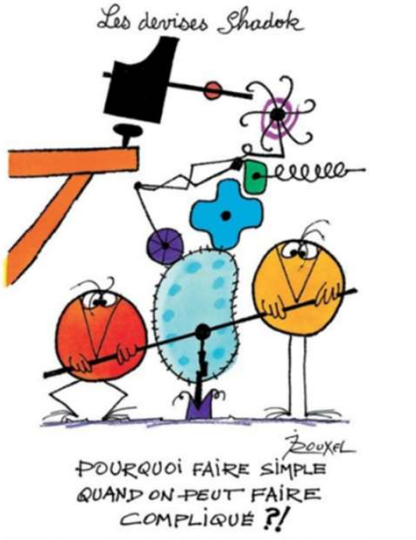
L'Art du Rien :

Exploration des Mystères du Vide …

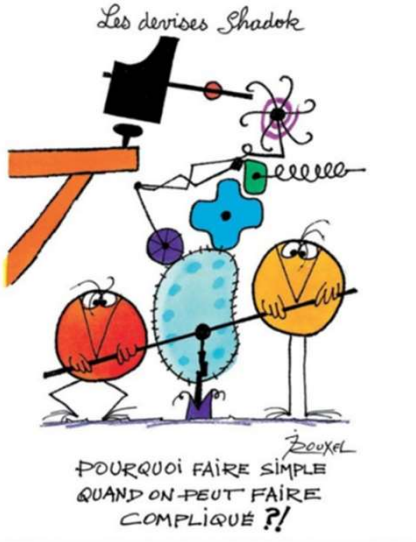


Virginie SPEISSER – CNRS / IPCMS
virginie.speisser@ipcms.unistra.fr

L'Art du Rien :

Exploration des Mystères du Vide …

Partie I : Introduction => Compléments



Virginie SPEISSER – CNRS / IPCMS
virginie.speisser@ipcms.unistra.fr

2. Définition du vide

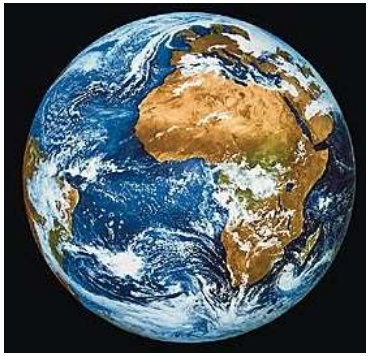
2.2. Les conditions nécessaires pour le vide

Le vide est possible lorsque l'on a un *domaine de l'état gazeux à une pression inférieure à la pression dite « normale* ».*

Pour ce faire, il faut :

- De la matière à l'état gazeux
- Des « limites » (ex. : des parois solides, les limites de l'atmosphère terrestre)
- Une référence de pression dite « normale* »

sur Terre
1013hPa @ 25°C



sur Vénus
***90 000 hPa** @ 450°C*

sur Mars
70 hPa @ -60°C

sur la Lune
1 nPa @ -18°C

**** Dans l'expression « conditions normales », le terme normal signifie normalisé et non pas habituel.***

I. Le vide à travers l'histoire

Otto von Guericke

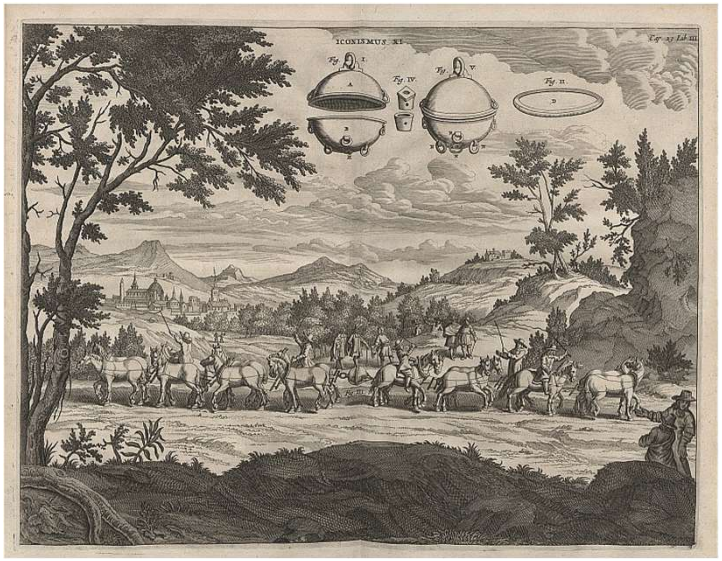
- 17ème siècle :
  - L'expérience des hémisphères de Magdebourg.

=> Force nécessaire pour séparer les sphères :

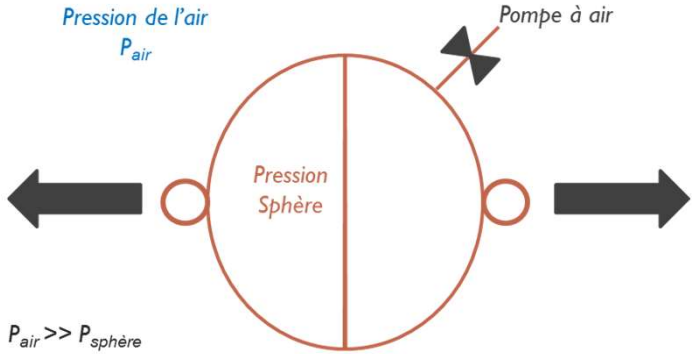
~ 20 000 Newtons ⇔ ~ 2 tonnes

$$(F = \pi r^2 \Delta P)$$

où
- ΔP (Pa) est la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la sphère,
- r est le diamètre de la sphère (m).



Expérience des hémisphères de Magdebourg



Diamètre ~ 40 à 50 cm

L'Art du Rien :

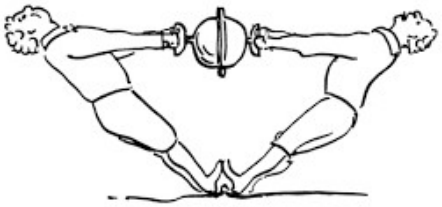
Exploration des Mystères du Vide …

Partie 2 : Le concept scientifique du vide et ses applications

Virginie SPEISSER – CNRS / IPCMS
virginie.speisser@ipcms.unistra.fr

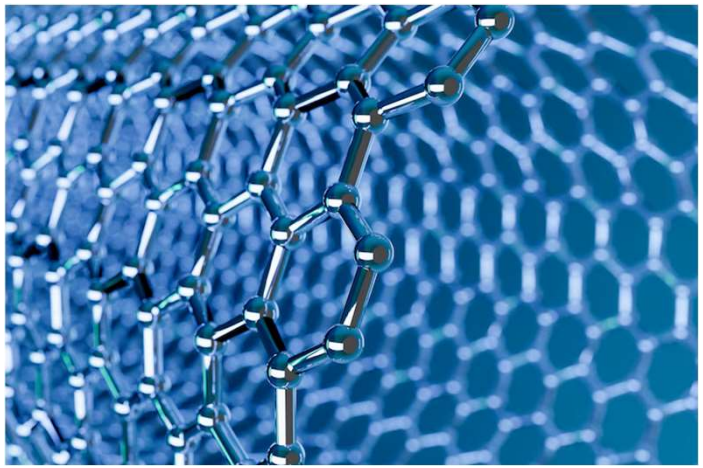
Partie 2 : Le concept scientifique du vide et ses applications

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »
- La pression
- La densité moléculaire
- Le libre parcours moyen
- Le vide qui n'est pas si vide…



II. Pourquoi faire le vide?
- Des exemples d'applications

Satellite

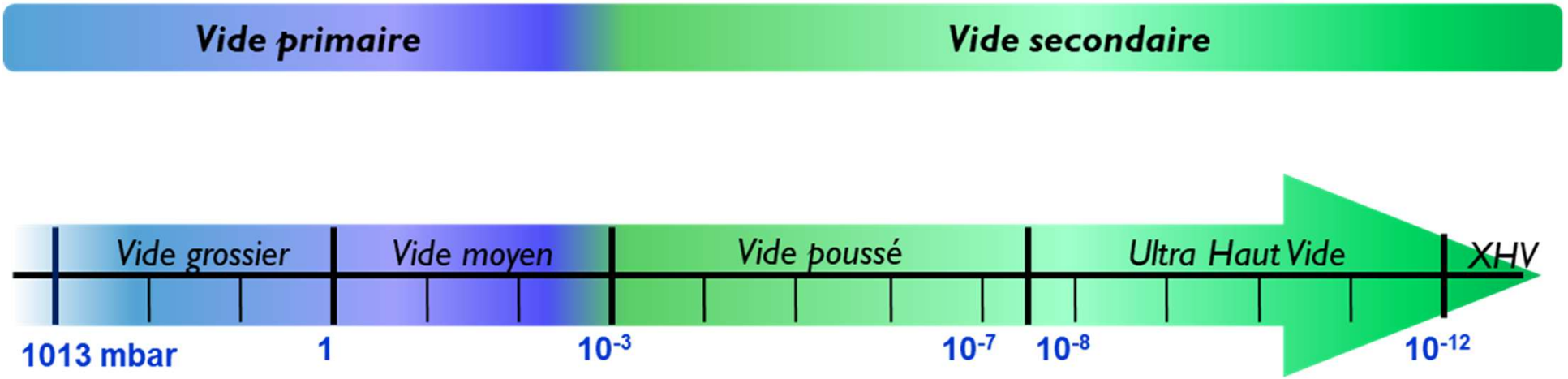


Nanotube de carbone

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

Le vide est possible lorsque l'on a un *domaine de l'état gazeux à une pression inférieure à la pression dite « normale ».*

- **« L'échelle du vide »**



Rappel : 1 Pascal (Pa) = 1 N.m^{-2}
Autres unités : 1 Torr / mmHg = 1,33.10^{2} Pa *1 micron de mercure (µHg) = 0,133 Pa* *1 mbar / hPa = 100 Pa*

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Pour caractériser le vide, la grandeur utilisée est la pression :

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

Où
P est la pression en N/m² ou en Pa (Pascal)
F est la force en N (Newton)
S est la surface sur laquelle la force est appliquée en m²

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Pour caractériser le vide, la grandeur utilisée est la pression :

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

Où
P est la pression en N/m² ou en Pa (Pascal)
F est la force en N (Newton)
S est la surface sur laquelle la force est appliquée en m²

- Nécessite une déformation / un mouvement « perceptible »

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Pour caractériser le vide, la grandeur utilisée est la pression :

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

Où
P est la pression en N/m² ou en Pa (Pascal)
F est la force en N (Newton)
S est la surface sur laquelle la force est appliquée en m²

- Nécessite une déformation / un mouvement « perceptible »

Vidéo sur ballon dans la cloche à vide : https://pod.univ-lille.fr/video/1817-le-ballon-dans-la-cloche-a-vide/

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Pour caractériser le vide, la grandeur utilisée est la pression :

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

Où
P est la pression en N/m² ou en Pa (Pascal)
F est la force en N (Newton)
S est la surface sur laquelle la force est appliquée en m²

- Nécessite une déformation / un mouvement « perceptible »

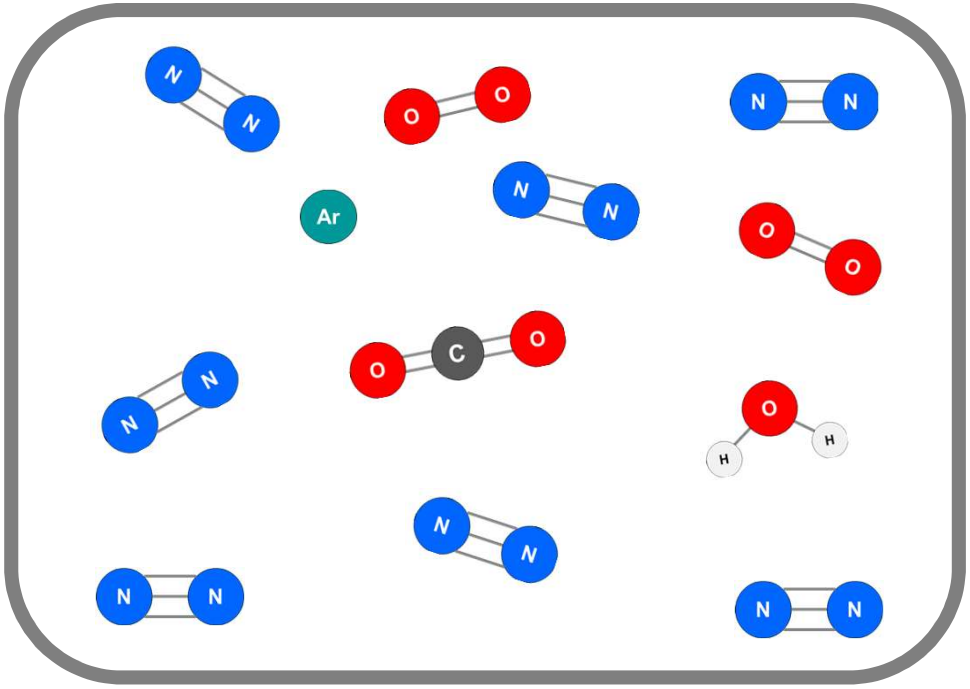
- À faibles pressions (=> déformation faible), utilisation de mesures indirectes

↳ Nécessité d'autres grandeurs de quantification *« Equivalent au Pa », permettant d'exprimer la pression.*

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- De quoi est constitué le vide?

Le vide peut être considéré comme une population de molécules, en agitation thermique, enfermées par des parois.

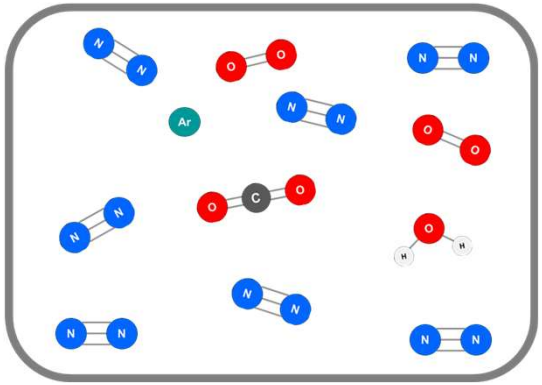


I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

John Dalton

- De quoi est constitué le vide?
  - Loi de Dalton (1801)

  Loi de thermodynamique énonçant que la pression au sein d'un mélange de gaz parfaits est égale à la somme des pressions partielles de ses constituants.



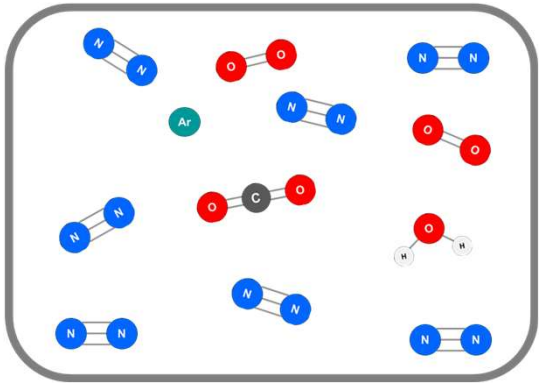
Composition de l'air

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

John Dalton

- De quoi est constitué le vide?
  - Loi de Dalton (1801)

  Loi de thermodynamique énonçant que la pression au sein d'un mélange de gaz parfaits est égale à la somme des pressions partielles de ses constituants.



Composition de l'air

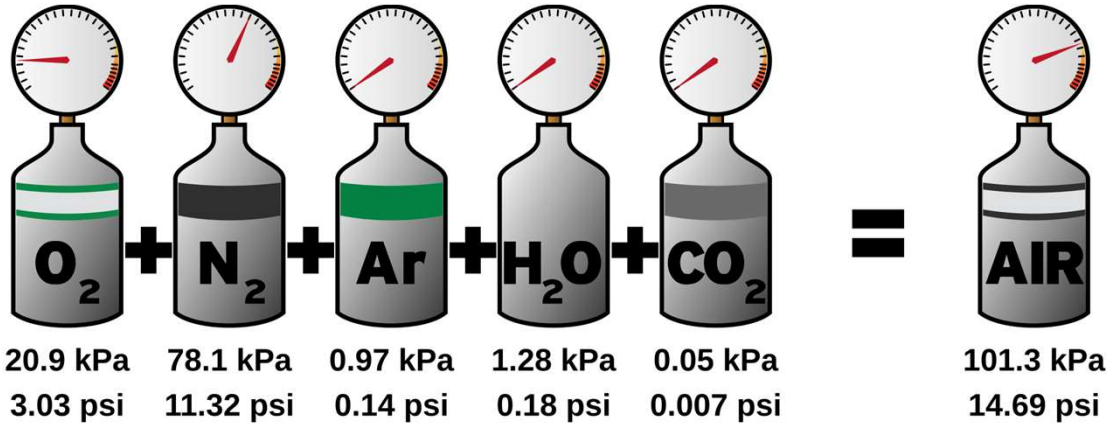


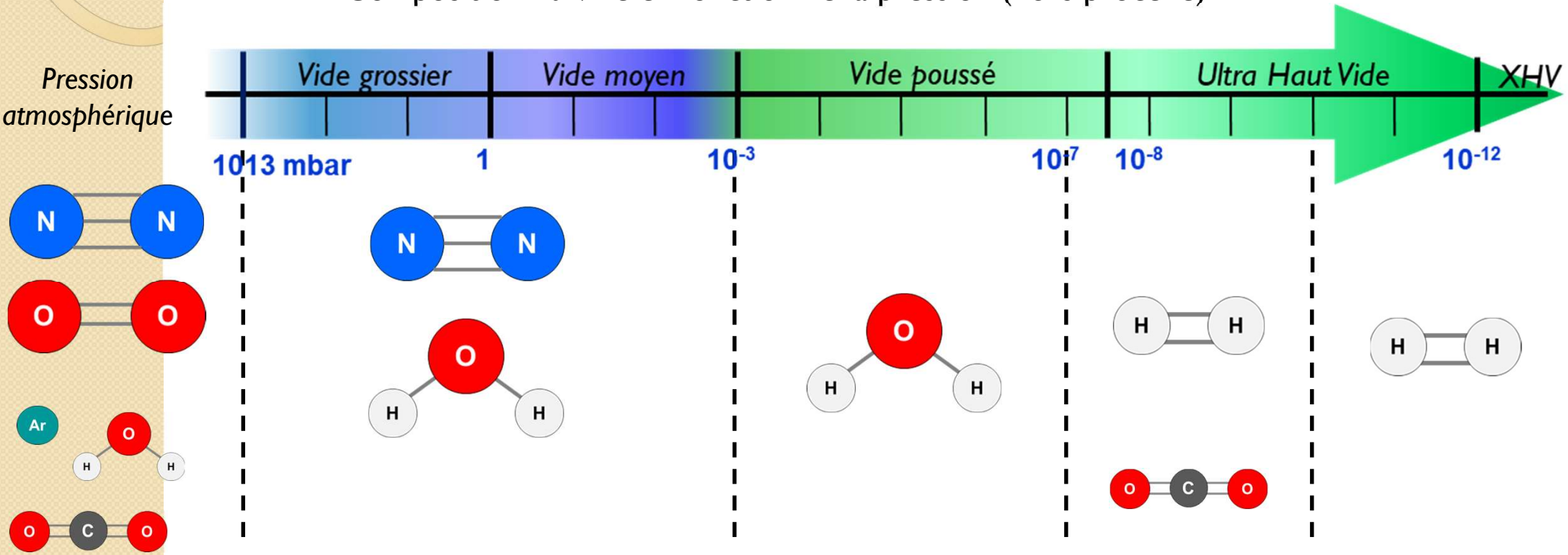
Illustration de la loi de Dalton en utilisant les gaz de l'air ambiant

(Par Andrew Jarvis — source Wikipédia)

Loi de Dalton : $P_{totale} = \Sigma P_{partielles}$

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- De quoi est constitué le vide?
  - ➢ Composition du vide en fonction de la pression (hors procédé)



I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

Amedeo Avogadro

- Hypothèse d'Avogadro : (1811)

Dans des conditions identiques de pression et de température, un même volume de gaz quelconque contient le même nombre de molécules.
Dans les conditions dites normales (P = 760 mmHg / T = 0°C), une mole (quantité de matière d'un système) occupe 22,4L et contient $\mathcal{N}$ = 6,02.10^{23} molécules.

Dans 1 cm^3, il y a :
- 2,69.10^{19} molécules / cm^3, à la pression atmosphérique,
- 2,66.10^{10} molécules / cm^3, à 10^{-6} mbar.

- Loi fondamentale des gaz parfaits

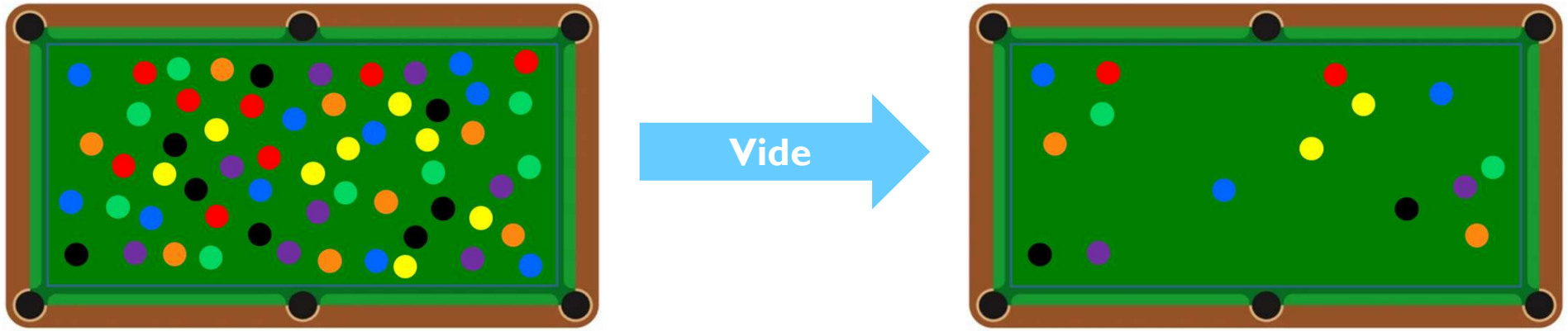
À basse pression, un gaz réel se comporte comme un gaz parfait.

$$P.V = n.R.T$$

Avec
P *: pression (Pa)* ***V*** *: volume de gaz (m^3)* ***T*** *: température absolue (K)* ***n*** *: nombre de molécules (mol)*
R *: constante des gaz parfaits (~ 8,314 J . K^{-1} . mol^{-1})*

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- La densité moléculaire :
  C'est le nombre de molécules par unité de volume.



I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- La densité moléculaire :
  C'est le nombre de molécules par unité de volume.

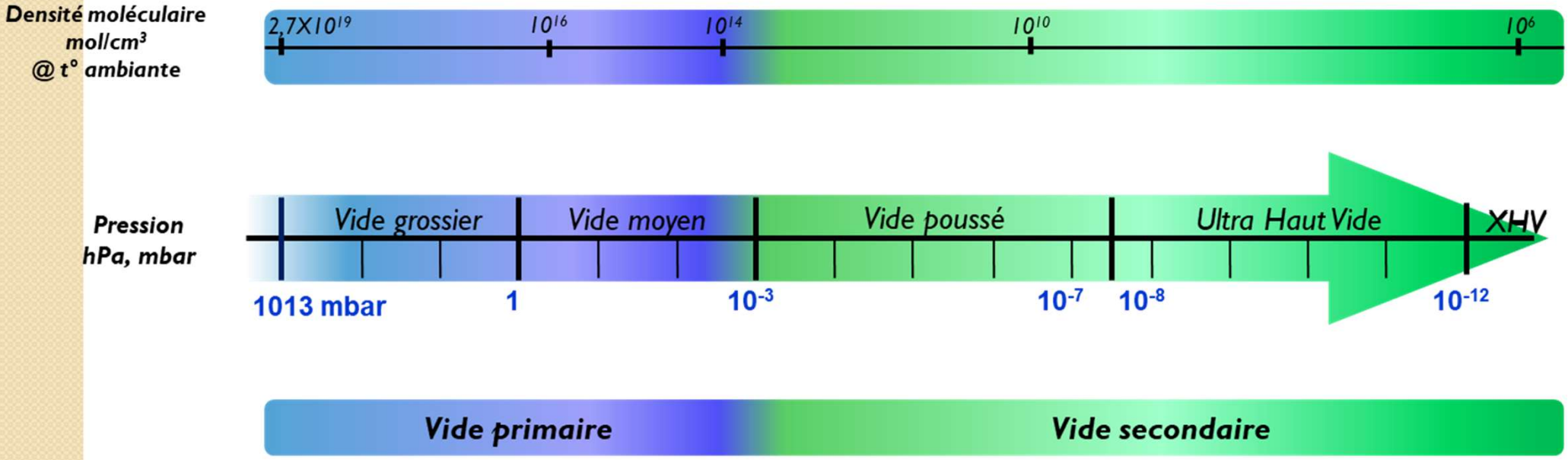
On peut définir la densité moléculaire, à partir de la loi des gaz parfaits, comme suit :

$$Densité\ moléculaire\ n_v = \frac{P}{k.T}$$

Avec P : la pression (Pa) T : la température (K) k : constante de Boltzmann

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

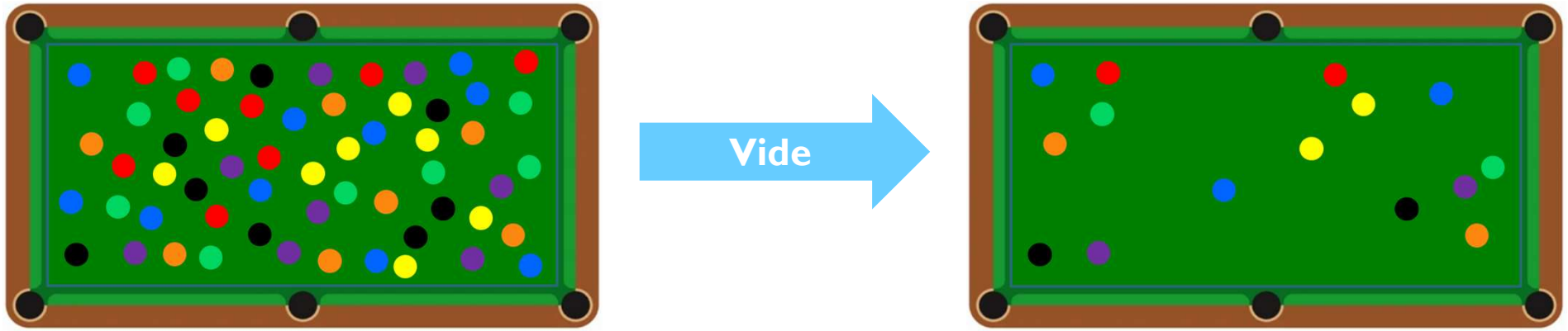
- La densité moléculaire :



I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Le libre parcours moyen λ :

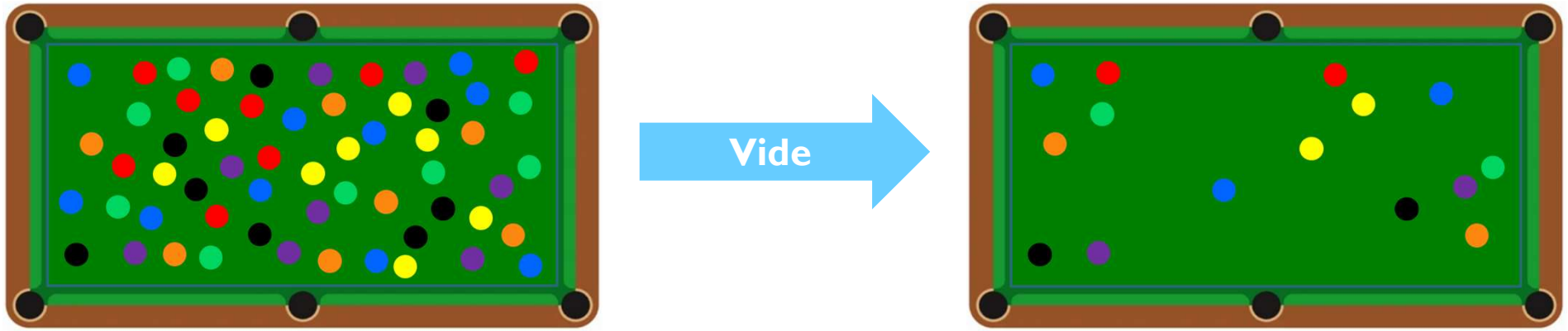
C'est la distance moyenne que peut parcourir une molécule avant de heurter un obstacle



I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Le libre parcours moyen λ :

C'est la distance moyenne que peut parcourir une molécule avant de heurter un obstacle

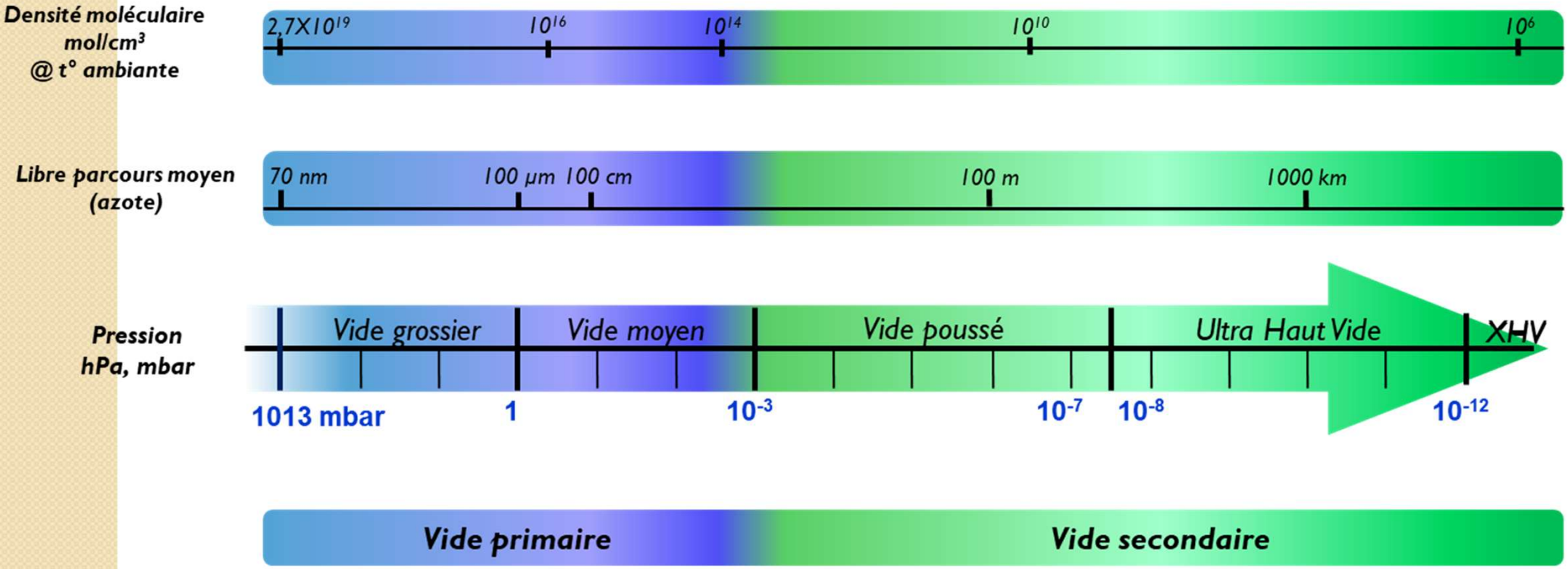


On peut définir le libre parcours moyen comme suit : $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}.\pi.D_0^2.n_v}$

Avec D_0 : *diamètre moléculaire* n_v : *densité moléculaire*

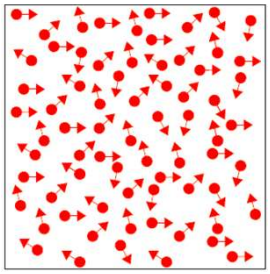
I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Le libre parcours moyen :



I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

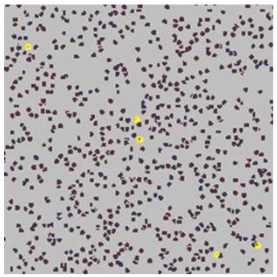
- La densité moléculaire & le libre parcours moyen :



Les chocs entre molécules dominent.
(assimilable à un mouvement brownien)

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- La densité moléculaire & le libre parcours moyen :



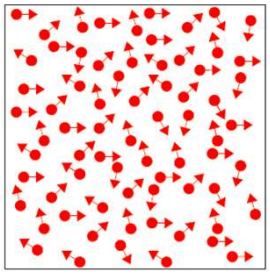
Les chocs entre molécules dominent.
(assimilable à un mouvement brownien)

=> Description mathématique du mouvement aléatoire d'une « grosse » particule immergée dans un liquide et qui n'est soumise à aucune autre interaction que des chocs avec les « petites » molécule

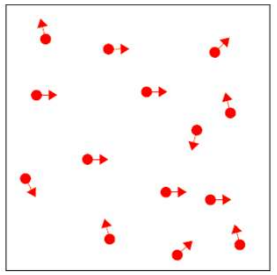
- entre deux chocs, la grosse particule se déplace en ligne droite avec une vitesse constante ;
- la grosse particule est accélérée lorsqu'elle rencontre une molécule de fluide ou une paroi.

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- La densité moléculaire & le libre parcours moyen :



Les chocs entre molécules dominent.
(assimilable à un mouvement brownien)

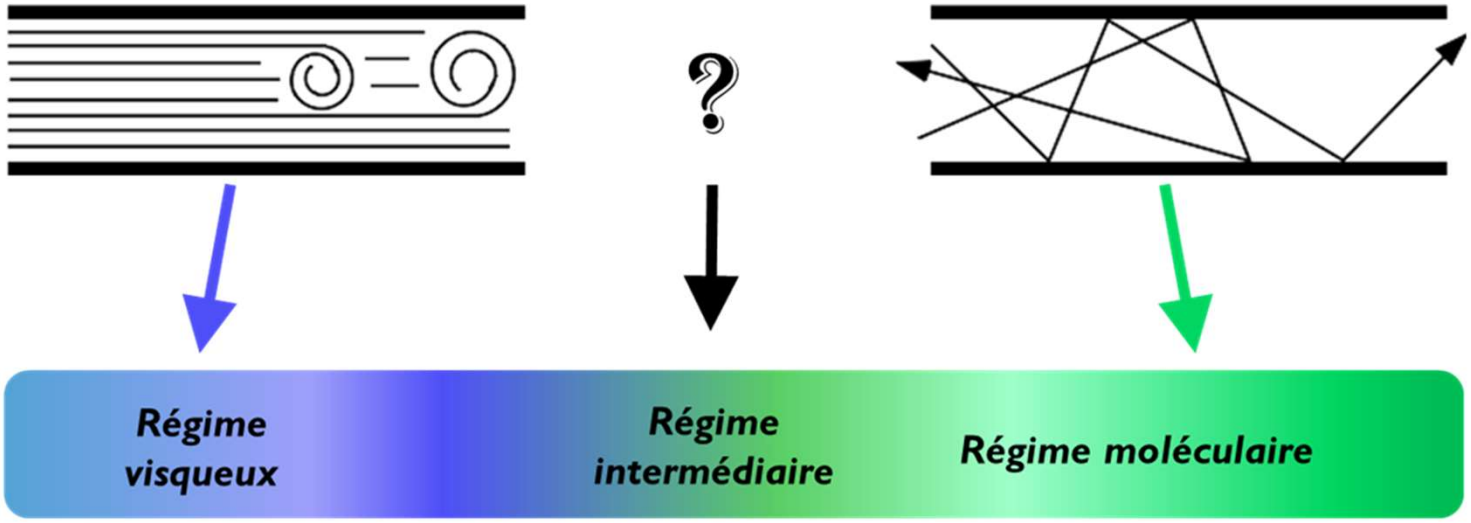


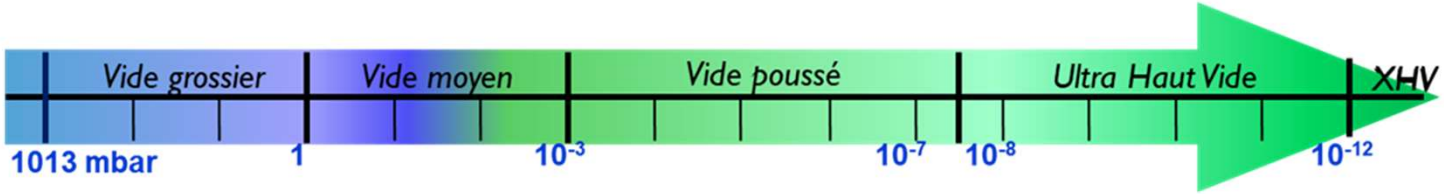
Les chocs molécules - paroi dominent.

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Les régimes d'écoulement gazeux :

Selon la variation de pression et les caractéristiques du système *(diamètre du conduit)*, il peut y avoir différents types d'écoulements possibles :





I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Les régimes d'écoulement gazeux :

Une foule quittant une salle de spectacle

- bousculade = régime (visqueux) turbulent

- sortie compacte ordonnées = régime (visqueux) laminaire

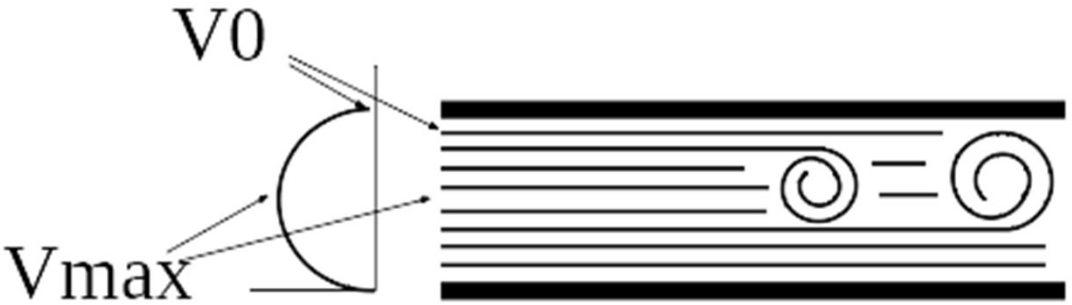
- contre-sens difficile mais possible = régime intermédiaire

- spectateurs isolés perdus = régime moléculaire

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Les régimes d'écoulement gazeux :
  - Le régime visqueux

Le gaz se comporte comme un fluide, composé de couches concentriques. Il y a frottement entre ces "couches", avec entrainement et freinage réciproque (viscosité du fluide).



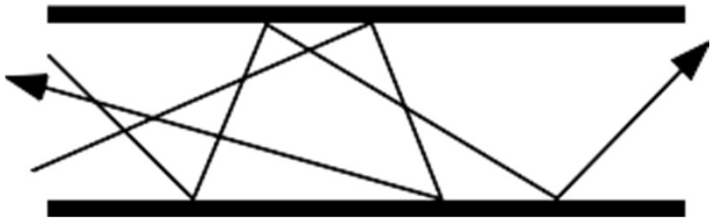
✓ *Ecoulement laminaire = succession de couches concentriques*
(Vitesse nulle au niveau des parois, vitesse maximale au milieu du conduit)

✓ *Ecoulement turbulent = apparition de tourbillons*
(temporaire ou permanent, risque de cavitation)

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Les régimes d'écoulement gazeux :
  - Le régime moléculaire

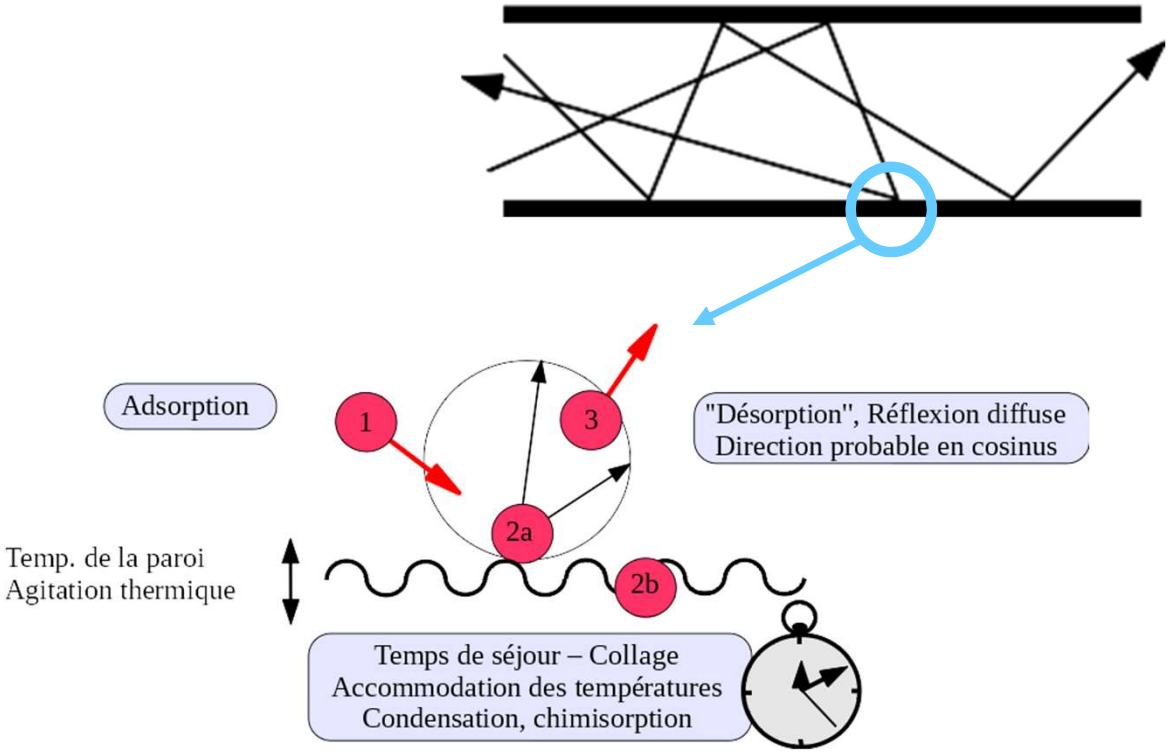
Il n'y a plus d'interactions molécule-molécule. Les chocs contre les parois dominent.



I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Les régimes d'écoulement gazeux :
  - Le régime moléculaire

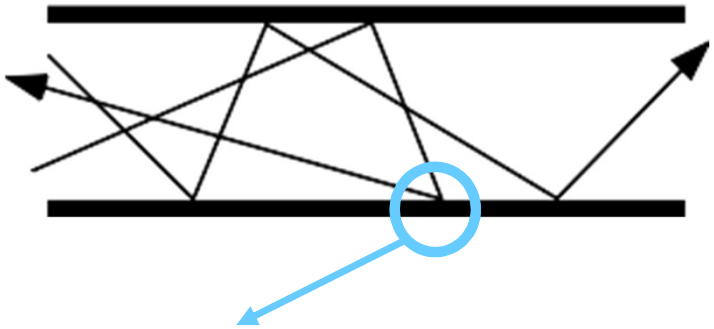
Il n'y a plus d'interactions molécule-molécule. Les chocs contre les parois dominent.



I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Les régimes d'écoulement gazeux :
  - Le régime moléculaire

Il n'y a plus d'interactions molécule-molécule. Les chocs contre les parois dominent.

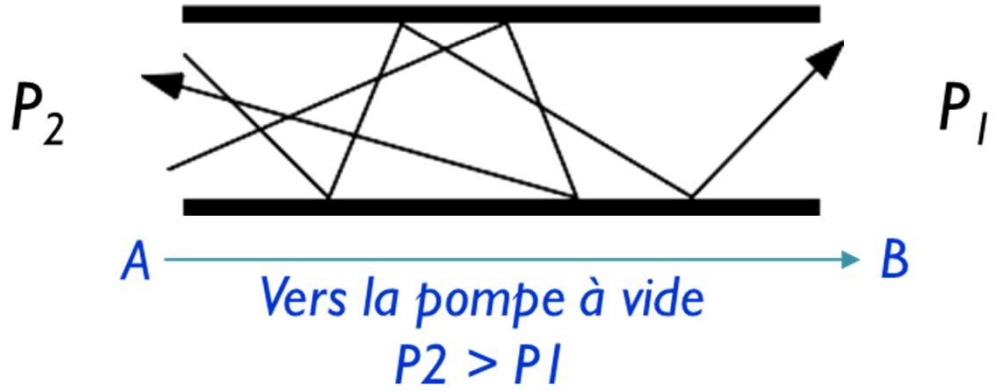


- ✓ *Le choc molécule-paroi se décompose en 3 temps : collage, temps de séjour et décollage,*
- ✓ *Il n'y a pas de relation entre la direction d'incidence et celle de départ.*

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- ✓ *Pas d'interaction entre molécules*
- ✓ *Pas de viscosité*
- ✓ *Pas d'effet mémoire (direction d'origine)*

- Les régimes d'écoulement gazeux :
  - ➢ Le régime moléculaire



- ✓ *Le passage de P2 vers P1 est régit par des lois de probabilité, et plus par un effet d'entraînement et de mouvement d'ensemble*

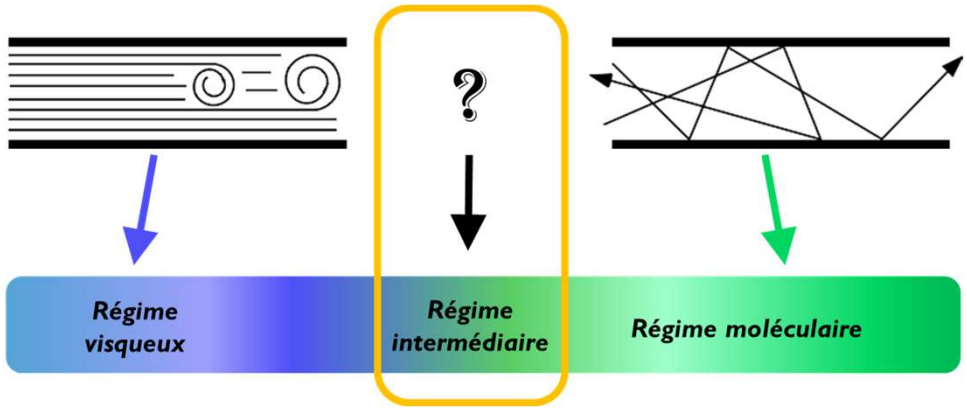
- ✓ *Une circulation à double sens est possible et effective, mais il y a plus de molécules allant de A vers B que de B vers A.*

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- Les régimes d'écoulement gazeux :
  - Le régime intermédiaire

On passe progressivement :

- ✓ *du régime visqueux au régime moléculaire,*
- ✓ *d'un mouvement d'ensemble avec frottements entre "couches" de gaz à des chocs individuels entre molécules et contre les parois.*

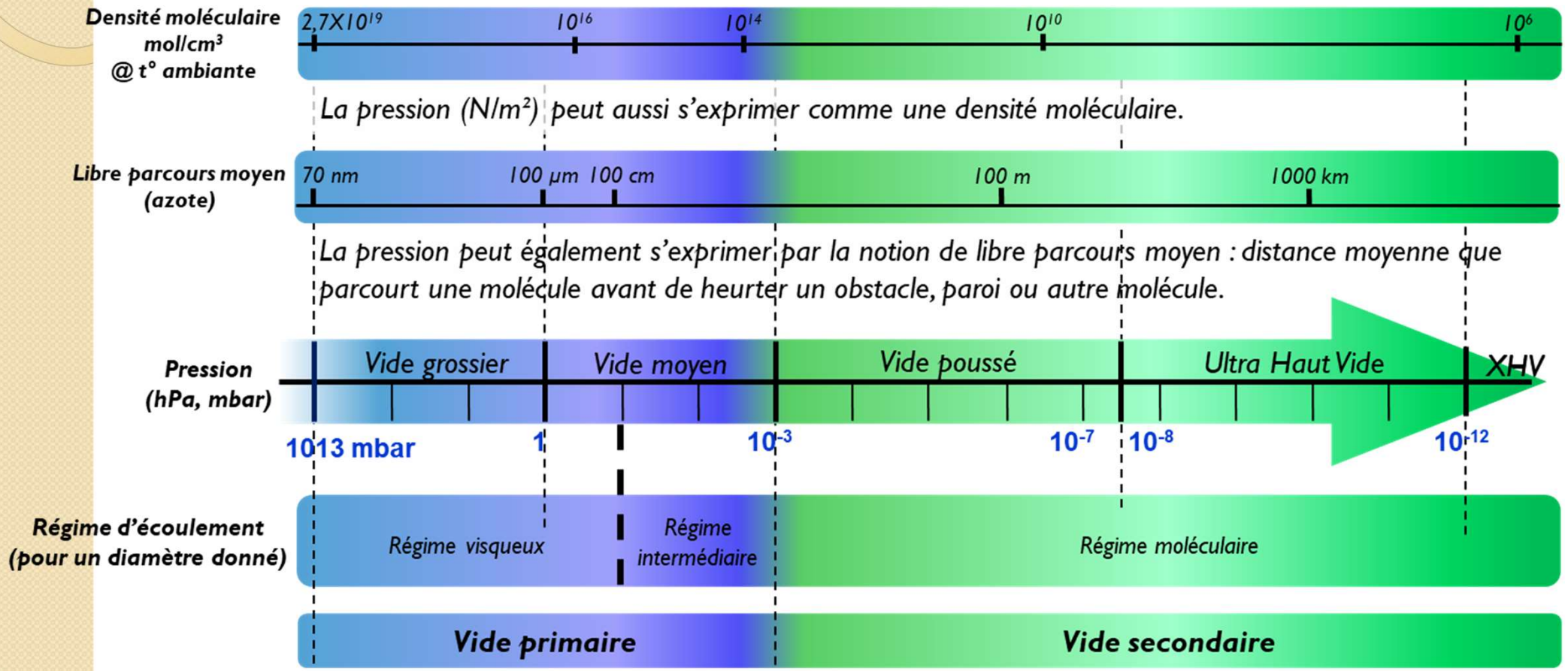


$$d < \lambda < 20.d$$

avec :
λ = libre parcours moyen
***d** = diamètre du conduit*

I. Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »

- En résumé :



II. Les applications

Pression (=force)
ΔP (comme actionneur)

Propriétés des gaz à basse pression
Changement d'état; ionisation, etc…

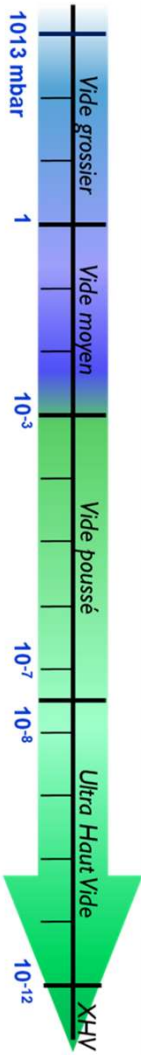
Moyen de fabrication
Milieu de fonctionnement
S'affranchir des effets des gaz

Assistance de freinage
Manutention

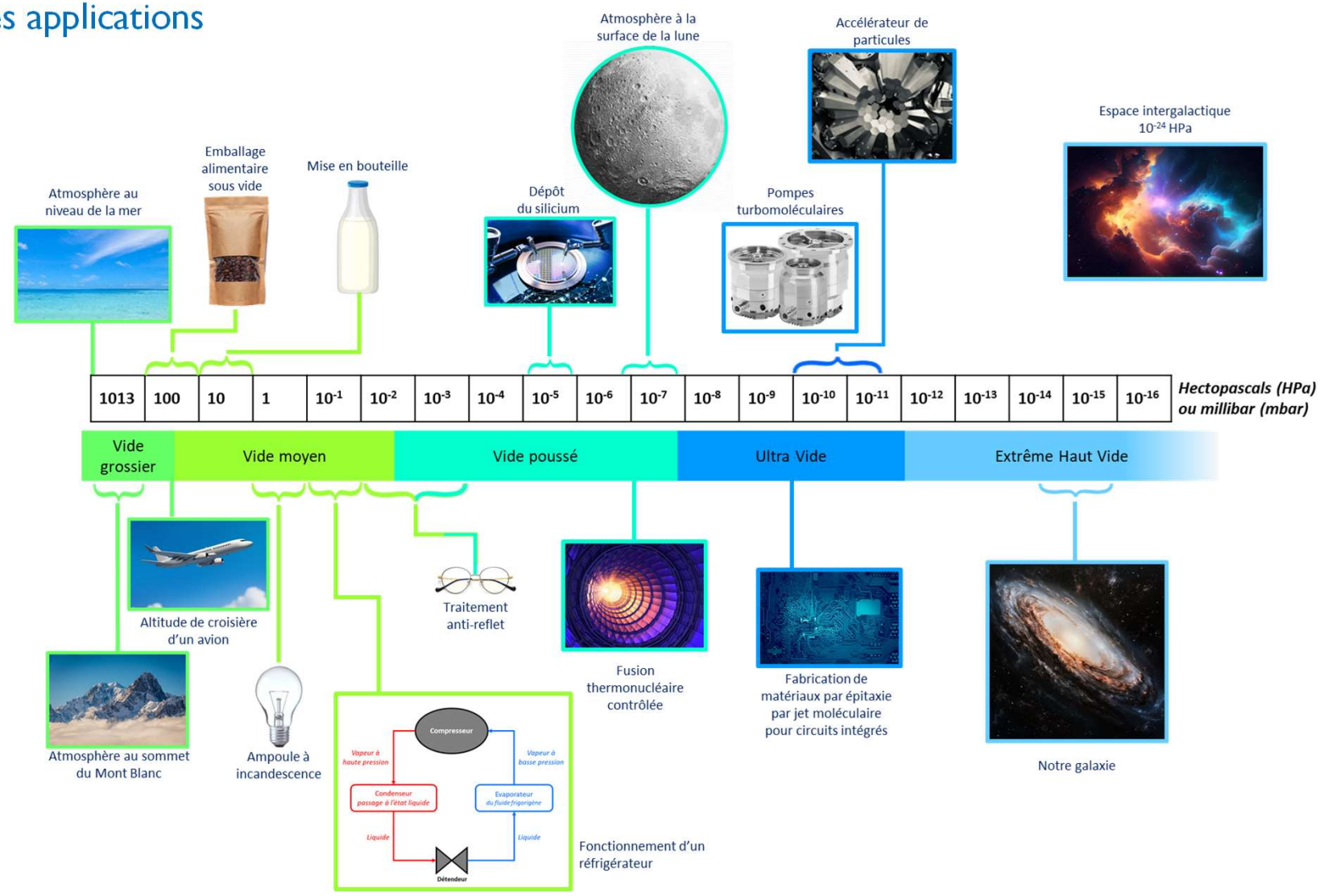
Distillation, séchage
Eclairage (Néon)

Dépôt de couches minces
Purge

Microscopie électronique, à champ proche
Analyse de surfaces
Physique des particules
Domaine spatial



II. Les applications



A suivre :

- Partie 3 : Créer et contrôler le vide

  - Créer le vide
    - Comment fait-on?
  - Contrôler le vide
    - Comment mesurer?
  - Les évolutions technologiques pour créer et mesurer le vide