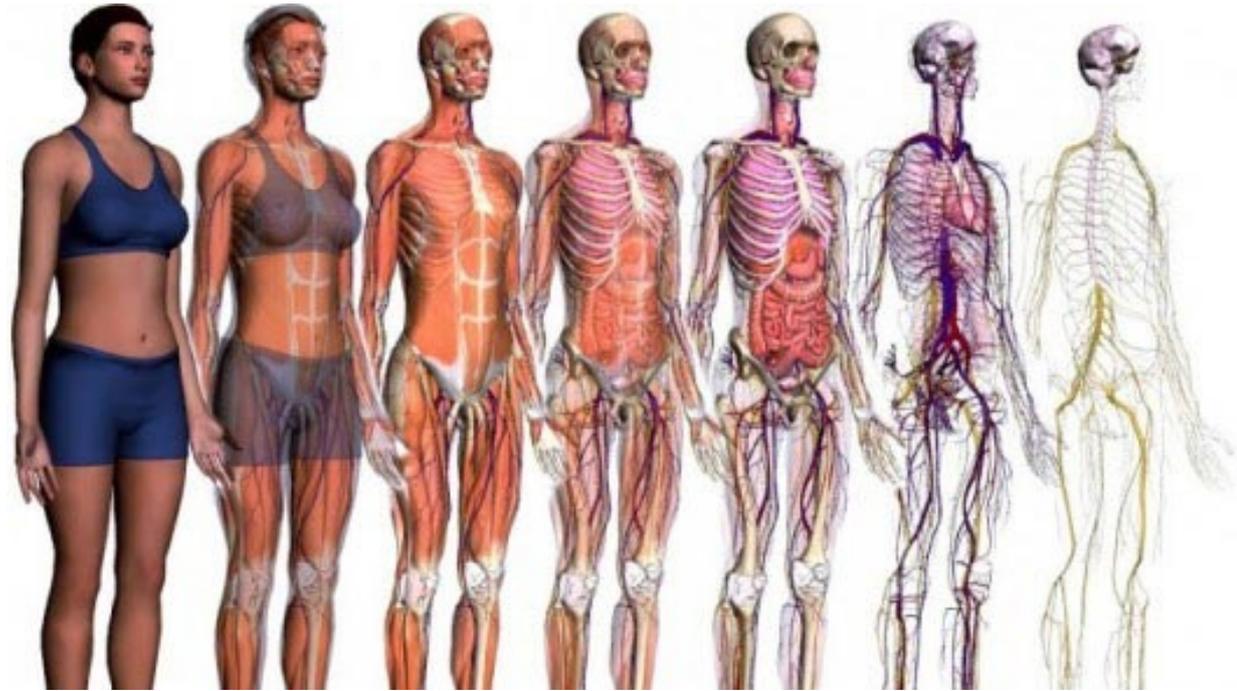


# La physique du corps humain

- Et un peu de chimie...
- Pression & température
- Homéostasie
- Osmose
- Taille



## Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
5. L'eau
15. Thermodynamique

Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées  
Images : Wikipedia sauf mention contraire

# Quelques chiffres

- $10^2$  kg,  $10^0$  m
- $10^{13}$  cellules,  $10^{15}$  bactéries
- $10^{11}$  neurones,  $10^{15}$  connexions
- Veines :
  - $L = 10^8$  m = 100 000 km
  - $D_{\text{capillaires}} = 8 \mu\text{m}$
  - $S = 7000 \text{ m}^2$
- $10^9$  battements de cœur
- 78 organes
  - 79 ? méésentère = repli du péritoine reliant les anses de l'intestin grêle à la paroi postérieure de l'abdomen
  - Cerveau : 2 % de la masse, 20 % de l'énergie !

## • Surfaces

### – Poumons :

- $\sim 150 \text{ m}^2$  (terrain de volley)
- $\sim 15\,000$  L respirés / jour =  $500 \times 10^6$  L / vie = 650 tonnes

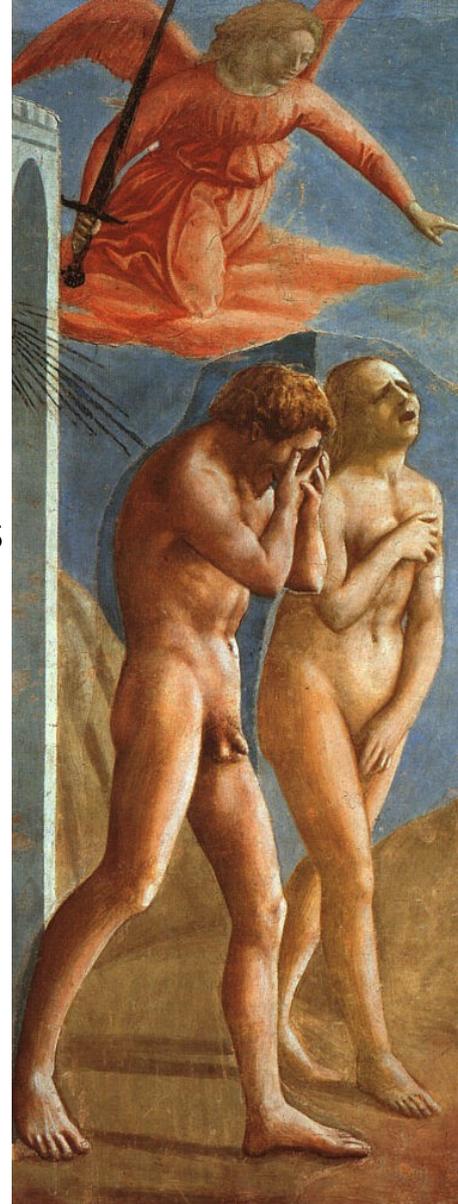
### – Intestins : $250+$ $\text{m}^2$ (terrain de tennis) mais nouvelles estimations à $30 \text{ m}^2$

### – Peau : $1,6 \text{ m}^2 - 1,9 \text{ m}^2$

- Formule de Mosteller

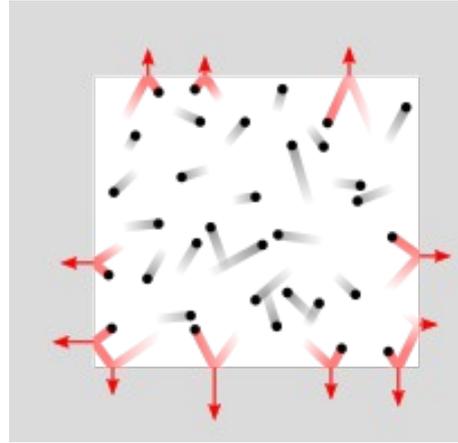
$$S(\text{m}^2) = \frac{\sqrt{\text{taille}(m) * \text{masse}(kg)}}{6}$$

Adam et Eve chassés de l'Eden (Masaccio, 1425)



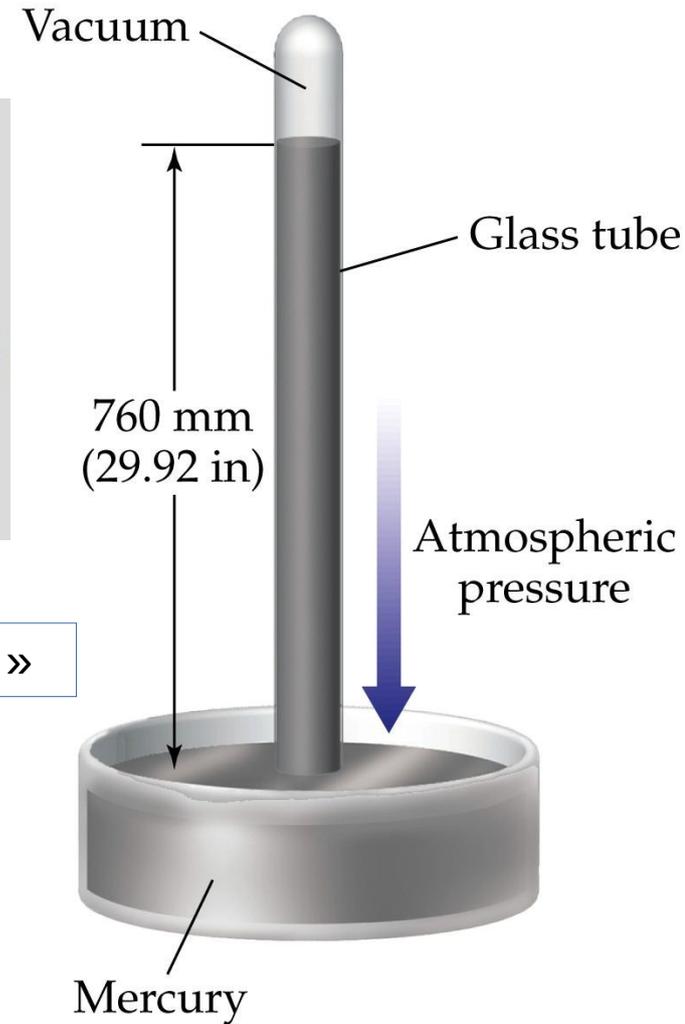
# La pression

- Rappel : **température** = mesure de la **vitesse moyenne** des molécules
- **Pression** = échanges de **quantité de mouvement** (m.v) entre fluide et surface
  - Force par unité de sf : 1 pascal = 1 N/m<sup>2</sup>
  - Dans toutes les directions
  - Au niveau de la mer :  
 $p \approx 101,3 \text{ kPa} \approx 1013 \text{ hPa} \approx 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$
- Mesurée avec un **baromètre**
  - On ne dit pas « pression barométrique »
  - (pas plus que « température thermométrique »)
- Premier baromètre à mercure (Hg)
  - Torricelli (1643)
  - Équilibre : 1 bar ~ 760 mm Hg
- Baromètres à eau : 10 m de haut
  - 1 bar ~ 10 m d'eau (13,5 × moins dense)



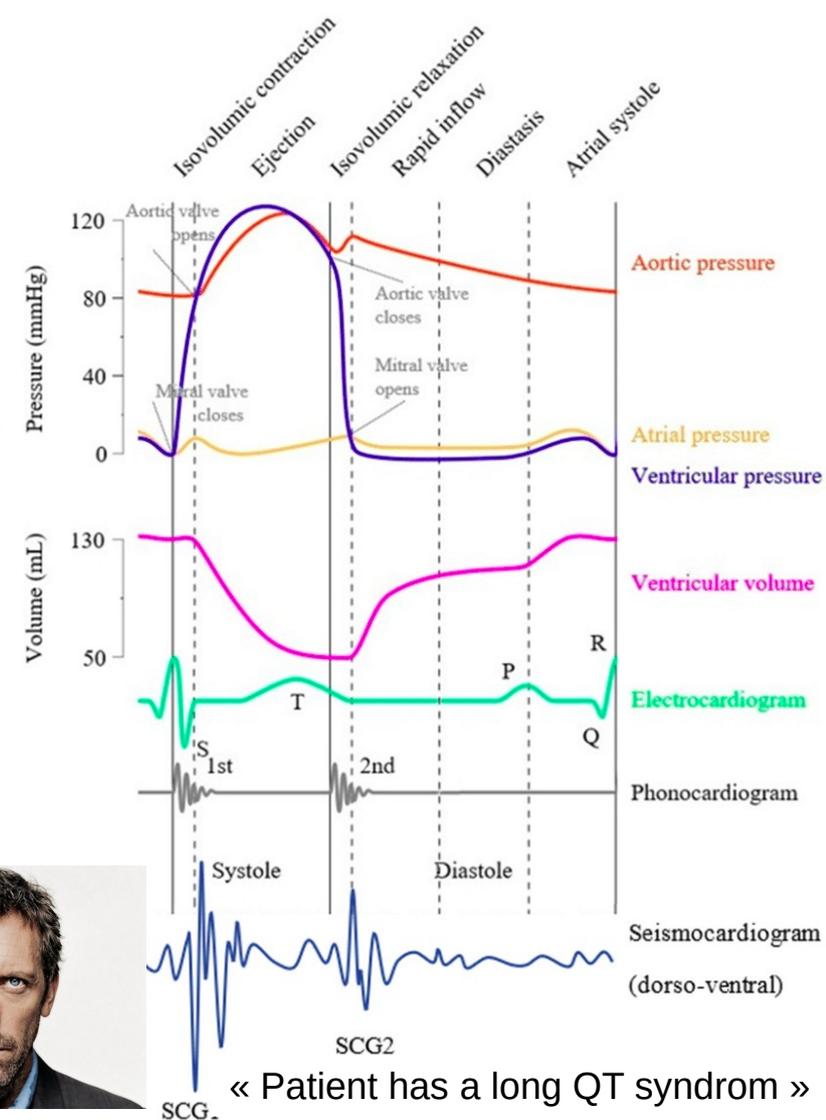
« « « 1 bar  $\equiv$  1 kg/cm<sup>2</sup> » » »

1 mm Hg = 1 Torr  $\Leftrightarrow$   
1 Torr = 133,3 Pa  
760 mm Hg = 760 Torr  $\Leftrightarrow$   
760 Torr = 1013 hPa



# La pression sanguine

- Le cœur a une masse de ~ 300 g (~ 0,5 % du corps)
  - 60-80 pulsations, 5 L/min au repos (jusqu'à 40 si effort !)
  - **Pressions « systolique » et « diastolique »** : « 12-8 » = 12 & 8 cm Hg = 120 & 80 mm Hg (15-10 % d'atmosphère)
- Girafe : cœur de 10 kg, 170 pulsations / 60 L par minute
  - Pression sanguine à la sortie du cœur **2,5 fois plus élevée** que chez l'Homme (cerveau situé 2 m plus haut)
    - Des valvules **diminuent la pression intracrânienne** lorsqu'elle baisse la tête
    - Pression énorme en bas des pattes → des **capillaires très résistants** permettent d'éviter les œdèmes

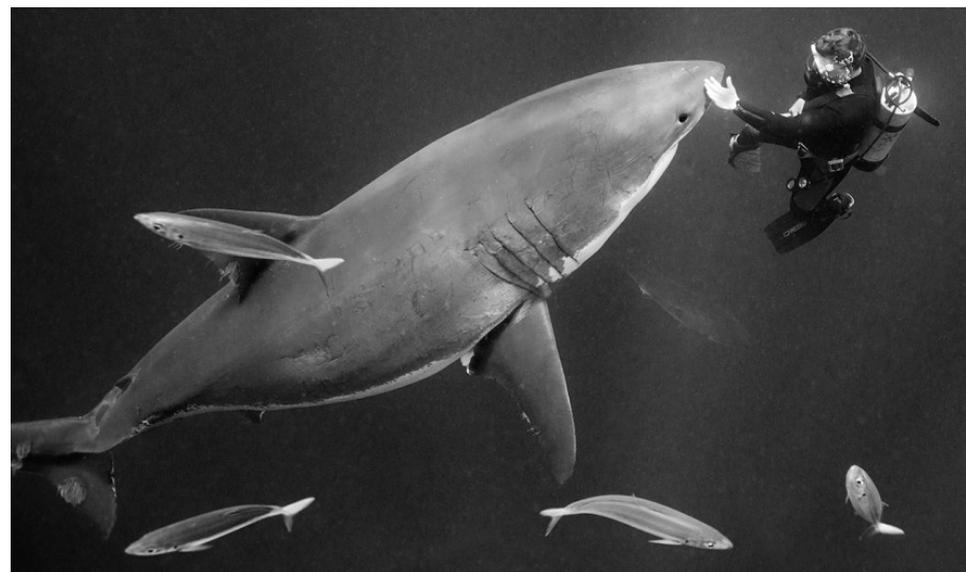
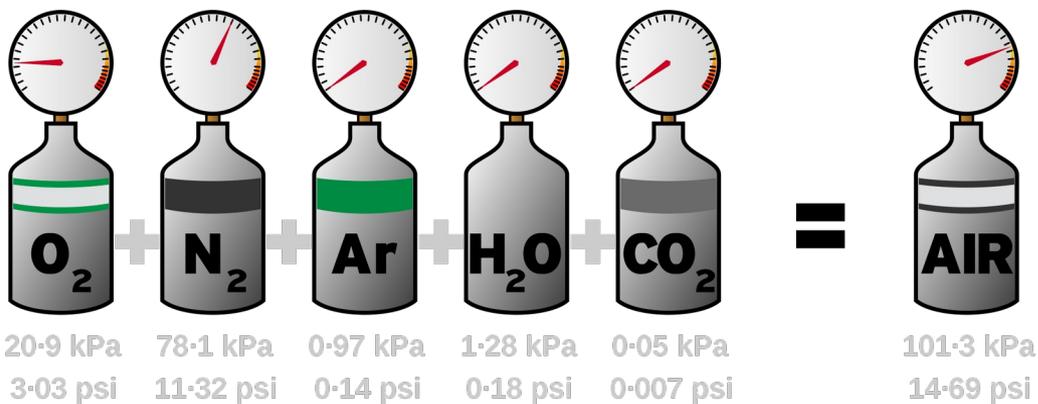


# La pression partielle d'un gaz

- Définie pour un gaz dans un **mélange**
- C'est la **pression** qu'il exercerait s'il occupait **seul le volume** du mélange
  - C'est sa **contribution à la pression totale**
- **Loi de Dalton (1801)**  $p_i = \frac{n_i}{n_{tot}} \cdot p_{tot} = x_i \cdot p_{tot}$ 
  - Proportionnelle à la **fraction** du gaz
- La **somme** des pressions partielles est égale à la **pression totale**

$$\sum_i p_i = p_{tot}$$

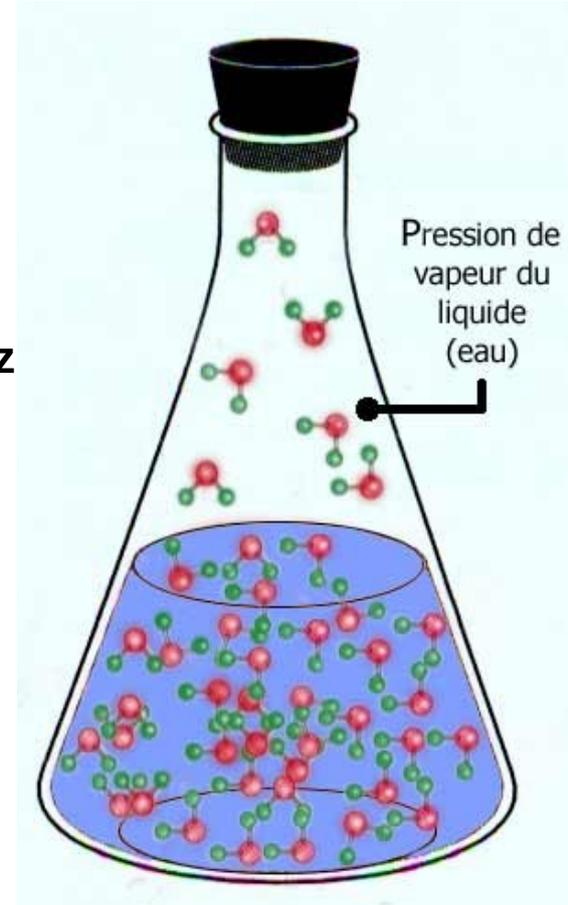
- Notion employée en plongée sous-marine :
  - **Azote** (narcose, du grec *narkê* « sommeil »)
  - **Oxygène** (toxique si  $p_{O_2} > 1,4 - 1,6$  bars)
    - **hyperoxie**
  - **Dioxyde de carbone** (hypercapnie)
    - Mélanges : nitrox, trimix, ...



L'invitation, Jean-Marie Ghislain

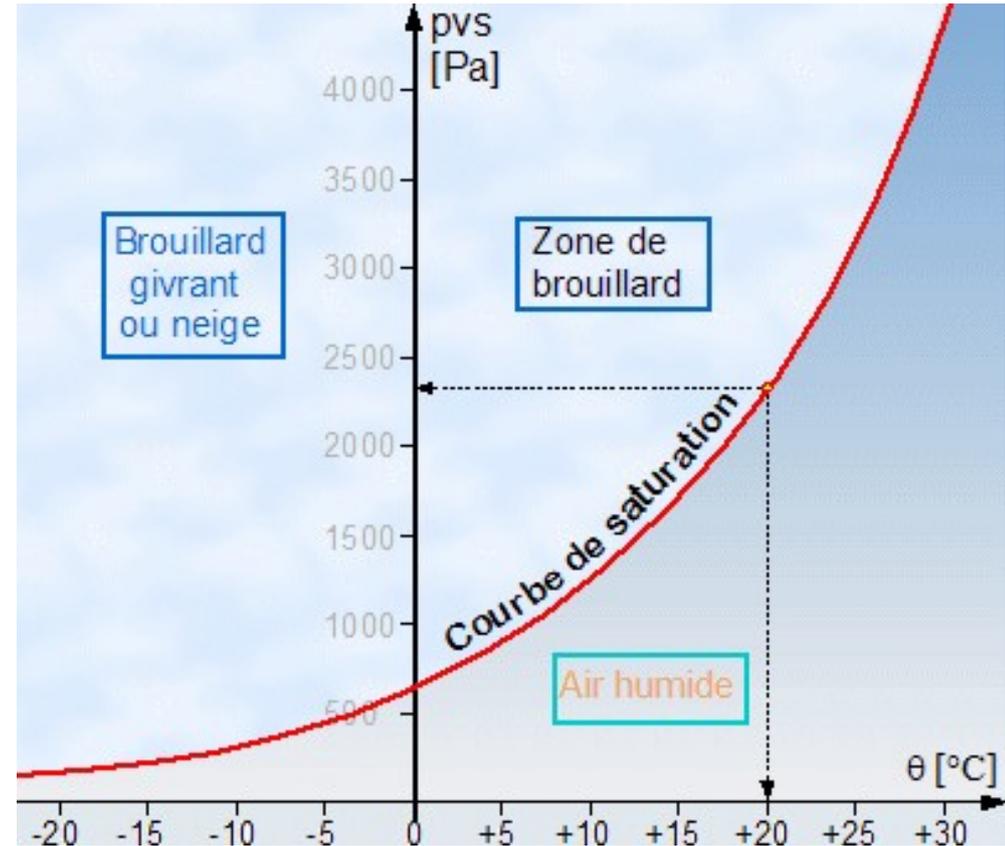
# La pression de vapeur saturante

- C'est la **pression partielle** à laquelle la **phase gazeuse** d'une substance est en **équilibre** avec sa **phase liquide** (ou solide) **à une  $T_p$  donnée**
  - « C'est la quantité de "son" gaz qu'un liquide (ou un solide) "veut" avoir autour de lui » (oui, le tungstène a une pression de vapeur saturante...)
  - Elle ne dépend que de la **température**, pas de la présence **d'autres gaz**
- Exemple du champagne (boisson gazeuse)
  - **Perd ses bulles** une fois ouvert car le liquide **dégaze** le  $\text{CO}_2$  dissous
  - Inutile : petite cuiller : le  $\text{CO}_2$  gazeux s'en va quand même
  - Utile : boucher la bouteille : le  $\text{CO}_2$  dégazé reste
  - Idéal : système de conservation par  $\text{CO}_2$  : lorsque la **pression partielle** est **égale** à la **pression de vapeur saturante**, le **dégazage s'arrête**
- Cette évaporation **prélève de l'énergie au liquide**
  - C'est pour cela qu'on souffle sur son thé et qu'il faut couvrir une casserole qui chauffe



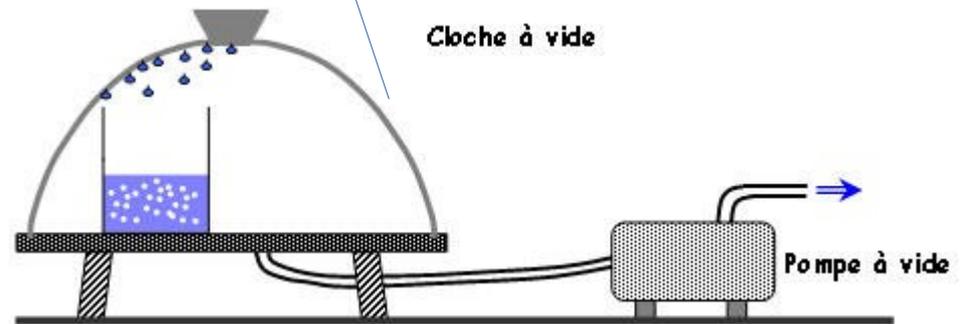
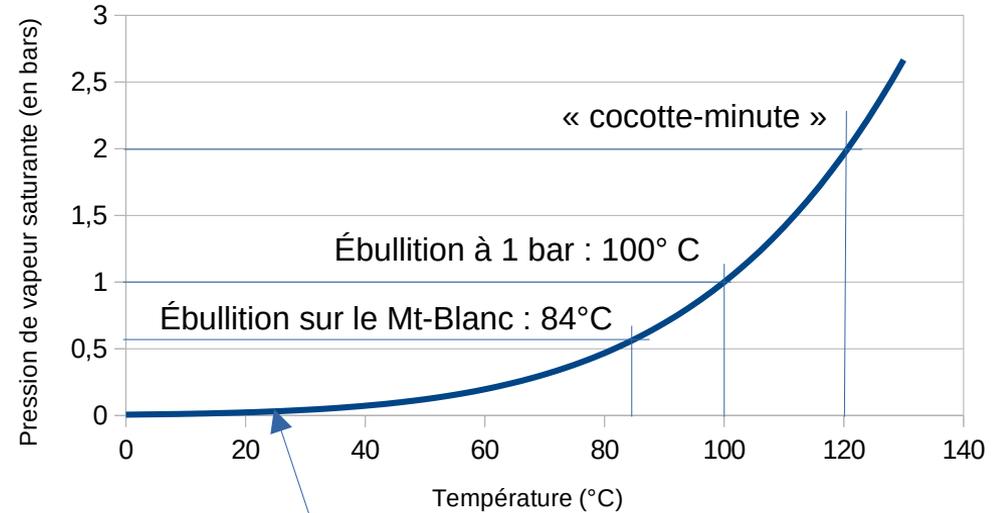
# L'hygrométrie

- **Hygrométrie** ou « **humidité relative** » : rapport entre la **pression de vapeur d'eau dans l'air** et la **pression de vapeur saturante** à cette  $T_p$
- **! Ce n'est pas le %age d'eau dans l'air !**  
$$\varphi(\%) = \frac{P_{vap}}{P_{sat}(T)} \times 100$$
- Si  $\varphi > 100\%$  → condensation (brouillard, rosée)



# L'ébullition

- Un liquide bout lorsque sa pression de vapeur saturante est égale à la pression ambiante
  - « Il veut remplacer tout le gaz autour par "son" gaz »
  - On peut faire bouillir de l'eau à **120°C** (cocotte-minute) ou **25°C** (sous une cloche à vide)
  - On peut maintenir de l'eau à **300°C liquide** (pression  $\approx$  60-80 bars)
- Cette transformation nécessite une « **enthalpie de vaporisation** » qui vaut
- $\Delta H = 2260 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Or  $c_{\text{eau}} = 4,185 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ 
  - Il faut donc **5 fois plus d'énergie pour faire évaporer de l'eau que pour la chauffer de 0°C à 100°C !**



# Volatilité et odeurs

- La volatilité est la mesure de la **capacité d'une substance à se vaporiser**

$$\text{volatilité} = \frac{\text{proportion du corps dans le gaz}}{\text{proportion du corps dans le liquide}}$$

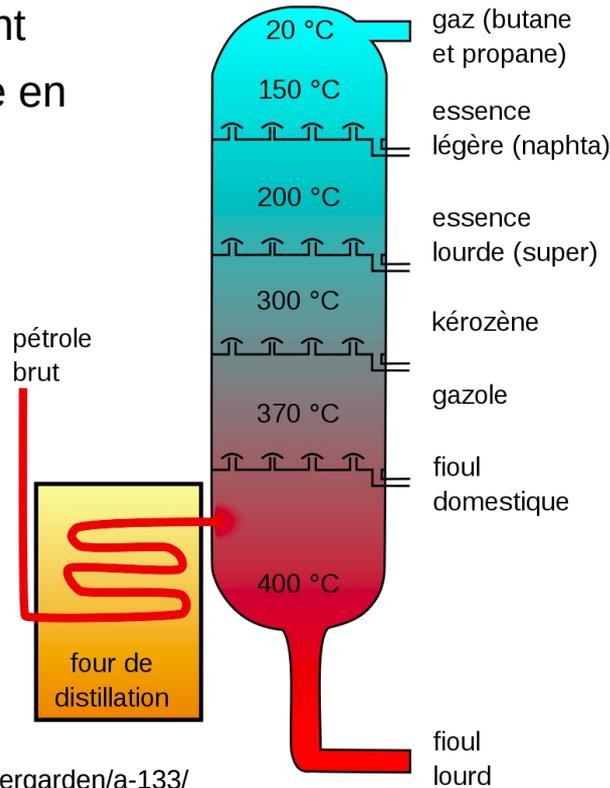
- Importante pour définir la qualité d'un carburant
- Plus le corps est volatil, plus le gaz est riche en ce corps par rapport au liquide / aux autres et plus on le sent**



- La volatilité relative des différents corps permet de les séparer par « **distillation** ». La volatilité relative est :

$$\alpha = \frac{\text{volatilité de A}}{\text{volatilité de B}}$$

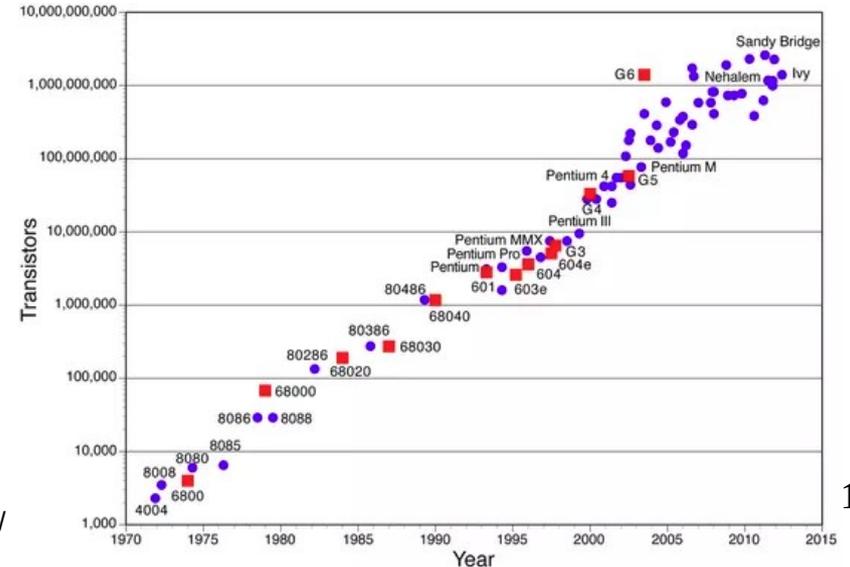
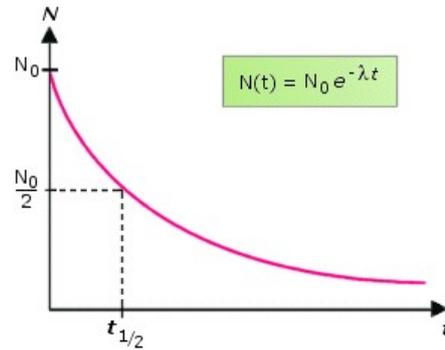
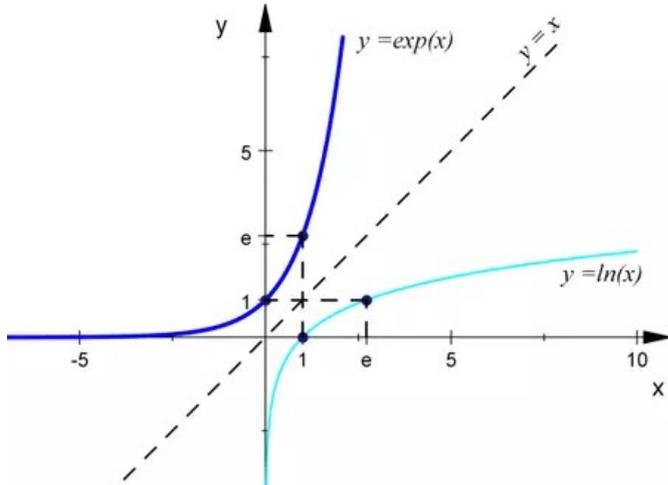
- La distillation est efficace si  $\alpha > 1,05$  → eau de vie, huiles essentielles, pétrole (distillation « fractionnée »)



# Exponentielle et logarithme

Ce sont des **fonctions réciproques** : symétriques par rapport à la droite  $y=x$

- Croît très rapidement
  - Transforme la somme en produit
- Phénomènes explosifs
- Exponentielle décroissante : réactions chimiques, radioactivité, électricité, ...
- Croît très lentement
  - Transforme le produit en somme
- Échelle logarithmique : représente plusieurs **ordres de grandeur**
  - Échelle de Richter, décibels, pH, loi de Moore, ...



<http://mathstutoring1.blogspot.com/>

<http://theinnovationandstrategyblog.com/2014/07/09/linnovation-et-le-progres-est-ce-la-meme-chose/>  
<https://www.maxicours.com/se/cours/mesure-d-une-duree-a-partir-d-une-decroissance-radioactive/>

# Perception humaine

- L'oreille humaine perçoit les sons de fréquence comprise entre

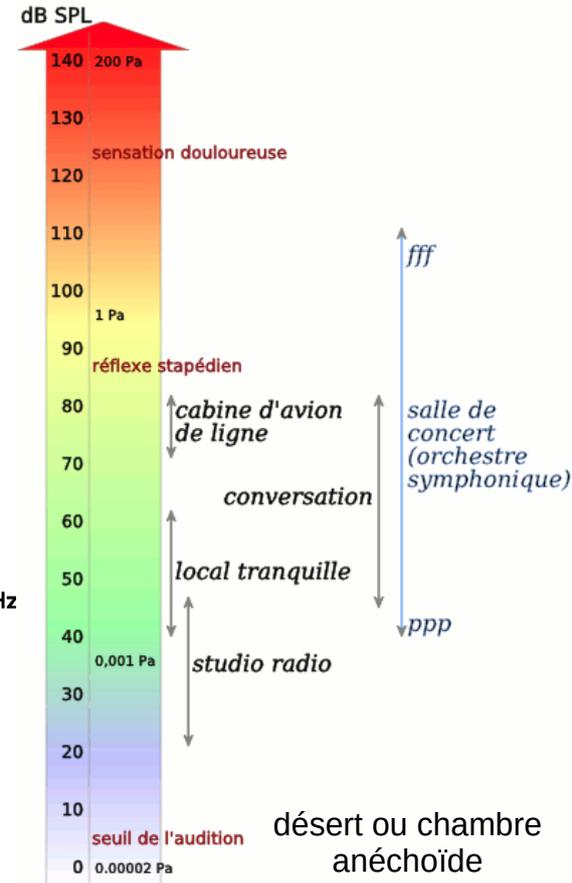
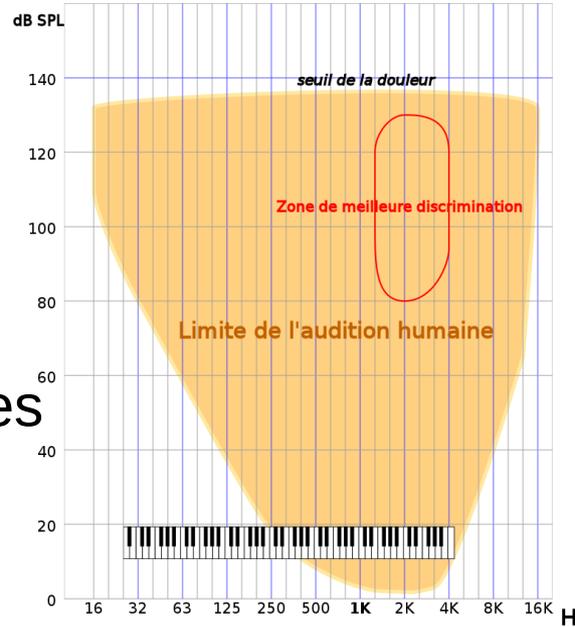
- 16 Hz pour les sons graves
- 15 à 18 kHz pour les sons aigus

- La sensibilité :

- varie selon les individus
- diminue aux fréquences extrêmes
- diminue avec l'âge

- Domaines acoustiques :

- en dessous de 16 Hz : « infrasons »
- au-dessus de 20 kHz : « ultrasons »
- au-dessus de 1 GHz : « hypersons »



$$X_{dB} = 10 \log \left( \frac{P}{P_0} \right)$$

avec  $P_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

# Le pH

Nombre d'Avogadro  
 $N_A = 6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

- Pour « potentiel hydrogène »
  - Mesure de l'**activité chimique des ions hydrogène (protons), hydratés sous forme  $H_3O^+$**
  - $10^{-15} \text{ mol.L}^{-1} < [H_3O^+] < n \text{ mol.L}^{-1} \rightarrow$  **logarithme**
  - Si  $pH = 7$  : la solution est **neutre**
  - Si  $pH < 7$  : la solution est **acide**       $pH = -\log [H_3O^+]$
  - Si  $pH > 7$  : la solution est **basique**
- **Autoprotolyse** de l'eau :  $H_2O + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^-$
- Une « **solution tampon** » maintient approximativement **le même pH** malgré une dilution ou l'addition de petites quantités d'un acide ou d'une base
  - Exemple : sang = **tampon physiologique** formé par le couple  $H_2CO_3 / HCO_3^-$  (**acide carbonique / ion bi/hydrogénocarbonate**)

Substance	pH approximatif
Acide chlorhydrique (à 37 %m)	-1,1
Acide chlorhydrique (1 mol/L)	0
Drainage minier acide (DMA)	<1,0
Acide d'un accumulateur ou batterie	<1,0
Acide gastrique	2,0
Jus de citron	2,4 - 2,6
Cola <sup>1</sup>	2,5
Vinaigre alimentaire (de 6 à 8 %)	2,5 - 2,9
Jus d'orange ou de pomme	3,5
Vin	4,0
Bière	4,5
Café	5,0
Thé	5,5
Pluie acide	<5,6
Lait	6,5
Salive humaine	6,5 - 7,4
Eau pure	7,0
Sang	7,38 - 7,42
Eau de mer	8,2
Savon	9,0 - 10,3
Eau de Javel	11,5
Chaux	12,5
Soude (1 mol/L)	14,0
Soude (saturée)	15,0

# L'homéostasie

- Terme introduit par Claude Bernard (fondateur de la médecine expérimentale)

- du grec ὅμοιος, **hómoios**, « similaire »  
στάσις, **stásis**, « stabilité »

- (Capacité de) **conservation d'une propriété d'un milieu autour d'une valeur souhaitée** grâce à des processus de **régulation** (température du corps, composition du sang, acidité, ...)

- Assurée chez l'humain par le système nerveux autonome et le système endocrinien :

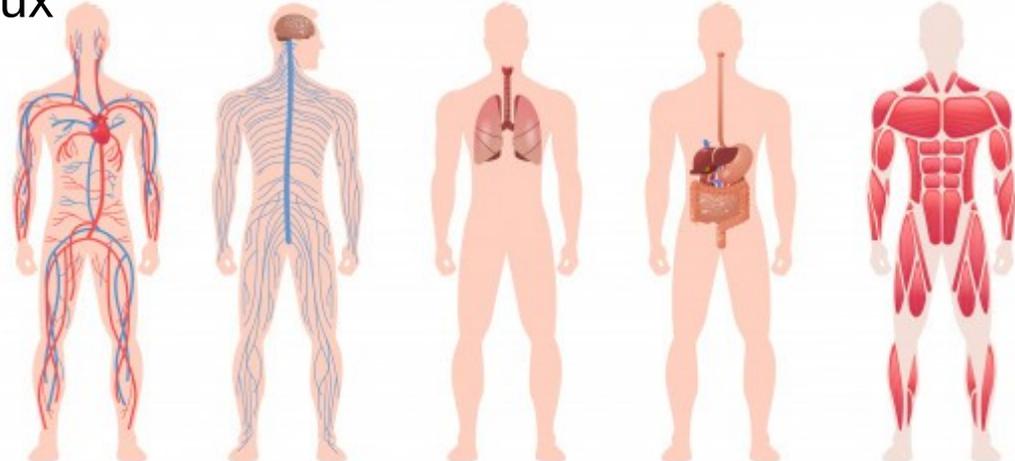
- Rythmes cardiaque et respiratoire
  - Vasodilatation et vasoconstriction
  - Miction, sudation

- Influencée par l'environnement (stress, pollution, ...), l'alimentation, le sommeil

- Concept également utilisé dans les organisations

## Arianisme, homoiousisme et consubstantialité

- homoousiens (nicéens) : Fils et Père de la même nature (« consubstantialité ») : *homoousios*
- homoiousiens : Fils et Père de nature semblable : *homoiousios*
- homéens : ressemblance du Fils au Père : *homoios*
- an(h)oméens : dissemblance du Père et du Fils : *anomoios*



# Régulation thermique

- **Conduction thermique**

- Lorsque la peau est en **contact** avec un objet de température différente
- Dépend de la phase (solide, liquide, gaz) et de la vitesse éventuelle (vent, mouvement)

- **Convection**

- Si la peau est plus chaude que l'air, l'air en contact avec la peau chauffe, s'élève et est remplacé par de l'air plus frais
- Inverse si peau plus froide

- **Rayonnement**

- Émission d'un rayonnement dépendant de la température

- **Transpiration** : production et évacuation de la sueur par les pores de la peau

- **Evaporation** des molécules sur la peau

- Si hygrométrie < 100 %
- Sueur visible seulement si transpiration ou hygrométrie importantes
- Si  $T > 37\text{ °C}$  et humidité à 100 %, on ne tient pas longtemps...

- L'évaporation de la sueur sur la peau **prélève de la chaleur** au corps, ce qui entraîne son **refroidissement**

- L'évaporation dépend de l'humidité relative et de la vitesse de l'air

- Les plantes transpirent, les lapins ne transpirent pas, les chiens transpirent par les coussinets mais se refroidissent surtout par la langue



Le Soldat de Marathon  
annonçant la victoire  
Jean Pierre Cortot, 1834  
(Louvre)

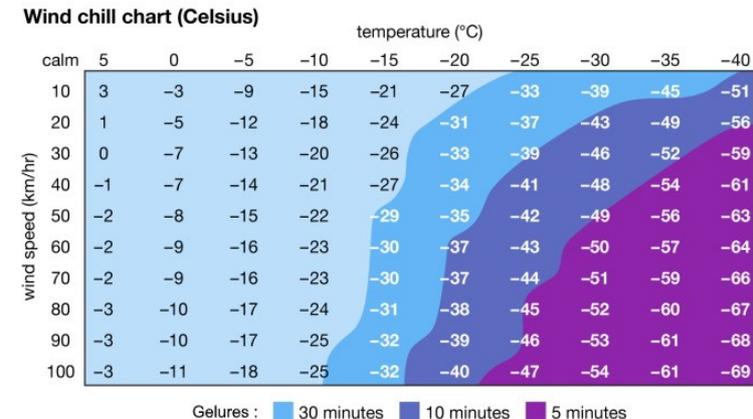
# La température ressentie

- Rappel : la température est la mesure de l'**agitation thermique** moyenne des particules d'un corps
- Quand deux corps sont en contact, ils **harmonisent leur température** par un **transfert de chaleur** (énergie cinétique microscopique) du plus chaud vers le plus froid → **équilibre thermique**
- **Le froid n'existe pas en physique !**
  - Un corps a une température sup. / inf. à un autre
- **Température ressentie = Indice** qui exprime la **sensation subjective** « de froid ou de chaleur » en fonction de la **température réelle**, du **vent** et de l'**humidité relative** (et de l'ensoleillement direct)



Indice Humidex

		Température (°C)															
		21	25	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Humidité relative (%)	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40	41	43	44	46	47
	30	-	-	31	33	34	36	37	38	40	42	43	45	47	48	50	51
	40	-	33	34	35	37	39	40	42	44	45	47	49	51	53	54	56
	50	33	35	36	38	40	41	43	45	47	49	51	53	55	57	-	-
	60	33	30	38	40	42	44	46	48	50	52	54	57	-	-	-	-
	70	33	32	41	43	45	47	49	51	53	56	58	-	-	-	-	-
	80	33	33	43	45	47	50	52	54	57	59	-	-	-	-	-	-
	90	33	35	45	48	50	52	55	57	60	-	-	-	-	-	-	-
	100	37	37	48	50	53	55	58	-	-	-	-	-	-	-	-	-



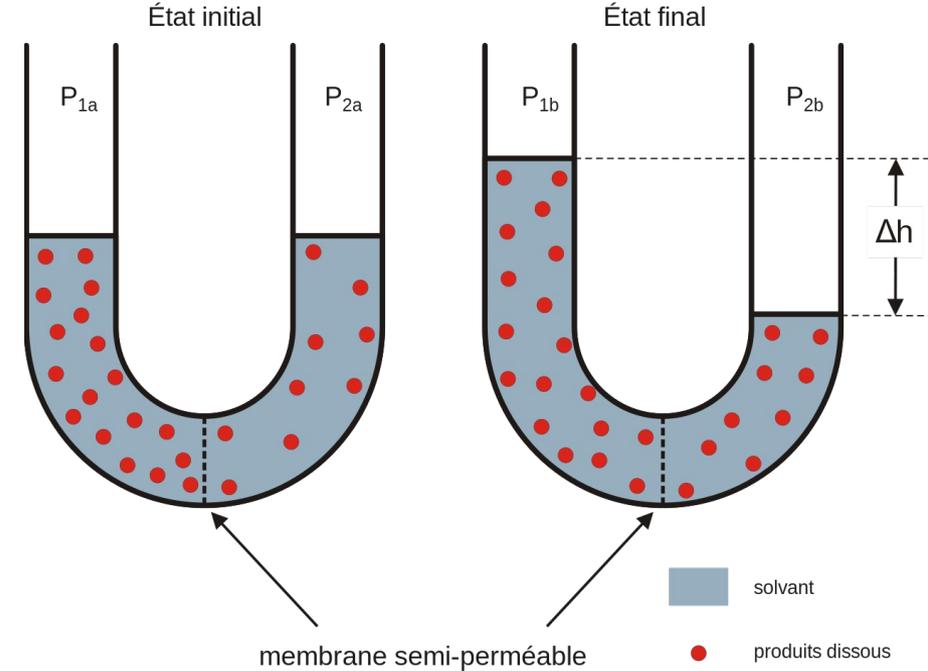
<http://www.unbelievableinfo.com/2013/12/the-ice-man-wim-hof.html>

[meteo-paris.com/actualites/comment-le-taux-d-humidite-et-le-vent-influent-sur-notre-perception-du-froid](http://meteo-paris.com/actualites/comment-le-taux-d-humidite-et-le-vent-influent-sur-notre-perception-du-froid)

# Osmose et pression osmotique

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

- **Osmose = diffusion de matière :**
  - Passage de molécules de **solvant** (en général eau) d'une solution à une autre à travers une **membrane semi-perméable** si les **concentrations en soluté** sont **différentes**
  - Transfert de la solution **la moins concentrée** (milieu **hypotonique**) **vers la plus concentrée** (milieu **hypertonique**) jusqu'à l'équilibre (milieux **isotoniques**)
- Apparition d'une « **pression osmotique** » sur la paroi

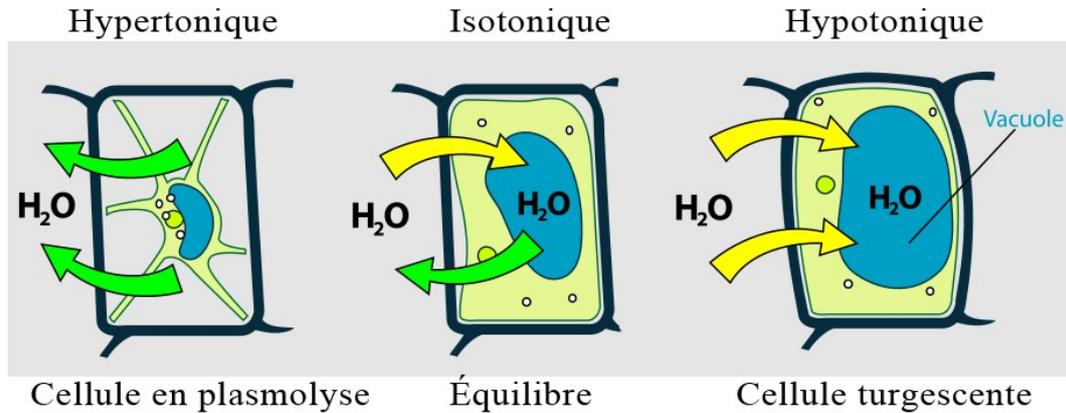


$$\Pi = \Delta c \cdot R \cdot T$$

Loi de l'« **osmométrie** » énoncée par van 't Hoff en 1886

→ prix Nobel de chimie 1901

# Effets biologiques



- La pression osmotique permet :
  - l'absorption des nutriments lors de la digestion
  - La conservation des aliments (sucre, sel)

- **Osmorégulation** : processus homéostatiques maintenant l'**osmolarité** (concentration osmotique) d'un être vivant à un niveau normal

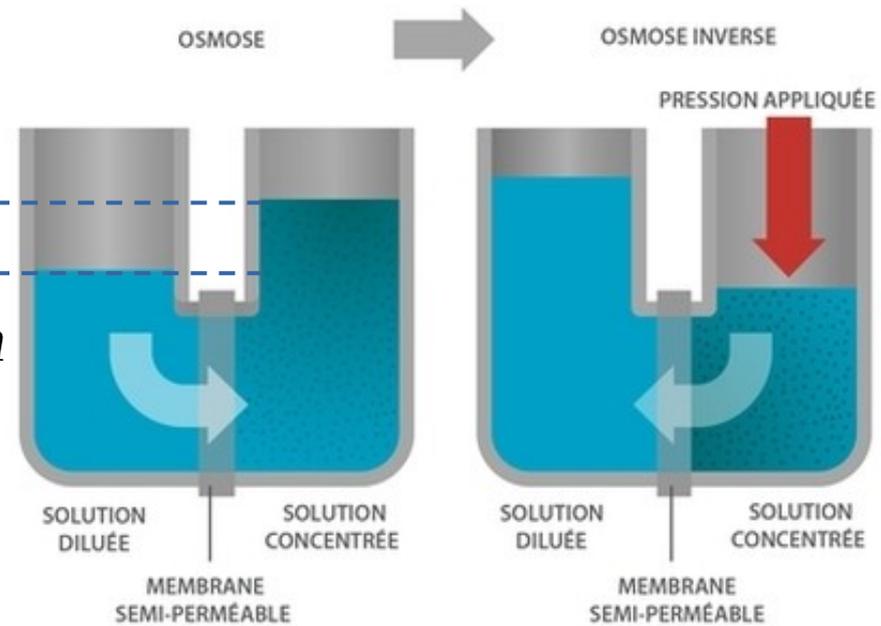
- Un organisme « **euryhalin** » (requin bouledogue, tortue marine) peut résister à un **fort changement de concentration interne** en solutés, contrairement à un organisme « **sténohalin** » (poisson de récif, limace)



# L'osmose inverse

C'est le procédé  
(volontaire)  
inverse de l'osmose

$$p_o = \rho g \Delta h$$



- On applique une pression  $p_A$  sur la solution plus concentrée

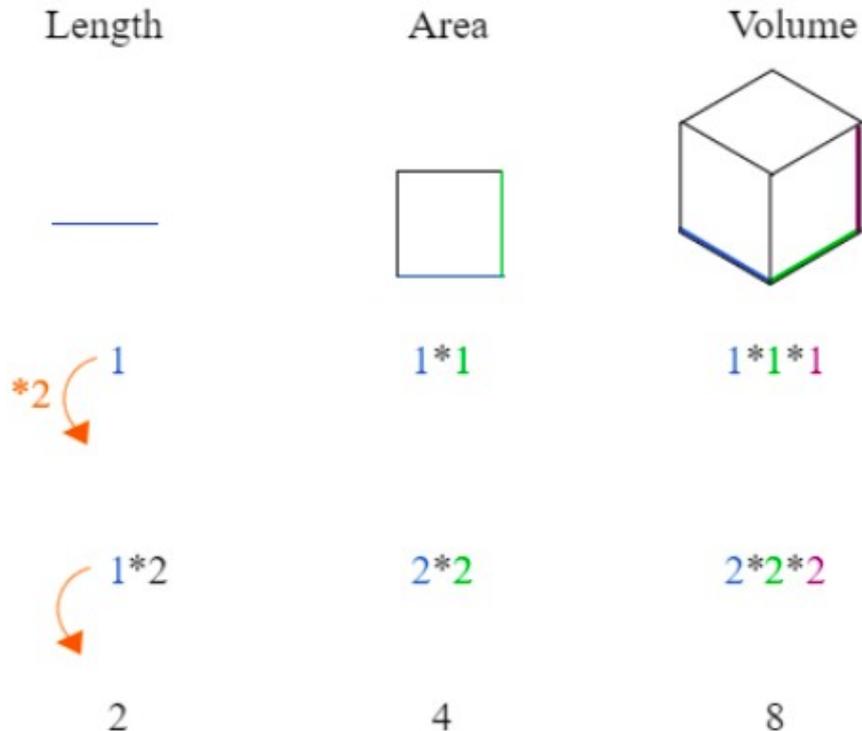
- Si elle est supérieure à  $p_o$  (pression osmotique), le solvant traverse la membrane vers la solution la moins concentrée
- Plus  $p_A$  est grande, plus on a de solution diluée (purifiée)



Usine de dessalement de l'eau de mer en Arabie saoudite

# Quelle est notre taille maximale ?

- **Effet d'échelle** (loi des carrés et des cubes)



Le bousier taureau soulève 1000 fois son poids



- Vol d'un oiseau

- Energie cinétique :  $E_c = \frac{1}{2} m v^2$
- masse  $\propto$  volume  $\propto L^3$ ,  $v \propto L$  donc  $E_c \propto L^5 \rightarrow$  quand on double la dimension, énergie multipliée par  $2^5 = 32$  !

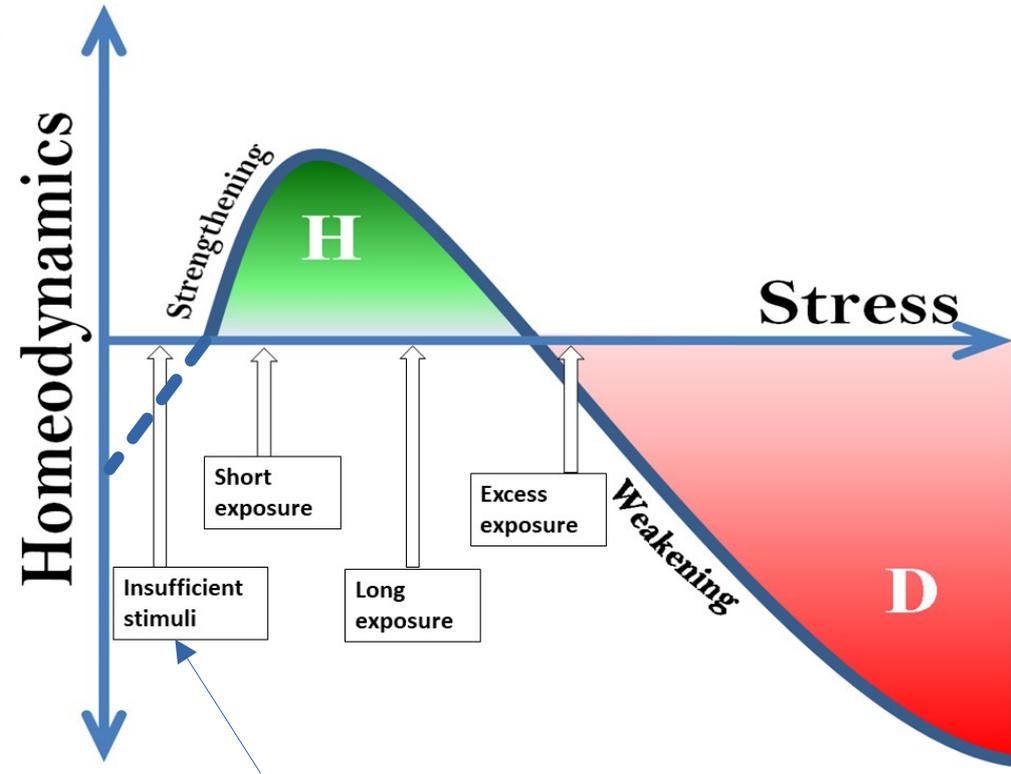
- Corps humain :

- Solidité d'un os & force d'un muscle proportionnelles à sa section ( $L^2$ )
- Poids du corps proportionnel à son volume ( $L^3$ )
- Modélisation de la limite : résistance à la fracture du crâne lors d'une chute  $\rightarrow \sim 3$  m
- Homme le plus grand : Robert Wadlow, 2,72 m

# L'hormèse

- De *ὁρμαεῖν* (hormáein), mettre en mouvement
- Hormèse = réponse biologique de défense **généralement favorable** à un stress modéré (faibles doses de toxines, pic de Tp, ...)
  - Ainsi, certains toxiques dits « **hormétiques** » peuvent avoir un effet opposé selon que la dose reçue est faible ou forte
  - Certaines substances sont nocives même à faible dose et d'autres ont des effets cumulatifs (ex : métaux lourds)
- Exemple : **mithridatisation** (II<sup>e</sup> siècle av J.C.) : ingestion de doses croissantes d'un produit toxique pour s'y rendre insensible

« Rien n'est poison, tout est poison ; c'est la dose qui fait le poison » Paracelse (XVI<sup>e</sup> siècle)



« Use it or lose it »

# Le « problème corps-esprit »

- **Questionnement philosophique sur les relations corps/cerveau-esprit**

- **Dualisme** (Descartes, 1641 : le corps (« substance étendue ») et l'esprit (« substance pensante ») sont distincts)

- **Dans la culture :**

- Livre de Bernard Werber, « Encyclopédie du savoir relatif et absolu » :
  - un marin portugais serait mort de froid dans un frigo qui était en fait éteint
- Film de C. Lelouch « Hommes, femmes : mode d'emploi » (1996) :
  - une secrétaire médicale intervertit des résultats, faisant croire à un patient sain qu'il a un cancer et laissant un malade dans l'ignorance

- **Effet placebo** (« je plairai » en latin) ~ 1800
  - **Résultat psycho-physiologique positif constaté après un traitement sans efficacité prouvée**
  - Concerne tous les médicaments
  - Indispensable aux études en « double aveugle »
  - Nombreux facteurs : qui, contexte, forme, prix, ...
  - Sensibilité : 30 % (~70 % sur dépression)
- **Effet nocebo** (« je nuirai » en latin) : 1961
  - Apparition d'effets indésirables dont le patient a pu avoir connaissance (médias, notice, ...) **sans prise du médicament**, anticipation de la douleur
  - Sensibilité : 20 à 30 % (maux de tête, somnolence et nausées lors de la prise d'un placebo)
- **Guérisons « miraculeuses »**
  - Lourdes : 70 personnes depuis 1858, 80 % de femmes
  - Critères : maladie avérée, incurable, guérison complète, immédiate et permanente due à une visite à Lourdes