

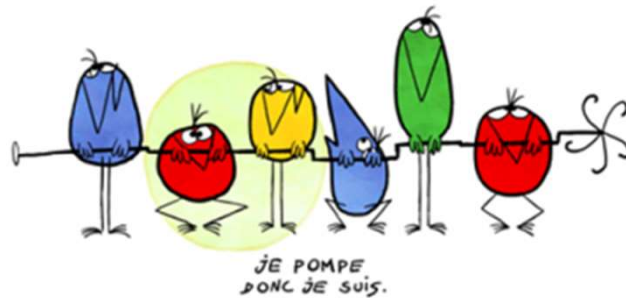
Les défis technologiques du vide : de la pompe à vide aux applications modernes

Virginie SPEISSER (IPCMS - Strasbourg)

Journées SFP 2026 : Le vide dans tous ses états
Organisée par la division Champs & Particules
de la Société Française de Physique

Les défis technologiques du vide : de la pompe à vide aux applications modernes

- ▶ Introduction au vide
- ▶ Historique et évolution des technologies du vide
- ▶ Les défis technologiques et leurs applications



1. Introduction au vide

► Définition du vide :

Le vide se caractérise par une pression.

À l'échelle macroscopique :



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

Avec
 P : pression (N/m^2 - Pa)
 F : force (N)
 S : surface (m^2)



À l'échelle microscopique :



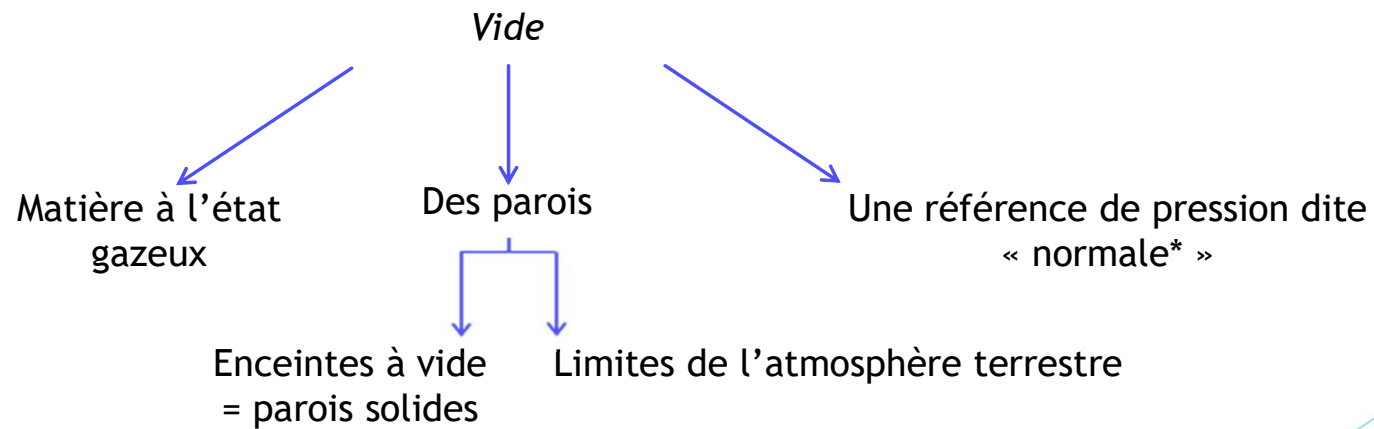
$$PV = nRT$$

Avec
 P : pression en N/m^2 ou en Pa
 V : volume de gaz (m^3)
 n : nombre de molécules (mol)
 R : constante des gaz parfaits ($\sim 8,314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)
 T : température absolue (K)

1. Introduction au vide

► Définition du vide :

Le vide se caractérise par une pression.



1. Introduction au vide

► Définition du vide :

- un espace où la pression est inférieure à la pression atmosphérique.
- un espace dans lequel les molécules sont fortement raréfiées
- Loi de Dalton : $P_{totale} = \sum P_{partielles}$



John Dalton

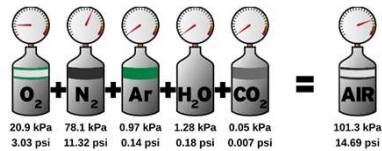
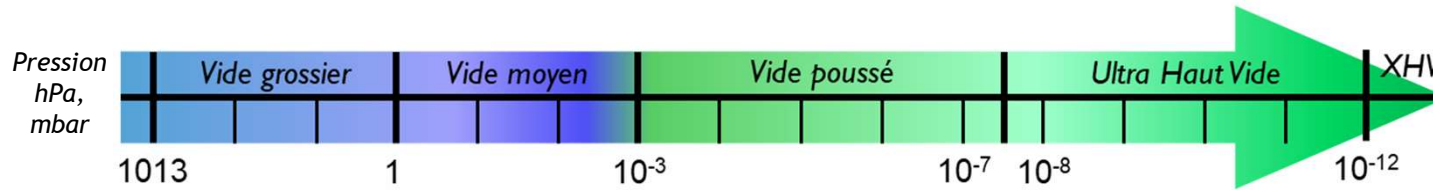


Illustration de la loi de Dalton en utilisant les gaz de l'air ambiant

(Par Andrew Jarvis – source Wikipédia)

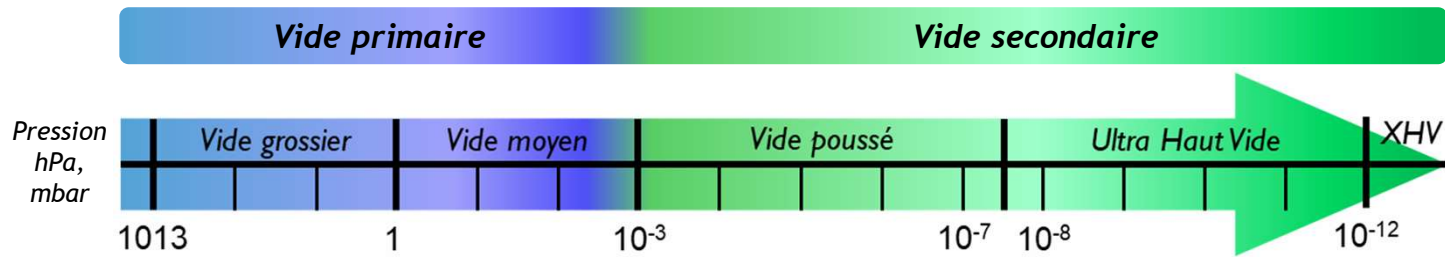
1. Introduction au vide

► Définition du vide :

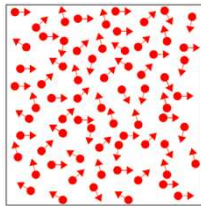


1. Introduction au vide

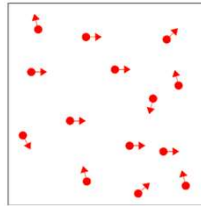
► Définition du vide :



Le vide peut être considéré comme une population de molécules enfermées par des parois.



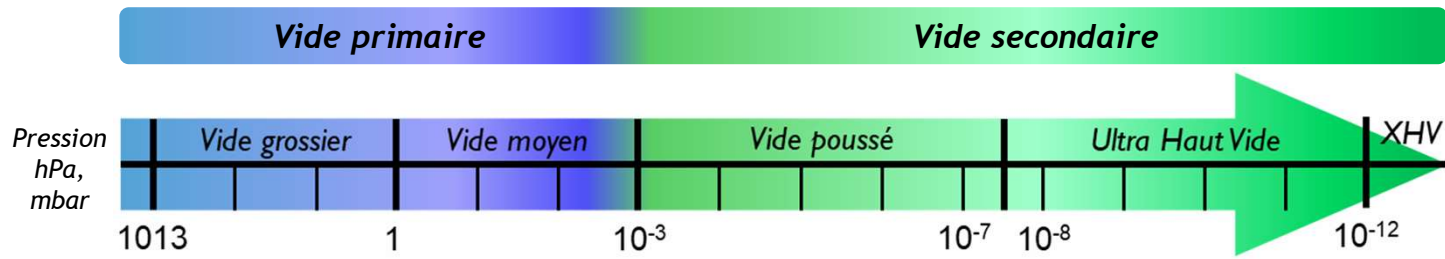
Les chocs entre molécules dominent.



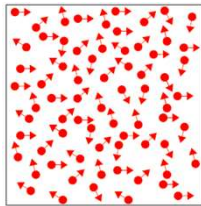
Les chocs molécules - paroi dominent.

1. Introduction au vide

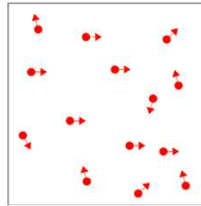
► Définition du vide :



Le vide peut être considéré comme une population de molécules enfermées par des parois.



Les chocs entre molécules dominent.



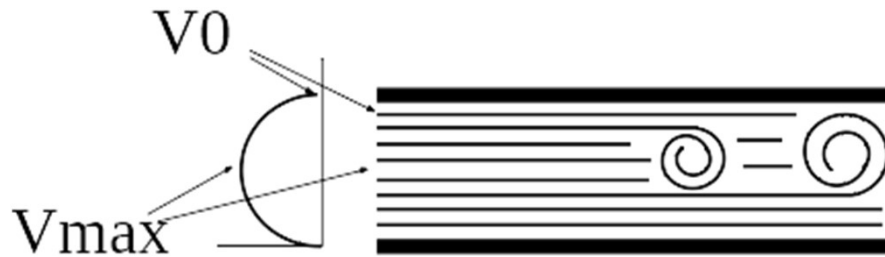
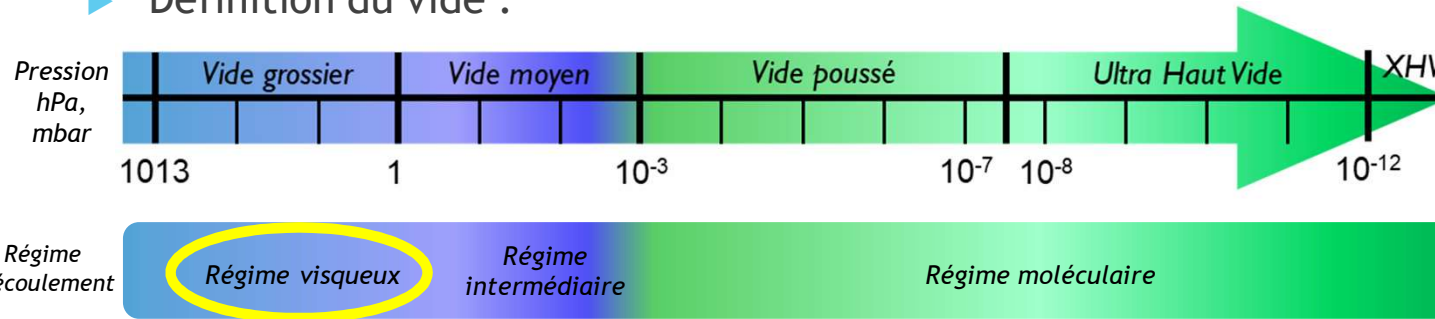
Les chocs molécules - paroi dominent.

Régime d'écoulement

Régime visqueux Régime intermédiaire Régime moléculaire

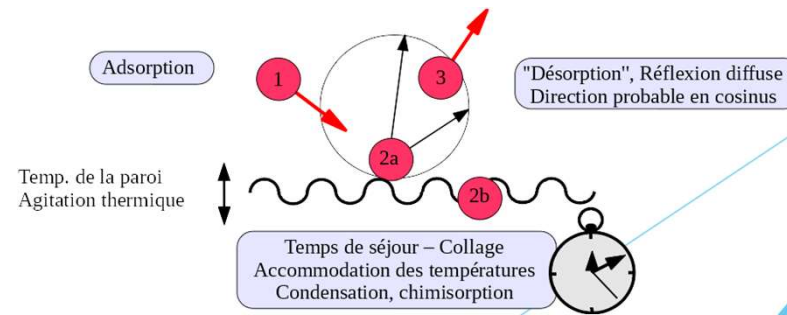
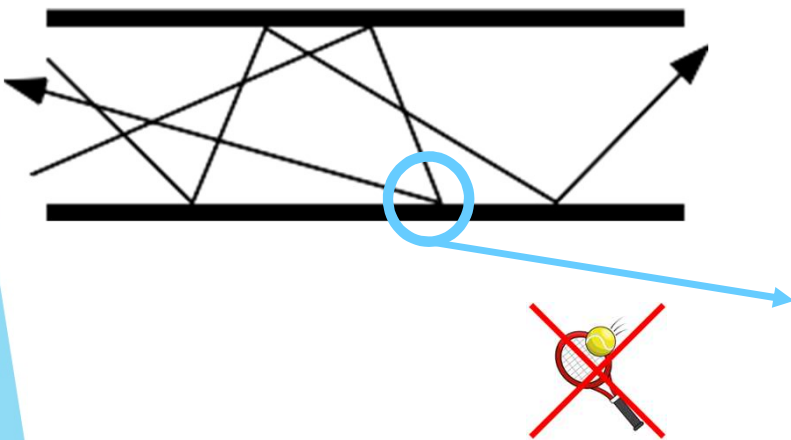
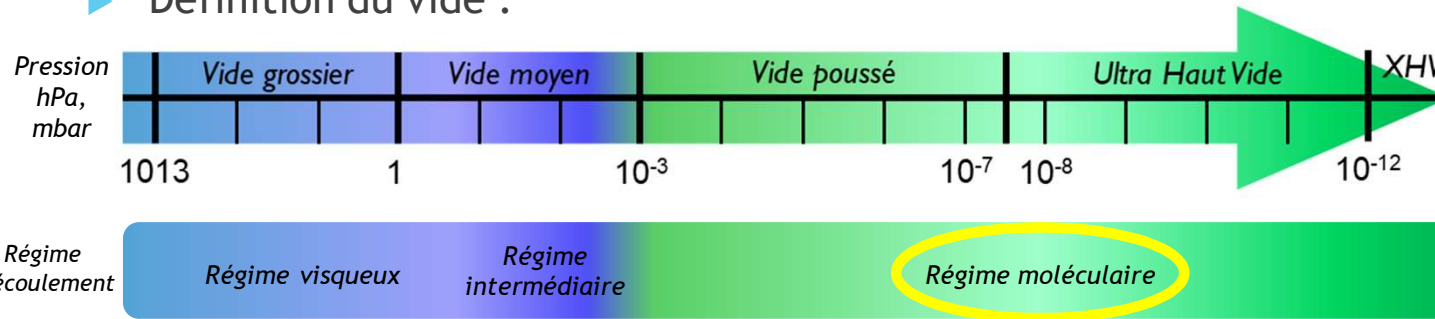
1. Introduction au vide

► Définition du vide :



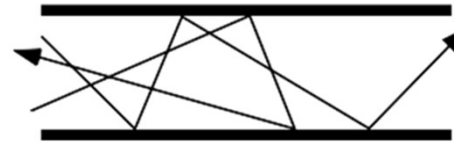
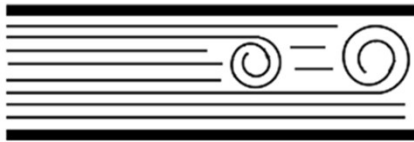
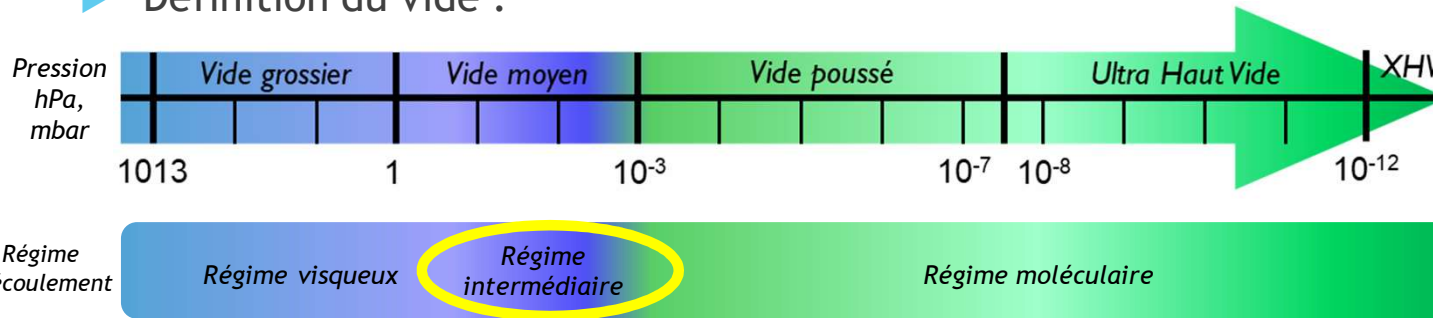
1. Introduction au vide

► Définition du vide :



1. Introduction au vide

► Définition du vide :



$$d < \lambda < 20 \cdot d$$

avec :

λ = libre parcours moyen

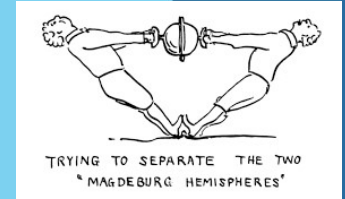
d = diamètre du conduit

2. Historique et évolution des technologies du vide

► Les pompes à vide, un peu d'histoire :

○ XVII^e - XIX^e siècles :

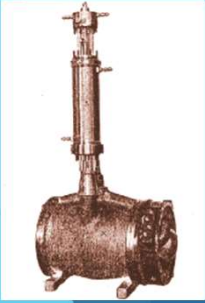
- Loi de Boyle-Mariotte : $P.V = Cste$ (à T° cste).
- Otto von Guericke (1650) : Invention de la première pompe à vide mécanique (pompe à piston manuel). Expérience des hémisphères de Magdebourg (1654).
- Perfectionnement de la pompe à piston (XVIII^e siècle) $\Rightarrow \sim 10^{-2}$ mbar.
- Pompe à mercure inventée par Hermann Sprengel (1865) $\Rightarrow \sim 10^{-3}$ mbar.



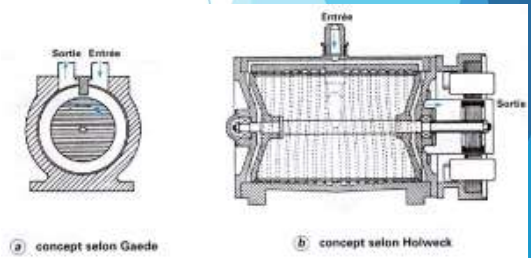
R. Boyle E. Mariotte

2. Historique et évolution des technologies du vide

- ▶ Les pompes à vide, un peu d'histoire :
 - Révolution industrielle (XX^e siècle) :
 - Pompe rotative à palettes - Wolfgang Gaede (1900) => $\sim 10^{-3}$ mbar
 - Pompe à diffusion - Wolfgang Gaede (1915)
 - Pompe moléculaire - Fernand Holweck (1923)
 - Pompe turbomoléculaire - Willi Becker (1958) => $\sim 10^{-9}$ mbar
 - Pompe cryogénique : Condensation des gaz sur des surfaces froides
 - Pompe ionique (fin des années 1950)



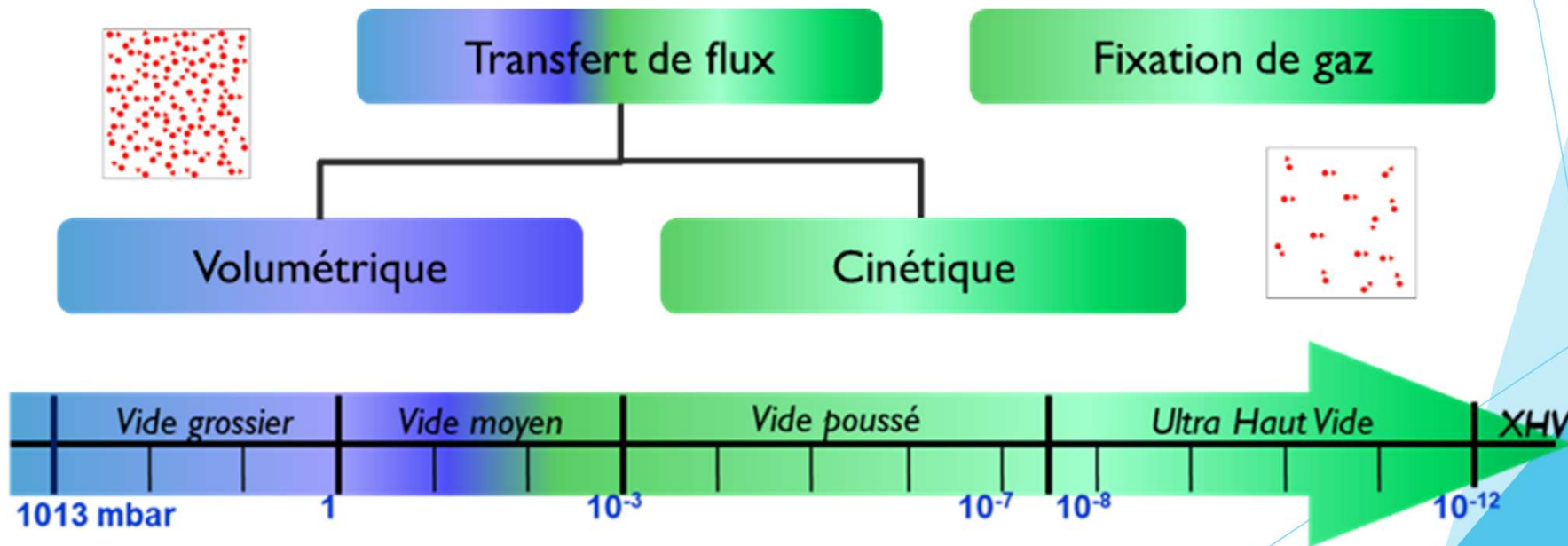
Lampes démontables
pompe de F. Holweck



Pompe moléculaire

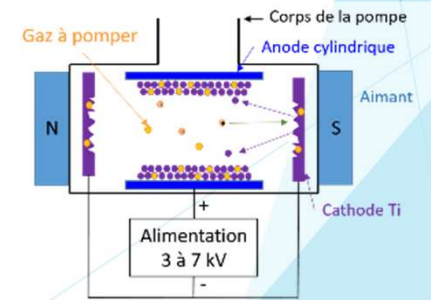
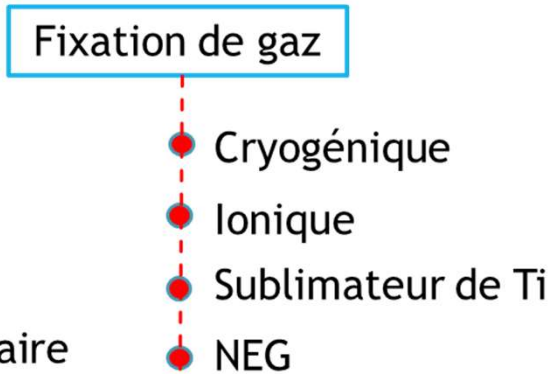
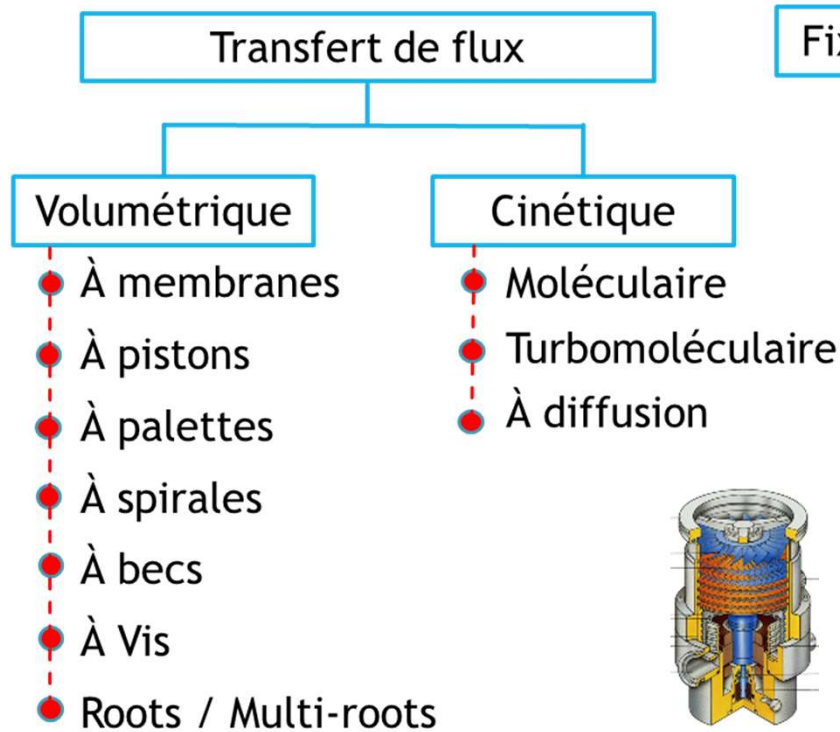
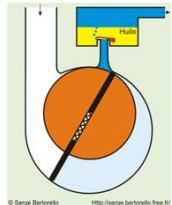
2. Historique et évolution des technologies du vide

- L'évolution des pompes à vide :



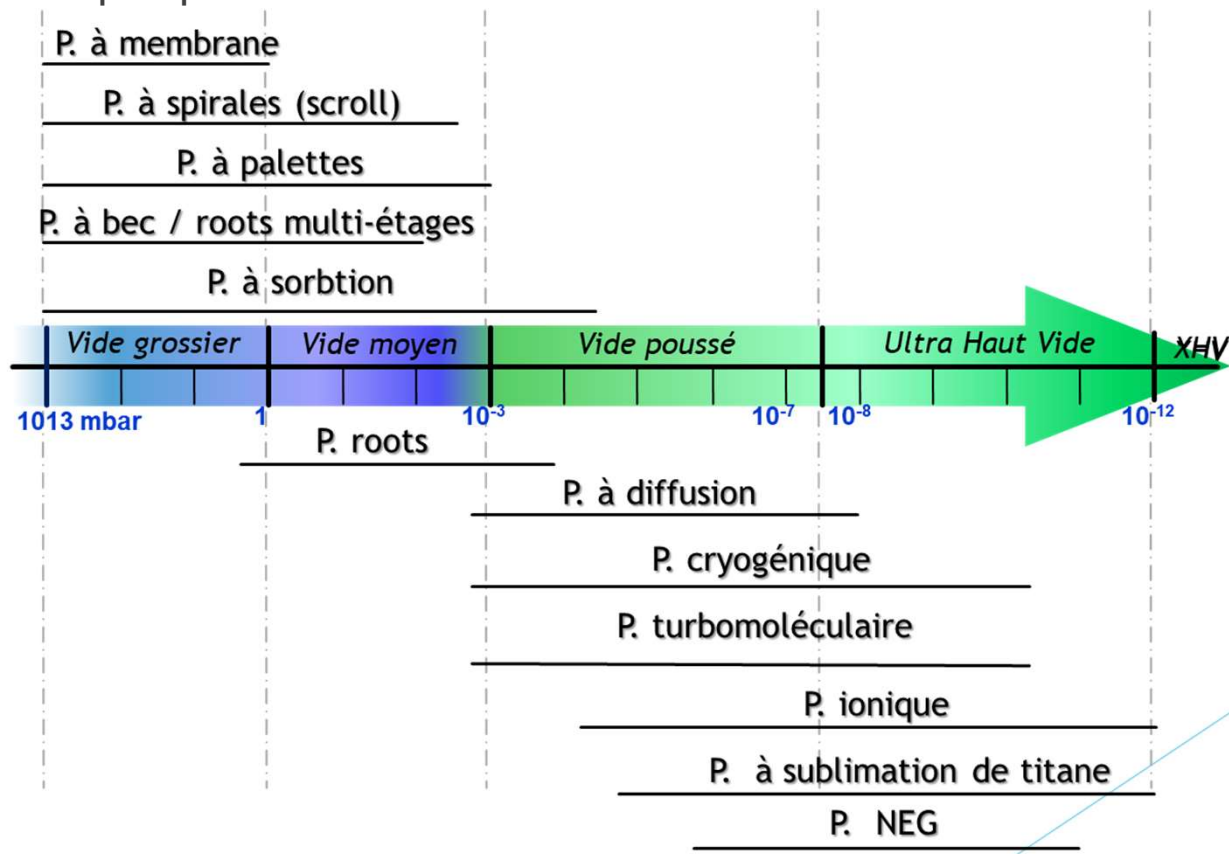
2. Historique et évolution des technologies du vide

► L'évolution des pompes à vide :



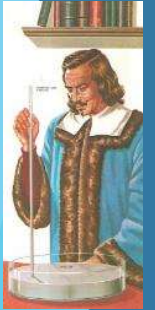
2. Historique et évolution des technologies du vide

► L'évolution des pompes à vide :



2. Historique et évolution des technologies du vide

- ▶ Les jauges à vide, un peu d'histoire :
 - Des jauges mécaniques aux capteurs électroniques
 - Evangelista Torricelli (1644) : invention du baromètre à tube de mercure.
 - Herbert McLeod (1874) : 1^{ère} jauge - vide poussé.
 - Jauge Pirani (1906) basé sur la conductivité thermique.
 - Jauge à ionisation (1916) pour les très basses pressions.



Baromètre de E. Torricelli



Jauge de McLeod

2. Historique et évolution des technologies du vide

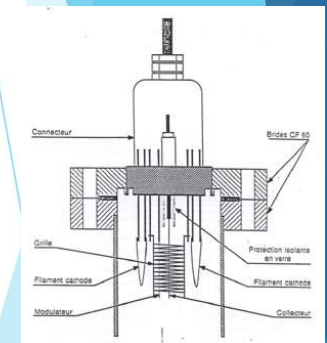
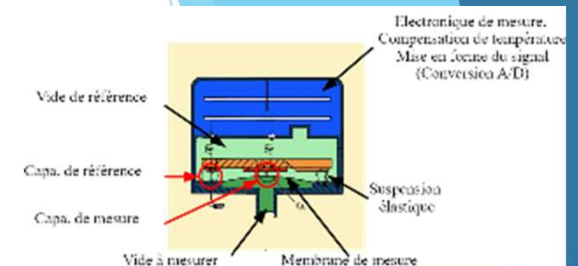
- ▶ L'évolution des jauges à vide :

Mesure directe

- Pesée, déplacement
 - *Jauge à piston*
 - *Baromètre de Torriceli*
 - *Jauge de MacLeod*
 - *Tube en U*
- Déformation mécanique
 - *Manomètre de Bourdon*
 - *Jauge capacitive*
 - *Jauge piézoélectrique*

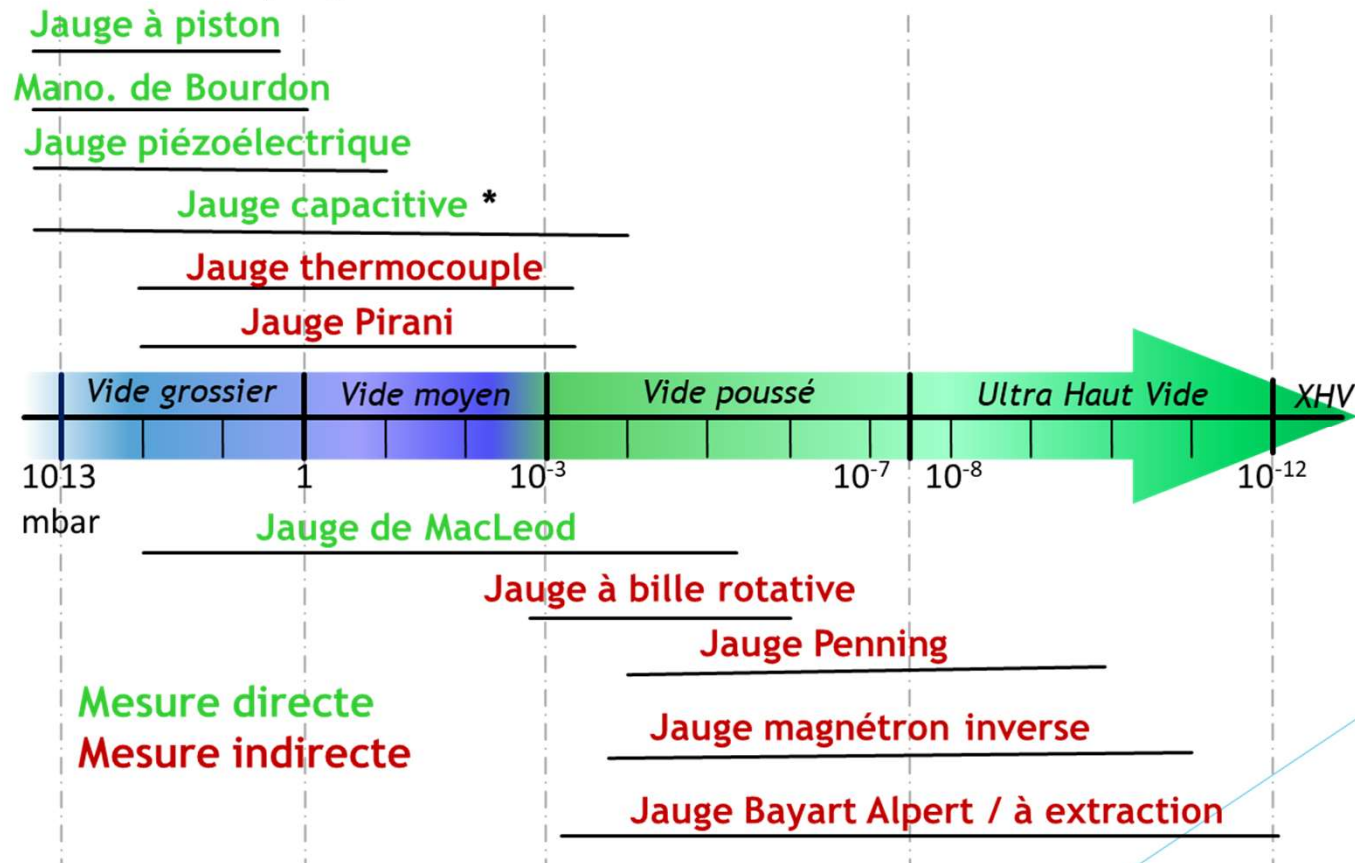
Mesure indirecte

- Transfert de mouvement
 - *Jauge à bille rotative*
- Dissipation thermique
 - *Jauges Pirani & Thermocouple*
- Ionisation
 - *Jauge à cathode froide (Penning, Magnétron Inverse)*
 - *Jauge à cathode chaude (Bayart-Alpert, à extraction)*
 - *Spectromètre de masse*



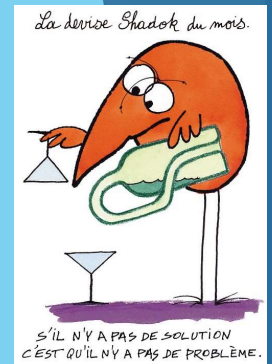
2. Historique et évolution des technologies du vide

- L'évolution des jauges à vide :



3. Les défis technologiques et leurs applications

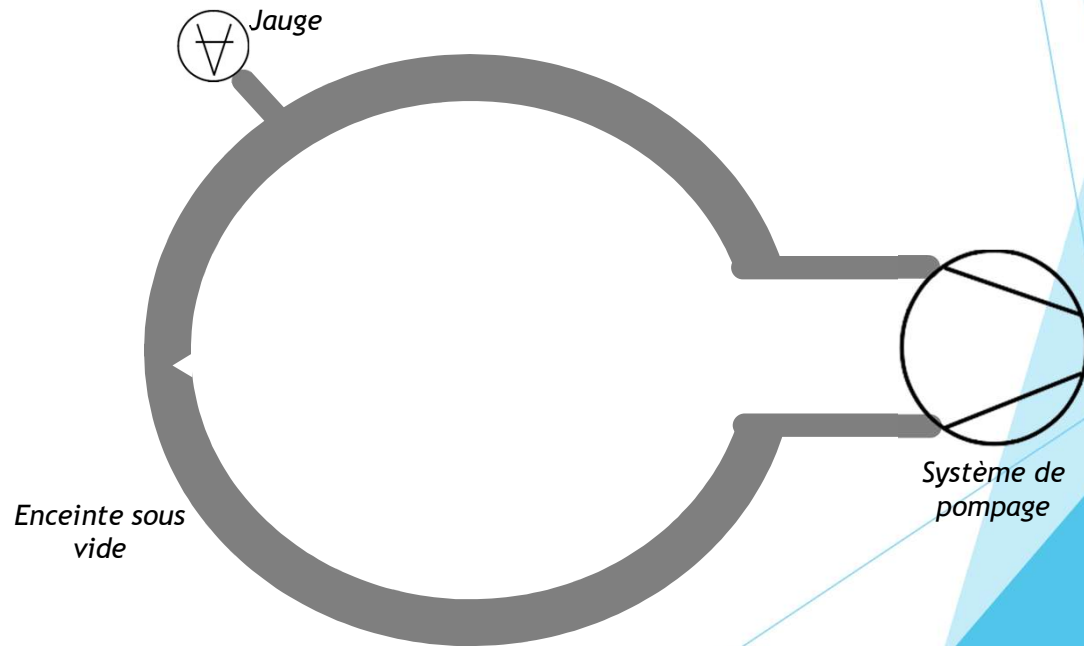
- ▶ Pourquoi « faire le vide » est un défi technologique?
 - « Complexité physique » : Les sources de flux
 - « Précision de la mesure » : Les jauges de mesure doivent être adaptées et « sensibles ».
 - « Stabilité » : maintien du vide, ce qui nécessite des systèmes de pompage performants / adaptés ainsi qu'une bonne étanchéité.



3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Complexité physique » : Identifier et maîtriser les sources de flux
D'où provient le flux gaz ?

$$Q = \Delta P \cdot C$$



Avec

Q : flux ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

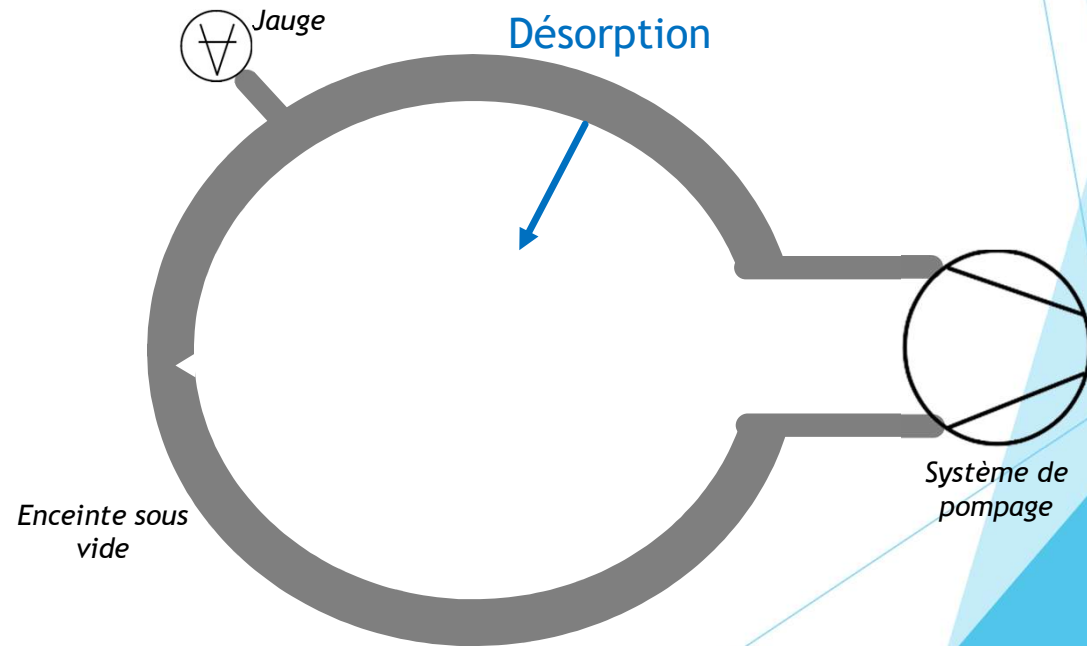
P : pression (Pa ou mbar)

C : conductance ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Complexité physique » : Identifier et maîtriser les sources de flux
D'où provient le flux gaz ?

$$Q = \Delta P \cdot C$$



Avec

Q : flux ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

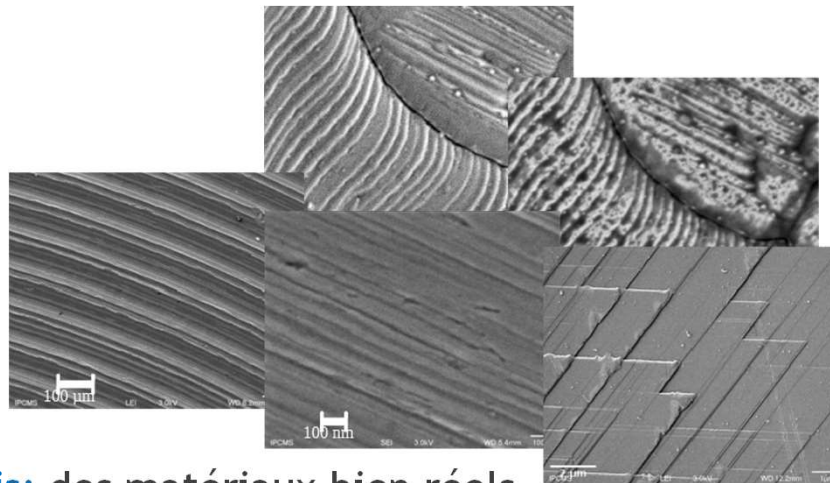
P : pression (Pa ou mbar)

C : conductance ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Complexité physique » : Identifier et maîtriser les sources de flux
D'où provient le flux gaz ?

$$Q = \Delta P \cdot C$$



Les parois: des matériaux bien réels,
des surfaces loin de l'idéal...

Avec

Q : flux ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

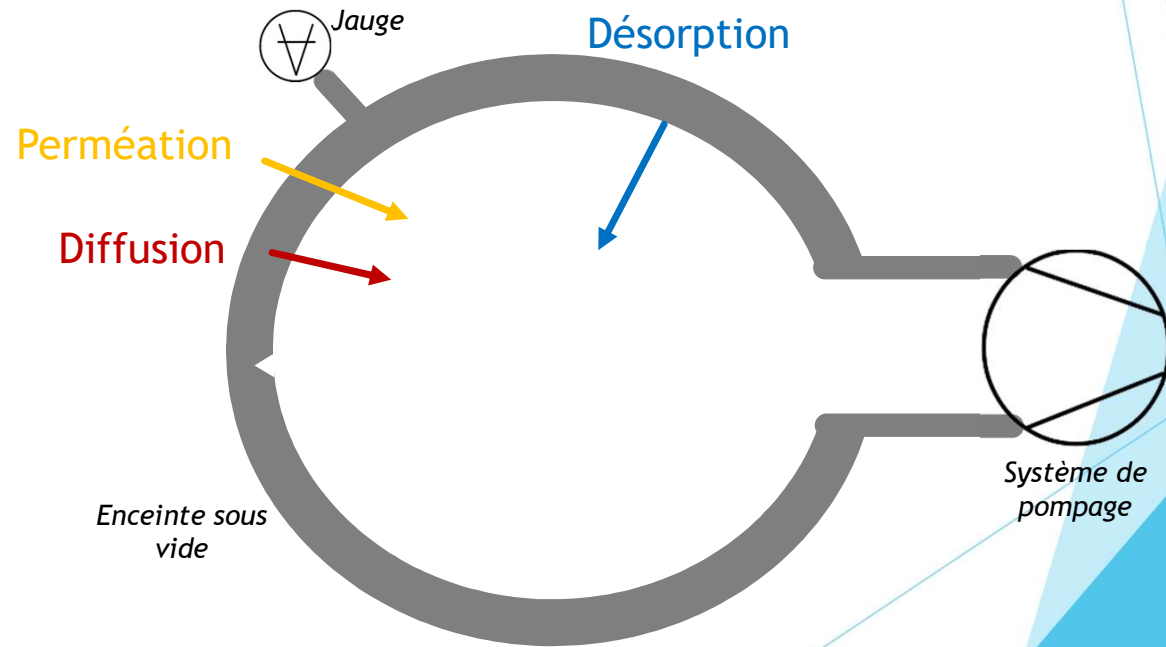
P : pression (Pa ou mbar)

C : conductance ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Complexité physique » : Identifier et maîtriser les sources de flux
D'où provient le flux gaz ?

$$Q = \Delta P \cdot C$$

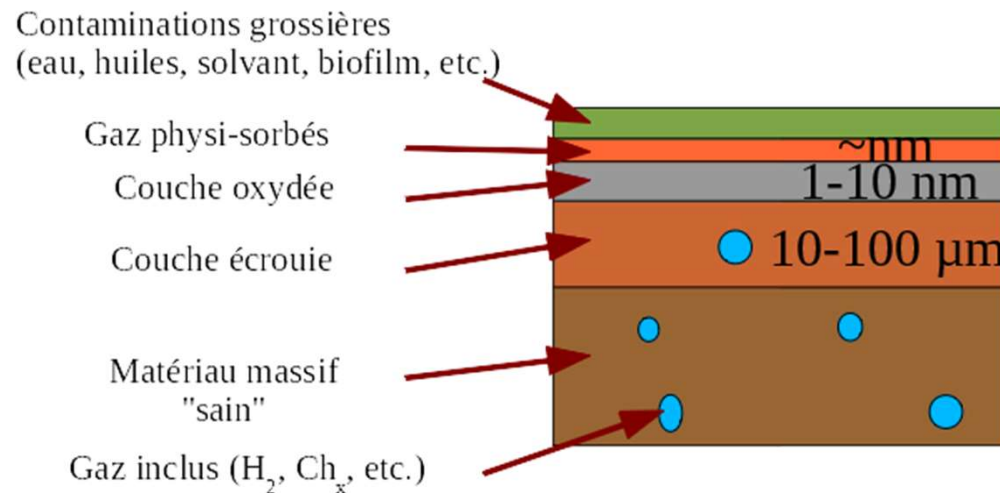


Avec
Q : flux (Pa.m³.s⁻¹ ou mbar.l.s⁻¹)
P : pression (Pa ou mbar)
C : conductance (m³.s⁻¹ ou l.s⁻¹)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- « Complexité physique » : Identifier et maîtriser les sources de flux
D'où provient le flux gaz ?

$$Q = \Delta P \cdot C$$



Méthode de nettoyage

- Solvants
- Étuvage standard
- Attaque chimique
- Polissage
- Étuvage HT
- Temps...

Dans le domaine du vide moléculaire, le volume compte peu, ce sont les effets dus aux surfaces qui dominent.

Mais : les surfaces ont une épaisseur...

Avec

Q : flux ($Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ ou $mbar \cdot l \cdot s^{-1}$)

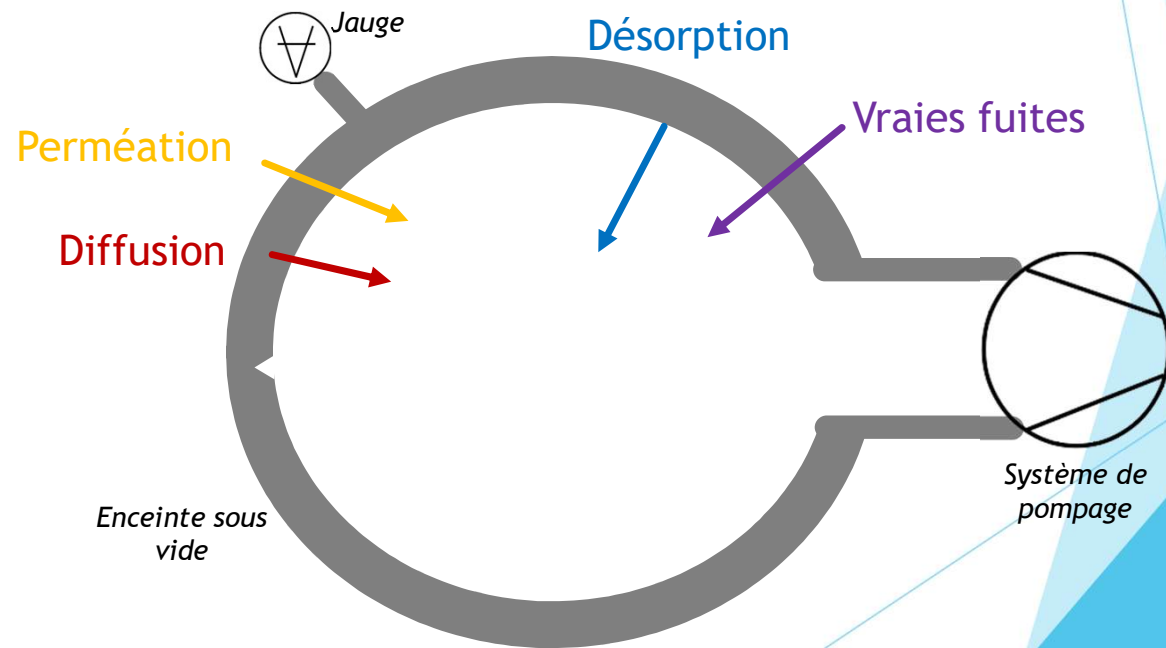
P : pression (Pa ou mbar)

C : conductance ($m^3 \cdot s^{-1}$ ou $l \cdot s^{-1}$)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Complexité physique » : Identifier et maîtriser les sources de flux
D'où provient le flux gaz ?

$$Q = \Delta P \cdot C$$



Avec

Q : flux ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

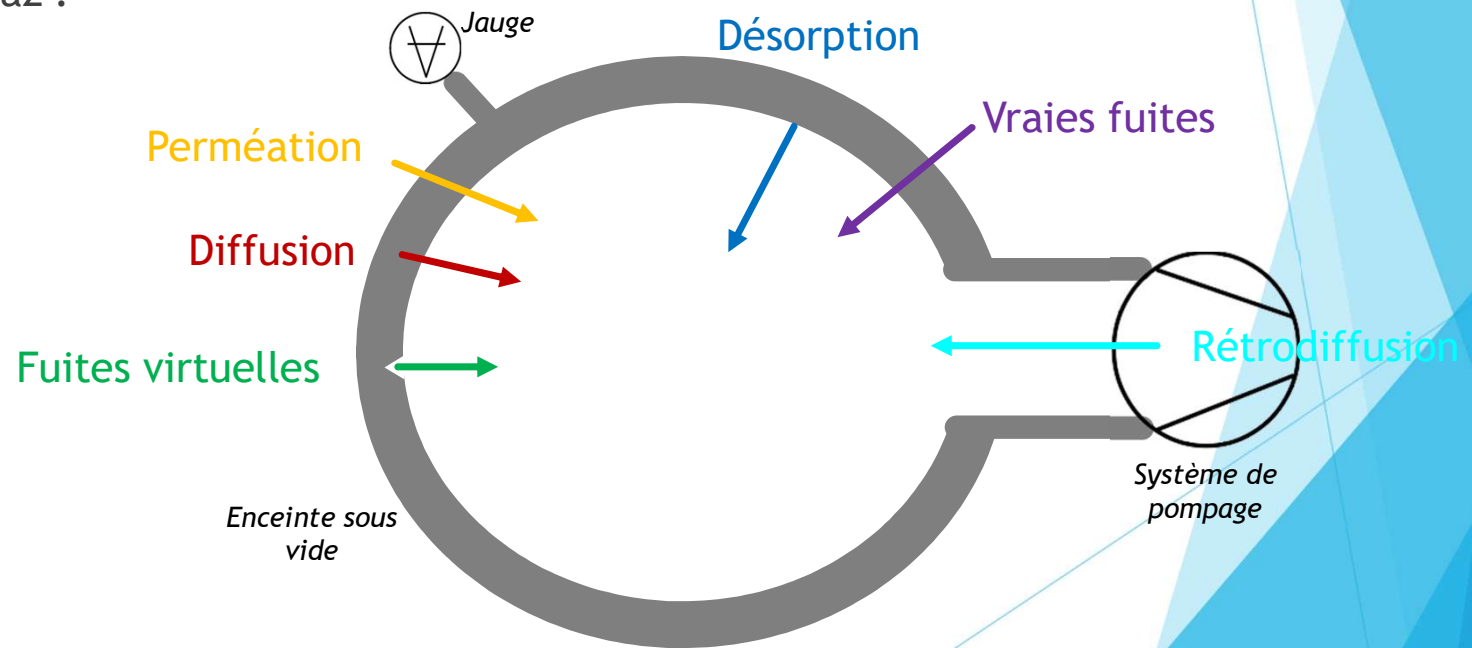
P : pression (Pa ou mbar)

C : conductance ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Complexité physique » : Identifier et maîtriser les sources de flux
D'où provient le flux gaz ?

$$Q = \Delta P \cdot C$$



Avec

Q : flux ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

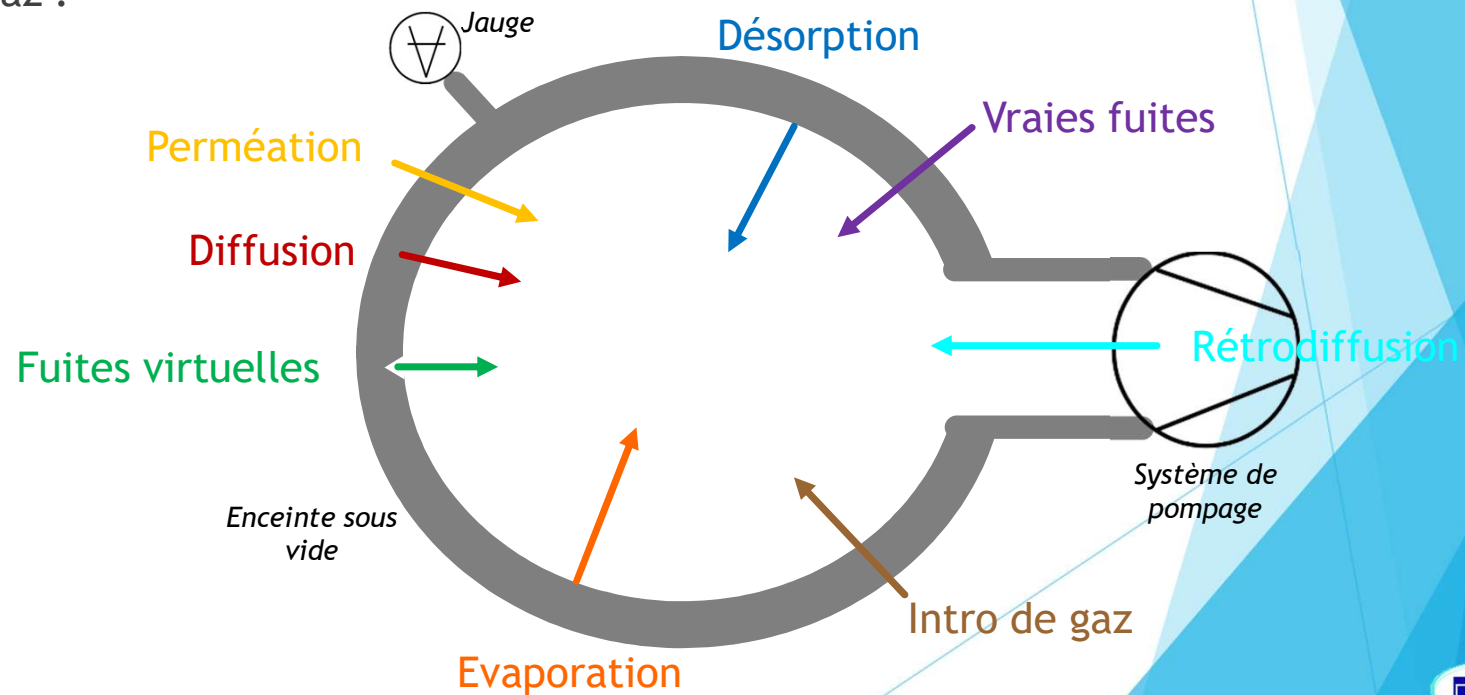
P : pression (Pa ou mbar)

C : conductance ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- « Complexité physique » : Identifier et maîtriser les sources de flux
D'où provient le flux gaz ?

$$Q = \Delta P \cdot C$$



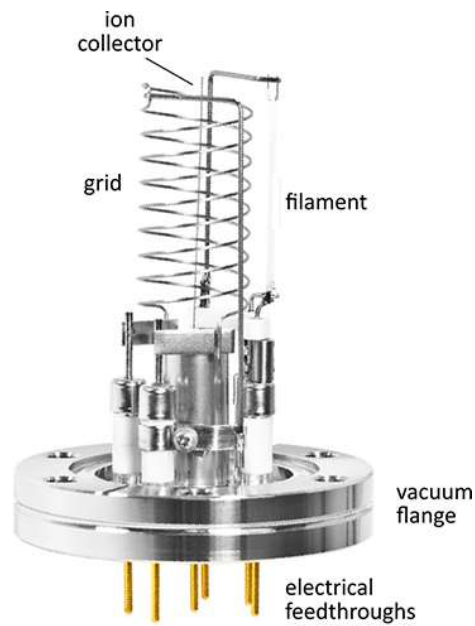
Avec
 Q : flux ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)
 P : pression (Pa ou mbar)
 C : conductance ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Précision de la mesure » : les jauges à vide, indicateurs ou vrais capteurs de mesure?
- 'vraie' Métrologie => capteurs étalonnés
- Sources d'erreurs et d'incertitudes
 - mesures indirectes
 - dépendance à la nature des gaz
 - effets mémoire et la dégazage
 - effets « parasites »

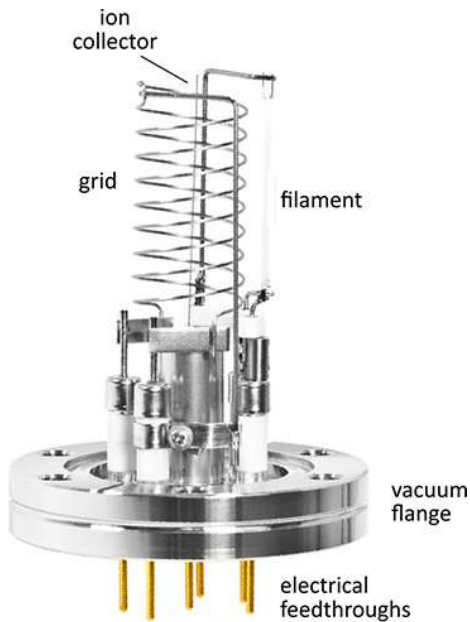
3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Précision de la mesure » : les jauges à vide, indicateurs ou vrais capteurs de mesure?
 - Exemple de la jauge Bayard Alpert



3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Précision de la mesure » : les jauges à vide, indicateurs ou vrais capteurs de mesure?
- Exemple de la jauge Bayard Alpert

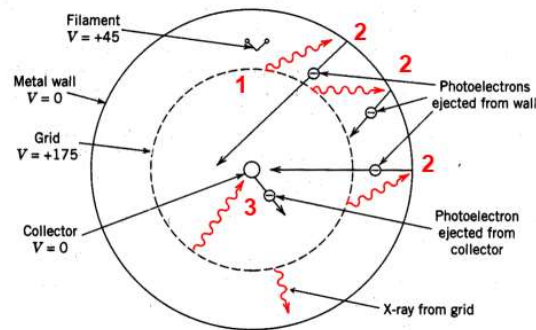


Production de rayons X

$$I^+ = I_G + I_x$$

I^+ : Courant d'ions collecté, valeur mesurée
 I_G : Courant « réel » recherché, dû au gaz ionisé
 I_x : Courant dû à l'émission des photoélectrons

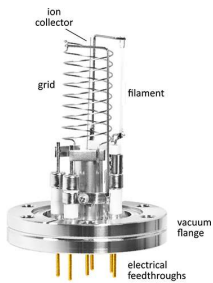
mais ...



3. Les défis technologiques et leurs applications

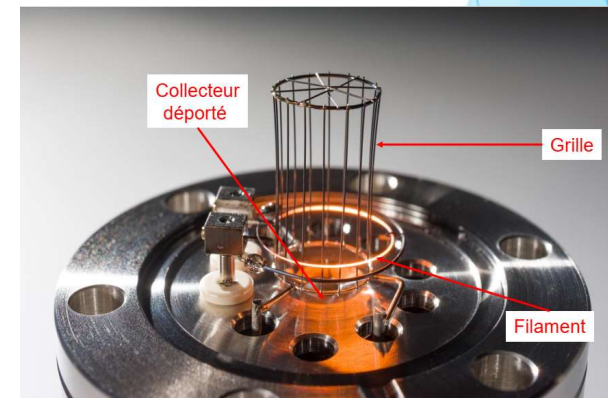
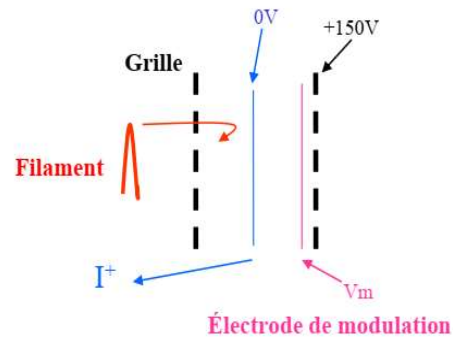
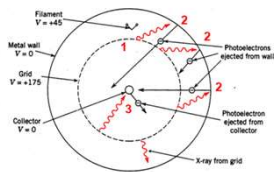
- ▶ « Précision de la mesure » : les jauges à vide, indicateurs ou vrais capteurs de mesure?
- Solution : la jauge Bayard Alpert à extraction

- Amélioration de la sensibilité (Forme de la grille)
- Diminution des dimensions du collecteur
- Modulation du courant collecté



Production de rayons X

$$I^+ = I_G + I_x$$



3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Stabilité du vide » : Atteindre des vides extrêmes
- Conception d'une installation :
 - + Choix des matériaux
 - + Calcul et dimensionnement de l'installation
 - + Choix des systèmes de pompage

$$Q = \Delta P \cdot C$$



$$P = \frac{Q}{S_{eff}} + P_0$$

Avec

Q : flux ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{mbar} \cdot \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

P : pression (Pa ou mbar)

C : conductance ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

S_{eff} : vitesse de pompage effective du système ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$)

P_0 : vide limite de la pompe secondaire (Pa ou mbar)

3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Stabilité du vide » : Atteindre des vides extrêmes
 - Le pompage NEG (Non Evaporable Getter)
 1. Dépôt d'alliage métallique (Zr-Al, Zr-V-Fe, Ti-Zr-V) en « cartouche » usur les parois des chambres à vide
 2. Température d'activation => Liaisons chimiques entre les molécules de gaz chimiquement actives (H₂O, CO, CO₂, O₂, N₂) et l'alliage = pompage

3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ « Stabilité du vide » : Atteindre des vides extrêmes
 - Le pompage NEG (Non evaporable Getter)

Design and construction of the SuperKEKB vacuum system

Yusuke Suetsugu,^{*)} Ken-ichi Kanazawa, Kyo Shibata, Takuya Ishibashi, Hiromi Hisamatsu, Mitsuru Shirai, and Shinji Terui
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

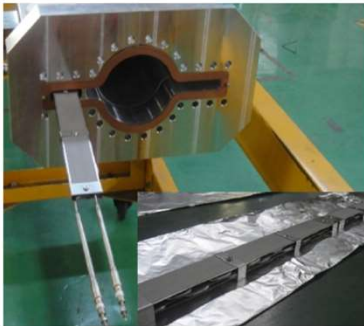


Fig. 4. (Color online) Multilayered NEG strips for the antechamber.

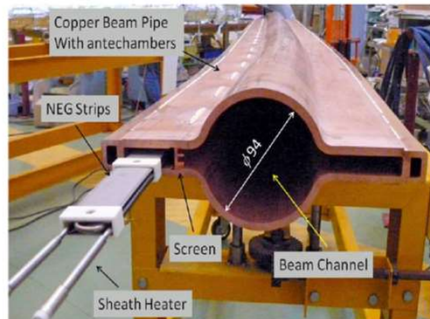
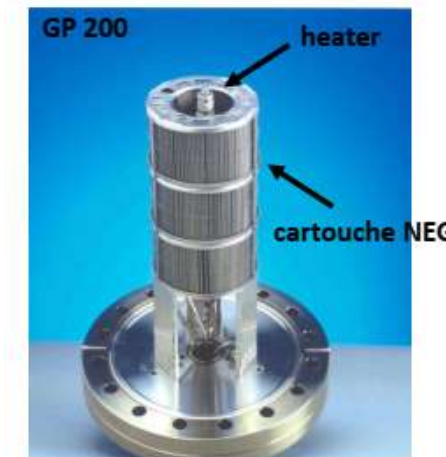


Fig. 1. Example of a beam pipe with antechambers and distributed pumps.

St707 NON-EVAPORABLE GETTER



T. Porcelli, 11/10/2016

8

3. Les défis technologiques et leurs applications



- ▶ « Stabilité du vide » : Atteindre des vides extrêmes
 - Exemple : The Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment

Spectrometer mass **200 t**, volume **1240 m³**, inner surface **1222 m²**

Stainless steel vessel on HV: **18.5 kV**

Inner wire electrode system with **23400 wires**

6 turbo molecular pumps 10000 ℓ/s

2 NEG-Pumps 250000 ℓ/s

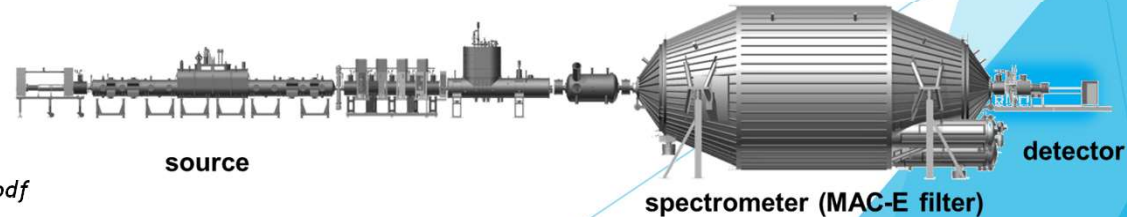
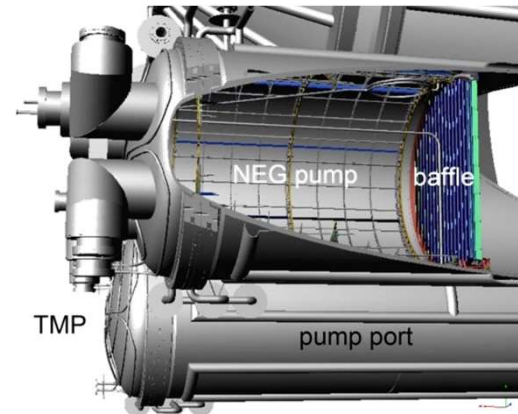
3 cryogenic LN₂ baffles (suppressing Rn background rate)

Latest **bake-out in summer 2019** (200°C, total time: 1 month)

stable pressure at $\approx 10^{-11}$ mbar

Outgassing (H₂) $\approx 10^{-12}$ mbar ℓ/s

Tritium partial pressure $< 10^{-20}$ mbar



3. Les défis technologiques et leurs applications

- ▶ Vers de nouvelles technologies :
 - Mesure des très basses pressions et Qbit à atomes piégés:

Temps de relaxation d'atomes piégés = $f(\text{densité de molécules résiduelles}) \Leftrightarrow f(\text{pression})$

Plus le temps de relaxation est long, plus la pression est basse, car il y a moins de collisions perturbatrices.

3. Les défis technologiques et leurs applications

► Et d'autres applications ...

Applications	Pourquoi utiliser le vide ?
Fabrication des semi-conducteurs	Limiter l'oxydation et la contamination des dépôts de couches minces
Simulation d'environnements spatiaux	Tester les satellites & instruments dans des conditions proches du vide spatial
Médecine (microscopie électronique)	Permet l'observation de virus / bactéries à l'échelle nanométrique
Energie / fusion nucléaire (ITER)	Confinement de plasma à très hautes températures sans contact avec les parois

Merci!

