



L'Art du Rien :



Exploration des Mystères du Vide ...

Partie I : Une Introduction au Vide



L'Art du Rien : Exploration des Mystères du Vide ...

Partie I : Une Introduction au Vide

I. Le vide à travers l'histoire

- les différentes perceptions du vide au cours de l'histoire
- les premiers dispositifs

II. Définition du vide

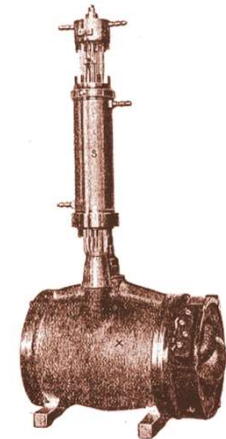
- quelques définitions
- les conditions nécessaires
- le vide sur Terre et dans l'espace



Baromètre de E. Torricelli



Hémisphères de Magdebourg



Lampes démontables – pompe de F. Holweck

I. Le vide à travers l'histoire

- Grèce antique / 5^{ème} siècle avant J.-C. :

- Leucippe & Démocrite, philosophes

Pensée atomiste : pensée philosophique d'espace qui entoure la matière : que le monde est constitué d'atomes se déplaçant dans un espace vide,

- Aristote, philosophe

Pensée opposée : Il s'oppose à l'idée du vide.
« La nature a horreur du vide. »

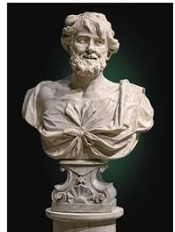
- 17^{ème} siècle:

- Blaise Pascal, mathématicien et philosophe

Il explique que la nature n'a pas horreur du vide. Il s'agit de la pression que l'air exerce sur Terre.



Leucippe



Démocrite



Aristote



B. Pascal

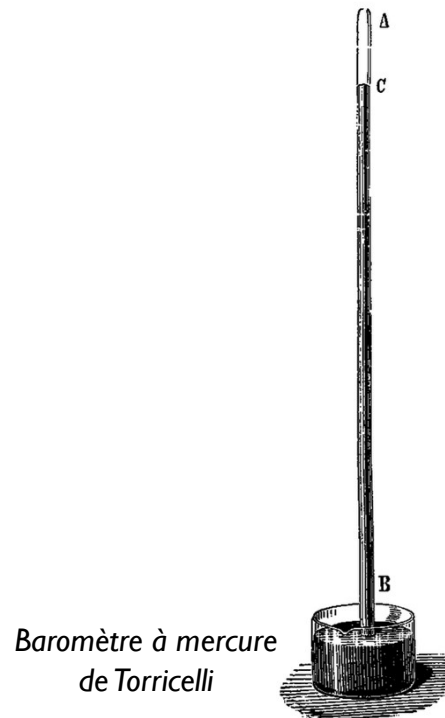
I. Le vide à travers l'histoire

- 17^{ème} siècle :
- Evangelista Torricelli, physicien et mathématicien

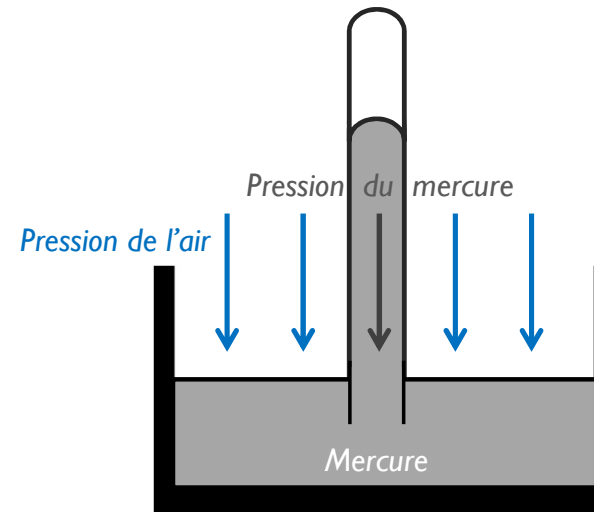
Il met en évidence, en 1644, la pression atmosphérique, en étudiant la pompe à eau de Galilée, ce qui lui permit d'inventer le baromètre à tube de mercure qui porte son nom.



E. Torricelli



Baromètre à mercure
de Torricelli



Principe de fonctionnement

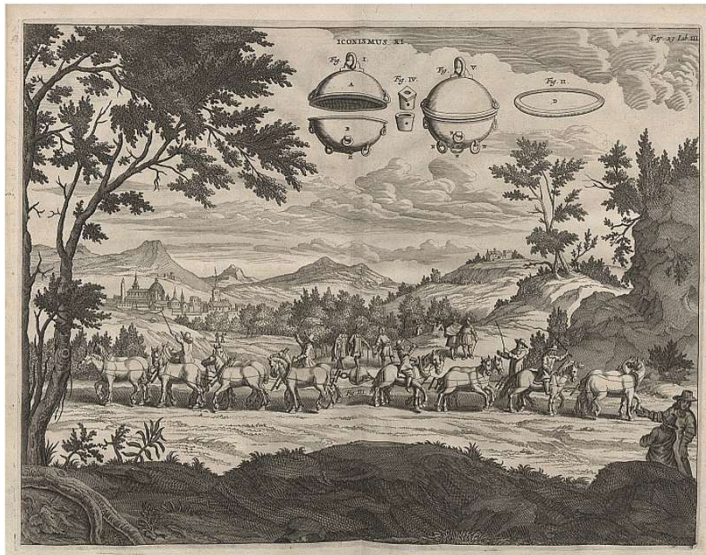
I. Le vide à travers l'histoire

○ 17^{ème} siècle :

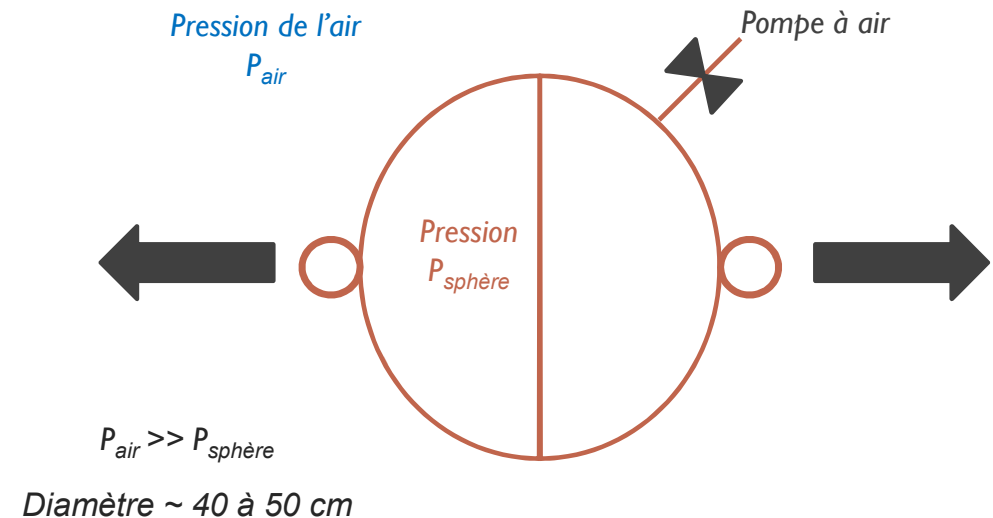
➤ Otto von Guericke, scientifique, inventeur et homme politique

Il invente la première pompe à air en 1650 (ancêtre de la pompe à vide).

En 1654 il démontre la force de la pression atmosphérique avec l'expérience des hémisphères de Magdebourg.



Expérience des hémisphères de Magdebourg



<https://www.youtube.com/watch?v=gvg3YZOcQVw>

I. Le vide à travers l'histoire

- 17^{ème} siècle :

- Robert Boyle, physicien et chimiste & Edmet Mariotte, physicien et botaniste

Ils définissent la loi de Boyle-Mariotte, qui relie la pression et le volume d'un gaz parfait à température constante.



R, Boyle

E. Mariotte

- 19^{ème} siècle :

- Joseph Wilson Swan, électricien et chimiste

En 1850, il effectua ses premiers essais avec une ampoule d'éclairage faite de filaments de papier carbonisé branchés dans une ampoule en verre où il avait fait le vide. (L'absence d'oxygène empêche la combustion du carbone.)



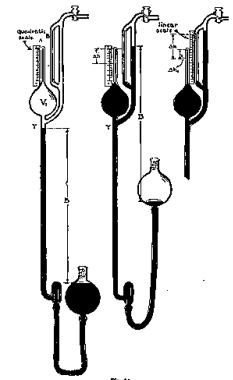
JW. Swan



Ampoules à incandescence

I. Le vide à travers l'histoire

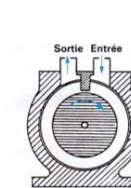
- 19^{ème} siècle :
 - Herbert McLeod, chimiste
En 1874, il a inventé la jauge qui porte son nom, permettant de mesurer des pressions dans un vide poussé. Le dispositif se base sur la loi de Boyle-Mariotte.
- Fin du 19^{ème} siècle :
 - Joseph John Thomson, physicien
En 1897, il prouve expérimentalement l'existence des électrons en construisant un tube cathodique avec un vide poussé.
- 20^{ème} siècle :
 - Wolfgang Gaede & Fernand Holweck, physiciens
W. Gaede a mis au point la première pompe rotative à joint d'huile et la première pompe moléculaire. F. Holweck a amélioré la pompe moléculaire de Gaede.



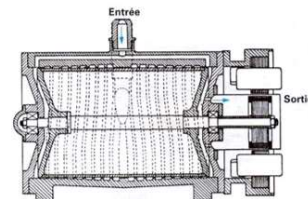
Jauge de McLeod



JJ. Thomson



a) concept selon Gaede



b) concept selon Holweck

Pompes moléculaires

2. Définition du vide

2.1. Quelques définitions



- État d'un gaz raréfié.
- Ambiance correspondant à un état dont la pression est inférieure à celle de l'atmosphère.

Source : www.larousse.fr

- En physique, le vide est l'absence de toute matière. Le vide absolu est donc un milieu statistiquement sans particules élémentaires. Un espace dans lequel les molécules sont fortement raréfiées peut donc être retenu comme une première définition du vide.

Source : www.wikipédia.fr

2. Définition du vide

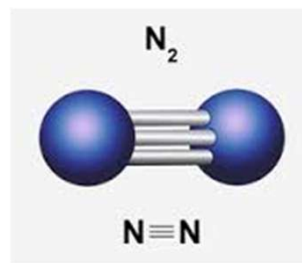
2.1. Quelques définitions

- Qu'est qu'une molécule?

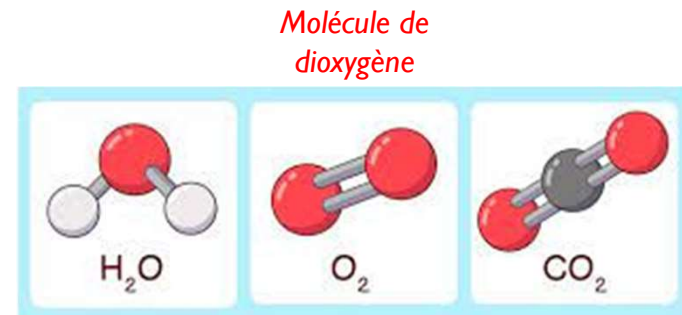
C'est l'assemblage chimique électriquement neutre d'au moins deux atomes, différents ou non, qui peut exister à l'état libre, et qui représente la plus petite quantité de matière possédant les propriétés caractéristiques de la substance considérée.

Source : www.wikipédia.fr

- Exemple de l'air (sec) : 78,08 % de diazote, 20,95 % de dioxygène, 0,93 % d'argon, 0,03 % de dioxyde de carbone et d'autres gaz à l'état de traces.



Molécule de diazote



Molécule d'eau

Molécule de dioxyde
de carbone

2. Définition du vide

2.1. Quelques définitions

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

Les unités couramment utilisées sont les suivantes :

Unité légale : Pascal (Pa) = 1 N.m⁻²

Autres unités fréquemment utilisées :

1 Torr / mmHg = 1,33.10² Pa

1 μ (de Hg) = 0,133 Pa

1 mbar / hPa = 100 Pa

1 bar = 1000 hPa

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

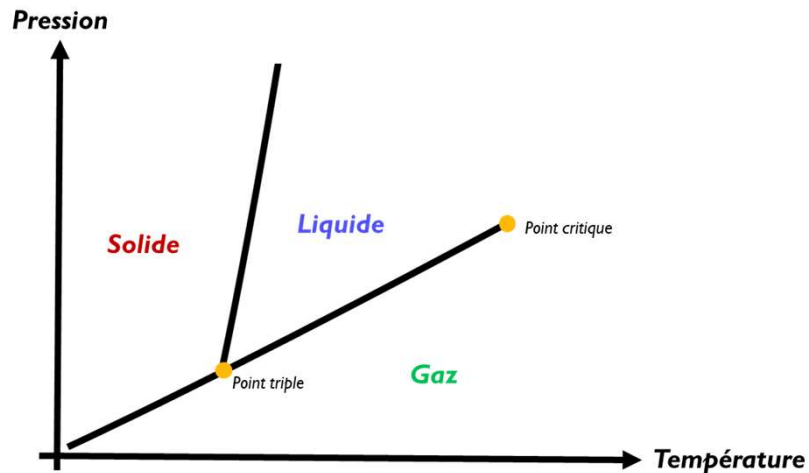


Diagramme de phase

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

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

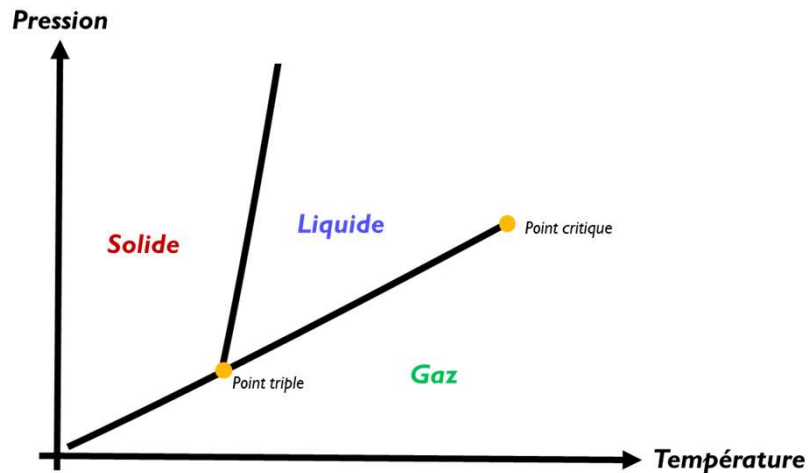


Diagramme de phase

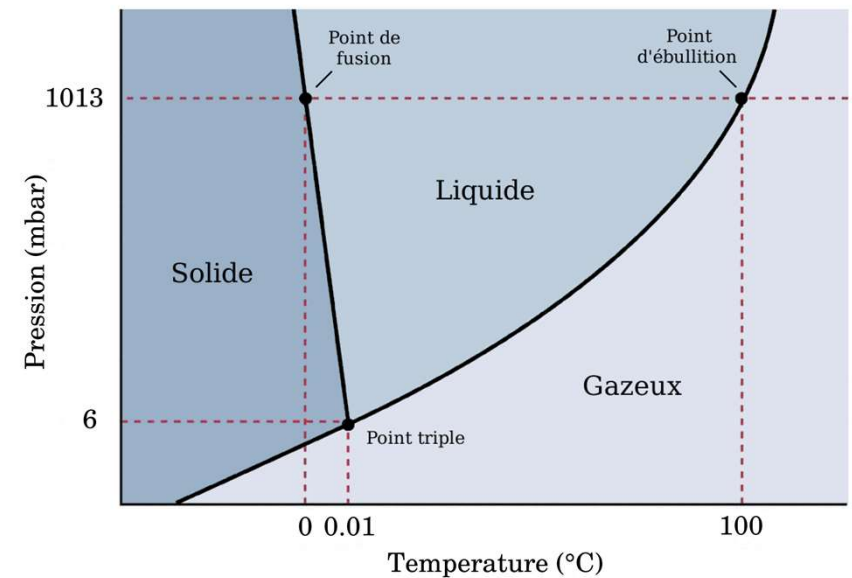


Diagramme de phase de l'eau

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

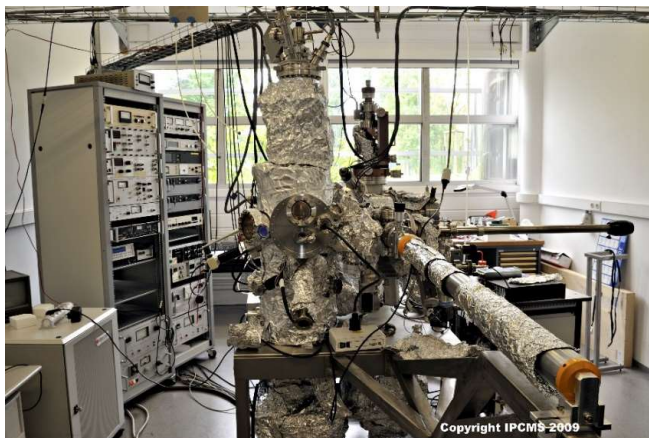
2. Définition du vide

2.2. Les conditions nécessaires pour le vide

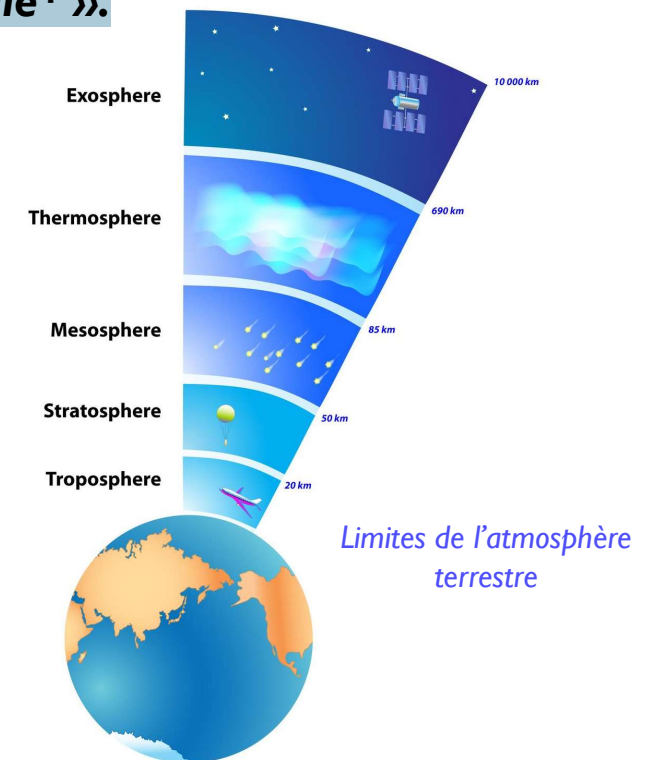
Le vide est possible lorsque l'on a un domaine de l'état gazeux à une pression inférieure à la pression dite « normale* ».

Pour ce faire, il faut :

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



Enceintes à vide



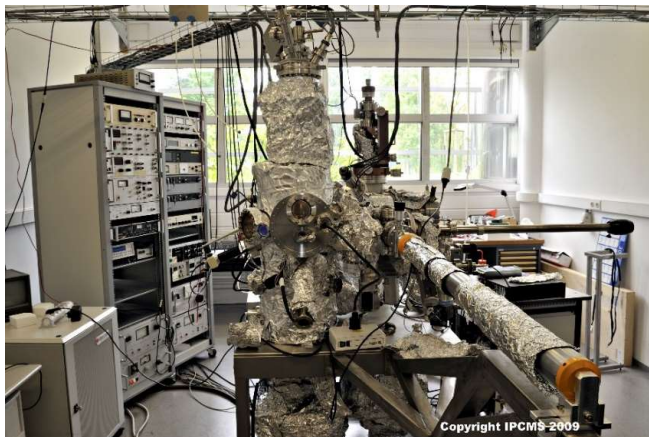
2. Définition du vide

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)



Enceintes à vide

D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

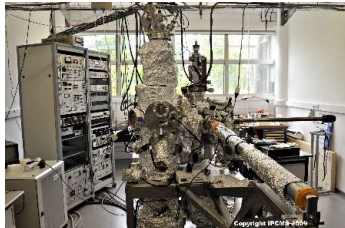
2. Définition du vide

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* ».

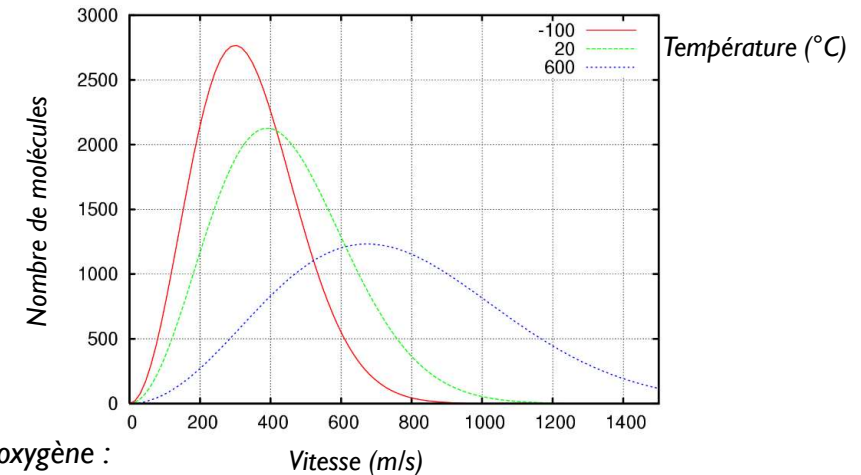
Pour ce faire, il faut :

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



D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

- Des molécules en agitation (en fonction de la température)



Loi de distribution des vitesses de Maxwell, pour l'oxygène :

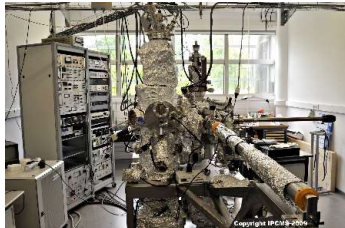
2. Définition du vide

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)



D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

➤ Des molécules en agitation (en fonction de la température)

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

Où

E_c est l'énergie cinétique

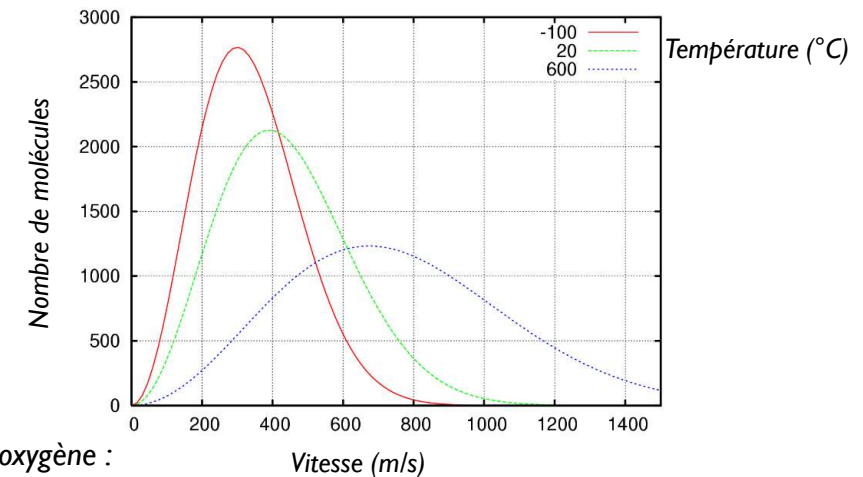
m est la masse de la molécule

v est la vitesse

k_B est la constante de Boltzmann

T est la température

Loi de distribution des vitesses de Maxwell, pour l'oxygène :



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)



D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

- Des molécules en agitation (en fonction de la température)
- Chocs sur les parois (et entre molécules)



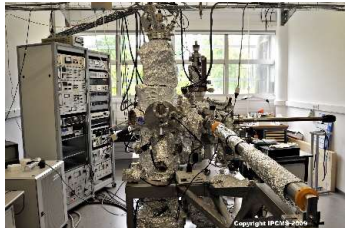
2. Définition du vide

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)



D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

- Des molécules en agitation (en fonction de la température)
- Chocs sur les parois (et entre molécules)

Où

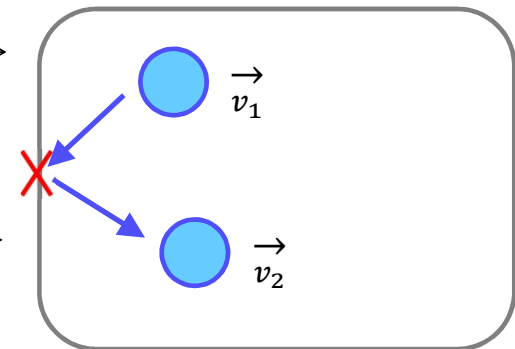
$\vec{p}$ est la quantité de mouvement

m est la masse de la molécule

$\vec{v}$ est la vitesse

$$\vec{p}_1 = m. \vec{v}_1$$

$$\vec{p}_2 = m. \vec{v}_2$$



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)

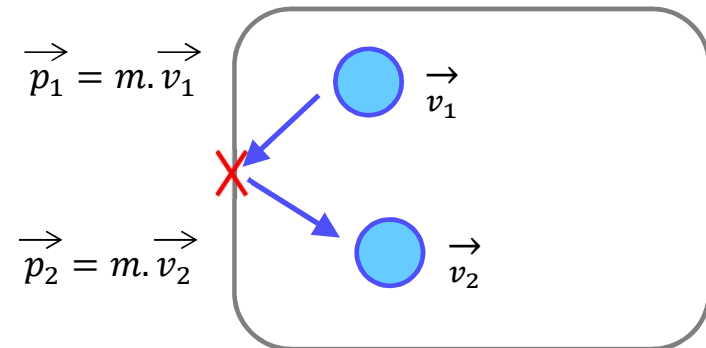


D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

- Des molécules en agitation (en fonction de la température)
- Chocs sur les parois et entre molécules

$$\vec{\Delta p} = m. (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)$$

$$\vec{F} = \frac{\vec{\Delta p}}{\Delta t}$$



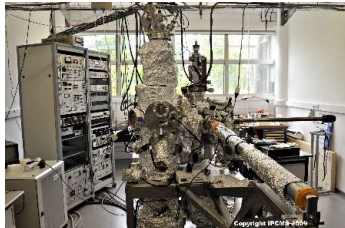
2. Définition du vide

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)



D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

- Des molécules en agitation (en fonction de la température)
- Chocs sur les parois (et entre molécules)

Pour un gaz (= N molécules)

$$E_{c\ totale} = N \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} N k_B T$$

Où

$E_{c\ totale}$ est l'énergie cinétique

m est la masse du gaz

v est la vitesse

k_B est la constante de Boltzmann

T est la température

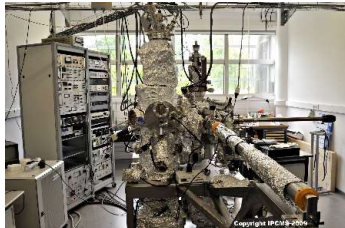
2. Définition du vide

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)



D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

- Des molécules en agitation (en fonction de la température)
- Chocs sur les parois (et entre molécules)

Si on suppose le gaz comme parfait :

$$E_{c\ totale} = U$$

$$P \times V = N k_B T$$

$$E_{c\ totale} = N \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} N k_B T$$

Où

$E_{c\ totale}$ est l'énergie cinétique

U est l'énergie interne du système

P est la pression du gaz

V est le volume du gaz

k_B est la constante de Boltzmann

T est la température

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)



D'où provient la pression dans une enceinte à vide?

- Des molécules en agitation (en fonction de la température)
- Chocs sur les parois (et entre molécules)

Si on suppose le gaz comme parfait :

$$E_{c\ totale} = U$$

$$P \times V = N k_B T$$

$$E_{c\ totale} = N \frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} N k_B T$$



$$E_{c\ totale} = U = \frac{3}{2} P \times V$$

Où

$E_{c\ totale}$ est l'énergie cinétique

U est l'énergie interne du système

P est la pression du gaz

V est le volume du gaz

k_B est la constante de Boltzmann

T est la température

2. Définition du vide

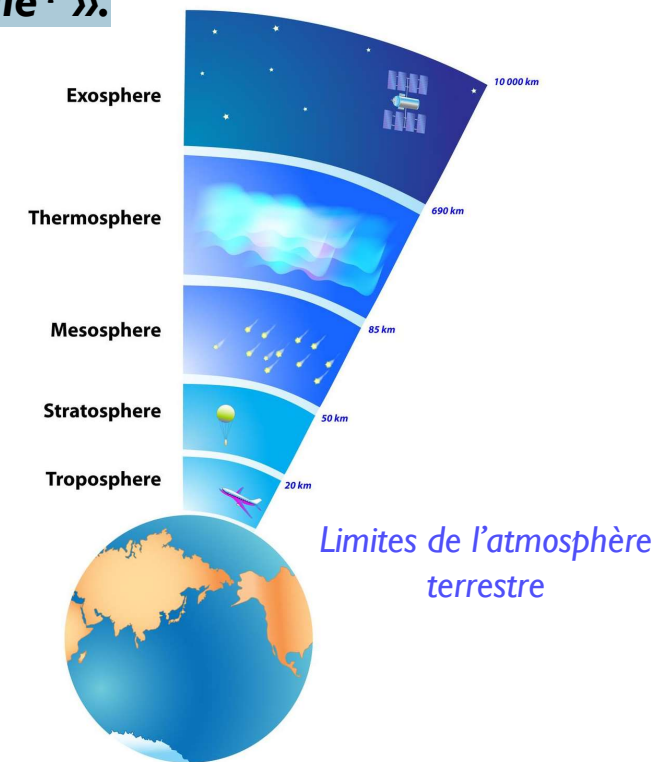
2.2. Les conditions nécessaires pour le vide

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)

- Dans l'atmosphère : les gaz sont maintenus autour de la Terre par la force gravitationnelle qui les retient et les empêche de s'échapper vers l'espace.



2. Définition du vide

2.2. Les conditions nécessaires pour le vide

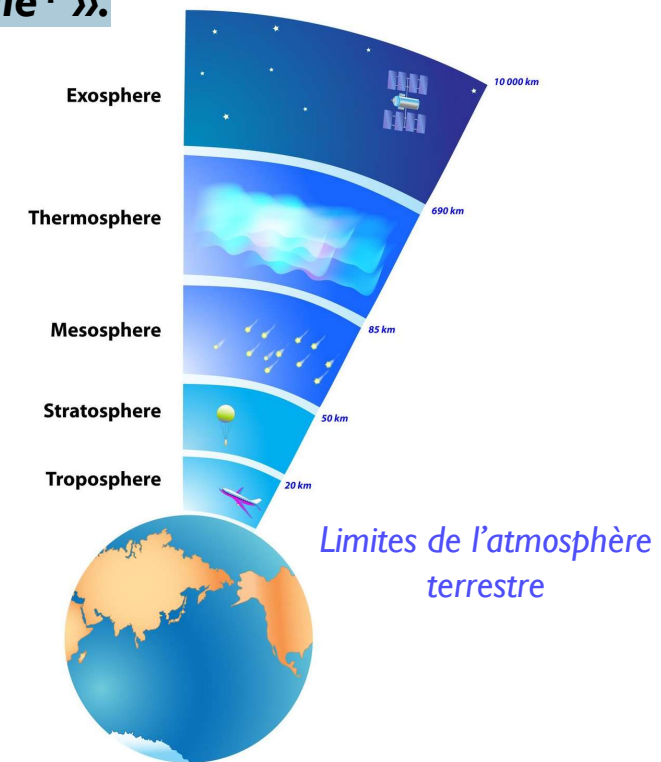
Le vide est possible lorsque l'on a un domaine de l'état gazeux à une pression inférieure à la pression dite « normale* ».

Pour ce faire, il faut :

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

Hypothèse de l'atmosphère isotherme :

- Air = gaz parfait ($P . V = n . R . T$)
- Isotherme sur la variation de hauteur considérée Δz



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)

Hypothèse de l'atmosphère isotherme :

$$P(z) = e^{-\frac{z.M.g}{R.T}}$$

Où

P est la pression en Pa (Pascal)

z est la distance en m (mètre)

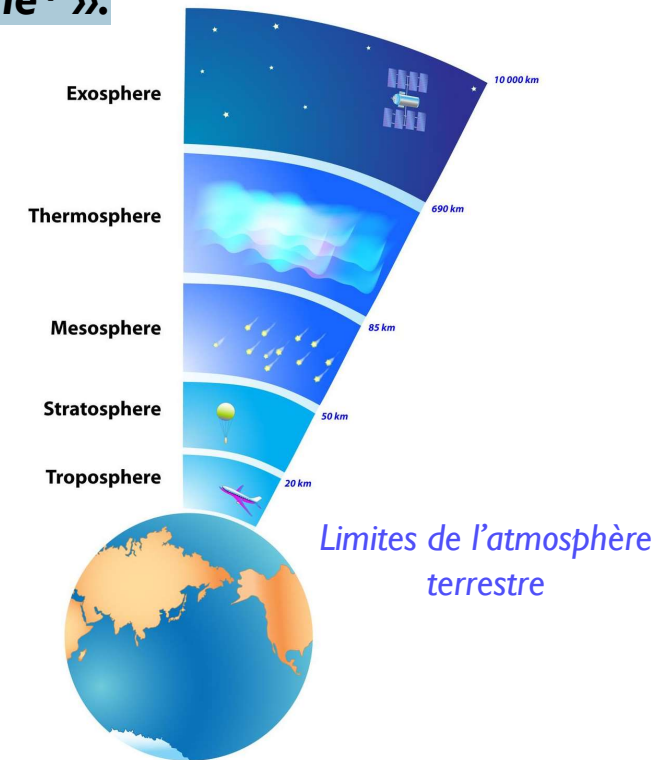
M est la masse molaire de l'air (kg/mol)

g est la gravité en m/s^2

R est la constante des gaz parfaits (mol^{-1})

T est la température en K (Kelvin)

Pour $0 < z < 10 \text{ km} \sim$



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
90000 hPa @ 450°C



sur Mars
70 hPa @ -60°C



sur la Lune
1 nPa @ -18°C



2. Définition du vide

2.3. Le vide sur Terre et dans l'Espace



- Danger pour l'humain à haute altitude : raréfaction de l'air
 - sommet de l'Everest – 8849 m
 - Surpression dans la cabine d'avion (altitude ~ 9 000 à 12 000m)

2. Définition du vide

2.3. Le vide sur Terre et dans l'Espace



- Danger pour l'humain à haute altitude : raréfaction de l'air
 - Sommet de l'Everest – 8849 m
 - Surpression dans la cabine d'avion (altitude ~ 5 000 à 12 000m)

Pourquoi c'est (presque) vide dans l'espace ?

Les particules sont très éloignées les unes des autres.

- Vide $\neq$ rien : présence de quelques particules/cm³, rayonnements (photons, neutrinos). Dans l'espace intergalactique : densité $\approx$ 1 atome/m³, reste le vide quantique.
- Absence de milieu : pas de propagation du son.
- Évaporation des liquides (même à basse température).
- Danger pour l'humain : hypoxie, décompression, ébullition du sang
 - protection vitale des combinaisons spatiales.



L'Art du Rien : Exploration des Mystères du Vide ...

A suivre :

➤ Partie 2 : Le concept scientifique du vide et ses applications

- ⊖ Les grandeurs physiques qui entrent « en jeu »
 - La pression
 - La densité moléculaire
 - Le vide qui n'est pas si vide...
- ⊖ Pourquoi faire le vide?
 - Des exemples d'applications

➤ 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

