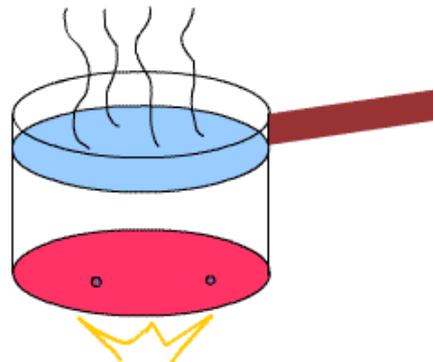
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Convection naturelle

Le mouvement du fluide est spontané

Exemple



Casserole remplie d'eau sur
le feu

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

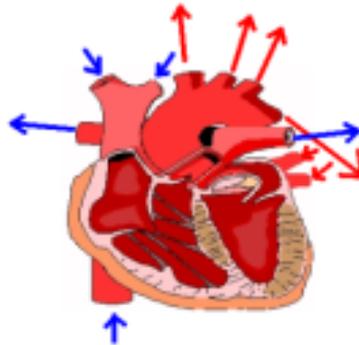
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Convection **forcée**

Le mouvement du fluide est provoqué par une circulation artificielle

Exemple



Circulation du sang grâce à
la pompe cardiaque

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

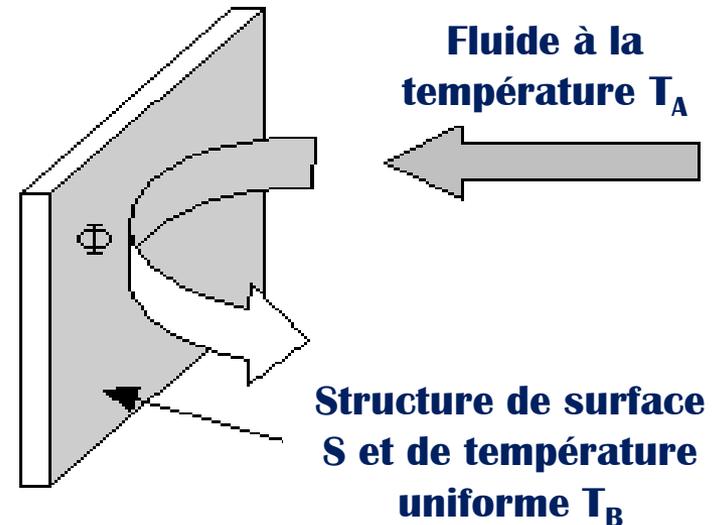
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Expression du flux de chaleur en convection

Pour quantifier les échanges de chaleur par convection se produisant entre un fluide et la paroi d'une structure, on peut estimer le **flux thermique Φ** à partir de la **loi de Newton**.

Quel que soit le type de convection (libre ou forcée) et quel que soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur transmis est donné par la **loi de Newton**.



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Loi de Newton

Pour un écoulement à température T_A autour d'une structure à température de surface uniforme T_B et d'aire S , l'expression du **flux de chaleur en convection Φ** est la suivante :

m^2 K

$$\Phi = h \times S \times (T_A - T_B)$$

Puissance
en W

L'écoulement de chaleur
s'effectue dans le sens des
températures décroissantes.

h est le **coefficient d'échange par convection**, en $W.m^{-2}.K^{-1}$

h dépend des **caractéristiques** du fluide, de la **nature de l'écoulement**, de la **température**, de la **forme de la surface d'échange**...

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemples de coefficients d'échange par convection

Type de convection	Matériau	h en $W.m^{-2}.K^{-1}$ conditions normales de pression et de température
Convection naturelle	Gaz	5 - 30
	Eau	100 - 1000
Convection forcée	Gaz	10 - 300
	Eau	300 - 12000
	Huile	50 - 1 700

Ne pas retenir

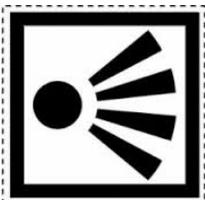
UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

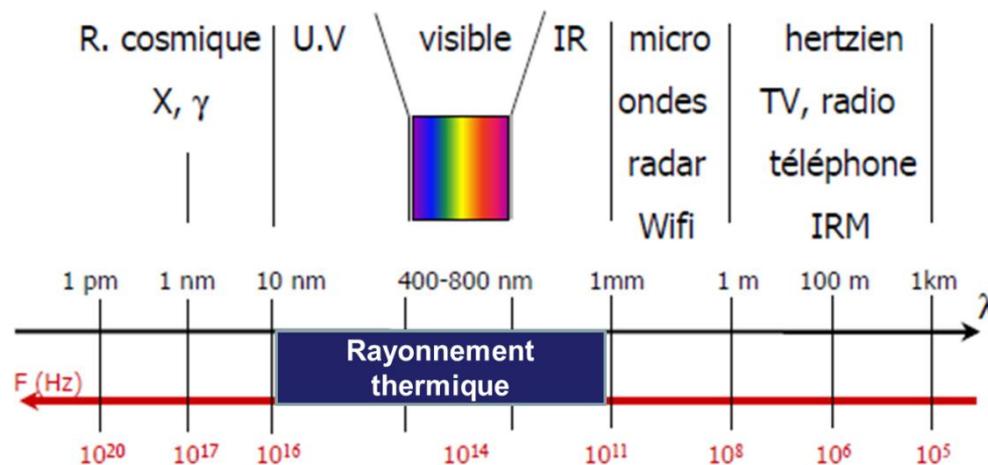
Zone réservée pour la vidéo

Propagation par rayonnement

Le rayonnement est le transfert de chaleur d'un corps à un autre, sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace.



Le **rayonnement thermique** concerne les longueurs d'ondes comprises entre 0,1 mm et 10 nm et va de l'infrarouge à l'ultraviolet en couvrant le visible.



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

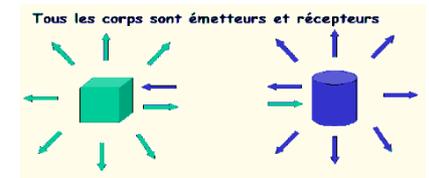
Propagation par **rayonnement thermique**

Dans la transmission de chaleur par **rayonnement**, le transfert thermique s'effectue par des **vibrations électromagnétiques** qui se propagent en ligne droite sans aucun support de matière.

Tout corps à la température $T \neq 0$ K émet un rayonnement électromagnétique.

Remarques

Tout corps est à la fois émetteur et récepteur.



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

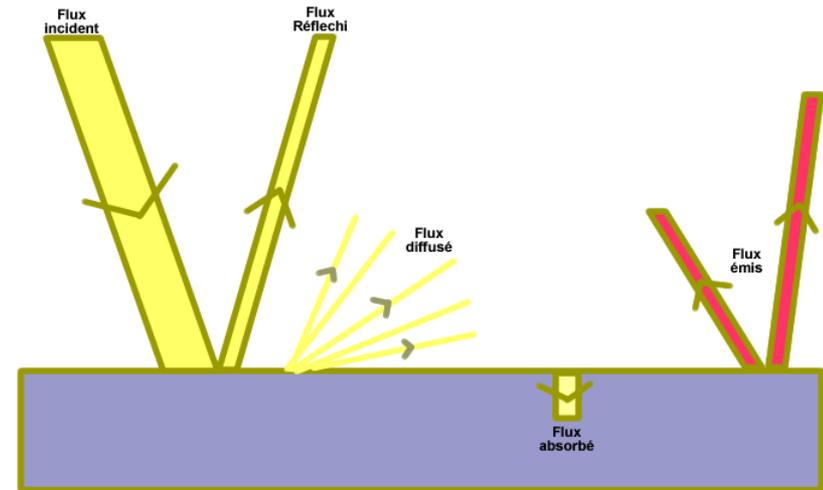
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Quelques rappels...

Lorsqu'un flux d'énergie rayonnée rencontre un corps, une partie de l'énergie est absorbée, une partie est réfléchi, une partie continue son trajet après avoir traversé le corps.

Si toute l'énergie incidente est absorbée, le corps est appelé **corps noir** ou **radiateur intégral**.



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Corps noir

- ❑ Le corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit.

Dans ces conditions, le flux réfléchi ou transmis est nul et le **flux partant est seulement constitué du flux émis.**

Le corps noir est un **absorbeur parfait.**

- ❑ Un corps noir à la température absolue T émet **toute une gamme de longueurs d'ondes.**

⇒ **Spectre d'émission**

Les longueurs d'onde du rayonnement reçu et du rayonnement émis ne sont pas forcément les mêmes.

Un corps éclairé par le soleil (donc dans le visible) réémet à température ambiante dans l'infrarouge.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

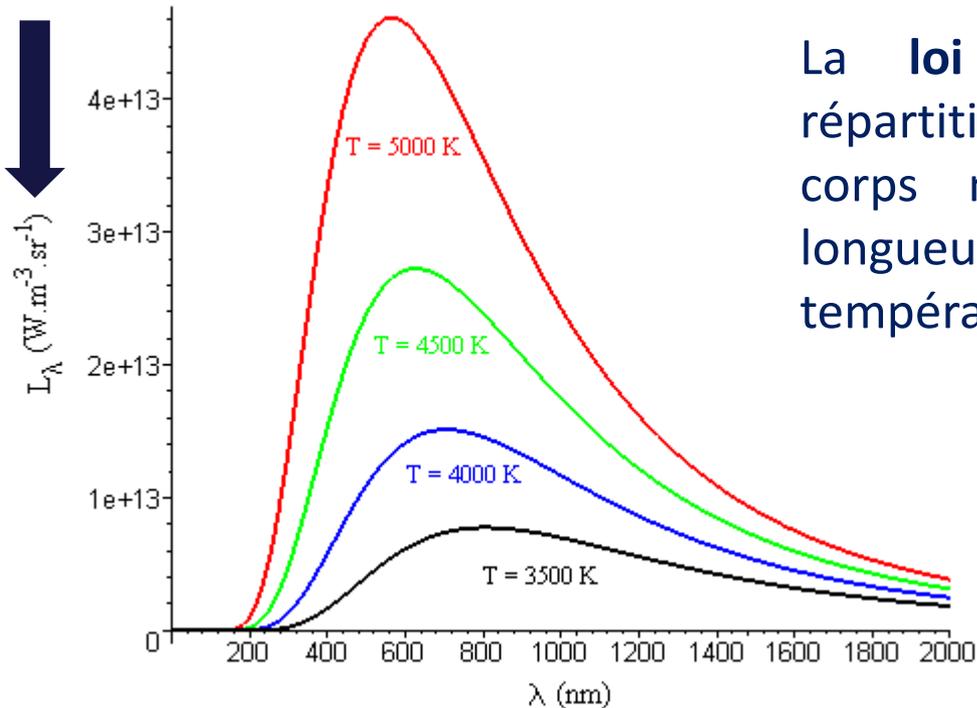
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Corps noir et spectre d'émission

Luminance

Flux d'énergie émis par unité de surface, dans un angle solide $\Omega = 1$ sr, normal à cette surface.



La **loi de Planck** donne la répartition de la luminance d'un corps noir en fonction de la longueur d'onde λ et de la température T .

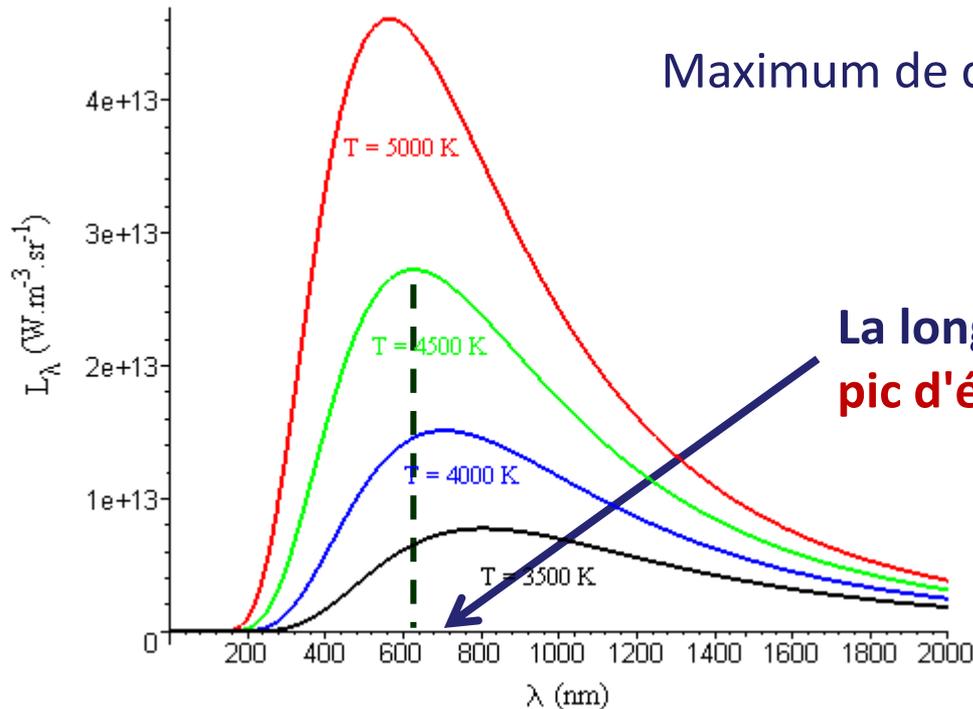
En 1893, **Wien** découvrit que la lumière émise par un corps noir se distribue autour d'une longueur d'onde privilégiée inversement proportionnelle à la température.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Corps noir et spectre d'émission



Maximum de ce spectre donné par la **loi de Wien**

La longueur d'onde correspondante est le **pic d'émissivité.**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Loi du déplacement de Wien

Cette loi permet de calculer la longueur d'onde λ_m qui correspond au maximum d'énergie rayonnée

$$m \quad \lambda_m = \frac{b}{T} \quad K$$

avec $b \cong 3 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$

b , constante de Wien

- Aux températures courantes, λ_m se situe dans l'infrarouge (corps humain).
- Si la température augmente, λ_m se situe dans le visible (soleil).

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Loi de Stefan-Boltzmann

Soit un corps noir de surface **S** et de température **T**

- Puissance électromagnétique **émise**

$$W \quad P_e = \sigma \times S \times T^4 \quad \text{avec} \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

σ , constante de *Stefan Boltzmann*

- Puissance **absorbée** (environnement à la température **T₀**)

$$W \quad P_a = \sigma \times S \times T_0^4$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

$$P_e = \sigma \times S \times T^4$$

$$P_a = \sigma \times S \times T_0^4$$

La puissance **nette rayonnée** par le corps noir est:

$$P = P_e - P_a = \sigma \times S \times (T^4 - T_0^4)$$

Si le corps noir est à une température d'équilibre T , la puissance qu'il absorbe est égale à la puissance qu'il émet.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple

On assimile le soleil à **un corps noir** à la température $T = 6\,000\text{ K}$.

- Calculer la puissance émise par la surface du soleil ($R_S = 0,7 \times 10^6\text{ km}$).
- Calculer la longueur d'onde où le flux solaire est maximal.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

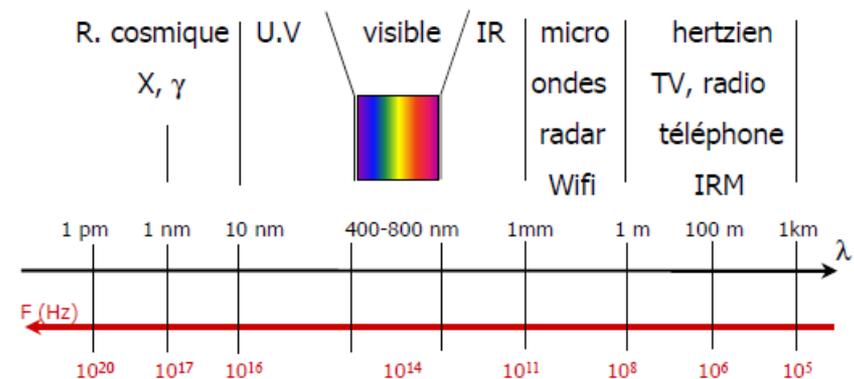
Exemple

$$P_e = \sigma \times S \times T^4 = 5,67 \times 10^{-8} \times 4 \times \pi \times (0,7 \times 10^9)^2 \times 6000^4$$

$$P_e = 4,52 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{0,003}{6000} \approx 5 \times 10^{-7} \text{ m} = 500 \text{ nm}$$

Pour le soleil, le maximum de l'émission se situe dans le **visible**.

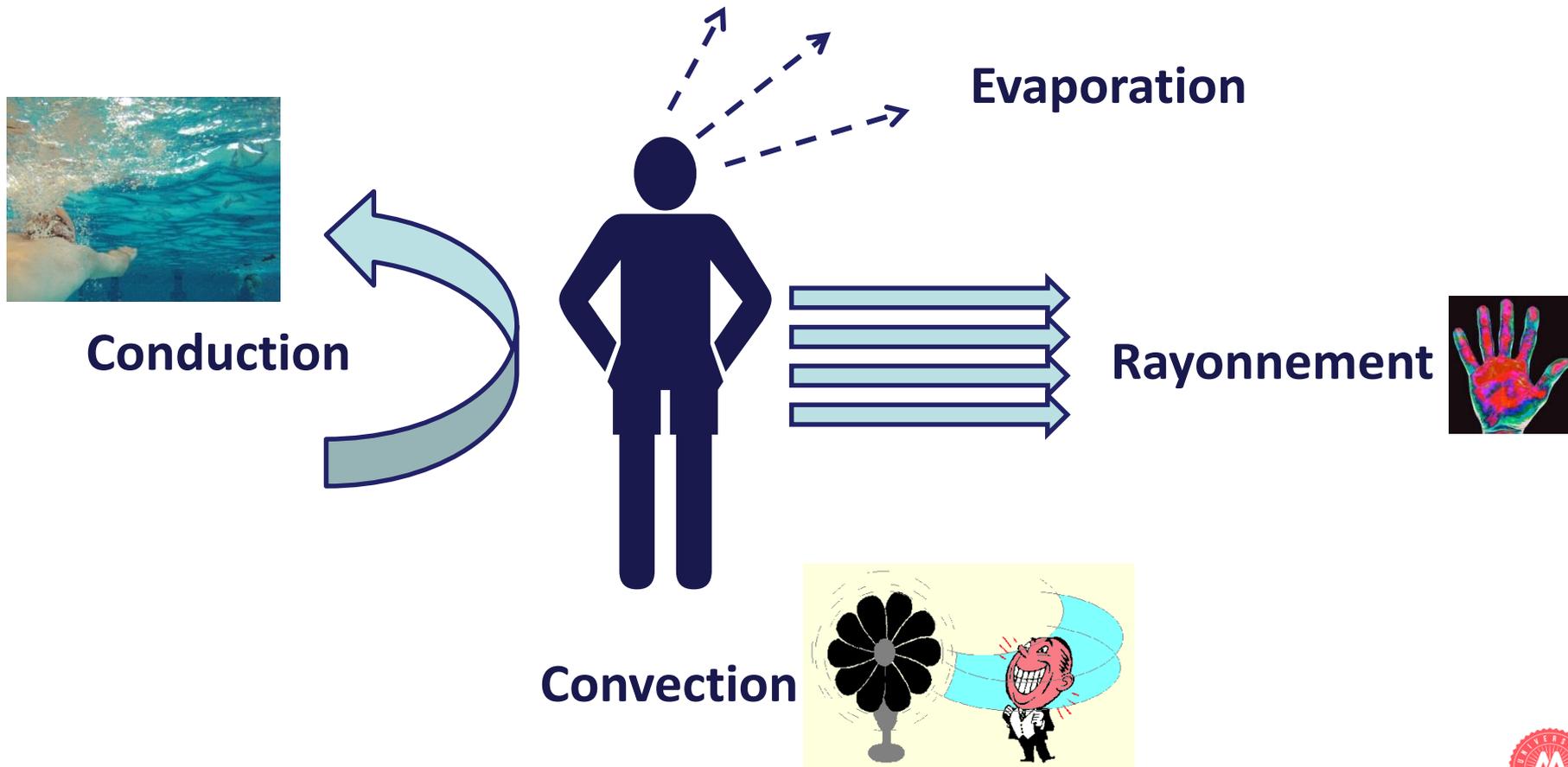


UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

... Les échanges thermiques du corps humain



**EQUATIONS FONDAMENTALES
ET THÉORIES associées au fluides**

3

- 1. Equation fondamentale de la statique des fluides incompressibles**
- 2. Théorie des gaz parfaits**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

L'état gazeux et l'état liquide présentent des similarités ⇒ **ce sont des fluides**

Atomes et molécules mobiles...

Gaz et liquides n'ont pas de forme propre et présentent la propriété de pouvoir **s'écouler**.

Les **liquides** sont quasiment **incompressibles** tandis que les **gaz** sont essentiellement **compressibles**.

Principales caractéristiques d'un fluide :
Mobilité - Pression - Viscosité

Un fluide peut être étudié :

- en situation immobile

☞ **Statique des fluides**

notion de pression

- en écoulement

☞ **Dynamique des fluides**

notion de débit

Mécanique des fluides

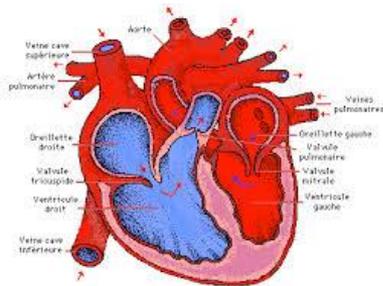


UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

... Mécanique des fluides et corps humain



BIOPHYSIQUE DU COEUR ET DE LA CIRCULATION

HEMODYNAMIQUE



1. Equation fondamentale de la statique des fluides incompressibles

- ✓ Définition de la pression
- ✓ Principe fondamental de la statique des fluides
- ✓ Théorème d'Archimède

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

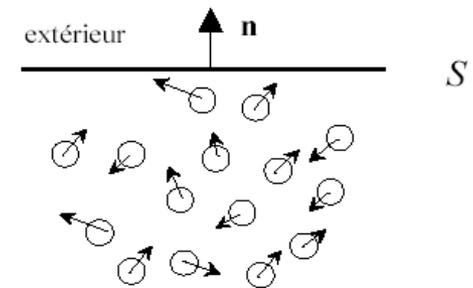
Définition de la pression

A l'échelle moléculaire, un fluide au repos est composé de molécules qui, si leur vitesse moyenne est nulle, sont néanmoins animées d'une vitesse aléatoire résultant des interactions entre elles (collisions, répulsions de Van der Waals...).

Lorsqu'on place une paroi solide de surface S au contact de ces molécules, elles vont entrer en collision avec cette paroi.

⇒ Il en résulte une force moyenne F dite *force de pression*.

⇒ Cette force ramenée à la surface S est appelée *pression P* .



$$P = \frac{F}{S}$$

Unités SI : Pascal (Pa ou $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)

atm	cm de Hg	bar	Pa	m colonne d'eau
1	≈ 76	≈ 1	≈ 100000	≈ 10

Ne pas retenir



Principe fondamental de la statique des fluides

DÉMARCHE

- ❑ On considère une **particule de fluide**

Ensemble de molécules de taille macroscopique mais suffisamment petit pour que l'on puisse considérer que tout y est identique et uniforme.



- ❑ On identifie quelles sont **les forces qui agissent sur ces particules.**

Fluide au repos

⇒ Fluide en équilibre

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

❑ Les forces intérieures

Les particules intérieures à S exercent les unes sur les autres des *forces intérieures* (forces moléculaires) égales et opposées deux à deux (principe de l'égalité de l'action et de la réaction) et qui forment par conséquent un système équivalent à zéro.



❑ Les forces extérieures

Forces de surface

Les particules extérieures à S exercent sur les particules intérieures à S des forces extérieures (forces moléculaires). Ces forces s'exercent sur les particules de la surface puisqu'elles s'exercent qu'à très faible distance.

Forces de volume

Les particules à l'intérieur de l'élément de fluide sont soumises à des champs de forces extérieurs (électrique, pesanteur, magnétique...).

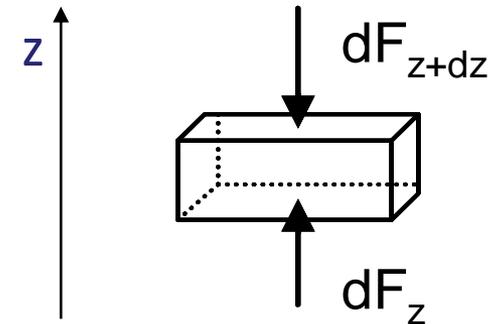
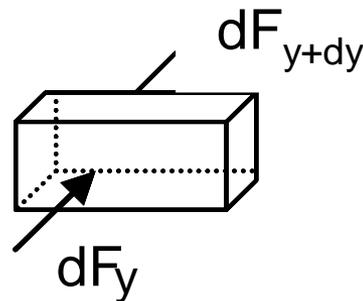
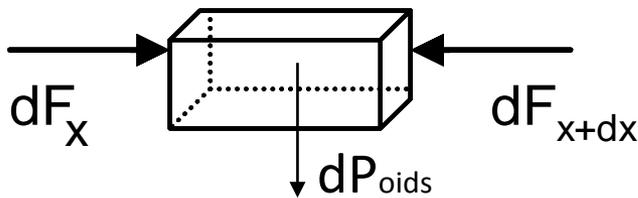
UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Bilan des forces sur un élément de volume de fluide

- ρ constante
- Seul champ extérieur : le champ de pesanteur



Force de volume

$$\vec{dP}_{oids} = dm \times \vec{g}$$

Forces de surface

$$d\vec{F}$$

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{0}$$

$$\vec{dP}_{oids} + d\vec{F} = \vec{0}$$

Le système est en équilibre

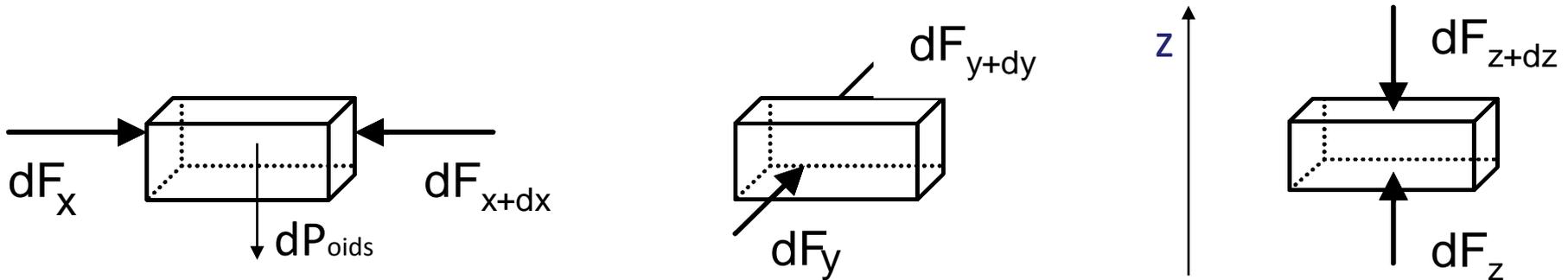
UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Bilan des forces sur un élément de volume de fluide

- ρ constante
- Seul champ extérieur : le champ de pesanteur



$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -dm \times g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} dF_x - dF_{x+dx} \\ dF_y - dF_{y+dy} \\ dF_z - dF_{z+dz} \end{pmatrix} = \vec{0} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} dF_x &= dF_{x+dx} \\ dF_y &= dF_{y+dy} \\ -dm \times g + (dF_z - dF_{z+dz}) &= 0 \end{aligned}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

$$-dm \times g + (dF_z - dF_{z+dz}) = 0$$

/ unité de volume dV

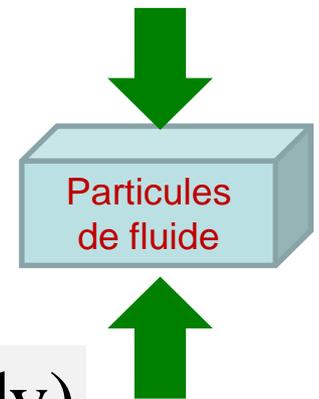
$$-\frac{dm \times g}{dV} + \frac{(dF_z - dF_{z+dz})}{dV} = 0$$

$$-\rho \times g + \frac{(dF_z - dF_{z+dz})}{dV} = 0$$

$$dV = dx \times dy \times dz$$

$$dP = \frac{dF}{dS}$$

$$dF_z - dF_{z+dz} = -dF = -dP \times dS = -dP \times (dx \times dy)$$



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

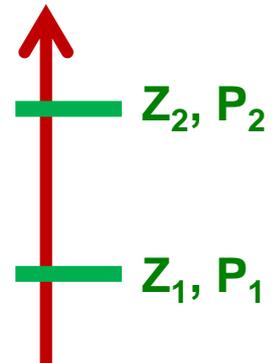
Zone réservée pour
la vidéo

$$-\rho \times g - \frac{dP}{dz} = 0 \quad \Rightarrow \quad dP = -\rho \times g \times dz$$
$$\int dP = -\rho \times g \times \int dz$$

La *forme intégrale* de la **relation fondamentale de la statique** des fluides est :

$$P_2 - P_1 = -\rho \times g \times (z_2 - z_1)$$

$$P_1 + \rho \times g \times z_1 = P_2 + \rho \times g \times z_2$$



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Principe fondamental de la statique

$$P + \rho \times g \times z = \text{constante}$$

Au sein d'un même fluide

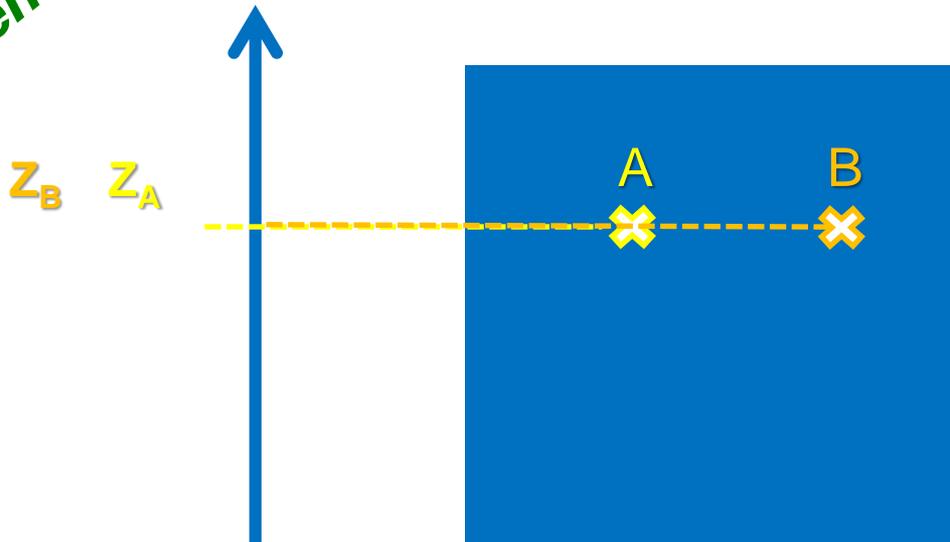
Si dans un liquide au repos deux points sont au même niveau horizontal alors la pression en ces deux points est identique.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple



$$P_A + \rho \times g \times z_A = P_B + \rho \times g \times z_B$$

$$\Rightarrow P_A = P_B$$

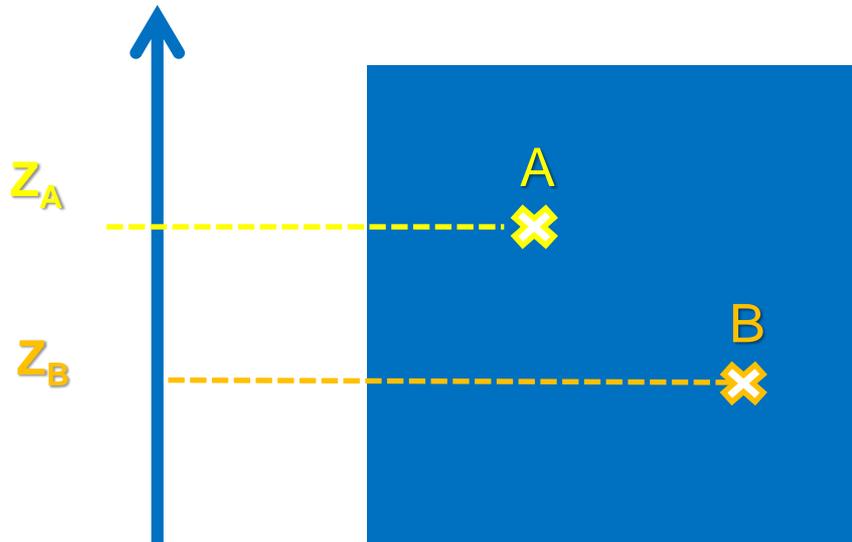
... dans un même fluide au repos

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple



$$P_A + \rho \times g \times z_A = P_B + \rho \times g \times z_B$$

$$\Rightarrow P_A = P_B + \rho \times g \times (z_B - z_A)$$

$$\Rightarrow P_A < P_B$$

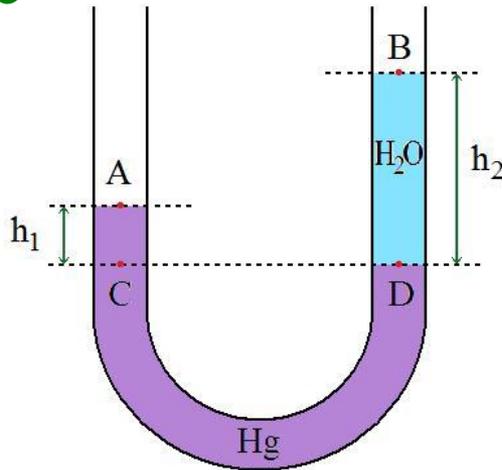
... dans un même fluide au repos

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple



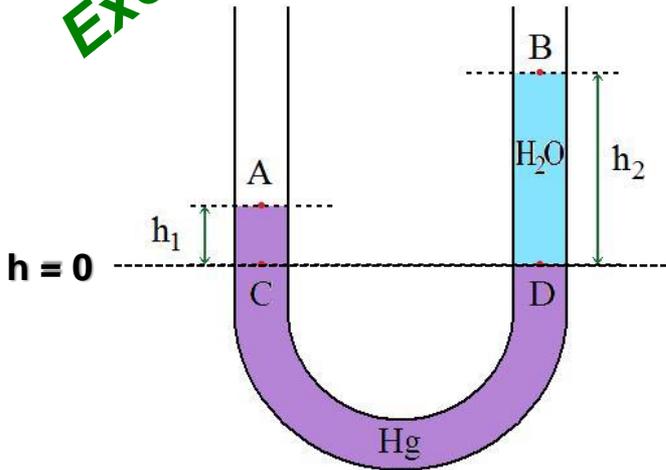
Quelle est la hauteur d'eau h_1 d'un tube en U ouvert à ses deux extrémités et contenant du mercure ($\rho_1 = 13,6 \text{ g.cm}^{-3}$) si dans la branche de droite une hauteur d'eau $h_2 = 27,2 \text{ cm}$ est mesurée?

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple



$$P_B + h_B \times \rho_{\text{eau}} \times g = P_D + h_D \times \rho_{\text{eau}} \times g \quad (1)$$

$$P_D + h_D \times \rho_{\text{Hg}} \times g = P_A + h_A \times \rho_{\text{Hg}} \times g \quad (2)$$

$$P_A = P_B = P_{\text{atm}}$$

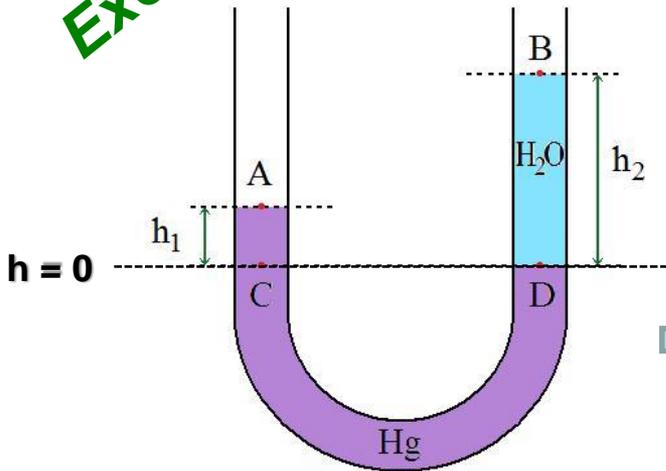
$$h_C = h_D = 0$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple



$$P_B + h_B \times \rho_{\text{eau}} \times g = P_D + h_D \times \rho_{\text{eau}} \times g \quad (1)$$

$$P_D + h_D \times \rho_{\text{Hg}} \times g = P_A + h_A \times \rho_{\text{Hg}} \times g \quad (2)$$

$$P_A = P_B = P_{\text{atm}} \quad h_C = h_D = 0$$

$$\Rightarrow P_{\text{atm}} + h_B \times \rho_{\text{eau}} \times g = P_D \quad (1)$$

$$P_D = P_{\text{atm}} + h_A \times \rho_{\text{Hg}} \times g \quad (2)$$

donc
$$P_{\text{atm}} + h_B \times \rho_{\text{eau}} \times g = P_{\text{atm}} + h_A \times \rho_{\text{Hg}} \times g$$

$$h_A = h_1 = \frac{h_B (= h_2) \times \rho_{\text{eau}}}{\rho_{\text{Hg}}} = \frac{0,272 \times 1000}{13600} = 0,02 \text{ m}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Théorème d'Archimède

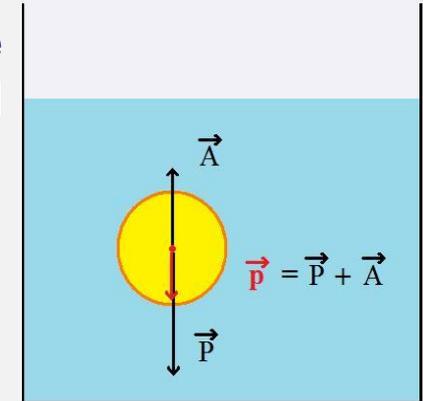
Par définition, on appelle **poussée d'Archimède** la résultante de toutes les forces de pression exercées par un fluide sur un corps immergé.

Tout corps plongé dans un fluide au repos, entièrement mouillé par celui-ci ou traversant sa surface libre, subit une force verticale, dirigée de bas en haut, et dont l'intensité correspond au poids du volume de fluide déplacé.

Cette force est appelée **Poussée d'Archimède**

... notée **A** ici

$$\mathbf{A} = V \times \rho_{\text{liquide}} \times \mathbf{g}$$



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

L'équilibre hydrostatique d'un corps immergé plongé dans un fluide est donné par le sens du vecteur poids apparent.

$$\vec{P}_{\text{apparent}} = \vec{P}_{\text{oids}} + \vec{A}$$

$$A = V \times \rho_{\text{liquide}} \times g$$

$$P_{\text{oids}} = V \times \rho_s \times g$$

si $P_{\text{oids}} < A$

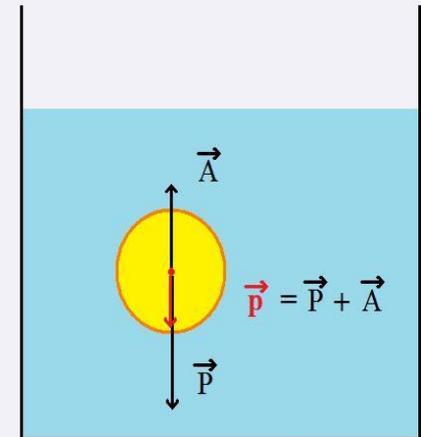
Le corps s'élève dans le fluide, l'ascension aboutit à la flottation.

si $P_{\text{oids}} = A$

Le corps reste immobile au sein du fluide.

si $P_{\text{oids}} > A$

Le corps se déplace vers le bas et s'enfonce dans le fluide.



Dans tous les cas, le poids apparent d'un corps immergé dans un fluide est toujours inférieur au poids réel.

Exemples d'applications biomédicale

On parlera de pression et on utilisera le principe fondamental de la statique des fluides...

- ❑ Lors de la mesure de **la Pression artérielle** (appelée aussi tension artérielle, en relation avec la force exercée par le sang sur les parois des artères).
- ❑ Pour estimer la pression lors de changements d'altitude par rapport au niveau 0 (alpinisme, plongée...).

On montre ainsi que si, au niveau de la mer (niveau 0), la pression est proche de 10^5 Pa, elle diminue avec l'altitude et augmente sous la mer.

*Si la pression est trop faible ou trop élevée par rapport à la pression atmosphérique, il peut se produire des **effets pathologiques** chez l'homme.*

2. Théorie des gaz parfaits

- ✓ Définition d'un gaz parfait
- ✓ Théorie des gaz parfaits
- ✓ Conséquences et applications
- ✓ Mélange gazeux parfait

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Définition d'un gaz parfait

Dans un gaz, les atomes et molécules interagissent faiblement car elles sont éloignées les unes des autres.

Le gaz est dit **parfait** quand les particules n'interagissent pas du tout entre elles (... gaz **très dilué**).

En pratique biomédicale, les gaz peuvent être considérés comme des gaz parfaits.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

L'état d'un gaz parfait dépend de :

- son nombre de moles n ,
- sa pression P ,
- son volume V ,
- sa température T .

On note ce gaz (n, P, V, T).

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Théorie des gaz parfaits

$$P \times V = n \times R \times T$$

**ATTENTION
AUX UNITES**

Pa m³



Pa.m³. mol⁻¹. K⁻¹

R constante des gaz parfaits = **8,31 J.mol⁻¹.K⁻¹**

Elle est liée à la constante de Boltzmann

avec $R = k_B \mathcal{N}$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Conséquences et applications

Soit n mole d'un même gaz, deux états différents :

$$(n, P, V, T) \quad (n, P', V', T')$$

n constant

$$\frac{P \times V}{T} = \frac{P' \times V'}{T'}$$

n et T constantes

$$P \times V = P' \times V'$$

Loi de Boyle-Mariotte

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Volume molaire

⇒ Volume occupé par 1 mole de gaz ($\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$)

Pour T et P constantes, tous les gaz parfaits ont le même **volume molaire**.

A $\theta = 273 \text{ K}$ et $P = 101\,325 \text{ Pa}$, le volume d'une mole vaut:

$$V = \frac{n \times R \times T}{P} = \frac{8,31 \times 273}{101325} = 0,0224 \text{ m}^3 = 22,4 \text{ L}$$

Parler du volume molaire d'un gaz n'a de sens que si l'on précise T et P.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple

Soit n moles d'un gaz (3 atm, 1L, 300K), quel est son volume V sous 1 atm et 273 K?

$$\frac{P \times V}{T} = \frac{P' \times V'}{T'}$$

$$V = \frac{P' \times V'}{T'} \times \frac{T}{P} = \frac{3 \times 101325 \times 0,001}{300} \times \frac{273}{1 \times 101325} = \underline{2,73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Mélange gazeux parfait

Pression partielle / Volume partiel

Soit un mélange gazeux dans l'état (n , P , V , T) et qui est composé de k gaz parfaits.

La pression partielle P_i du gaz i dont le nombre de moles est n_i , est par définition telle que :

$$P_i \times V = n_i \times R \times T$$

C'est la pression qu'exercerait le gaz s'il était seul dans le volume occupé par le mélange.

Le volume partiel V_i du gaz i dont le nombre de moles est n_i , est par définition tel que :

$$P \times V_i = n_i \times R \times T$$

Si chaque gaz pouvait être mis à part dans le mélange, il occuperait un volume égal à son volume partiel.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

$$P \times V = n \times R \times T$$

$$P_i \times V = n_i \times R \times T$$

$$P \times V_i = n_i \times R \times T$$

$$\frac{P_i}{P} = \frac{n_i}{n} = x_i$$

x_i Fraction molaire du mélange

$$\frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} = x_i$$

$$\sum_i^k P_i = \sum_i^k \frac{n_i}{n} \times P = \frac{P}{n} \sum_i^k n_i = P$$

La somme des pressions partielles est égale à la pression du mélange gazeux.

Loi de Dalton

$$\sum_i^k V_i = \sum_i^k \frac{n_i}{n} \times V = \frac{V}{n} \sum_i^k n_i = V$$

La somme des volumes partiels est égale au volume du mélange gazeux.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemples d'application biomédicale



Plongée en apnée

Plongée en bouteille

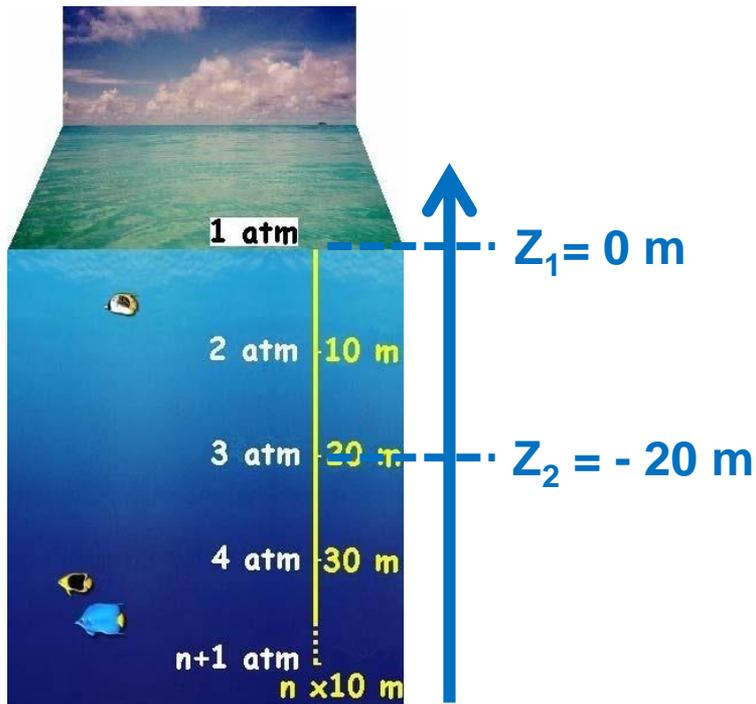


UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Plongée à 20 m



$$P_1 + \rho \times g \times z_1 = P_2 + \rho \times g \times z_2$$

$$10^5 = P_2 + \rho \times g \times z_2$$

$$\Rightarrow P_2 \approx 10^5 - 1000 \times 10 \times z_2$$

$$\Rightarrow P_2 \approx 10^5 - 1000 \times 10 \times (-20)$$

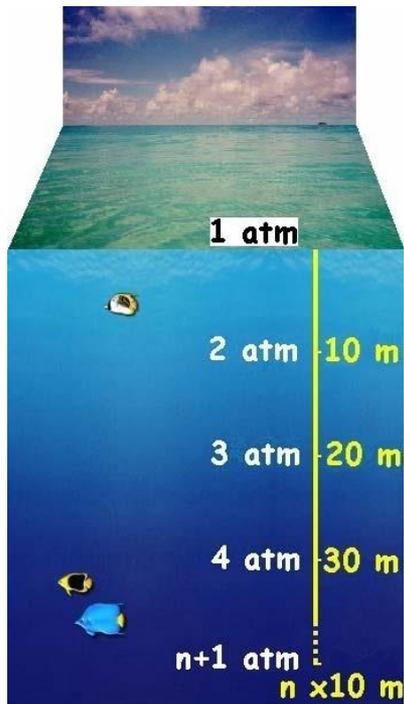
$$\text{A } 20 \text{ m } P \approx 3 \times 10^5 \text{ Pa}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Cause des accidents de plongée en apnée



A 20m

Pression de 3 bar

$P_{O_2} \times 3$

Remontée

$P_{O_2} / 3$

☹️ **Syncope**

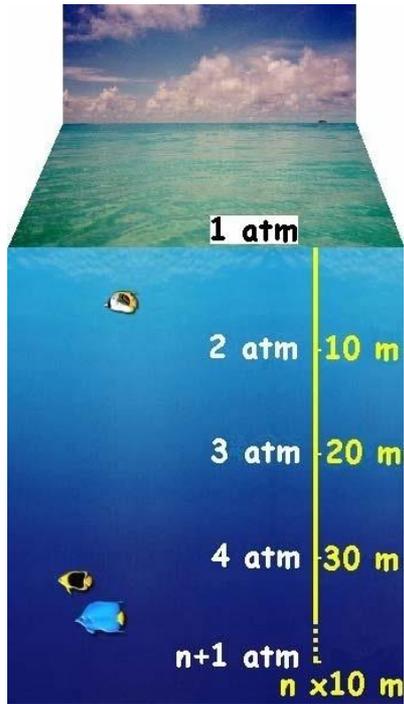
$$\frac{P_{O_2}}{P} = x_{O_2} = \text{constante}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Cause des accidents de plongée en bouteille



A la surface

$$P_{O_2} \sim 0,2 \text{ bar}$$

$$P_{N_2} \sim 0,8 \text{ bar}$$

$$\frac{P_i}{P} = x_i = \text{constante}$$

- ☹ La toxicité de l'azote devient imminente pour
 $P_{N_2} = 4 \text{ bar} (= 5 \times 0,8) \rightarrow 40 \text{ m de fond}$
 \rightarrow **Narcose à l'azote ou ivresse des profondeurs**
- ☹ La toxicité de l'oxygène devient imminente pour
 $P_{O_2} = 1,8 \text{ bar} (= 9 \times 0,2) \rightarrow 80 \text{ m de fond}$
 \rightarrow **Crise d'épilepsie**

PROPRIETES COLLIGATIVES

4

- 1. Solutions et propriétés colligatives : définition**
- 2. Expressions des concentrations des solutions**
- 3. Propriétés colligatives des solutions**
- 4. Compléments, exemples et applications**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

1. Solutions et propriétés colligatives : définition

Solution

Mélange homogène (phase unique) d'au moins deux composés chimiques distincts.



solide, liquide ou gazeuse

Soluté et Solvant

Un **solvant** a la propriété de dissoudre et de diluer d'autres substances.

Les substances (minoritaires) qui sont dissoutes dans le solvant sont appelées **solutés**.

☞ Les solutés comme le solvant peuvent être solides, liquides ou gazeux.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Solution liquide

Une solution ayant l'eau comme solvant est appelée **solution aqueuse**.

On s'intéressera tout particulièrement à :

✓ **un liquide dans un autre**

⚠ *Limité par la miscibilité des deux.*

✓ **un solide dans un liquide**

⚠ *Limité par la solubilité du solide dans le solvant, au delà de laquelle le solide n'est plus dissous.*

✓ **un gaz dans un liquide.**

Au-delà de la limite de
solubilité, on parle de
solution saturée

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Solvant pur

Interactions moléculaires **solvant/solvant**

Propriétés physicochimiques

*e.g. température d'ébullition, de fusion,
pression de vapeur saturante, viscosité...*

Solution

Interactions moléculaires **soluté/solvant** + **solvant/solvant** + **soluté/soluté**

Modifications des propriétés physicochimiques de la solution par rapport au solvant pur

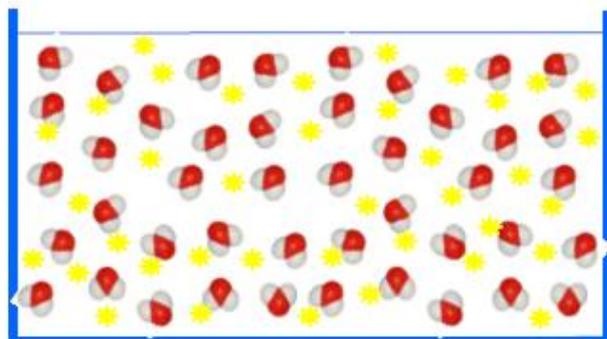
A température et pression identiques, l'état énergétique du solvant dans la solution sera différent de celui du solvant pur.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Solvant pur: état d'énergie E1



 Molécule de Solvant (Eau)

 Interaction Solvant/Solvant

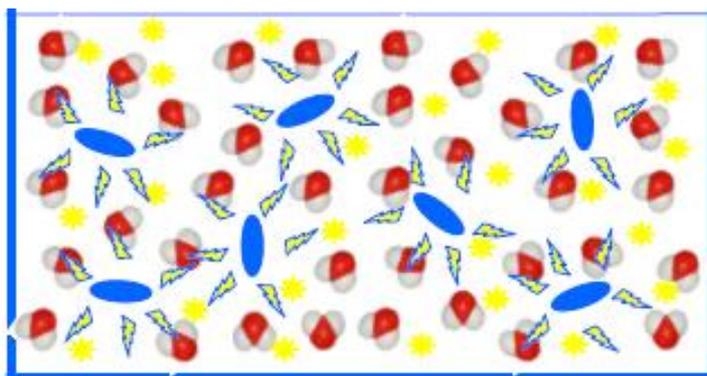
Soluté ionique ou moléculaire



 Molécule de Soluté

 Interaction Soluté/Soluté

Solution: état d'énergie du solvant $E2 \neq E1$



 Molécule de Solvant (Eau)

 Molécule de Soluté

 Interaction Solvant/Solvant

 Interaction Soluté/Solvant

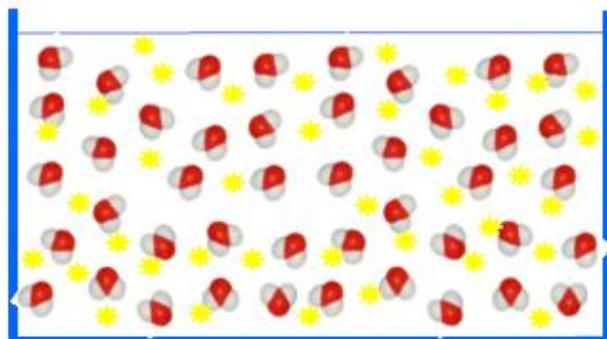
 Interaction Soluté/Soluté

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Solvant pur: état d'énergie E1



-  Molécule de Solvant (Eau)
-  Interaction Solvant/Solvant

Soluté ionique ou moléculaire



-  Molécule de Soluté
-  Interaction Soluté/Soluté

Absence d'interactions Soluté/Soluté
= solution idéale



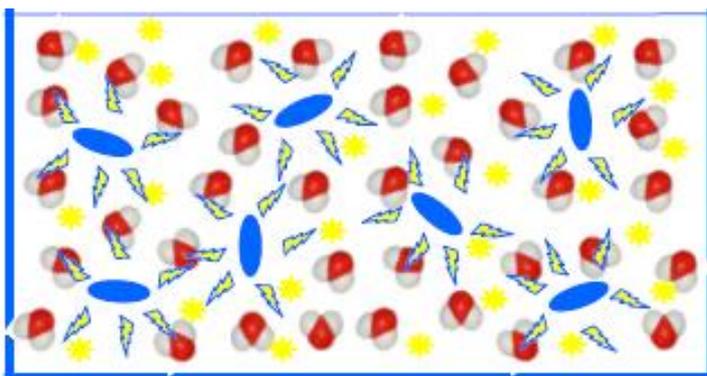
La présence du soluté ne modifie pas le champ de force intermoléculaire du solvant

Mélange de corps chimiquement très voisins

ou

Mélange dilué

Solution: état d'énergie du solvant $E2 \neq E1$



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Modifications des propriétés physicochimiques d'une solution par rapport au solvant pur



Propriétés colligatives des solutions

... colligare (attacher, réunir)



Dans les solutions idéales, ces propriétés ne dépendent pas de **la nature des corps dissous**, mais seulement de leurs concentrations.

Des exemples d'applications

- *Dans le cas de solutés non dissociables, les propriétés colligatives peuvent être employées pour la détermination des masses molaires des solutés.*
- *Dans le cas de solutés dissociables, les mesures des propriétés colligatives permettront d'estimer la constante d'équilibre.*

2. Expression des concentrations des solutions

La concentration en soluté exprime la **quantité de soluté** par unité de quantité de **solution** ou de **solvant**.

Pour exprimer une quantité de substance, on peut utiliser différentes grandeurs: la masse, le volume, le nombre de moles...

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Type de concentration	Dimension	Unité SI
Concentration massique, c_{mp}	$M.L^{-3}$	kg de soluté / m^3 de solution
Concentration molaire ou molarité, c_p	$N.L^{-3}$	nombre de moles de soluté / m^3 de solution
Molalité, m_p	$N.M^{-1}$	nombre de moles de soluté / kg de solvant
Fraction molaire, x_p	-	nombre de moles du soluté / nombre total de moles présentes dans la solution

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Fraction molaire - Particularités

Rapport sans dimension qui est donc compatible avec n'importe quel système d'unité.

Mélange binaire 1 soluté (p) dans 1 solvant (s)

$$x_p = \frac{n_p}{n_p + n_s} \quad x_s = \frac{n_s}{n_p + n_s} \quad x_p + x_s = 1$$

Mélange de i constituants

$$x_i = \frac{n_i}{\sum_i n_i} \quad \sum_i x_i = 1$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Autres expressions

Type de pourcentage	Définition
Pourcentage poids / volume *	Masse de soluté en g pour 100 mL de solution
Pourcentage volume / volume**	Volume de soluté en mL pour 100 mL de solution
Pourcentage poids / poids	Masse de soluté en g pour pour 100 g de solution

* Une solution aqueuse de CaCl_2 5% p/v correspond à 5 g de CaCl_2 dissous dans 100 mL (ou cm^3) de solution

** Une solution alcoolique à 5% v/v correspond à 5 mL (ou cm^3) d'alcool dissous dans 100mL (ou cm^3) de solution

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Exemple

Soit une solution aqueuse de H_2SO_4 à 15% en masse et de densité 1,10;
quelles sont sa molalité et sa molarité?

Peut-on considérer cette solution comme une solution diluée?

$S = 32 \text{ g.mol}^{-1}$; $O = 16 \text{ g.mol}^{-1}$; $H = 1 \text{ g.mol}^{-1}$

100 g de solution à 15% en masse

15 g de soluté (H_2SO_4)
85 g de solvant (H_2O)

$$m_p = \frac{n_{\text{soluté}}}{m_{\text{solvant}}}$$

$$c_p = \frac{n_{\text{soluté}}}{V_{\text{solution}}}$$

Solution diluée si $m_{\text{soluté}} \ll m_{\text{solvant}}$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

$$m_p = \frac{n_{\text{soluté}}}{m_{\text{solvant}}}$$

$$c_p = \frac{n_{\text{soluté}}}{V_{\text{solution}}}$$

$$m_p = c_p \times \frac{V_{\text{solution}}}{m_{\text{solvant}}}$$

$$\Rightarrow m_{\text{solution}} = \rho_{\text{solution}} \times V_{\text{solution}}$$

$$\Rightarrow m_{\text{solution}} = m_{\text{soluté}} + m_{\text{solvant}}$$

$$\Rightarrow m_{\text{solvant}} = \rho_{\text{solution}} \times V_{\text{solution}} - M_{\text{soluté}} \times n_{\text{soluté}}$$

$$m_p = c_p \times \frac{V_{\text{solution}}}{\rho_{\text{solution}} \times V_{\text{solution}} - M_{\text{soluté}} \times n_{\text{soluté}}}$$

Solution diluée si $m_{\text{soluté}} \ll m_{\text{solvant}}$

$$m_p \approx c_p \times \frac{V_{\text{solution}}}{\rho_{\text{solution}} \times V_{\text{solution}}}$$

$$m_p = \frac{c_p}{\rho_{\text{solution}}}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Molalité $m_p = \frac{n_{\text{soluté}}(\text{H}_2\text{SO}_4)}{m_{\text{solvant}}(\text{H}_2\text{O})} = \frac{\frac{m_{\text{H}_2\text{SO}_4}(\text{mol})}{M_{\text{H}_2\text{SO}_4}}}{m_{\text{H}_2\text{O}}(\text{kg})} = \frac{\frac{15}{98}}{85 \cdot 10^{-3}} = \underline{1,8 \text{ mol kg}^{-1}}$

Molarité $c_p = \frac{n_{\text{soluté}}(\text{H}_2\text{SO}_4)}{V_{\text{solution}}}$

La densité est un rapport de masses volumiques $\rho_{\text{solution}} = d_{\text{solution}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}$

$$\Rightarrow V_{\text{solution}} = \frac{m_{\text{solution}}}{d_{\text{solution}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{100\text{g}}{1,1 \times 1000\text{g.L}^{-1}} = 0,0911$$

$$c_p = \frac{n_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{V_{\text{solution}}} = \frac{\frac{15}{98}}{0,091} = \underline{1,68 \text{ mol.L}^{-1}}$$

$$m_p \times \rho_{\text{solution}} = 1,8 \times 1000 \times 1,10 = 1980 \text{ mol/m}^3 = 1,98 \text{ mol/L} \neq 1,68 \text{ mol/L}$$

Cette solution ne peut pas être considérée comme une solution diluée!

2. Propriétés colligatives des solutions

Les propriétés colligatives sont relatives à :

Solution idéale

Changements d'état



1. l'abaissement de la pression de vapeur,

Lois de Raoult - Loi de la tonométrie

2. l'élévation de la température d'ébullition,

Lois de Raoult - Loi de l'ébulliométrie

3. l'abaissement de la température de congélation,

Lois de Raoult - Loi de la cryométrie

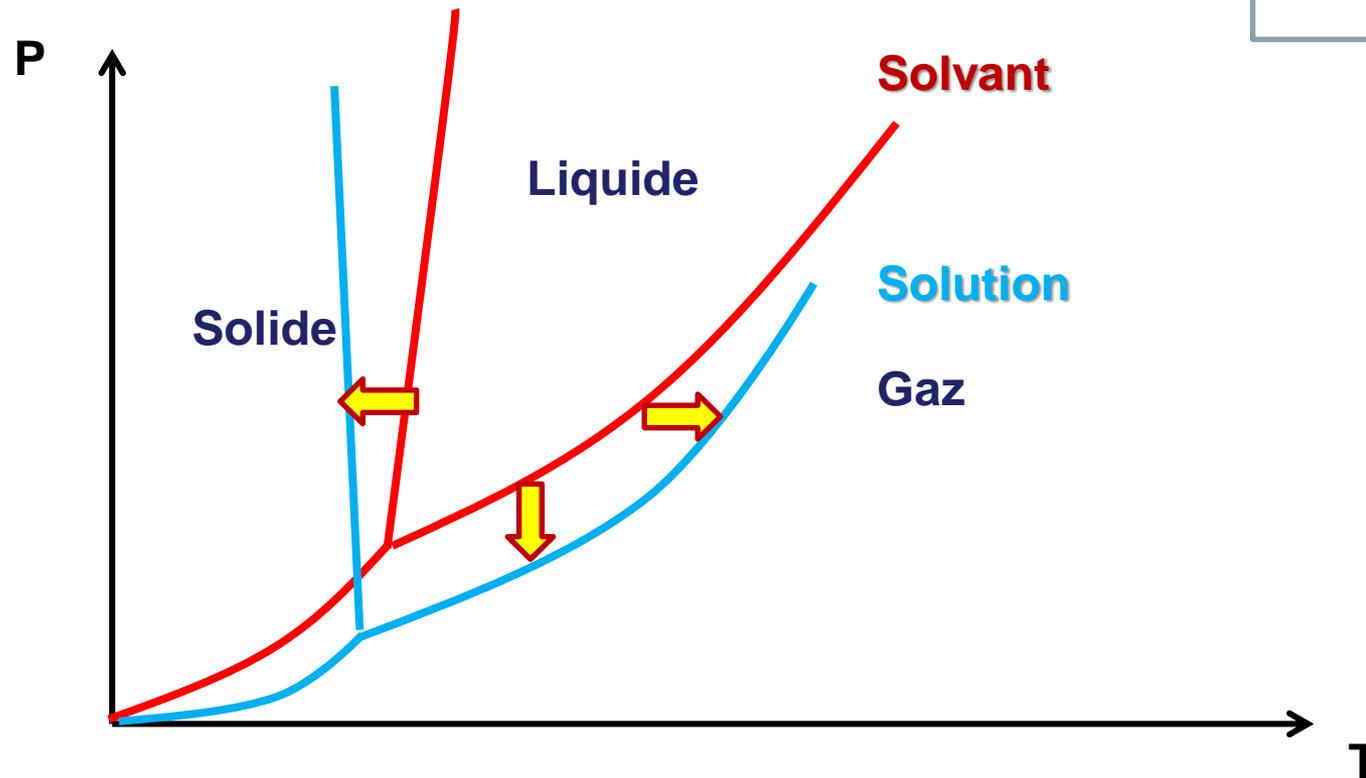
4. la pression osmotique.

Lois de Van't Hoff

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

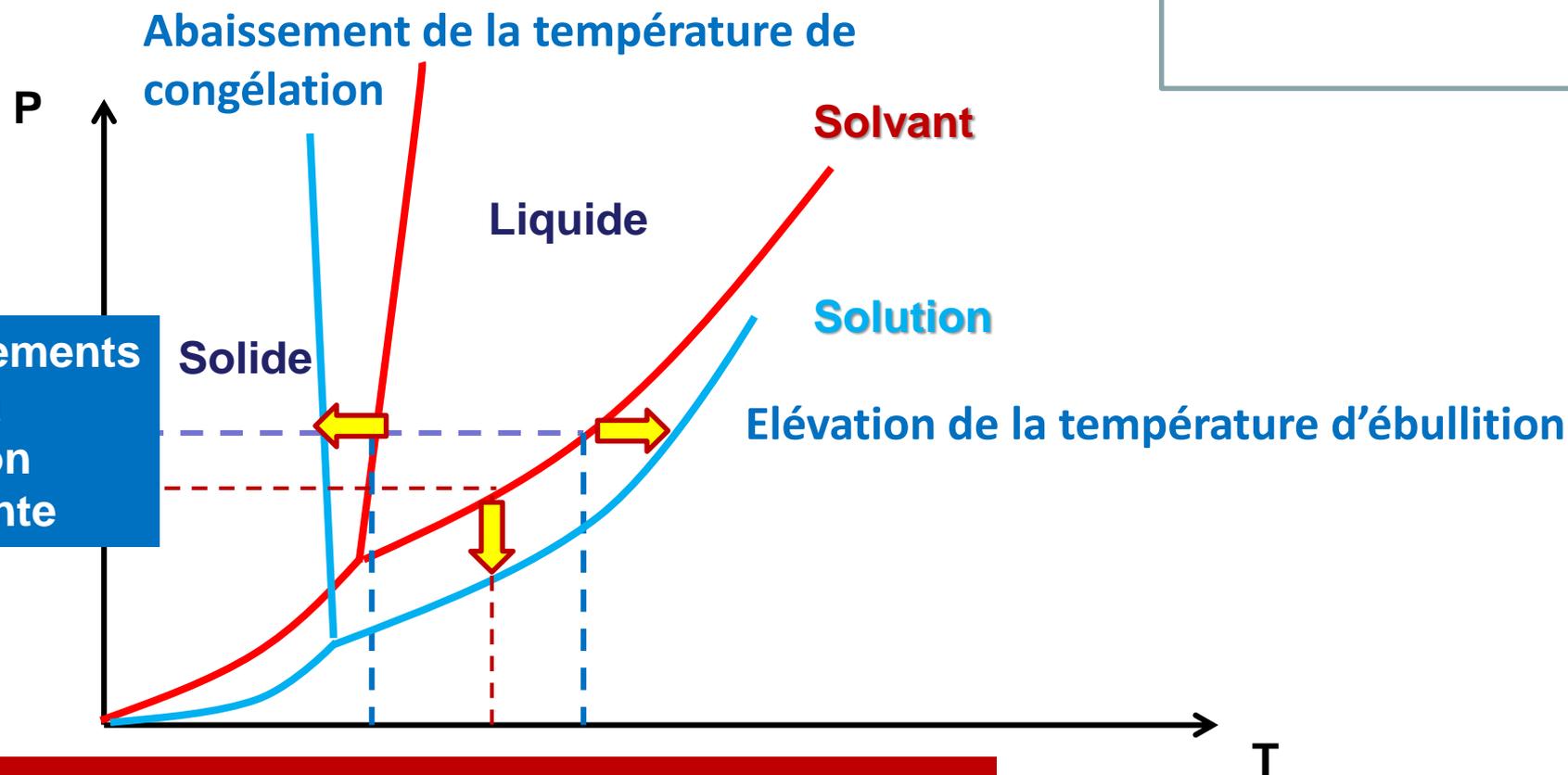


La présence d'un soluté modifie l'état énergétique du solvant.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo



Changements d'état à température constante

Abaissement de la pression de vapeur du solvant

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

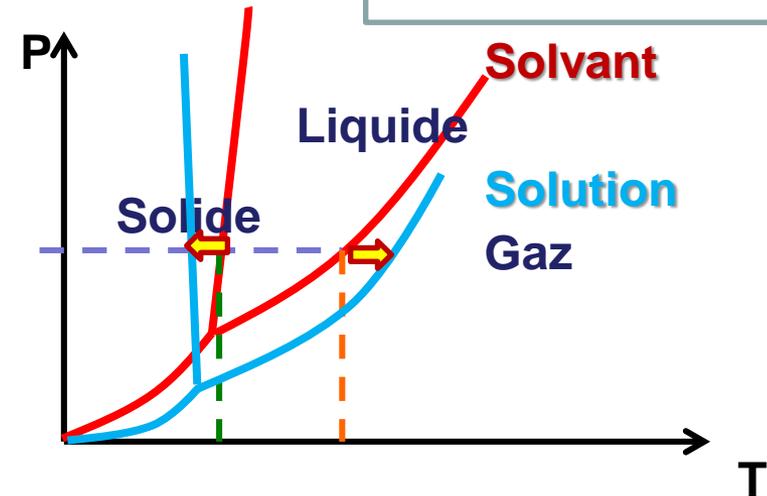
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Changements d'état à pression constante

Différence de température de transition de phase entre la solution et le solvant pur à la pression P:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{R \times T_0^2}{Q_{T_0}} \times (x_p^I - x_p^{II})$$



- T Température de transition de phase I→II de la solution
- T₀ Température de transition de phase I→II du solvant pur
- Q_{T₀} Chaleur de transition de phase I→II du solvant pur (T₀, P)
- x_p^I, x_p^{II} Fractions molaires du soluté dans les phases I et II

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Cas particulier : une des phases est le solvant pur ($x_p^{\text{II}} = 0$)

Exemple :

- Le soluté est exclu de la phase solide (de la glace)
- Le soluté n'est pas volatil

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{R \times T_0^2}{Q_{T_0}} \times (x_p^{\text{I}} - x_p^{\text{II}}) \approx \frac{R \times T_0^2}{Q_{T_0}} \times x_p^{\text{I}}$$

J.mol⁻¹K⁻¹ **K²**

J.mol⁻¹

- ΔT Proportionnel à la fraction molaire du soluté dans la solution
- K Constante caractéristique du solvant (constante cryoscopique ou constante ébullioscopique)

Les unités de K sont déterminées par les unités utilisées pour exprimer la quantité de soluté (fraction molaire, molalité, molarité...)

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

ON RETIENDRA

⚠ Lorsque l'on considère une solution, la température d'ébullition de la solution est plus haute que la température d'ébullition du solvant seul.

L'élévation de la température d'ébullition est proportionnelle à la fraction molaire du soluté.

Lois de Raoult - Loi de l'ébulliométrie

K constante ébullioscopique

$$|\Delta T| = K \times x_p$$

⚠ Lorsque l'on considère une solution, la température de solidification de la solution est plus basse que la température de solidification du solvant seul.

L'abaissement de la température de congélation est proportionnel à la fraction molaire du soluté.

Lois de Raoult - Loi de la cryométrie

K constante cryoscopique

$$|\Delta T| = K \times x_p$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

QUELQUES VALEURS DE CONSTANTES CRYOSCOPIQUES DE SOLVANTS

	M_s (g.mol ⁻¹)	d	T_f (°C)	K (Kelvin)	K' (K.kg.mol ⁻¹)	K'' (K.L.mol ⁻¹)
Ac. acétique	60	1,082	16,7	65	3,9	3,6
Benzène	78,1	0,879	5,5	65,5	5,12	5,82
Cyclohexane	84,2	0,779	6,5	237,5	20,0	25,67
1,4-Dioxane	88,1	1,03	10,5	55,6	4,9	4,76
Eau	18	1	0	103,3	1,86	1,86

Ne pas retenir

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Changements d'état à température constante

Notions de pression partielle

Solvant
Soluté

Gaz

Equilibre



Pression partielle de vapeur du solvant et du soluté ?

Liquide – solution idéale

Solvant
Soluté

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Pression partielle de vapeur du **solvant** - Cas de solutions idéales



$$P_s = P_s^{\text{sat}} \times X_s$$

La pression partielle de vapeur du solvant dans la phase gaz au dessus de la solution, P_s , est proportionnelle à sa fraction molaire dans la solution.

P_s^{sat} , facteur de proportionnalité, est la pression de vapeur du solvant pur.

 **La loi de Raoult ne s'applique pas au soluté (p)**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Pression partielle de vapeur du **soluté** - Cas de solutions idéales



$$P_p = K_H \times X_p$$

La pression partielle de vapeur du soluté dans la phase gaz au dessus de la solution, P_p , est proportionnelle à sa fraction molaire dans la solution.

K_H , facteur de proportionnalité, est la constante d'Henry.

Loi de Henry (relative au soluté)

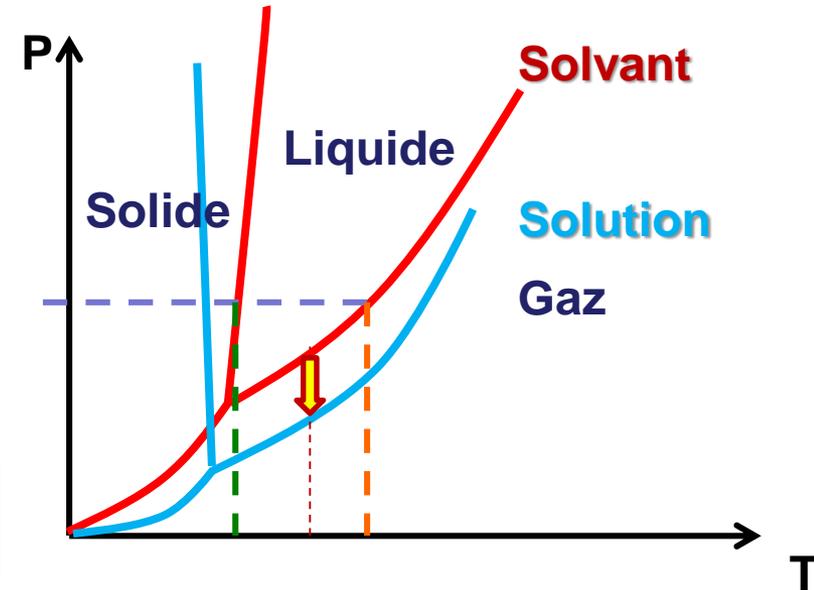
UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Si le soluté est absent de la phase gazeuse, à l'équilibre, à une température déterminée T , la pression de vapeur du solvant au dessus de la solution est inférieure à celle du solvant pur à la même température et la différence est proportionnelle à la fraction molaire du soluté dans la solution.

$$\Delta P_s = P_s - P_{s_0} = -P_{s_0} \times X_p^I$$



P_s

Pression de vapeur du solvant au dessus de la solution à la température T

P_{s_0}

Pression de vapeur du solvant au dessus du solvant pur à la température T

x_p^I

Fraction molaire du soluté dans la solution

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

ON RETIENDRA

⚠ Lorsque l'on considère une solution, la pression de vapeur du solvant au dessus de la solution est inférieure à celle du solvant pur à la même température.

Pour une solution idéale, l'abaissement relatif de pression de vapeur du solvant est égal à la fraction molaire du soluté.

Lois de Raoult - Loi de la tonométrie

$$\frac{|\Delta P_s|}{P_{s_0}} = \frac{|P_s - P_{s_0}|}{P_{s_0}} = X_p^I$$

$$\Delta P_s = P_s - P_{s_0} = -P_{s_0} \times X_p^I$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Loi de Van't Hoff

La **pression osmotique** d'une solution correspond à la différence de pression entre la solution et le solvant liquide pur, lorsque les deux sont en équilibre à travers une membrane semi-perméable qui permet le passage des molécules du solvant mais non des particules du soluté.



La **pression osmotique** d'une solution diluée à température constante est directement **proportionnelle à sa concentration en soluté.**

La **pression osmotique** d'une solution diluée est directement **proportionnelle à sa température .**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

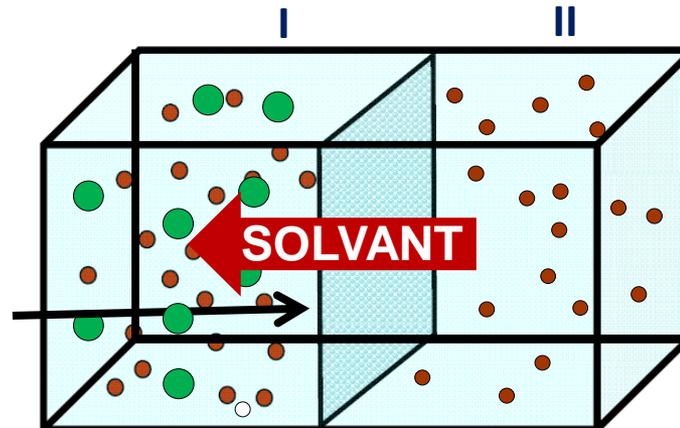
Zone réservée pour la vidéo

SYSTÈME

- ✓ Température constante
- ✓ Présence d'une phase unique liquide
- ✓ 2 constituants : solvant et soluté

Système hors équilibre

Membrane perméable au solvant mais non perméable au soluté



$$x_P^I \neq x_p^II = 0$$

➔ Il ne pourra avoir égalisation des concentrations par diffusion du soluté puisque celui-ci ne peut traverser la membrane.

➔ On tendra donc vers l'équilibre par un flux de solvant à travers la membrane qui tendra à diluer le compartiment le plus concentré.

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

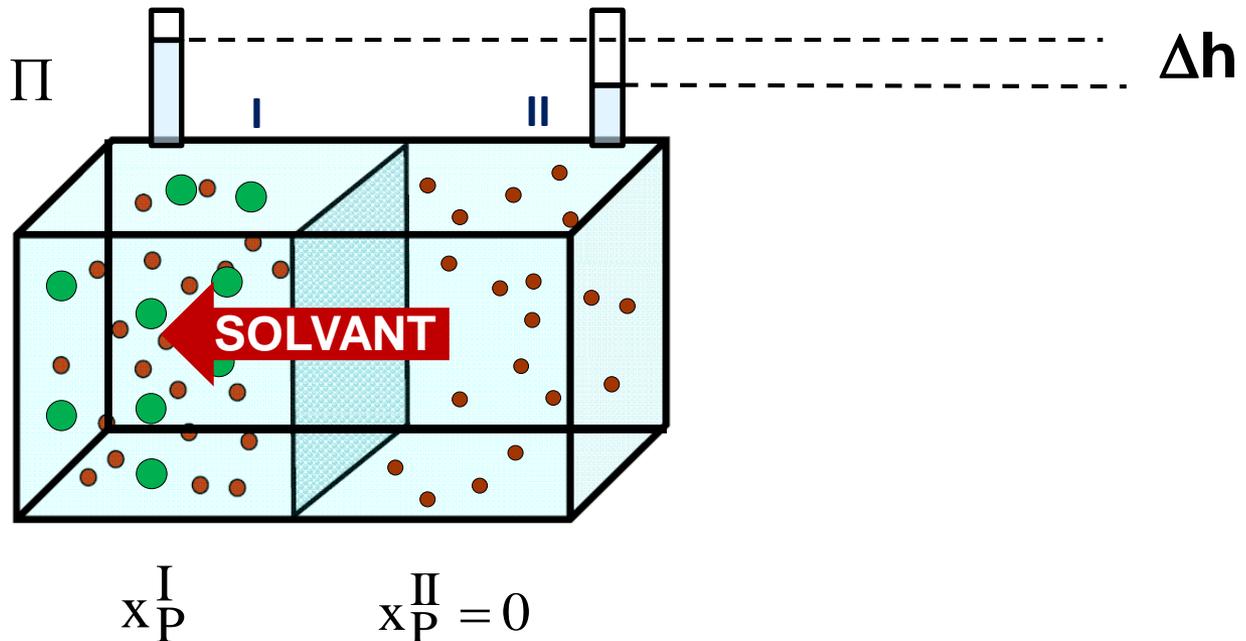
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

V_s = volume molaire partiel du solvant

$$\Delta P = P^{\text{II}} - P^{\text{I}} = -\frac{R \times T}{V_s} \times x_p^{\text{I}}$$

$$\Delta P = \rho \times g \times \Delta h = \Pi$$



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Cas de solutions idéales (très diluées)

$$x_p^I = x_p \ll 1$$

$$|\Delta P| = |P^{\text{II}} - P^{\text{I}}| = \left| -R \times T \times \frac{x_p}{v_s} \right| = \Pi$$

Voir définition des
volumes partiels

$$x_p = \frac{n_p}{n_p + n_s} \approx \frac{n_p}{n_s} \text{ donc } \frac{x_p}{v_s} = \frac{\cancel{n_p} / n_s}{v_s} = \frac{n_p}{n_s \times v_s} = \frac{n_p}{v_{\text{solution}}} \approx c_p$$



$$\Pi = R \times T \times c_p$$

Loi de Van't Hoff

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

3. Compléments, exemples et applications

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour la vidéo

Dissociation du soluté...

Supposons que la substance (soluté) ajoutée au solvant pur se dissocie en sa présence... l'intégralité des produits de la dissociation vont influencer sur les propriétés colligatives!

⇒ Notions d'osmole, d'osmolarité et d'osmolalité

Type de concentration	Dimension	Définition
Osmolarité	$[N.L^{-3}]$	nombre de particules (moles ou osmoles) / volume de solution
Osmolalité	$[N.M^{-1}]$	nombre de particules (moles ou osmoles) / masse de solvant

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo



L'osmolarité est tout simplement la concentration molaire des produits de dissociation, **actifs en solution**, c'est-à-dire qui vont agir sur les propriétés colligatives



Si la solution est constituée de solutés non dissociables, une **mole** de soluté correspond à une **osmole**.

Si la solution est constituée de solutés dissociables (électrolytes), une mole de soluté correspondra à un nombre d'osmoles > 1 .

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

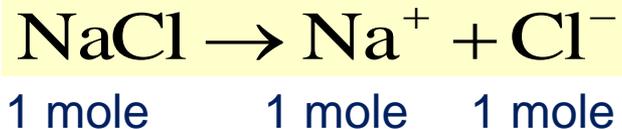
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

EXEMPLE 1

Soit 1 mole de NaCl ajouté à 1 litre d'eau.

Si la dissociation est totale, quelle est l'osmolarité de cette solution?



Deux espèces en solution : **Na⁺ et Cl⁻**

En solution \longrightarrow **osmolarité de 2 osmol/L ou 2 mol/L**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

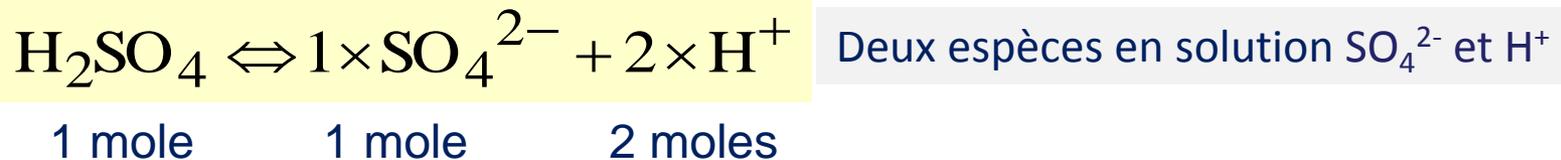
Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

EXEMPLE 2

Soit 1 mole de H_2SO_4 ajouté à 1 litre d'eau.

Si la dissociation est totale, quelle est l'osmolarité de cette solution?



En solution \longrightarrow **osmolarité de 3 osmol/L ou 3 mol/L**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

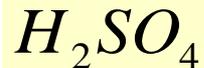
EXEMPLE 3

Soit 1 mol de H_2SO_4 ajouté à 1 litre d'eau.

Si la dissociation est de 20%, quelle est l'osmolarité de cette solution?



0,2 mole 0,2 mole 0,4 moles



0,8 mole

Trois espèces en solution H_2SO_4 , SO_4^{2-} et H^+

En solution \longrightarrow **osmolarité de 1,4 osmol/L ou 1,4 mol/L**

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Dissociation partielle du soluté...



1 molécule dissociée donne $\gamma = n + m$ osmoles
 C_p molécules dissociées donneront $C_p \times \gamma$ osmoles

si α est le coefficient de dissociation

$\alpha \times C_p$ molécules dissociées donneront $\alpha \times C_p \times \gamma$ osmoles
 $C_p - \alpha \times C_p$ **molécules non dissociées**

Le nombre total de particules (**osmoles**) présentes dans la solution, sera donc :

$$\alpha \times C_p \times \gamma + C_p \times (1 - \alpha) = C_p \times (\alpha \times (\gamma - 1) + 1)$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Si c_p est la concentration molaire du soluté, son osmolarité C^0 (qui correspond à la concentration "efficace" pour les propriétés colligatives) s'écrira:


$$C^0 = (\alpha \times (\gamma - 1) + 1) \times c_p = i \times c_p$$

**i coefficient isotonique ou
coefficient de Van't Hoff**

$$i = (\alpha \times (\gamma - 1) + 1)$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

EXEMPLE 4

Soit une solution de H_2SO_4 à 15% en masse et de densité 1,10.

Quelle est son osmolarité si le degré de dissociation de l'acide est total?

Quelle est son osmolarité si le degré de dissociation de l'acide est de 20%?

$S = 32 \text{ g.mol}^{-1}$; $O = 16 \text{ g.mol}^{-1}$; $H = 1 \text{ g.mol}^{-1}$

100 g de solution à 15% en masse

{	15 g de soluté (H_2SO_4)
	85 g de solvant (H_2O)

$$\text{molarité} = C_p = 1,68 \text{ mol.L}^{-1}$$

$$C^0 = (\alpha \times (\gamma - 1) + 1) \times c_p = i \times c_p$$

$$\alpha = 1 \quad \text{et} \quad \gamma = 3$$

$$C^0 = 3 \times c_p = 5,04 \text{ mol / L}$$

$$\alpha = 0,2 \quad \text{et} \quad \gamma = 3$$

$$C^0 = 1,4 \times c_p = 2,35 \text{ mol / L}$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

AUTRES EXEMPLES

$$\text{NaCl} \quad \alpha = 1 \quad \gamma = 2 \quad \Rightarrow \quad i = 1 \cdot (2-1) + 1 = 1 + 1 = 2 \quad C_{\text{osm}} = 2 \cdot c_p$$

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 \quad \alpha = 1 \quad \gamma = 3 \quad \Rightarrow \quad i = 1 \cdot (3-1) + 1 = 2 + 1 = 3 \quad C_{\text{osm}} = 3 \cdot c_p$$

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ phosphate tricalcique ou phosphate neutre de calcium (soluble en milieu acide)

$$\alpha = 1 \quad \gamma = 5 \quad \Rightarrow \quad i = 1 \cdot (5-1) + 1 = 4 + 1 = 5 \quad C_{\text{osm}} = 5 \cdot c_p$$

$\text{Ca}(\text{ClO})_2$ hypochlorite de calcium

$$\alpha = 1 \quad \gamma = 3 \quad \Rightarrow \quad i = 1 \cdot (3-1) + 1 = 2 + 1 = 3 \quad C_{\text{osm}} = 3 \cdot c_p$$

par contre, si $\alpha = 0.5$,

$$\Rightarrow \quad i = 0,5 \cdot (3-1) + 1 = 1 + 1 = 2 \quad C_{\text{osm}} = 2 \cdot c_p$$

$\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$

si complètement dissocié: $\alpha = 1 \quad \gamma = 3 \quad \Rightarrow \quad i = 1 \cdot (3-1) + 1 = 2 + 1 = 3 \quad C_{\text{osm}} = 3 \cdot c_p$

par contre, si $\alpha = 0.25$,

$$\Rightarrow \quad i = 0,25 \cdot (3-1) + 1 = 0,5 + 1 = 1,5 \quad C_{\text{osm}} = 1,5 \cdot c_p$$

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Application à la détermination des constantes d'équilibre



$$[A^{m-}] = \alpha \times n \times c_p$$

$$[C^{n+}] = \alpha \times m \times c_p$$

$$[A_n C_m] = (1 - \alpha) \times c_p$$

$$k_d = \frac{[A^{m-}]^n \times [C^{n+}]^m}{[A_n C_m]}$$

$$\gamma = n + m$$

$$k_d = \frac{n^n \times m^m \times c_p^{\gamma-1} \times \alpha^\gamma}{1 - \alpha}$$



On mesure C^0 par cryométrie

→ connaissant c_p et γ , on peut calculer α et K_d



UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Notions d'iso-osmolarité et d'isotonie

Deux solutions sont dites **iso-osmolaires** si elles ont la même **osmolarité**, c'est à dire la même concentration globale en particules actives indépendamment de la nature de ces particules.

L'**isotonie** correspond à une concentration égale en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable.



Il ne faut pas confondre **isotonie** et **iso-osmolarité**.

Si, dans une solution, il y a des solutés qui peuvent franchir passivement une membrane: leur concentration s'égalise de part et d'autre de cette membrane et ils ne participent pas aux phénomènes osmotiques.



Une osmole n'est pas forcément une particule osmotiquement active (c'est-à-dire capable de provoquer une pression osmotique).

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

Deux solutions **iso-osmolaires**, dans un même solvant, auront le même abaissement cryoscopique.

Soit une membrane qui les sépare:

- Si cette membrane est rigoureusement semi-perméable pour tous les constituants en solution (extra ou intracellulaire), les deux solutions seront **isotoniques (ou iso-osmotiques)**.
- Si cette membrane peut laisser diffuser certains constituants, ces deux solutions **iso-osmolaires** ne seront pas **isotoniques**.

Exemple

*Une solution qui contient 75 mmol/L de NaCl (osmolarité de **150 mmol/L**) et 150 mmol/L d'urée sera **iso-osmolaire** au **plasma sanguin (300 mmol/L)** mais **hypotonique** parce que l'urée peut diffuser au travers de la membrane du globule rouge.*

UE 3 - Organisation des appareils et systèmes

Bases physiques des méthodes d'exploration

Zone réservée pour
la vidéo

MERCI POUR VOTRE ATTENTION
