

A detailed historical engraving from the 17th century, titled 'ICONIS MUS XI', illustrating various vacuum technologies. The scene is set in a landscape with trees and a town in the background. In the foreground, several teams of horses are pulling a large, wheeled apparatus (Fig. II) on a road. Above the landscape, five technical diagrams are shown: Fig. I shows a dome-shaped vessel (A) with a handle and a base (B); Fig. II shows a large, multi-wheeled carriage; Fig. III shows a smaller, similar carriage; Fig. IV shows a small, box-like component; and Fig. V shows a dome-shaped vessel (V) with a handle and a base (N).

Technologies du vide

R.LEVALLOIS

Ecole des accélérateurs – IN2P3

- **Généralités**
- **Théorie**
 - **Notions de base**
 - **Flux**
 - **Dimensionnement**
- **Technologies du Vide**
 - **Moyens de pompage**
 - **Mesure du vide**
 - **Conception**

- **Généralités**
- **Théorie**
 - Notions de base
 - Flux
 - Dimensionnement
- **Technologies du Vide**
 - Moyens de pompage
 - Mesure du vide
 - Conception

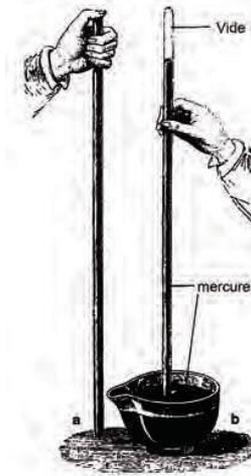
Généralités

-500 à -70 : 1^{ère} notions du vide en Grèce antique (Leucippe, Démocrite) avec la pensée atomiste, ou leur opposition (Platon, Aristote)



Evangelista TORRICELLI
(1608-1647)

Evangelista Torricelli :
mise en évidence du vide



Blaise PASCAL
(1623-1662)

Travaux de Blaise Pascal sur la pression
(mesure de pression sur le Puy de Dome)

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

F : Force (N)

S : surface (m²)

P : pression (Pa)

Unités de pression :

$$100\text{Pa} = 1\text{hPa} = 1\text{ mbar} = 0,75\text{ Torr (mmHg)}$$

$$\textit{pression relative} = \textit{pression absolue} + 1\text{bar}$$

- **Définition du Vide :**

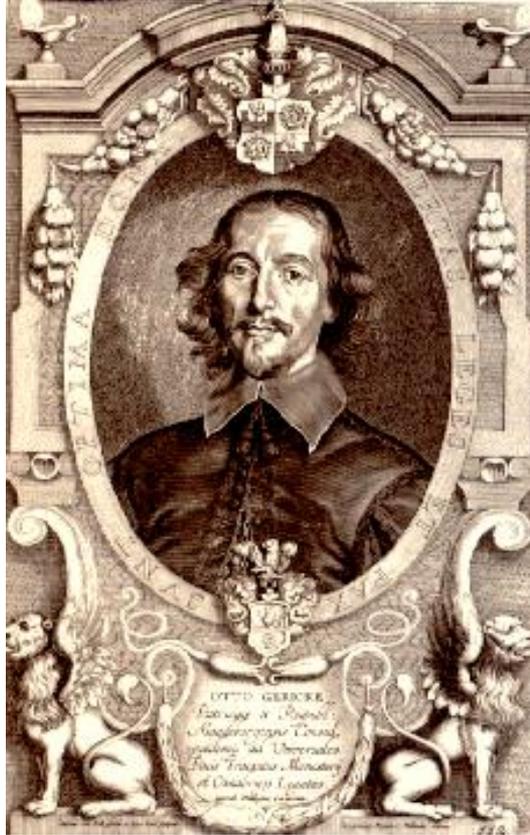
Espace où les particules matérielles sont fortement raréfiées ($P < P_{\text{atmosphérique}}$)

$$n_v < 2,5 \cdot 10^{19} \text{ molécules/cm}^3$$

- **Technologies du Vide :**

Technologies mises en œuvre pour obtenir et maintenir des pressions $< P_{\text{atm}}$

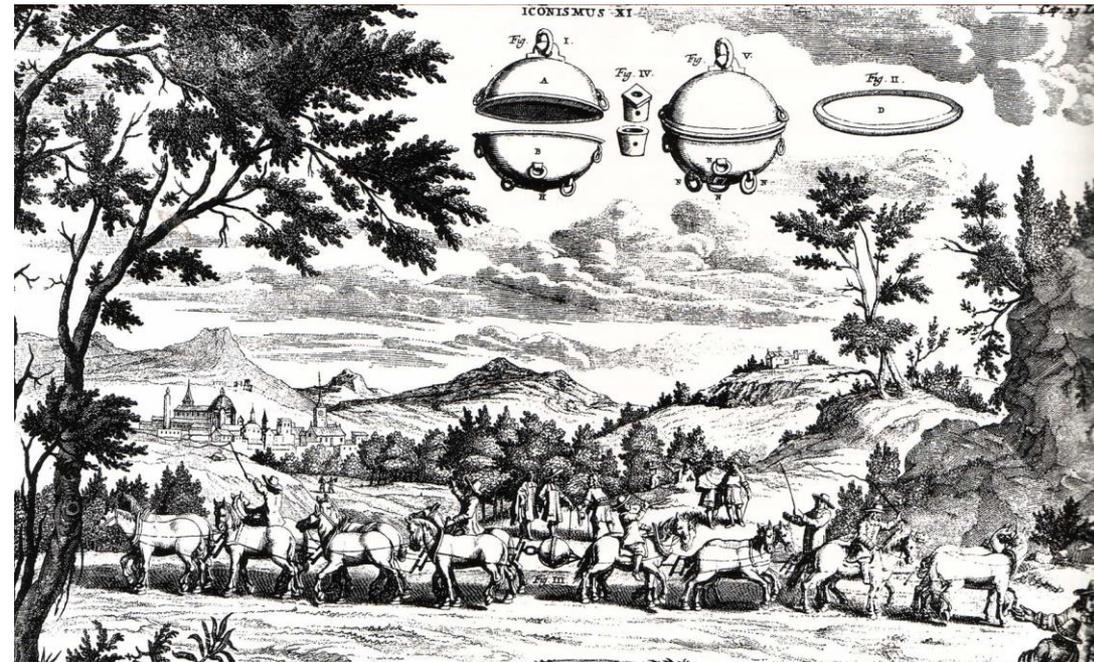
Généralités



Otto Von Guericke
1602 - 1686
Source Wikipedia



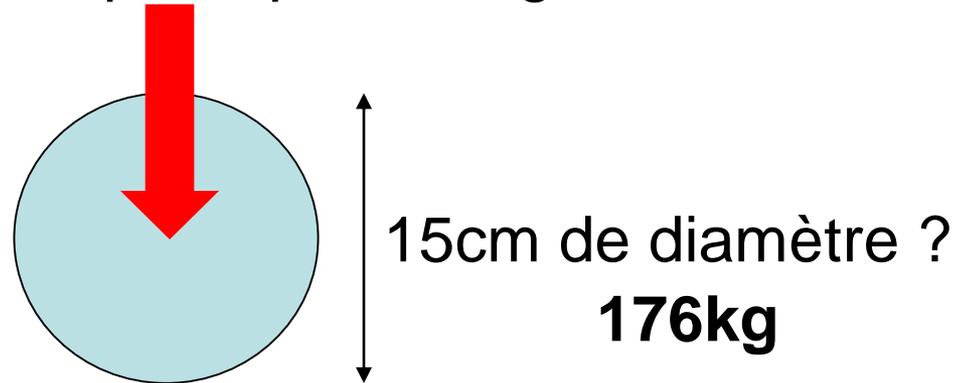
Source Gazette du Vide n° 24



Généralités

La pression 2/2

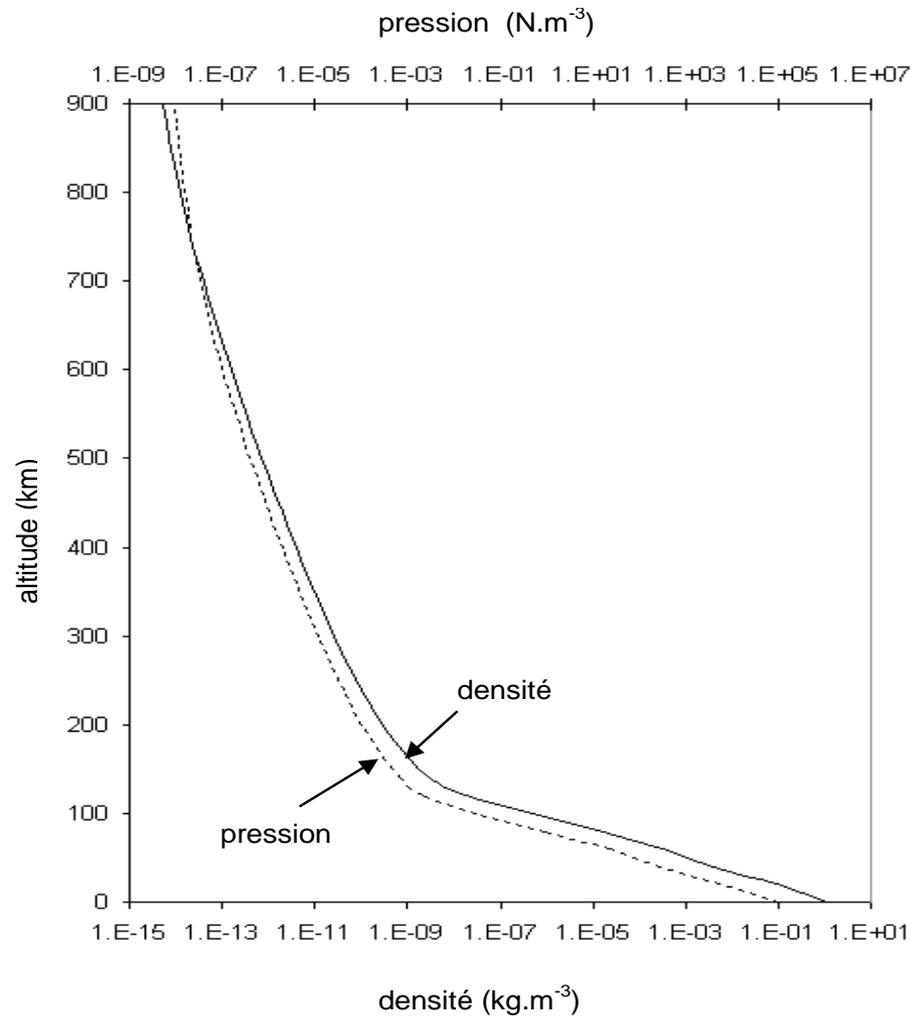
Pression atmosphérique -> 1kg/cm²



1^{ère} contrainte : Dimensionnement des équipements en conséquence



Le vide : tout autour de nous 1/2



Données de MSISE-90, Nasa (extrait du cours TTVS du CNES)

Généralités

Le vide : tout autour de nous

Altitude	(Km)	P (hPa)
Niveau de la mer	0	1013
Sommet Mont-Blanc	4.8	560
Altitude des jets	15	120
Satellites géostationnaires	35800	$2 \cdot 10^{-5}$
Au voisinage du sol lunaire	0	$5 \cdot 10^{-7}$
A l'altitude de la lune	384000	$5 \cdot 10^{-9}$
Dans notre galaxie	(estim.)	$10^{-15} - 10^{-17}$
Espace inter-galactique	(estim.)	$10^{-22} - 10^{-24}$

 **$2 \cdot 10^{-14}$ hPa au plus bas en laboratoire à T_{amb} (CERN)**

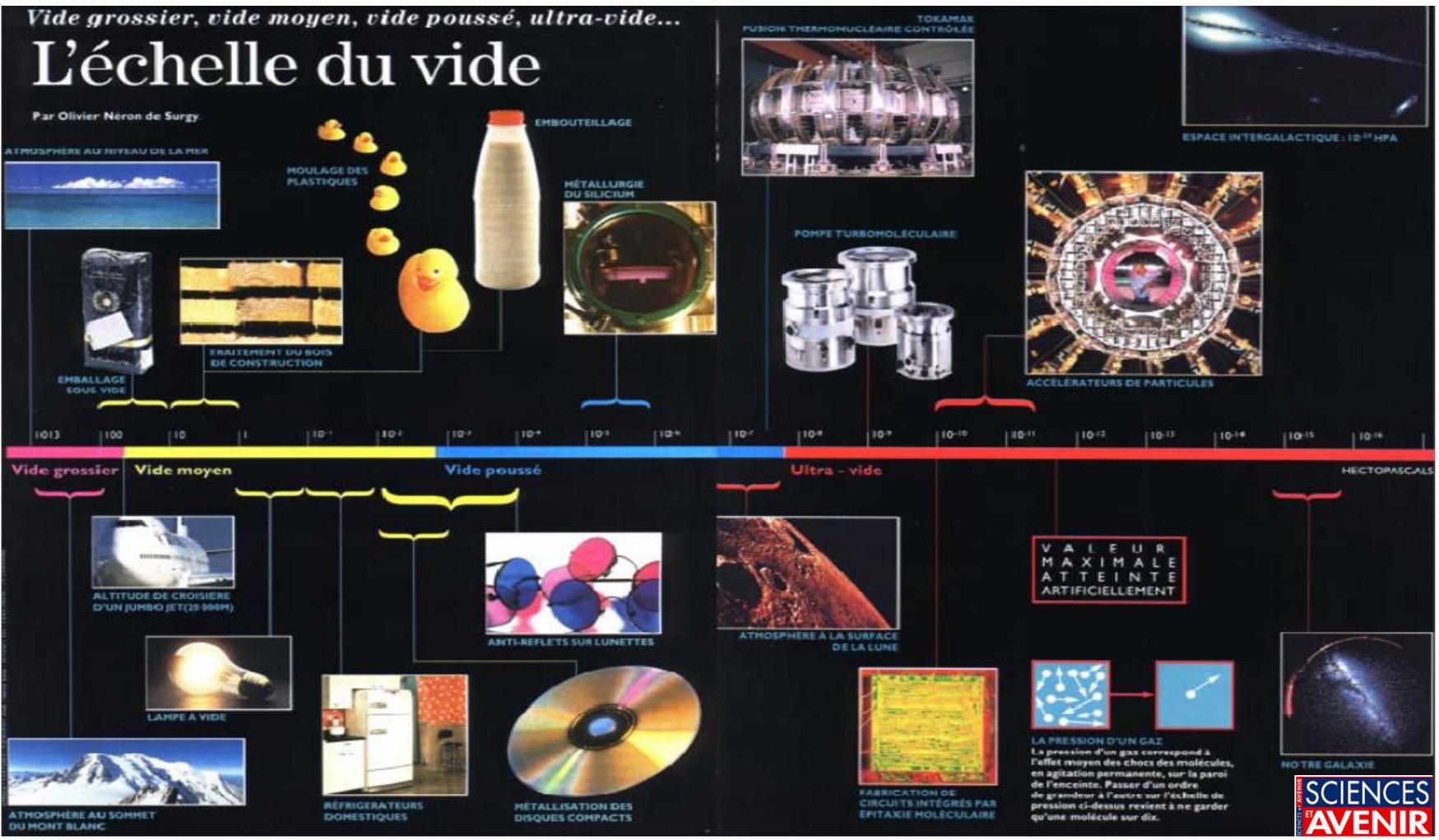
Domaines de pression

Ces limites doivent être considérées comme approximatives

- **Vide industriel ou vide primaire** ($1000 < P < 1$ hPa)
 - > 99,9% des efforts mécanique sur les parois
 - > Régime d'écoulement turbulent ou laminaire
- **Vide moyen** (1 à 10^{-3} hPa)
 - > Variation de la viscosité
 - > Régime laminaire ou moléculaire suivant les dimensions de l'enceinte à vide
- **Vide poussé** (10^{-3} à 10^{-7} hPa)
 - > Le dégazage des surfaces devient limitant
 - > Régime d'écoulement moléculaire
- **Ultra-vide** ($< 10^{-7}$ hPa) :
 - > Domaine des faibles concentrations moléculaire
 - > Le dégazage des profondeurs des matériaux devient limitant
 - > Technologie ultra-vide

Généralités

Domaines d'applications

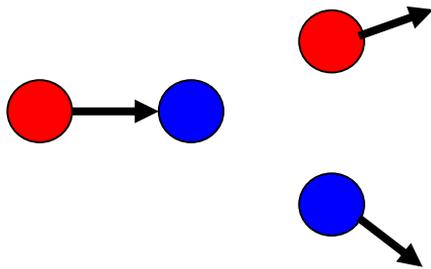


Technologies « transverses » : Domaines d'application très étendus

Utilité du vide dans les accélérateurs de particules

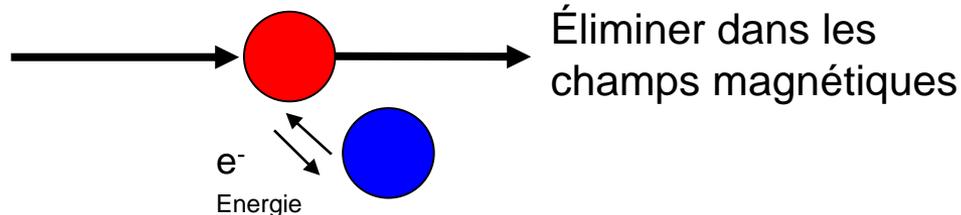
➤ Limiter les interactions du faisceau avec le gaz résiduel :

- Collisions élastiques (particule faisceau – gaz résiduel)



- Collisions inélastiques :

- perte d'énergie
- échange de charges avec le gaz résiduel

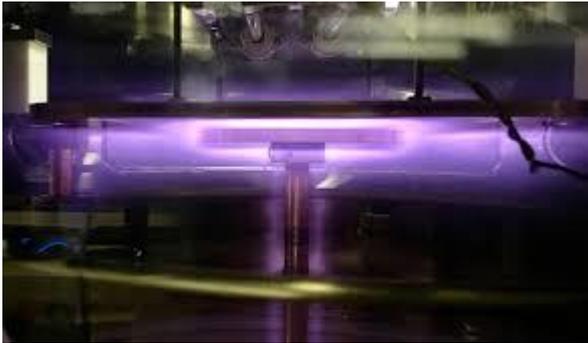


- Pertes faisceau
- Diminution de transmission
- Diminution du temps de stockage

Utilité du vide dans les accélérateurs de particules

➤ Permettre le fonctionnement de systèmes spécifiques

- Sources de particules (plasma, ...)
- Isolation des systèmes HT (cavités accélératrices HF, éléments électrostatiques,...)
- Isolation thermique des cryosystèmes (cavités HF supra, aimants froids, pompes cryo, ...)
- Confinement des éléments radioactifs



Plasma



Boite froide SPIRAL2



RFQ SPIRAL2

- Généralités
- **Théorie**
 - Notions de base
 - Flux
 - Dimensionnement
- Technologies du Vide
 - Moyens de pompage
 - Mesure du vide
 - Conception

Description macroscopique

Pour les calculs qui suivent : système à l'équilibre thermodynamique

- Température et volume constant à l'échelle de temps des calculs
- Gaz non condensables

Loi d'Avogadro

-> avec les mêmes conditions T et P -> volumes égaux de gaz différents contiennent le même nb. de molécules

-> 1 mole de gaz ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ molécules) dans les conditions TPN occupe 22,4litres

Conditions TPN :

$$T_0 = 273,15 \text{ K}$$

$$P_0 = 1 \text{ atm} = 1013,25 \text{ hPa}$$

Description macroscopique

Loi de Dalton

$$P_{totale} = \sum_1^n P_n = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad \text{exl : } P_{air} \approx P_{N2} + P_{O2} + P_{Ar} + P_{H2O} + P_{CO2}$$

		Concentration (%)	Pression partielle (mbar)
Azote	N ₂	78	780
Oxygène	O ₂	21	210
Argon	Ar	0.93	9.3
Dioxyde de carbone	CO ₂	0.03	0.3
Néon	Ne	0.0018	1.8 10 ⁻²
Hélium	He	0.0005	5 10 ⁻³
Krypton	Kr	0.0001	1 10 ⁻³
Hydrogène	H ₂	0.00005	5 10 ⁻⁴
Xénon	Xe	0.000006	6 10 ⁻⁵

$\epsilon = 65\%$
 $P_p(H_2O) = 15 \text{ mbar}$

 H_2O

Composition de l'air sec (TPN)

Description macroscopique

Loi des gaz parfaits

$$PV = NkT = nRT$$

R : cst gaz parfait $8,314 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$

k : cste de Boltzmann : $k = 1.38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

n : nombre de mole

N : nombre de molécules

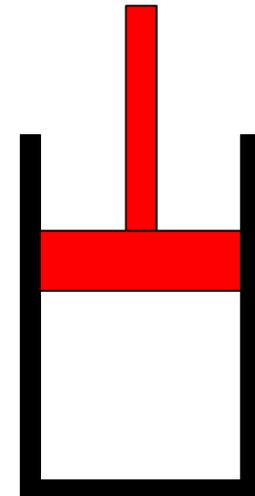


La pression dépendra :

De la Température (vitesse des molécules)
Des changements de volume
Du nombre de molécules

Mais ne dépendra pas :

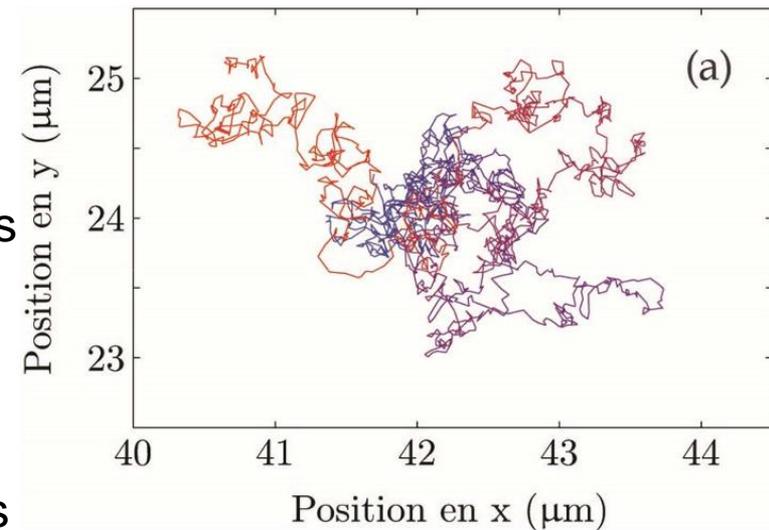
De la nature du gaz



Si $V \searrow$ alors $P \nearrow$

Description microscopique

- Les gaz sont constitués d'un très grand nombre de particules de dimensions très faibles et indépendantes les unes des autres
- Mouvement incessant et aléatoire des molécules de gaz, dont la vitesse ($E_{\text{cinétique}}$) dépend de la température du gaz
- Collisions élastiques et trajectoires rectilignes entre deux chocs (inter-moléculaires ou avec les parois)



Mouvement analogue au mouvement Brownien
d'une particule colloïdale en suspension
http://perso.ens-lyon.fr/thomas.gibaud/pdf/bup_mvtBrownien.pdf

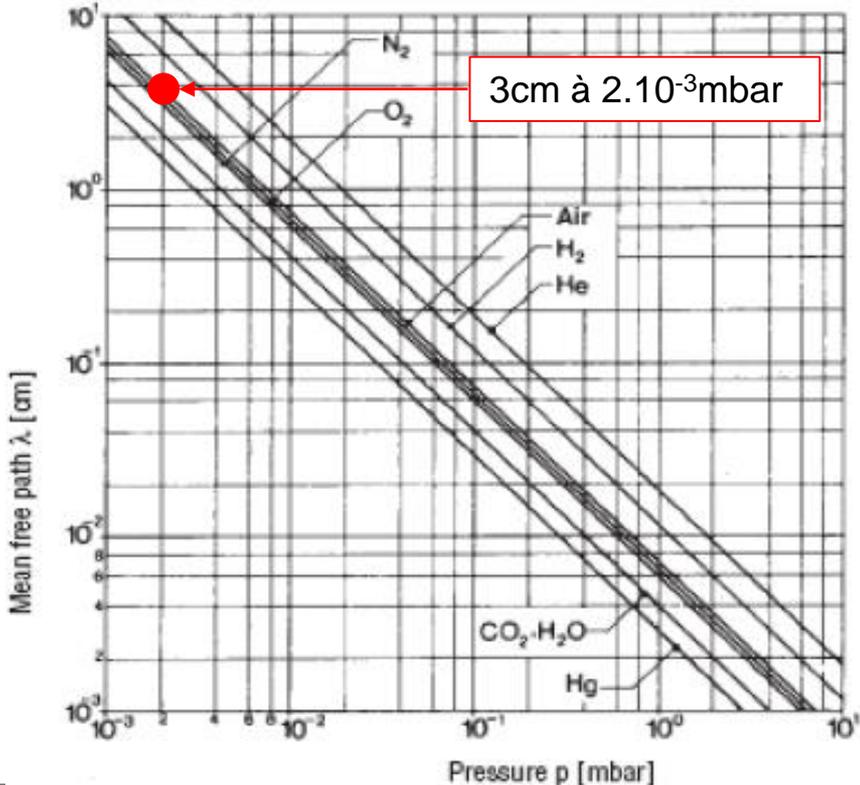
Description microscopique

Libre parcours moyen

Définition : Distance moyenne parcourue entre deux chocs moléculaires successifs

$$l_m = \frac{\text{vitesse moyenne}}{\text{nombre de chocs}} = \frac{1}{n \cdot d^2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} = \frac{V}{d^2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot P} \frac{k \cdot T}{P}$$

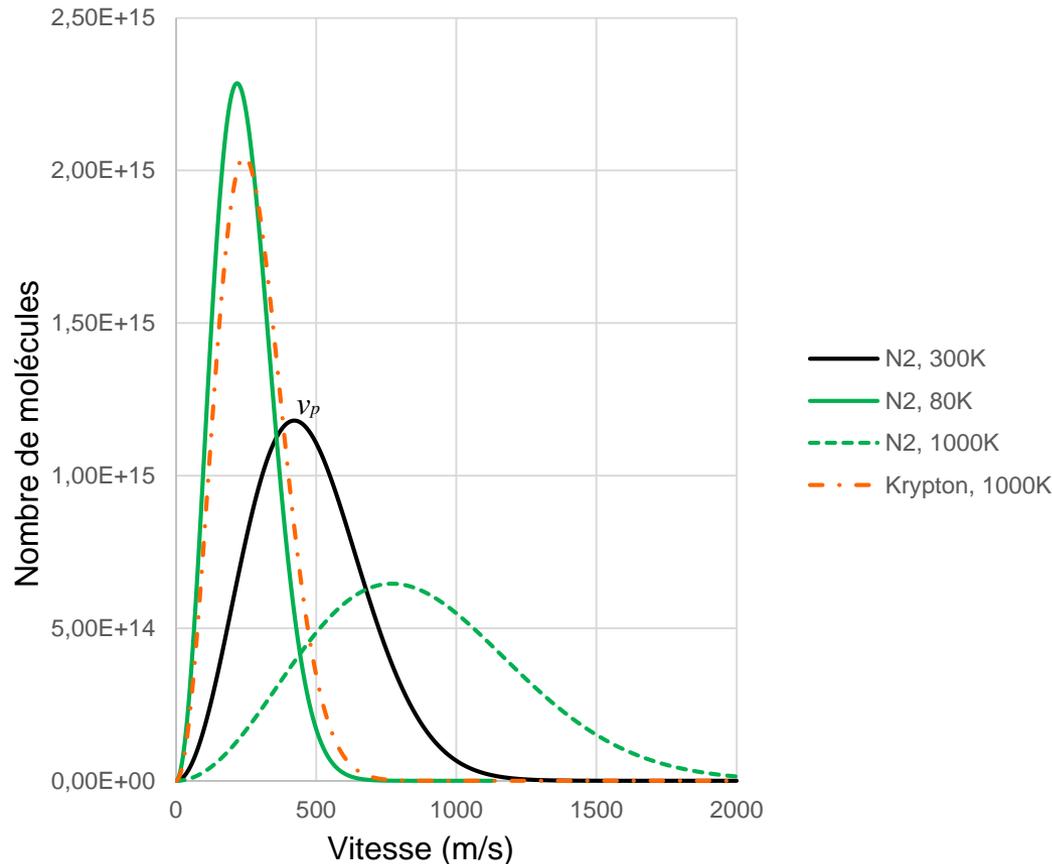
d : diamètre des molécules



Lm ➡ définition du vide poussé (interaction des molécules de gaz avec les parois, régime d'écoulement)

Description microscopique

Distribution des vitesses (Maxwell Boltzmann)



Vitesse la plus probable (maximum de la distribution)

$$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$

Vitesse moyenne arithmétique

$$v_m = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

Vitesse quadratique moyenne (Ec)

$$v_c = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

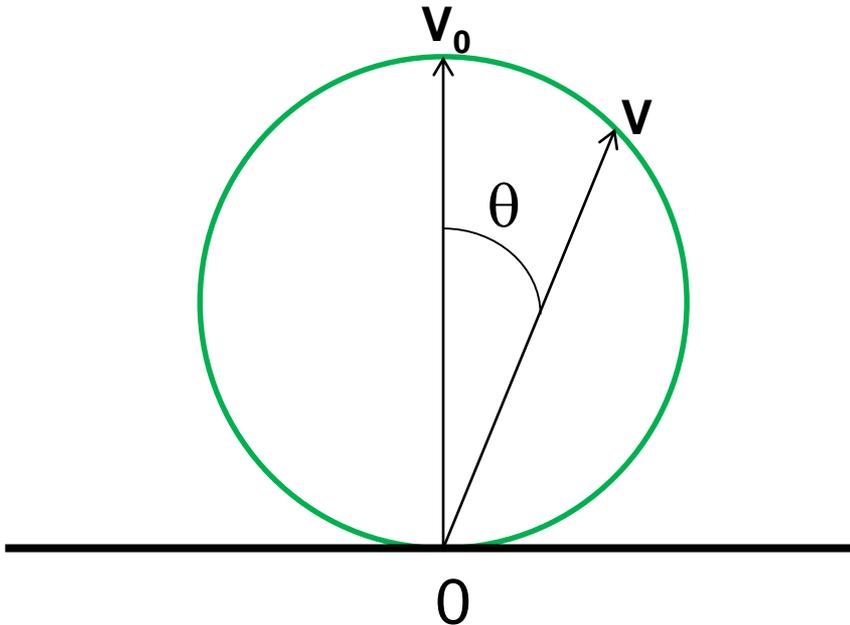
Importance de la nature du gaz dans les calculs d'écoulement aux basses pressions

Description microscopique

Choc de Knudsen 1/2

Définition : la molécule se fixe pour une durée τ (**temps de séjour**) sur la surface puis se libère en perdant la mémoire de sa direction et de sa vitesse avant le choc.

Réémission : suivant la loi de Lambert $V = V_0 \cos \theta$



Fondamental pour la compréhension des écoulements gazeux à très basses pressions (pas d'interaction entre particules)

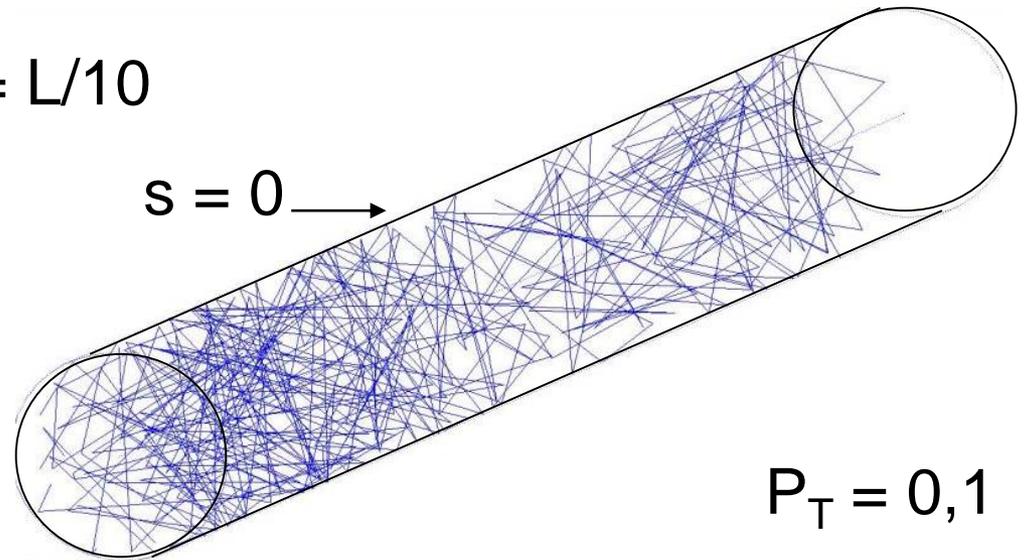
-> écoulement gazeux difficile à basses pressions (régime moléculaire)

Choc de Knudsen 2/2

Simulation de la probabilité de transfert des molécules de gaz dans une structure (régime d'écoulement moléculaire)

$$\Phi = L/10$$

$$s = 0 \rightarrow$$



$$P_T = 0,1$$

Application numérique : Tube longueur 1m, diamètre 10cm -> 10% de transmission

Écoulement difficile à travers les structures longues et de petite section

Description microscopique

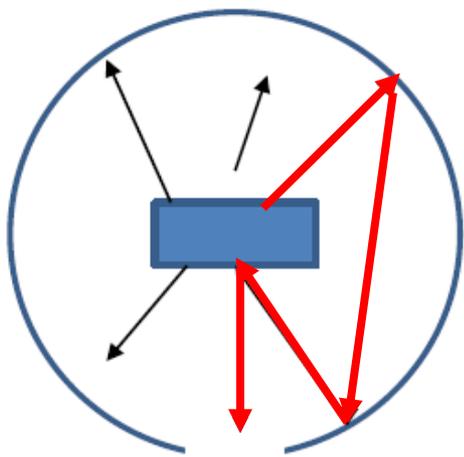
Temps de séjour (Frenkel)

Définition : Temps où la particule de gaz reste à la surface

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{E}{RT}}$$

τ_0 : fréquence d'oscillation (10^{-13} s à 20°C)
 E : chaleur d'adsorption
 R : constante des gaz parfait
 T : Température

Pour 20 kcal/mol $\tau = 80\text{s} \Rightarrow$ Si $E < 20\text{kcal/mol}$ (exl : N_2 , Ar, ...) \Rightarrow réémission rapide
Si $20 < E < 25$ kcal/mol (exl H_2O) ($80\text{s} < \tau < 5\text{j}$)



- τ à chaque contact avec l'enceinte ou l'échantillon
- Si $T \uparrow$ alors $\tau \downarrow \Rightarrow$ principe de l'étuvage
- Si $T \downarrow$ alors $\tau \uparrow \Rightarrow$ principe du cryopompage

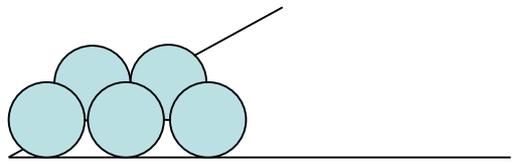
T° (K)	Temps séjour (s)
77	$5 \cdot 10^{43}$
293	80
473	0,0002

Temps pour H_2O à 20kcal/mole

Description microscopique

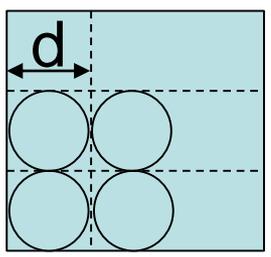
Temps de formation d'une monocouche

But : définir un cas idéal, pour apprécier la propreté d'une surface (en terme de quantité de gaz)



$$\dagger = \frac{\text{nb de molécules formant une monocouche}}{\text{nb de chocs par unité de surface}} = \frac{\mu}{\gamma}$$

- Molécules supposées sphériques, d'un diamètre d et pour un arrangement atomique parfait



Pour une surface unitaire : $\mu = \frac{1}{d^2}$
(pour $N_2 : \mu_s = 7 \cdot 10^{18} / m^2$)

- Taux d'incidence donné par $\gamma = \frac{1}{4} \cdot N \cdot V_m$

$\dagger = \frac{4}{N V_m d^2}$

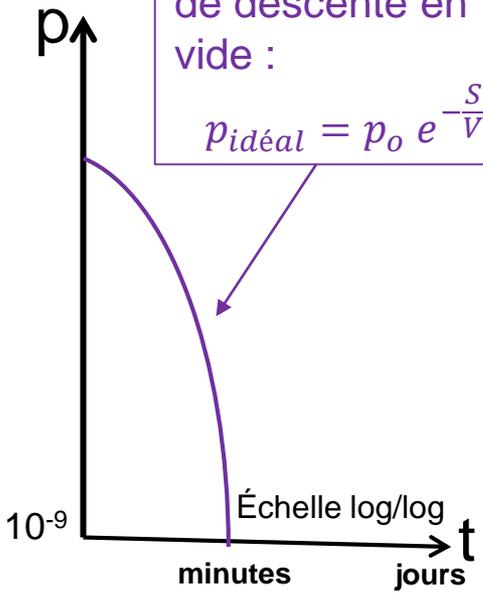
$10^{-6} \text{mbar@300K} \quad \dagger \approx 3,4\text{s}$

- Généralités
- Théorie
 - Notions de base
 - **Flux**
 - Dimensionnement
- Technologies du Vide
 - Moyens de pompage
 - Mesure du vide
 - Conception

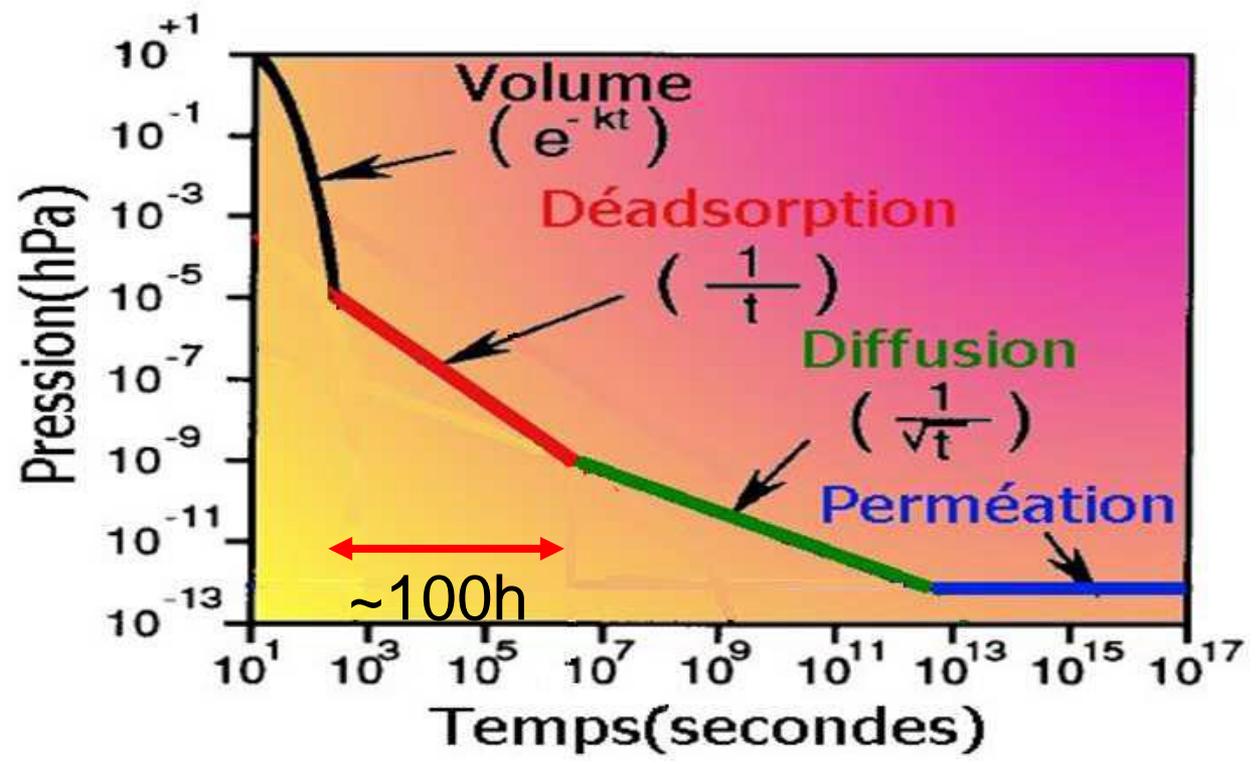
Descente en vide typique (sans injection de flux)

Descente en pression idéale

Si temps de séjour très court, temps de descente en vide :
 $p_{idéal} = p_o e^{-\frac{s}{v}t}$



Descente en pression réelle :
 -> imposée par le dégazage des matériaux



La maitrise des flux est primordiale!!

Les flux gazeux

Définition

A l'équilibre thermodynamique:

$$Q = P \cdot \frac{dV}{dt} = P \cdot S = \frac{dN}{dt} k_B \cdot T$$

Q : flux

N : nombre de molécules

k_B : constante de Boltzman

S : flux évacué

Unité SI : 1 Pa.m³/s = 10 mbar.l/s = 7,5 torr.l/s

Pour comparer des mesures : Taux de dégazage : flux dégazé par unité de surface

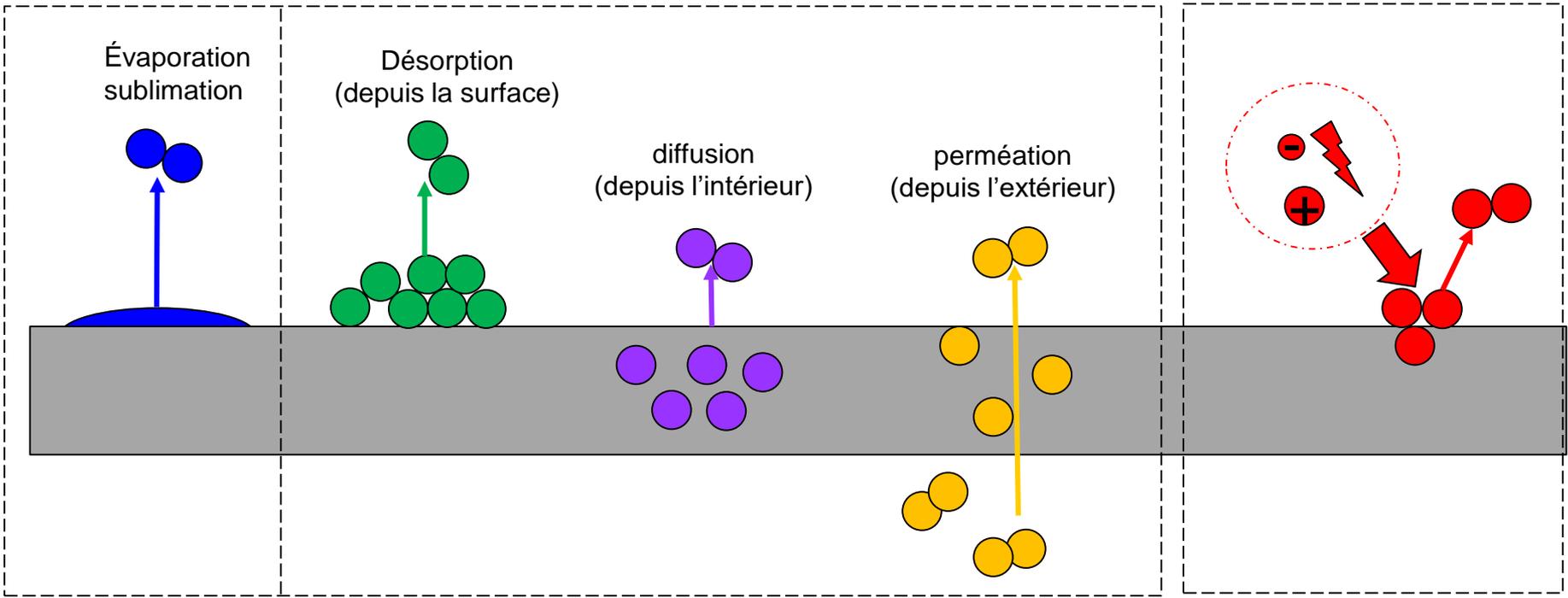
$$Q_{gu} = \frac{Q}{A} \quad \begin{array}{l} q : \text{Taux de dégazage} \\ A : \text{surface} \end{array}$$

Unité SI : 1 Pa.m/s = 10⁻³ mbar.l/s /cm² = 7,5.10⁻⁴ torr.l/s /cm²

Les flux

Types de dégazage

Définition du dégazage : Extraction des gaz dissous dans un liquide ou **absorbés** par un solide ou **adsorbés** par une surface

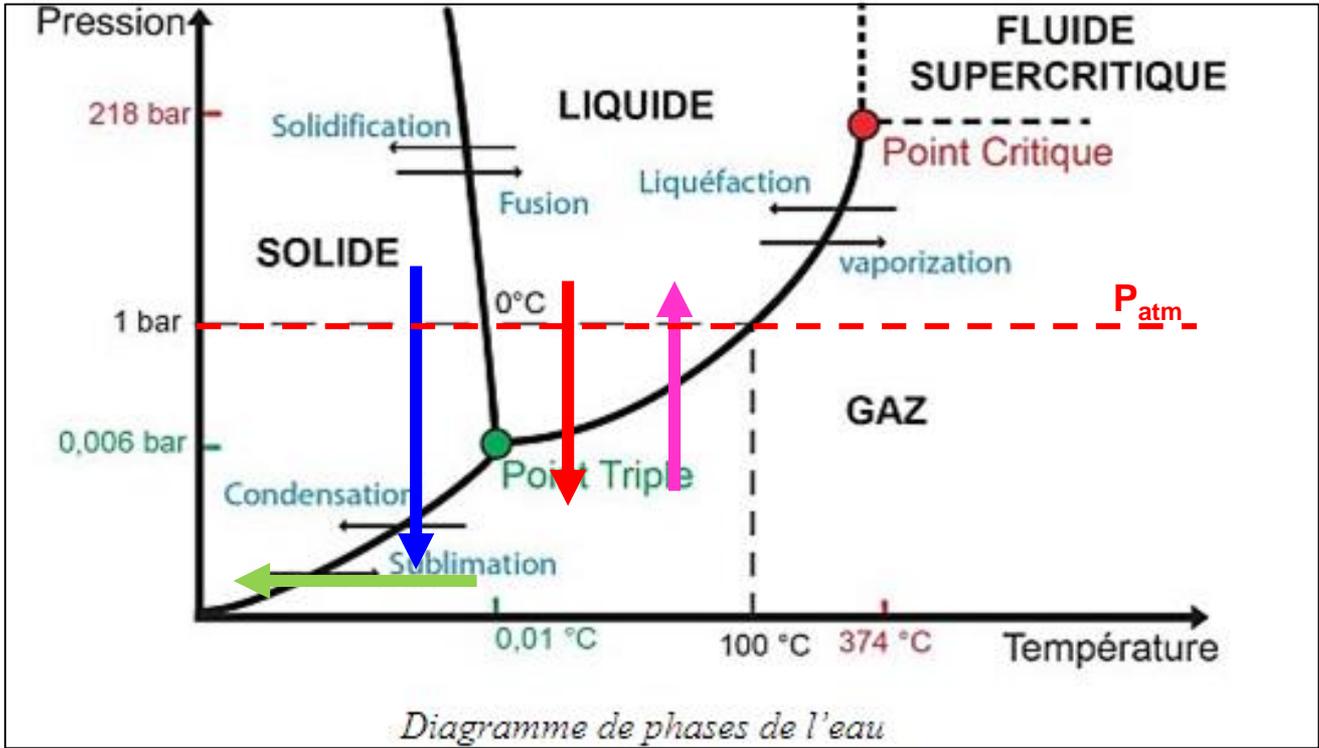


Spontané -> dégazage thermique (dont étuvage)

Dégazage induit
(impacts d'électrons,
ions, molécules,
photons)

Les flux

Changements de phase



Utilisation de corps non volatils (à basse tension de vapeur) aux températures d'utilisation

Descente sous vide, dans l'enceinte :

- Evaporation**
 - Sublimation**
 - Condensation -> pompage**
- } Flux énorme de gaz + pollution !!!

Attention lors du pompage :

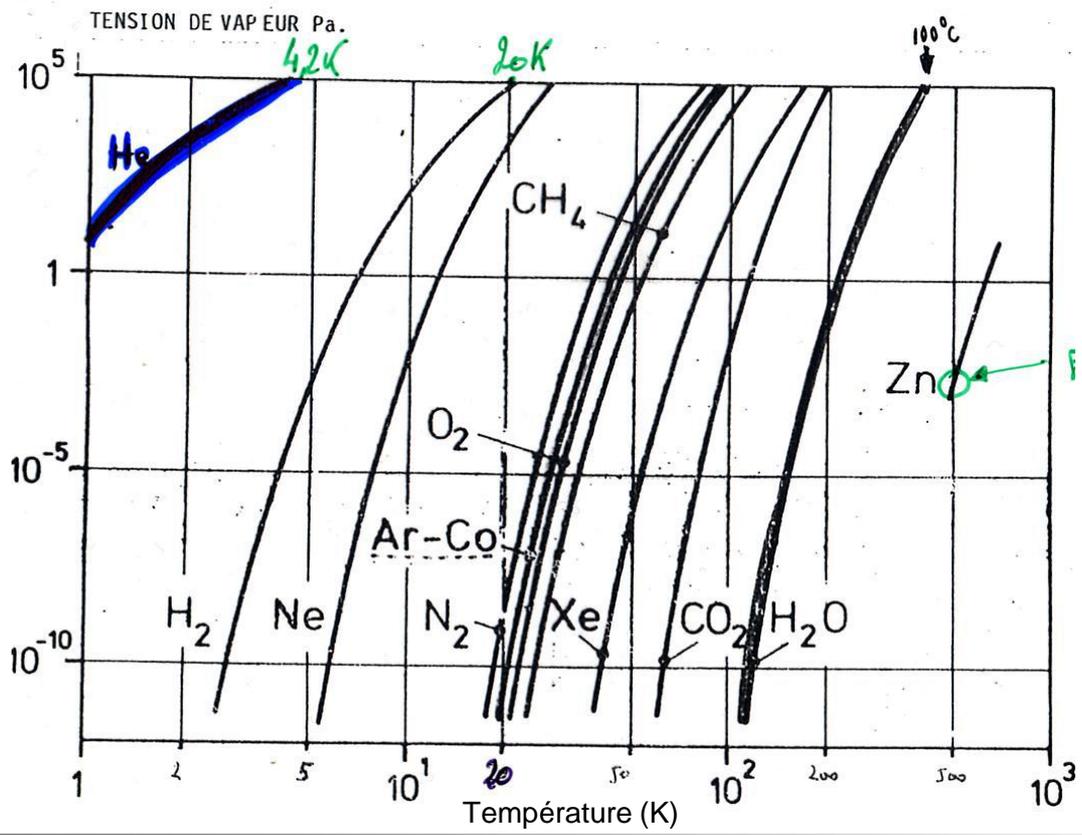
- Liquéfaction dans la pompe**
- > pollution / dégradation**

Les flux

Pression de vapeur saturante

Définition : pression à laquelle la phase gazeuse d'une substance est en équilibre avec sa phase liquide ou solide à une température donnée dans un système fermé.

Cryocondensation



Zn : 10⁻⁵ hPa/200°C
idem pour Mg à 290°C

Rq : Laiton -> Cu + Zn

Les flux

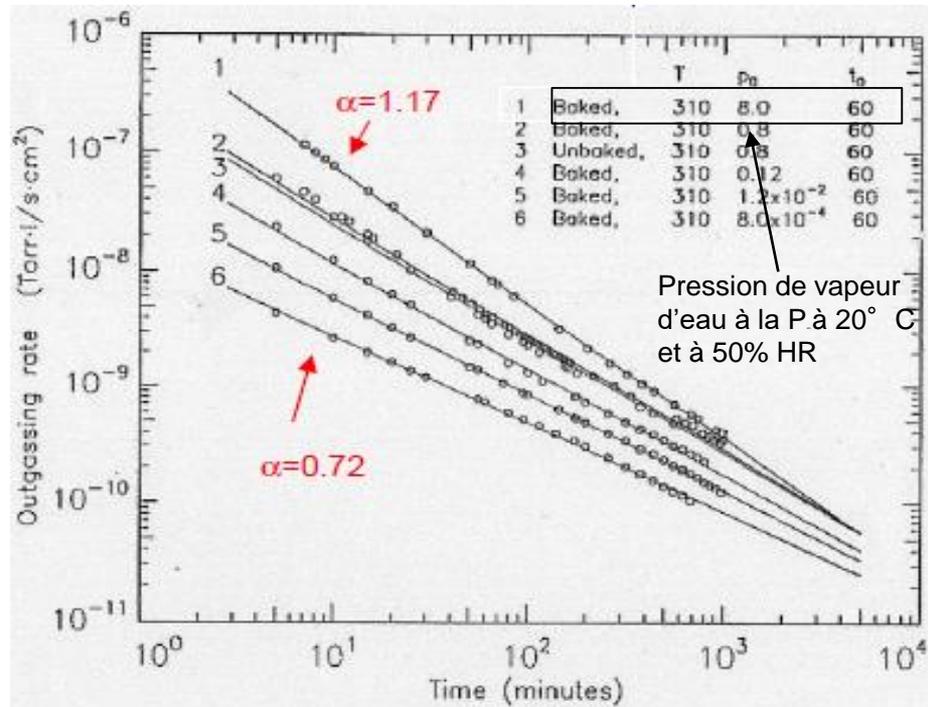
Désorption (Dé-adsorption) 1/3

Définition : relâchement des particules piégées en surface (physisorption, chimisorption)



Le flux de désorption n'est pas une valeur intrinsèque du matériau : il dépend du système de vide (système de pompage, matériaux de l'enceinte à vide)

- **Sur les systèmes non étuvés et propre** : La pression est imposée par le dégazage de l'eau
- Le temps d'exposition à l'eau influencera fortement la descente en pression (**aération avec un gaz sec**)



M. Li and H. F. Dylla, JVSTA 12(4) 1994

Les flux

Désorption (Dé-adsorption) 2/3

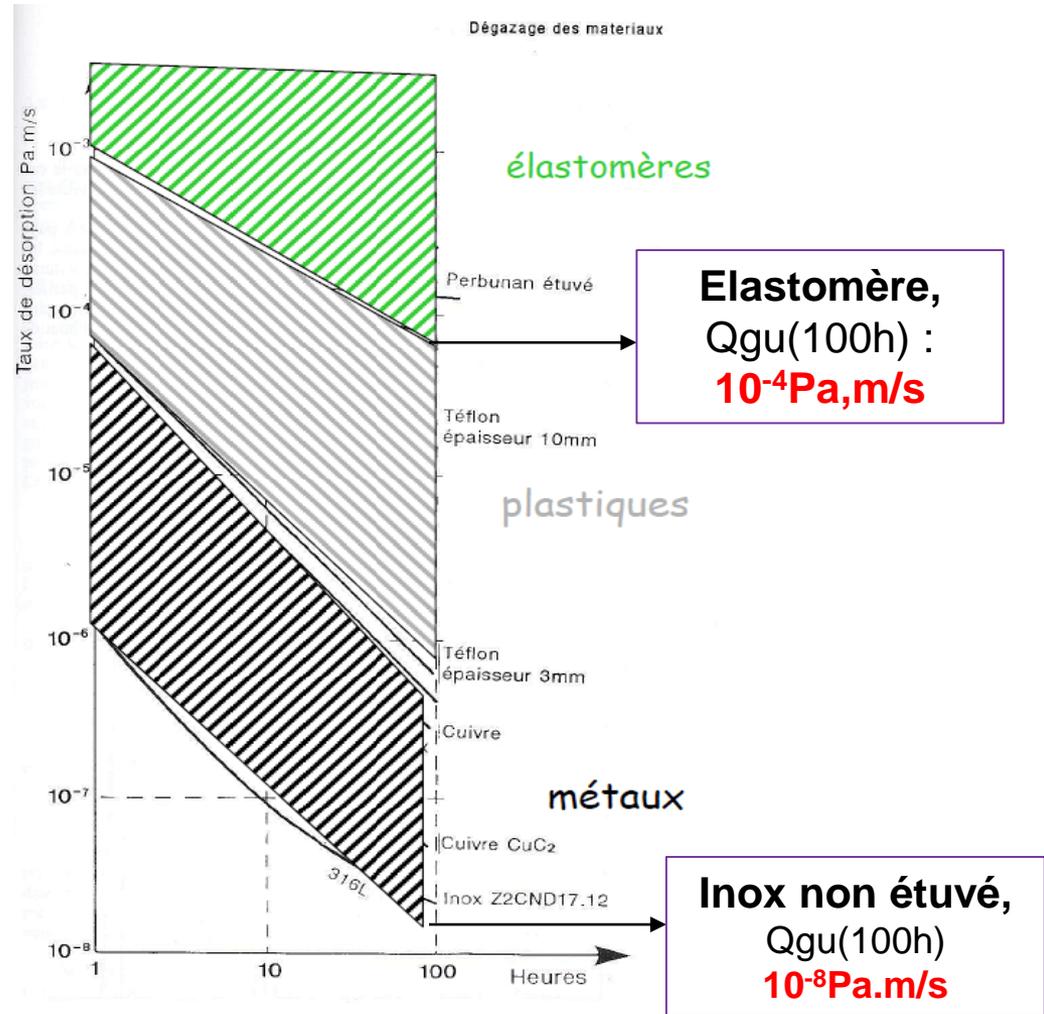
Évolution du dégazage des matériaux sous vide

Élastomères et plastiques

$Q(t)$ évolution en $1/\sqrt{t}$

Métaux

$Q(t)$ évolution en $1/t$



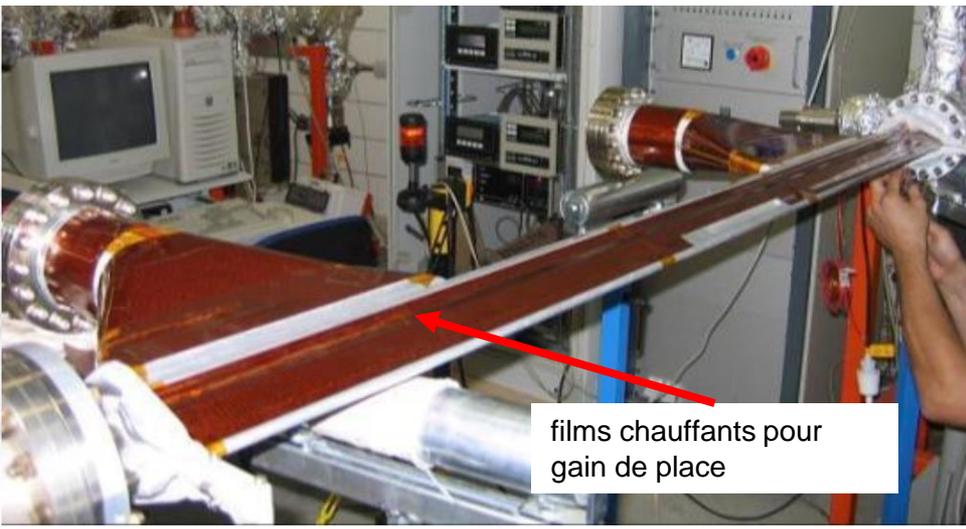
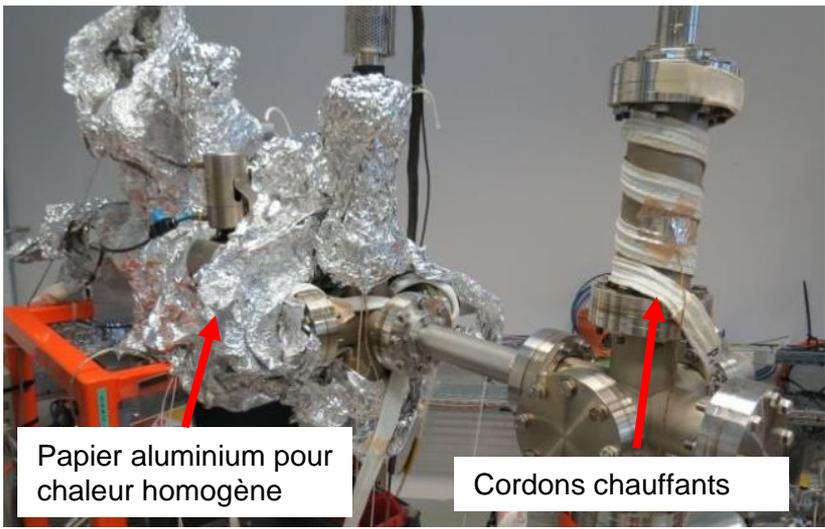
Les flux

Désorption (Dé-adsorption) 3/3

Pour atteindre l'UHV, les efforts visent à éliminer la vapeur (Diminution du temps de séjour)

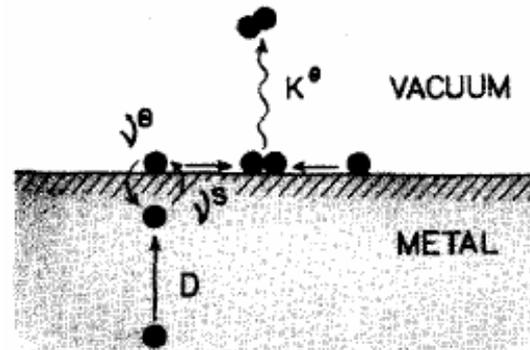
➔ Gain d'un facteur 10, 100 voir 1000 sur le taux de dégazage

Acier inox non étuvé (pompage 10h) $q_{H_2O} = 2 \times 10^{-10} \text{ Torr l s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	➔	Acier inox (150° C x 24 h): $q_{H_2} = 2 \times 10^{-12} \text{ Torr l s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
---	---	---



Présentation sur l'étuvage (J.P DUVAL) http://rtvide.cnrs.fr/IMG/pdf/Reseau_vide_etuvage_Duval_JP.pdf

Diffusion 1/2



Dans les métaux :

- Seule la diffusion de H est significative
- Forte concentration

(Exl : inox non étuvé: $80 < C_0 < 300 \text{ mbar.m}^3 \text{ (gaz)/m}^3 \text{ (matière)}$)

Dans les polymères :

- Concentration importante de gaz
- Forte concentration en eau

(Exl : Solubilité de H_2O le PEEK : $4.4 \text{ à } 22 \times 10^{19} \text{ molécules/cm}^3 \rightarrow 10 \text{ à } 50 \times \text{ plus que } H_2 \text{ dans inox}$)

Diffusion 2/2

Étuvage haute Température sous vide pour « vider le matériau » (Firing)

Diminution de la concentration d' H_2

CERN : 950°C , 2h, $P : 10^{-5}\text{mbar}$



Four d'étuvage du CERN (longueur 6m, hauteur 1m)

Après étuvage in-situ:
 $q(H_2) \sim 10^{-14}$ à $10^{-15} \text{ mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$

Création d'une Barrière de diffusion

Formation d'une couche d'oxyde



Tube Virgo (D : 1,2m, L : 3km)

VIRGO : 390°C à l'air pendant 100h suivie d'un étuvage in situ à 150°C de 7 jours

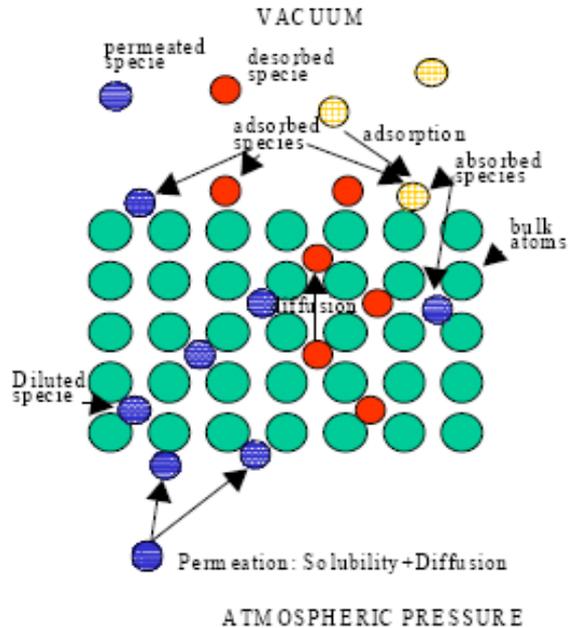
$q(H_2) \sim 5,10^{-15} \text{ mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$

Les flux

Perméation

Les corps solides ne sont pas des obstacles aux gaz. Les gaz peuvent traverser les corps solides suivant un processus complexe (observable pour les polymères):

1. Adsorption de la molécule sur la parois externe
2. Dissociation de la molécule
3. Dissolution dans le réseau
4. Diffusion
5. Recombinaison sur la parois interne
6. Désorption sous vide



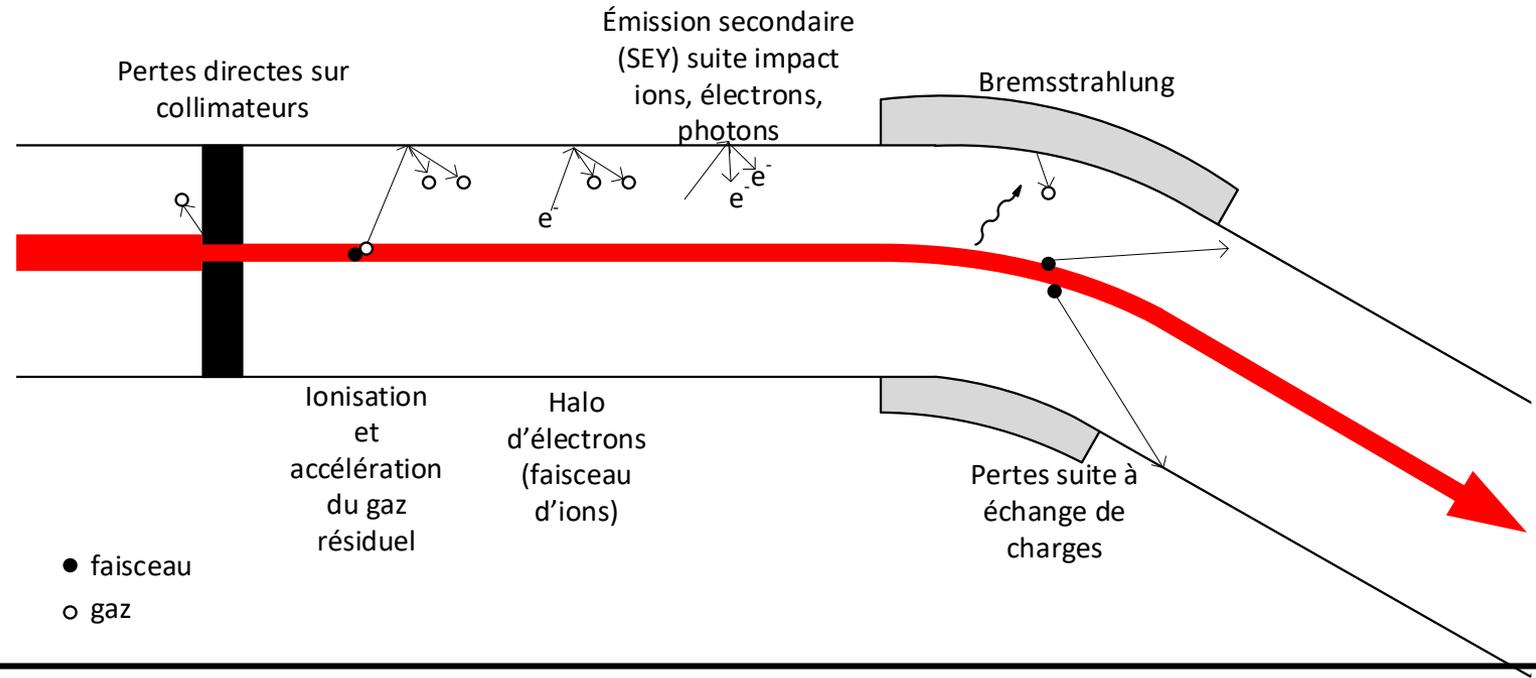
$$Q = P_3 \cdot \frac{S}{e} \left(p_1^j - p_2^j \right)$$

P3 : coefficient de perméation
S : surface exposée au vide
e : épaisseur
J = 1 pour monoatomique, j=2 pour diatomique, etc...

Exl: 10 m, viton, $\Phi 7,5$ mm, $P_3 : 7,5 \cdot 10^{-12}$ (He) \rightarrow He : $5 \cdot 10^{-5}$ mbar l/s
 \rightarrow observable en détection de fuite

Les flux

Dégazage induit



Rendement de dégazage induit
$\eta = \frac{\text{Nombre particules émises}}{\text{Nombre particules incidentes}}$

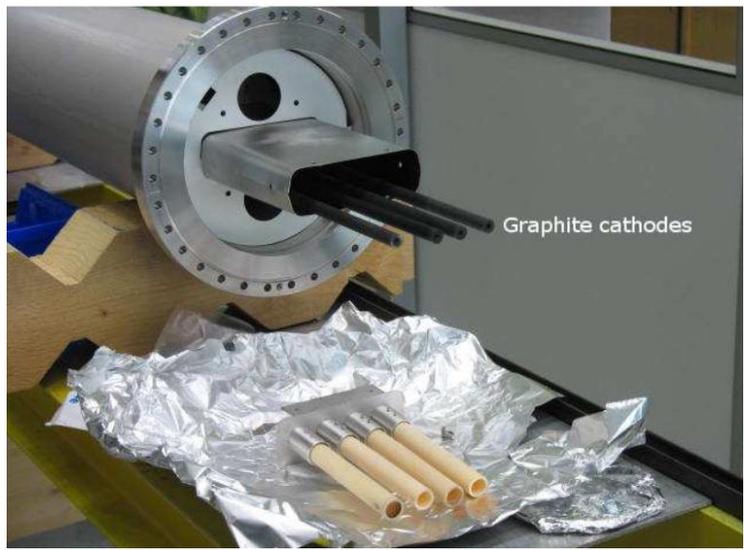
$$0,1 < \eta < 100000$$

Augmentation de plusieurs ordres de grandeur la pression dans les accélérateur -> Phénomène limitant

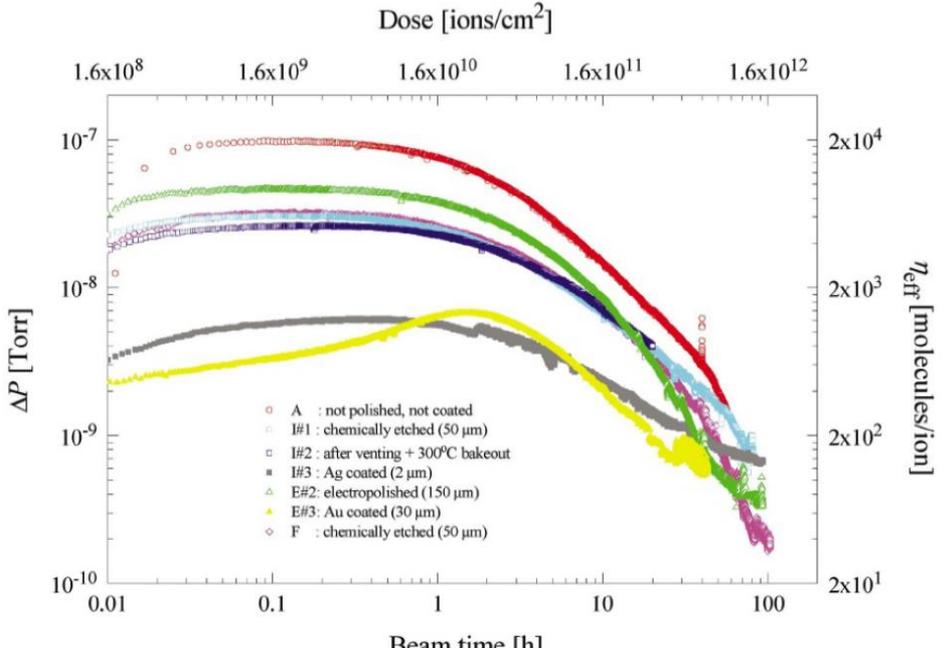
Les flux

Dégazage induit : systèmes limitants

Limitation par traitement des matériaux (étuvage, nettoyage, laser), dépôts (carbone amorphe, NEG), scrubbing (nettoyage avec le faisceau)



Dépôt de carbone amorphe (CERN)



Rendement de désorption en fonction de la dose pour différents matériaux (faisceau Pb⁵³⁺, 52MeV/u), CAS 2007

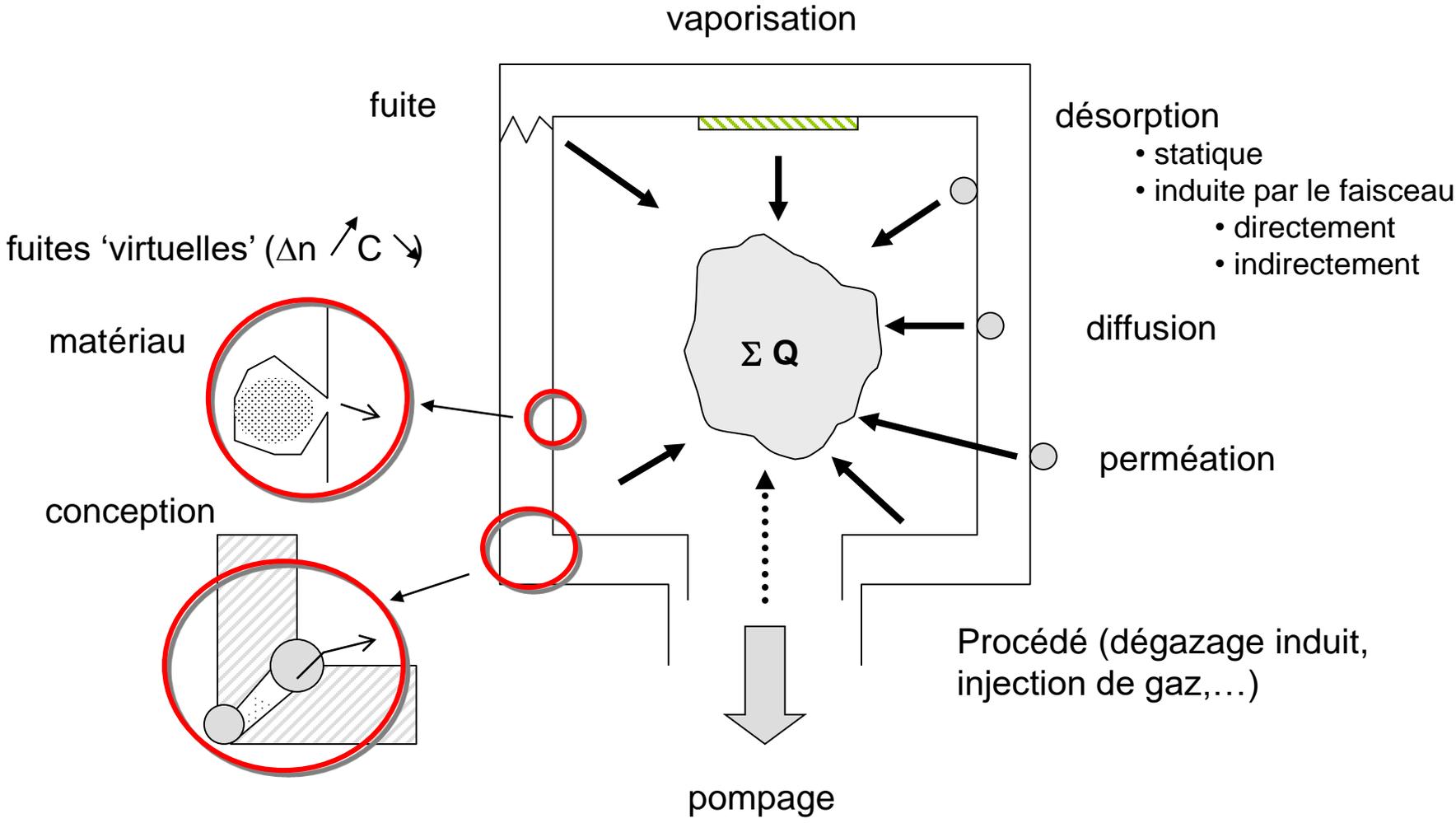
2 dernières theses sur ce sujet :

- Low Secondary Electron Yield Carbon Coatings for Electron Cloud Mitigation in Modern Particle Accelerators, C. YIN VALLGREN
- Pression dynamique dans les accélérateurs de particules: mesures expérimentales et simulation dans le grand collisionneur de hadrons S. BILGEN

- Généralités
- Théorie
 - Notions de base
 - Flux
 - **Dimensionnement**
- Technologies du Vide
 - Moyens de pompage
 - Mesure du vide
 - Conception

Les flux

Récapitulatif et compléments



Dimensionnement

Equation fondamentale

Si la température est homogène dans le système la pression se calcule :

$$P(t) = \underbrace{\sum(q_{gu}(t) \cdot S)}_{\text{Dégazage des matériaux}} + \underbrace{Q_{perméation}}_{\text{Choix des joints (tt métal ou élastomère)}} - \underbrace{Q_{process} + Q_{deg\ stimulé} + Q_{fuite}}_{\substack{\text{À maîtriser} \\ S_{eff} \\ \text{Vitesse de pompage efficace}}} + \underbrace{Q_{pollution}}_{\text{À limiter}} + P_0$$

↓
Pression limite de la pompe

÷ 10 la pression

- ↗ **x10 sur la vitesse de pompage (possible sur 3 ordres de grandeurs)**
- ↘ **÷ 10 les flux Possible sur 10 ordres de grandeurs**

Dimensionnement

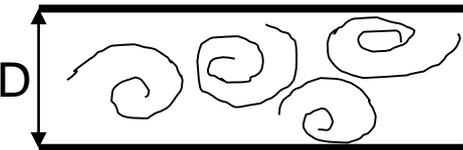
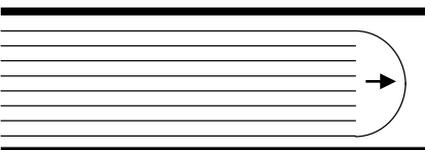
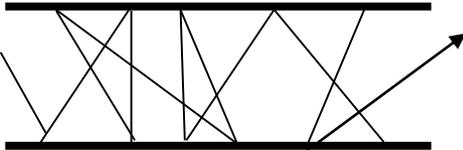
Écoulements des gaz

Le régime d'écoulement est déterminé grâce (unités SI) :

Nb de Reynolds $Re = \frac{4}{\pi \eta D} \frac{MQ}{RT}$

Flux gazeux (Pa.m³/s) $Q = P \cdot q_v$

En fonction de ces valeurs, l'écoulement sera :

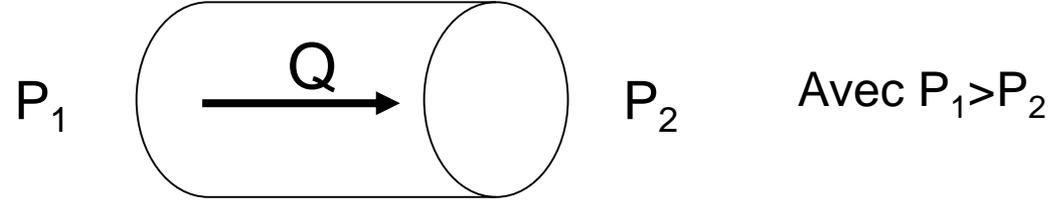
	turbulent	$Re > 2200$ ou $Q > 2600 \cdot D$ (air 20°C)
	laminaire	$Re < 1200$ ou $Q < 1400 \cdot D$ (air 20°C) Et $D/L_m > 80$
	moléculaire	$D/L_m < 3$

+ Régimes intermédiaires

Dimensionnement

Conductances

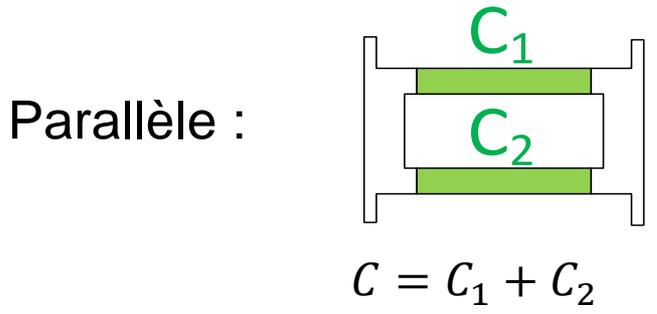
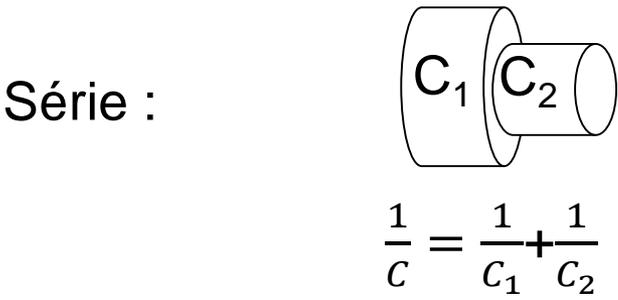
Définition : En régime permanent, la conductance correspond à un nombre de particules transmises par unité de temps



Pour un ensemble isotherme : $Q = C (P_1 - P_2)$

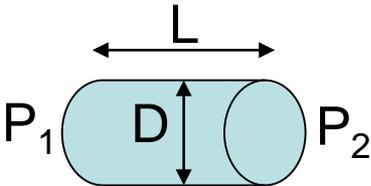
Le flux (Q) est proportionnel au gradient de pression (P), le facteur de proportionnalité est appelé conductance C qui s'exprime en m^3/s

Association :



Dimensionnement

Conductances des tubes de section circulaire



Régime Laminaire

$$C = \frac{\pi D^4}{128 \eta L} \left(\frac{P_1 + P_2}{2} \right)$$

Régime Moléculaire

$$C = \frac{1}{6} \frac{D^3}{L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}$$

Pas de dépendance de la pression

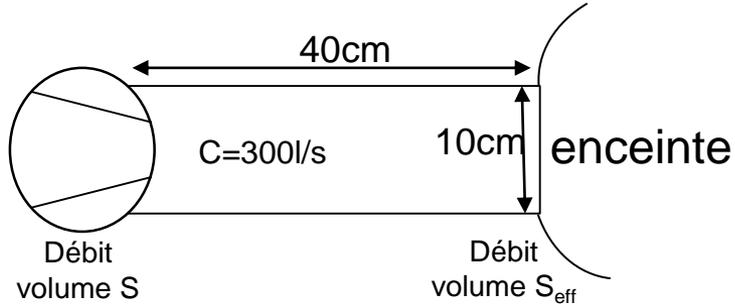
Exl :
D=10cm; L = 50cm; air 20° C
RL : ΔP= 10²hPa -> C=1360m³/s
 ΔP̄= 1hPa -> C=13,6m³/s
RM (P<2.10⁻³hPa, air): C = 0,12m³/s

Dimensionnement

Débit volume efficace

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C}$$

S : débit volume de la pompe
C : conductance de raccordement de la pompe sur l'enceinte
S_{eff} : débit volume effectif sur l'enceinte



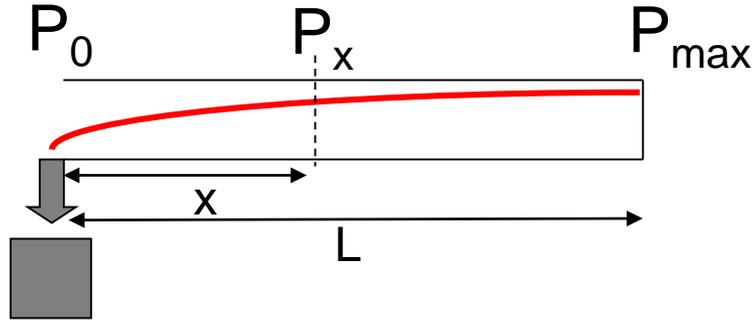
- La canalisation impose le S_{eff} maximum (surtout le diamètre)
- Choisir des tubes courts et larges
- L'intégration des pompes est à prendre en compte dès le début de la conception

S (l/s)	S _{eff} (l/s)
300	150
600	200
∞	300 (max)

Dimensionnement

Cas particulier des accélérateurs de particules : dégazage réparti

Longues canalisations en vide poussé => prise en compte de la conductance du tube de faisceau et du dégazage du matériau

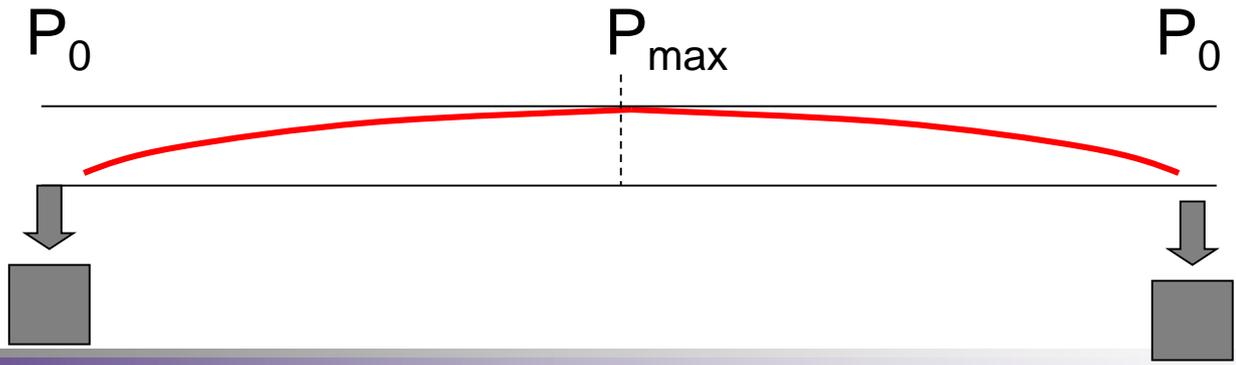


C : conductance totale
l : périmètre

$$P(x) = P_0 + q_{gu} \cdot l \cdot \left[\frac{x}{C} - \frac{x^2}{2CL} \right] \qquad P_{max} - P_0 = \frac{q_{gu} \cdot L \cdot l}{2 \cdot C} = \frac{Q}{2C}$$

Pour une géométrie fixée, ΔP ne dépend que du dégazage du tube

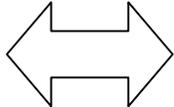
- réduire le taux de désorption (traitement de surface, conditions de propreté)
- pompage réparti



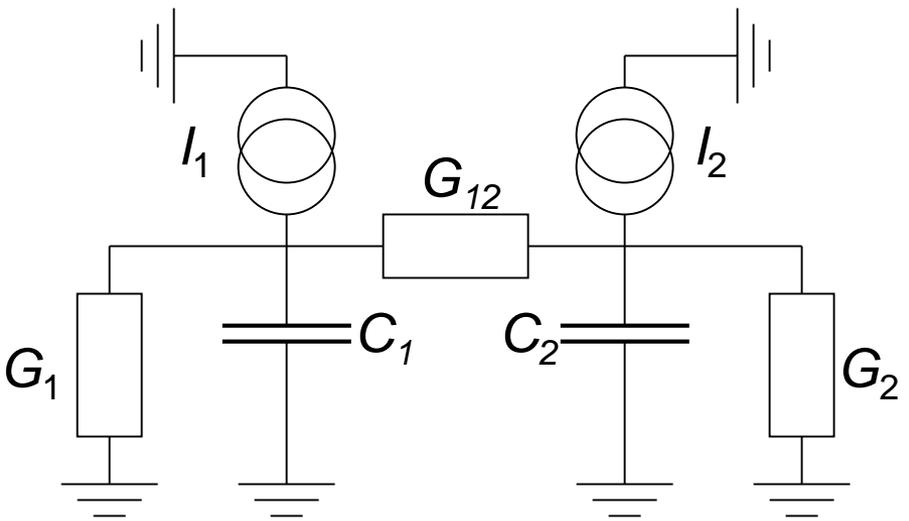
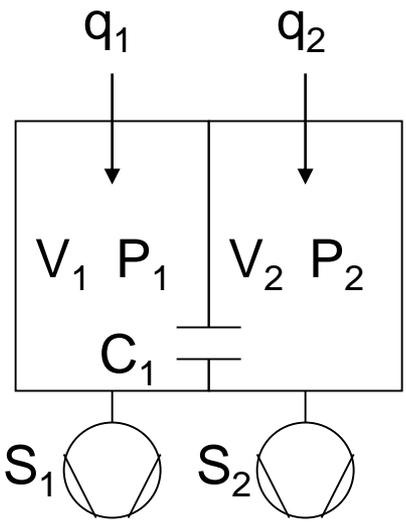
Dimensionnement

Méthode de calcul : analogie électrique 1/2

Flux de molécules



Flux d'électrons



Volume V [m³]

Flux de gaz Q [Pa. m³.s⁻¹]

Conductance C [m³.s⁻¹]

Vitesse de Pompage S (conductance -> masse)

Pression P [Pa]

Capacité V [F]

Courant [A]

Conductivité [Ω⁻¹]

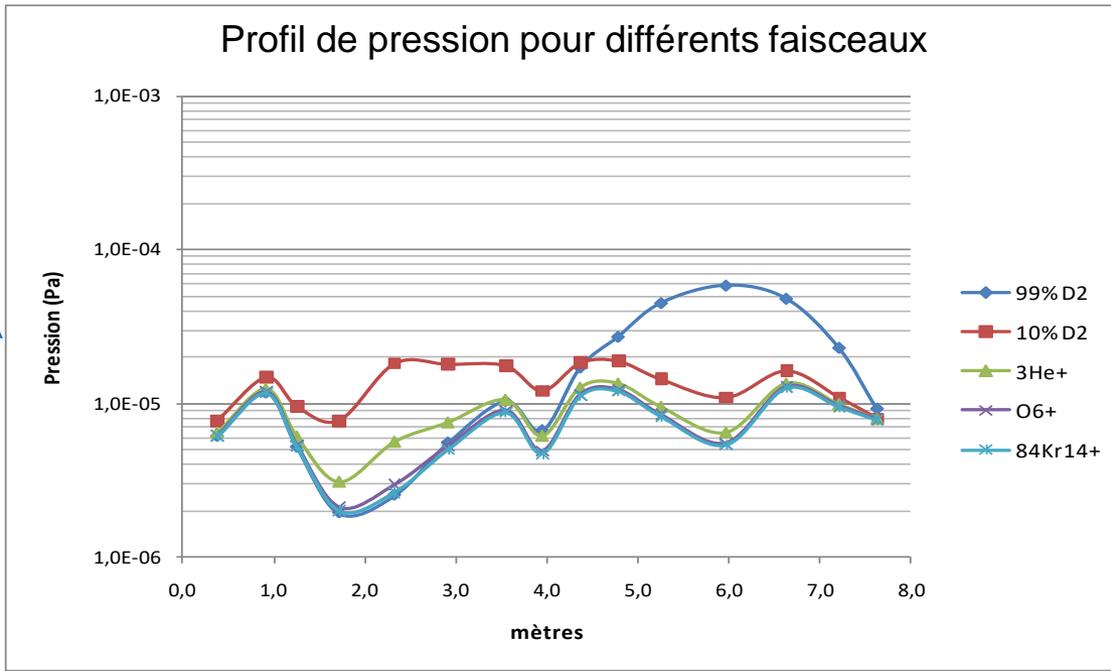
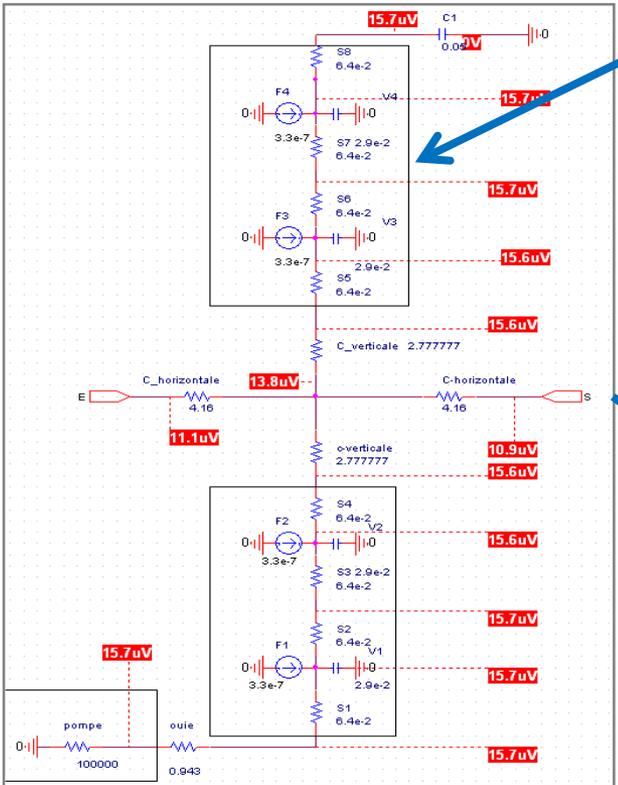
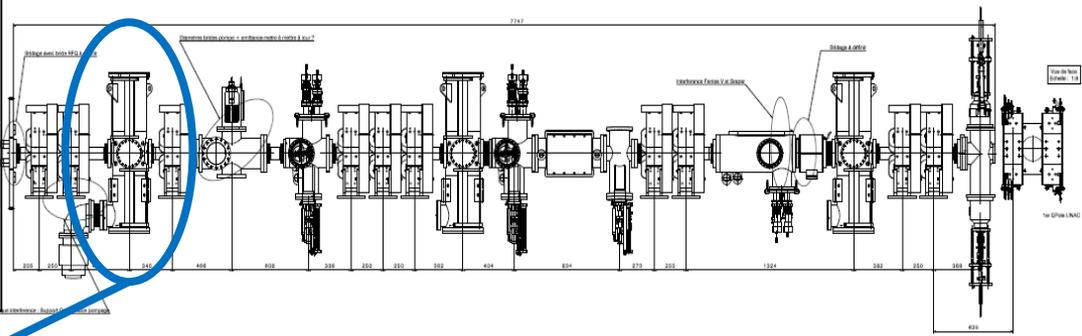
Conductivité [Ω⁻¹]

Tension U [V]

Dimensionnement

Méthode de calcul : analogie électrique 1/2

- 😊 Optimisation rapide de la configuration (implantation des unités de pompage en fonction des besoins)
- 😞 Calculs des conductances à faire à part



Dimensionnement

Méthode de calcul : calcul Monte Carlo

Méthode : Calculs de la probabilité de transfert des éléments volatiles en régime moléculaire (TPMC).

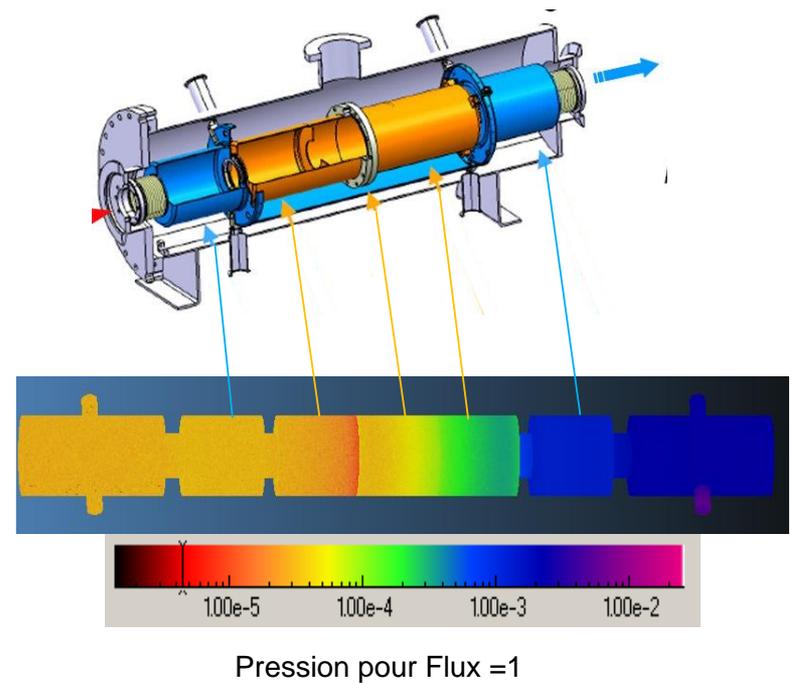
La probabilité peut être convertie à l'aide de l'équation :

$$C = \frac{\bar{v}}{4} \cdot A \cdot P_{i \rightarrow j}$$

Vitesse moyenne (m³/s) Probabilité de transfert

Conductance (m³/s) Aire de la surface émettrice (m²)

Etude de la transmission des gaz à travers un piège cryogénique (cryotrap) à l'aide du logiciel Molflow+



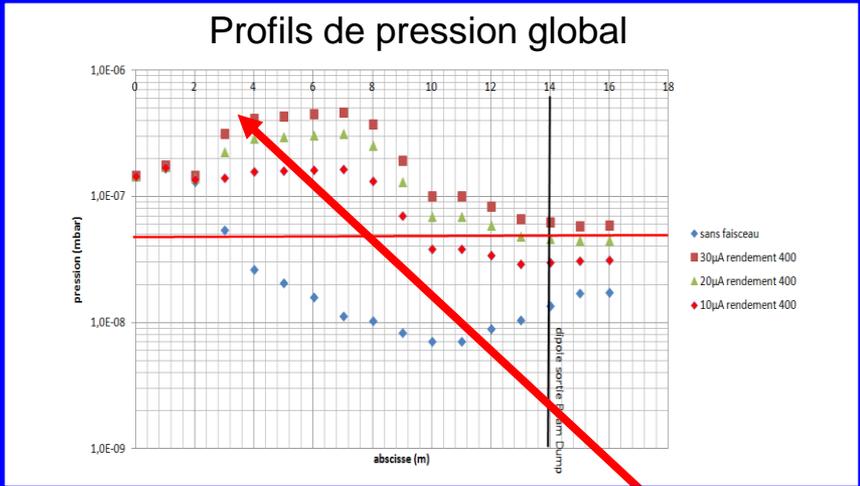
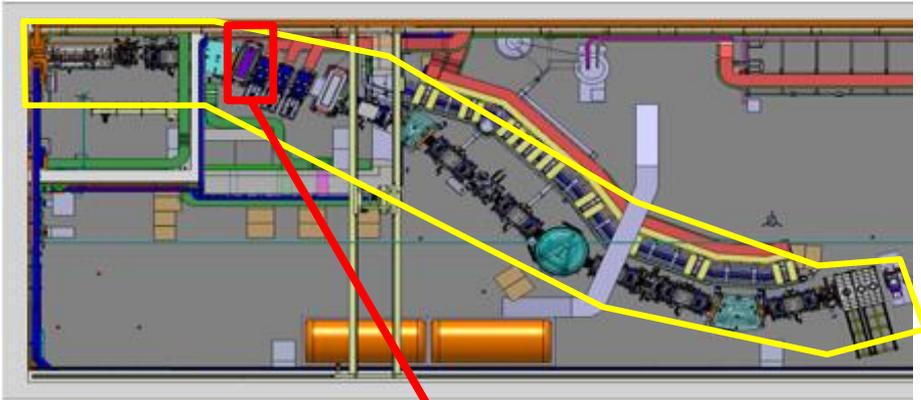
😊 Calculs précis des conductances et profils de pression à travers des structures complexes

☹ Temps de calculs importants

Dimensionnement

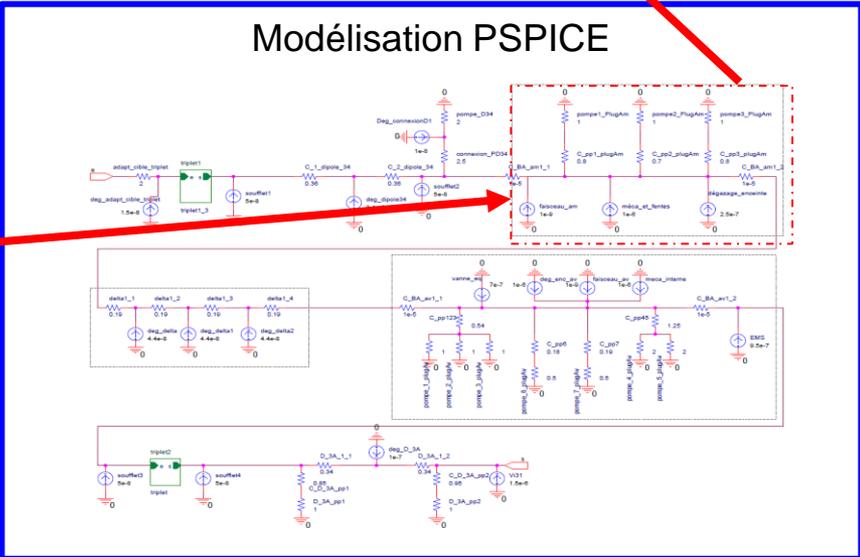
Complémentarité des méthodes de calcul

Ex1 : Calcul du profil de pression de S3 (salle d'expérience SPIRAL2)



Calculs des conductances complexes avec Molflow+

#	Hls	Des	Abs
518	0	0	0
519	0	0	0
520	0	0	0
521	0	0	0
522	0	0	0
523	0	0	0
524	0	0	0
525	0	0	0
526	0	0	0
527	0	0	0
528	0	0	0
529	0	0	0
530	0	0	0
531	0	0	0
532	0	0	0

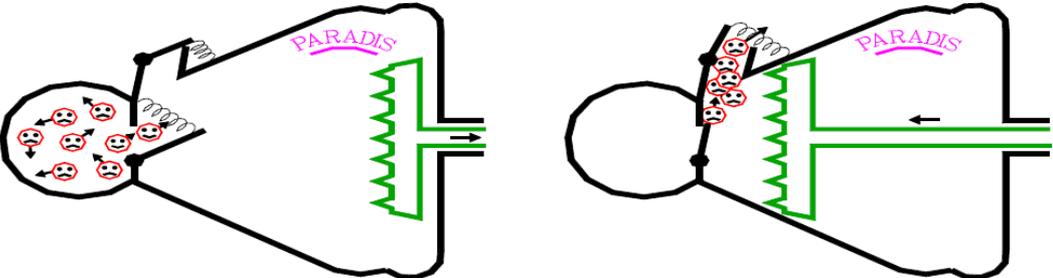


- Généralités
- Théorie
 - Notions de base
 - Flux
 - dimensionnement
- **Technologies du Vide**
 - **Moyens de pompage**
 - **Mesure du vide**
 - **Conception**

Les moyens de pompage

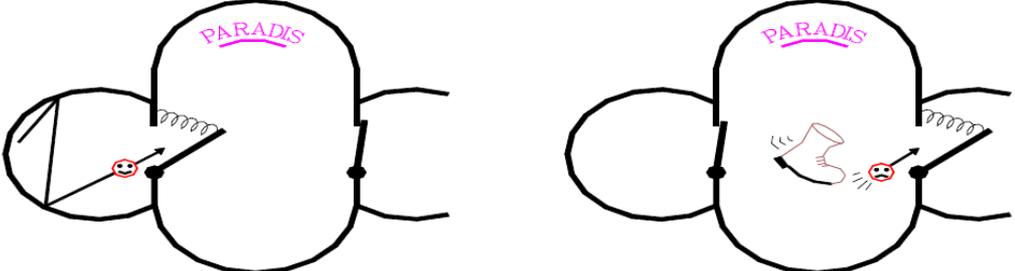
Les principes de fonctionnement

Action au niveau des volumes de gaz

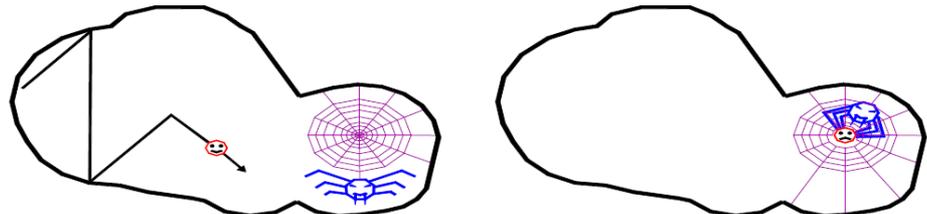


Pompage volumétrique : transfère un volume de gaz en le comprimant

Action au niveau des molécules



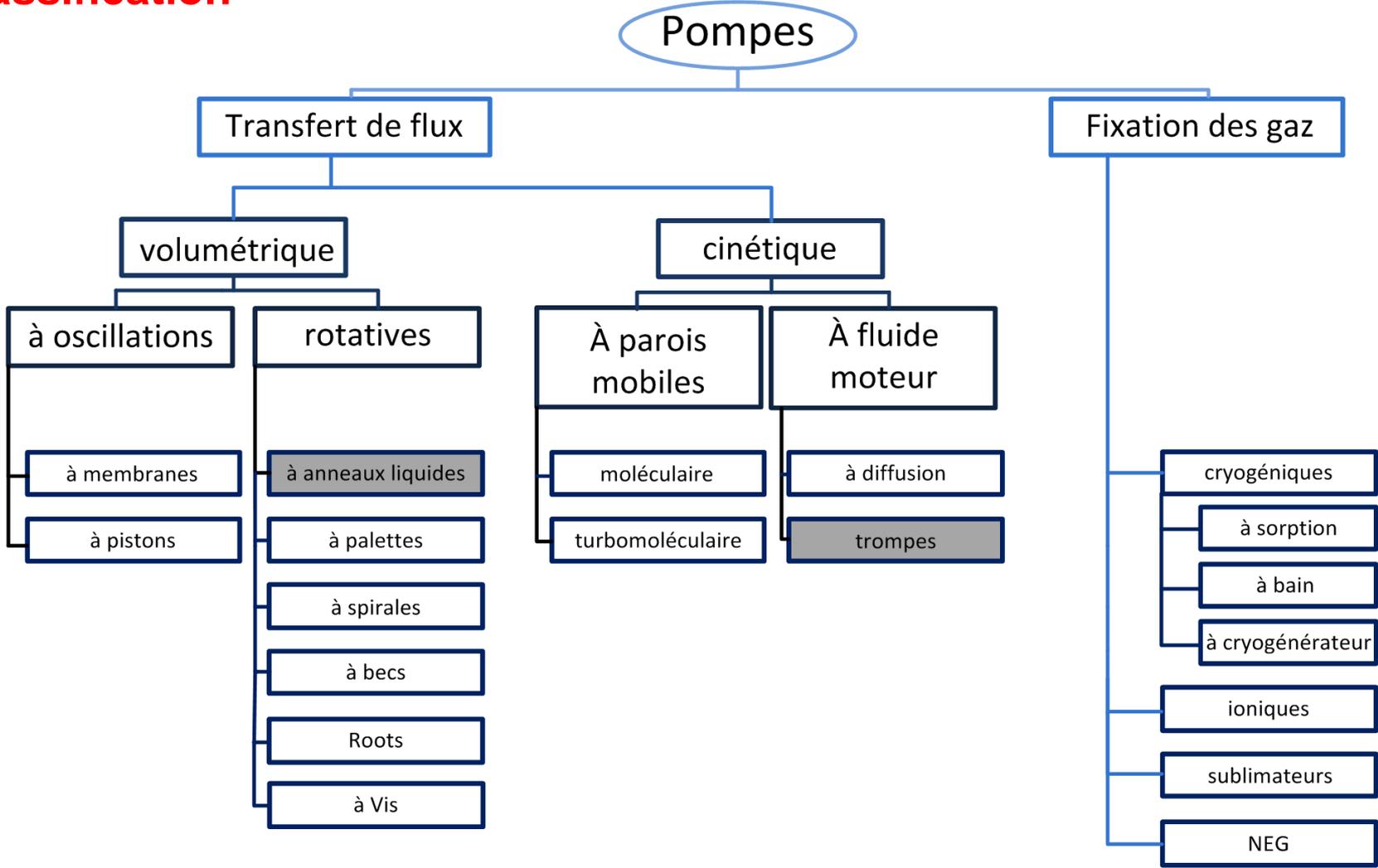
Pompage cinétique : change la direction des molécules de gaz à pomper



Pompage par fixation : piège les particules à pomper

Les moyens de pompage

Classification



Choix à faire en fonction du procédé

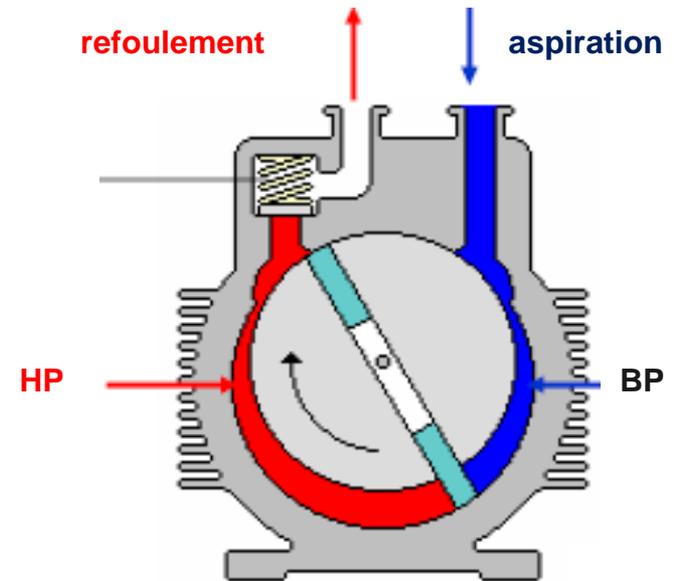
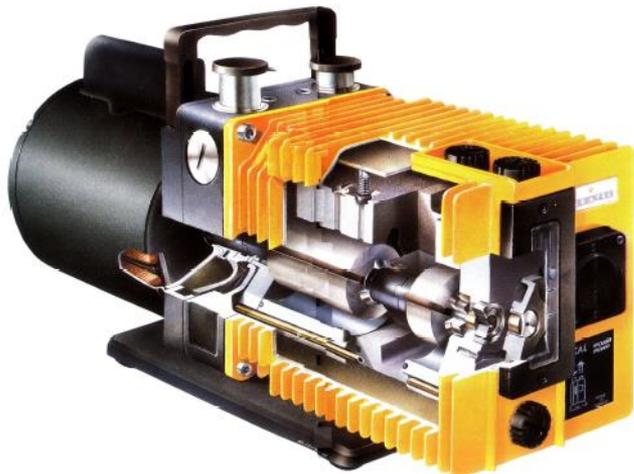
Caractéristiques principales et critères de choix

- ✓ Le débit-volume $q_v = f(P, \text{gaz})$
- ✓ La pression limite
- ✓ La pression d'amorçage
- ✓ Le taux de compression pompes à transfert de flux
$$k = P_{\text{ref}} / P_{\text{asp}} = f(P, \text{gaz})$$
- ✓ Critères spécifiques au procédé
 - tolérance à la contamination (huile, poussières,...)
 - pompage sélectif ou non
 - tolérances aux vibrations (paliers magnétiques)
 - critères de maintenance (zone INB)
 - ...
 - coût (investissement, maintenance)

Les moyens de pompage

Pompes primaires à transfert : pompe à palettes

- Pression d'amorçage : P_{atm}
- Pression limite $\sim 10^{-3}$ hPa
- Non sélective
- Présence d'huile (joint dynamique, lubrifiant, refroidissement)
- Pression limitée par Q_f et $Q_{dég. Huile}$ (T !!)
- Vitesse de pompage (bi-étage) : $1 \ll 100 m^3/h$

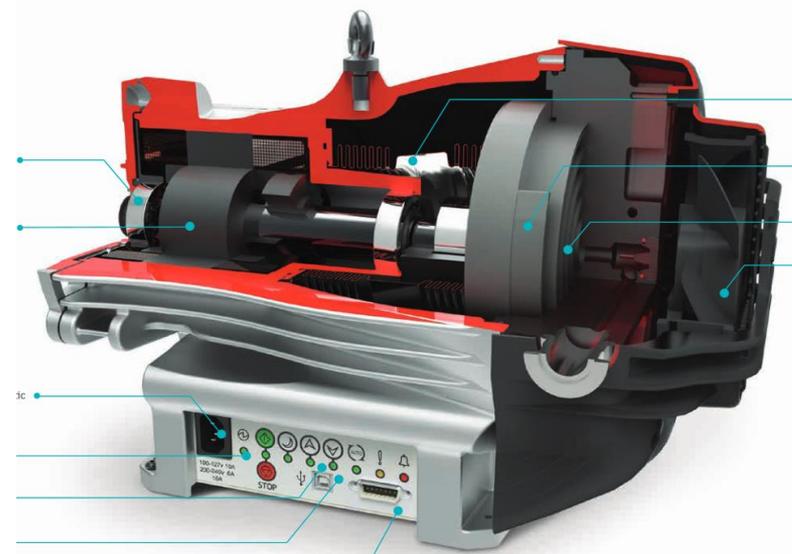
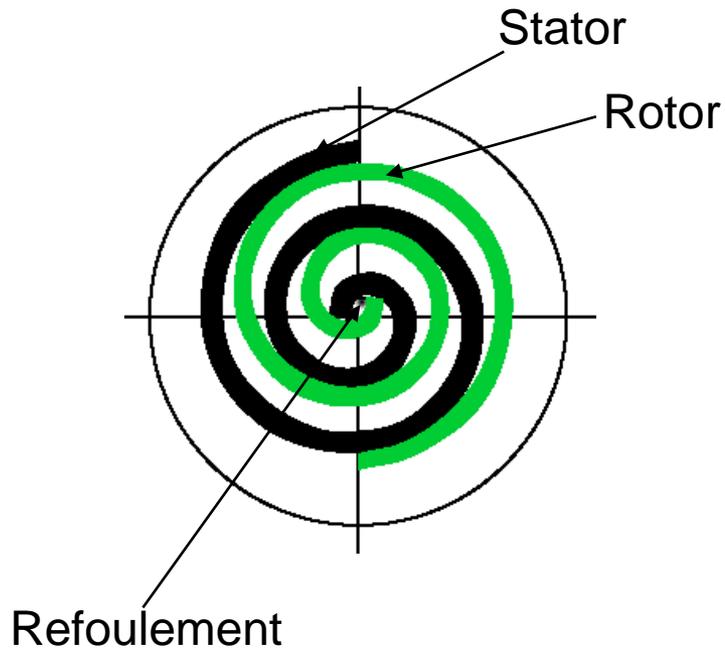


- ☺ - fiable, faible coût
- ☹ - présence d'huile

Les moyens de pompage

Pompes primaires à transfert : Pompes à spirales

- Pression d'amorçage : P_{atm}
- Pression limite $\sim 10^{-3}$ hPa
- Sélective (pompe mal les gaz légers)
- Présence de poussières
- Vitesse de pompage : $5 \ll 80 \text{ m}^3/\text{h}$

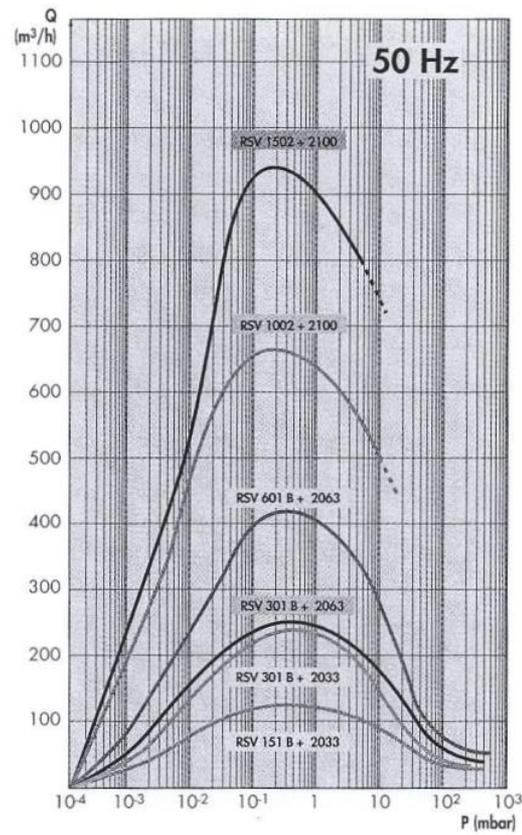
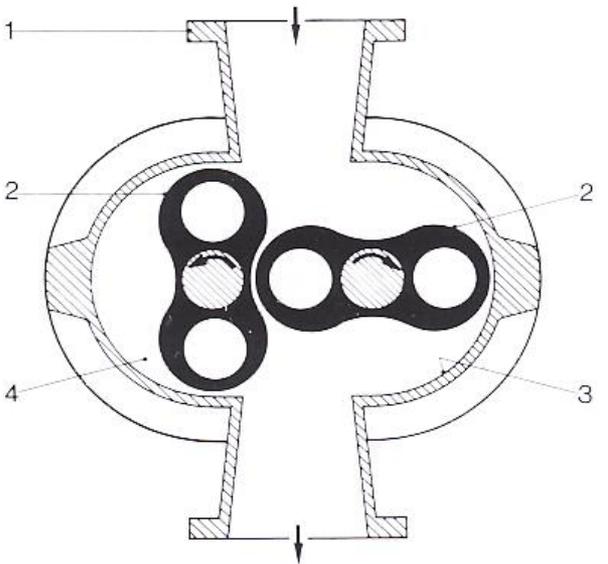


- ☺ - Sans huile (sèche)
- ☹ - présence de poussière et sélective

Les moyens de pompage

Pompes primaires à transfert : Pompes Roots

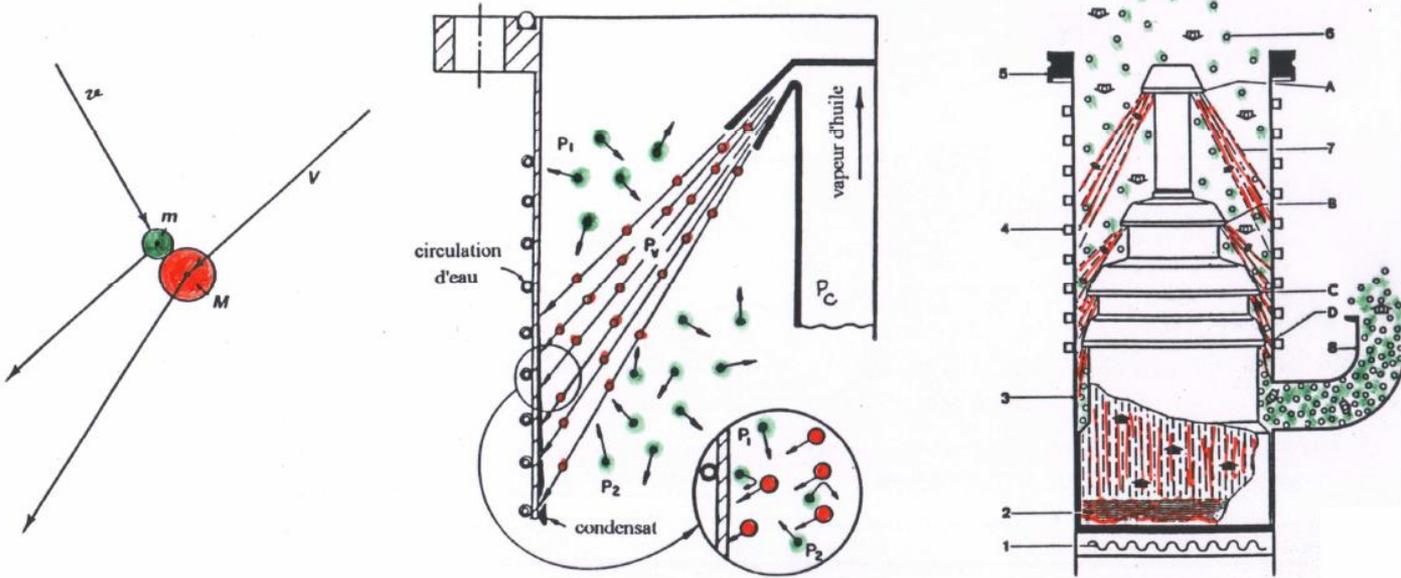
- Pompe volumétrique sans huile
- P amorçage : < ~50mbar
- $P_1 \sim 10^{-4}$ hPa
- Débit-volume élevé
- Pas de film d'huile => $K \sim 50$
- Couplage à une pompe primaire
- Vitesse de pompage : $100 \ll 135000 \text{ m}^3/\text{h}$
- ≠ Multiroots : pompe primaire sèche



- 😊 - Sans huile, débit volume élevé, robuste
- ☹️ - Nécessite une pompe au refoulement

Les moyens de pompage

Pompes secondaires à transfert : Pompes à diffusion



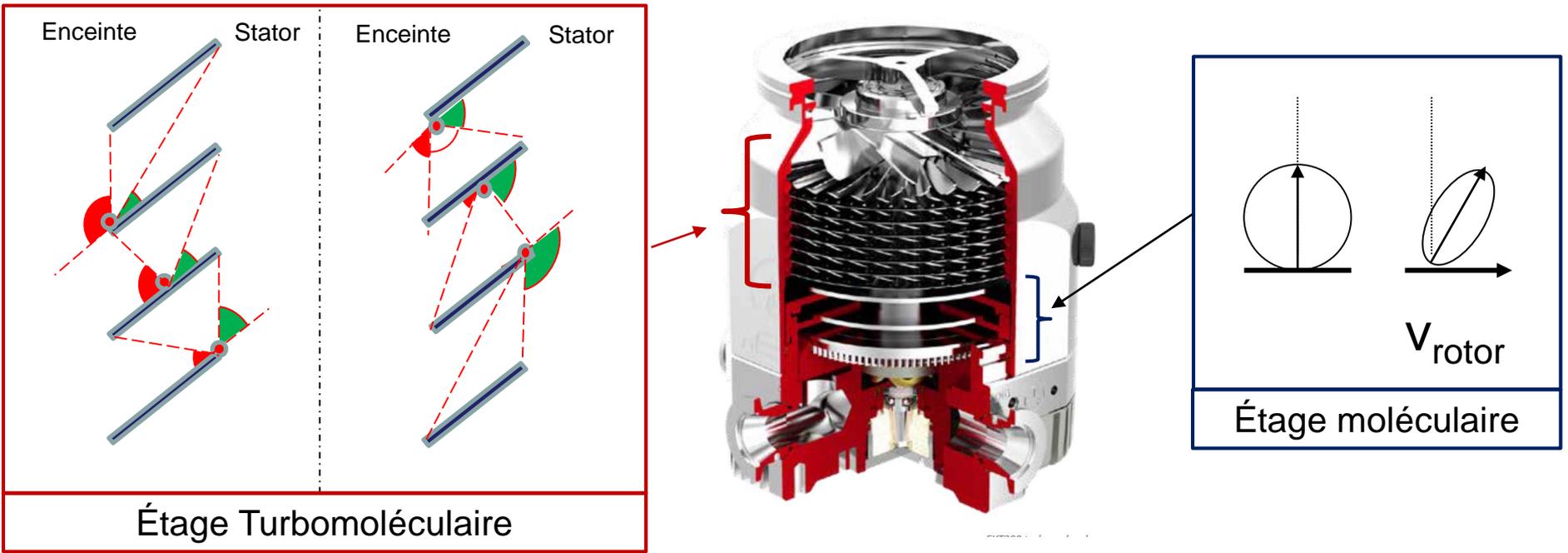
- Jet supersonique de molécules lourdes donnant une direction privilégiée au gaz pompé
- $P_{max} \sim 10^{-2}$ hPa $P_1 \sim 10^{-7}$ hPa (P_v huile..)
- Pompe primaire au refoulement

- 😊 - robustes, faible coût de maintenance
- ☹️ - risque +++ de pollution (retrodiffusion, incident)

N'est plus utilisée sur le vide faisceau mais très efficace sur vide isolation de systèmes cryo

Les moyens de pompage

Pompe secondaire à transfert : pompes turbomoléculaires



- $P_{max} \sim 1\text{hPa}$ $P_1 \rightarrow \text{UHV}$
- K dépend de \sqrt{M} de v_{rotor}
- Couplage à une pompe primaire
- Vitesse de pompage jusqu'à 5000l/s



- pompage propre (magnétique)
- pompage à transfert de flux
- évolution vers des pompes moins sélectives (H_2) et a taux de compression plus élevés



- énergie cinétique développée (risque lié à d'éventuels crash ..)

Les moyens de pompage

Surveillance accrue pour les pompes turbomoléculaires



Surveillance des paramètres de fonctionnement

Intégration et protection (grille)



Les moyens de pompage

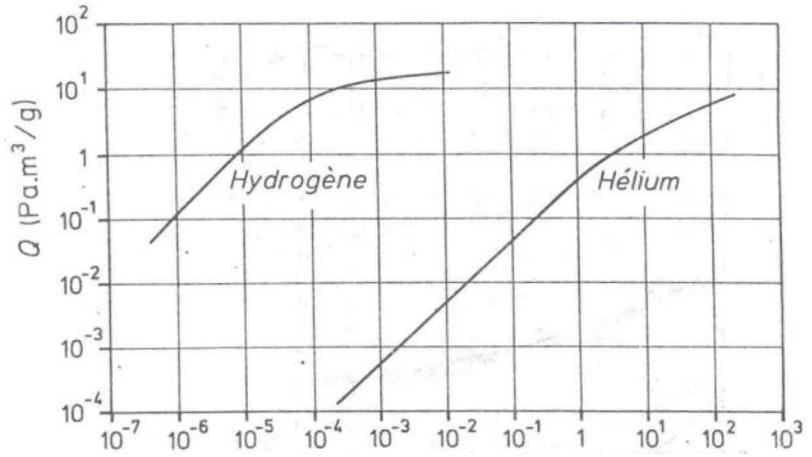
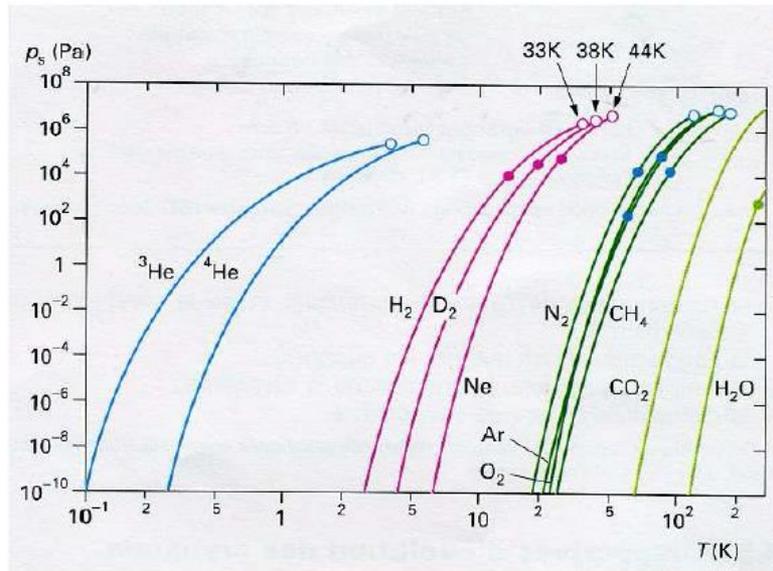
Cryosorption

$$q_v(\text{max}) = 1,15 \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot S$$

'trou noir' pour les molécules (à la conductance d'accès et au coeff de collage près)

$q_v \text{ max (c infinie et } s \sim 1)$
 119 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ pour N_2
 148 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ pour H_2O

- **cryosorption** sur adsorbants solides refroidis (physisorption)
- **cryotrapping**



Isothermes d'adsorbtion sur CA à 20K —

Les moyens de pompage

Les pompes à fixation : pompes à fluides cryogéniques

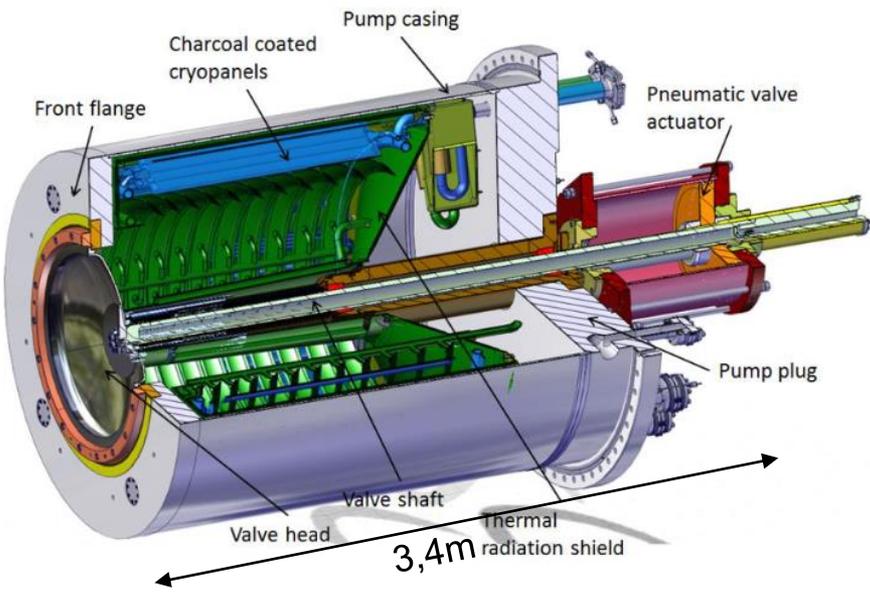
L : chaleur latente de vaporisation

- source d'énergie cryogénique à la $T_{éb.}$
- fixe la consommation du système

H : chaleur sensible (variation d'enthalpie du gaz entre $T_{éb.}$ et 300K)

- source d'énergie cryogénique

Fluide s	$T_{éb.}$ (K) (NTP)	V_g/V_l (NTP/N BP)	L (J/g) (NBP)	H (J/g) $T_{éb.} \rightarrow 300K$
O ₂	90,2	857,7	214	193
Ar	87,3	841,4	157	112
N ₂	77,3	693,2	199	247
Ne	27,2	1439,3	89	280
H ₂	20,4	847,7	452	3474
He ⁴	4,2	751,6	21	1550



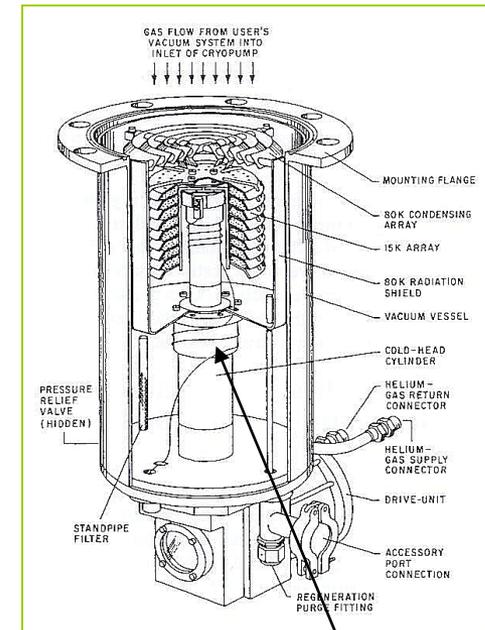
Pompe cryogénique ITER
 Refroidissement He 4,5K
 Design pour 80m³/s

Les moyens de pompage

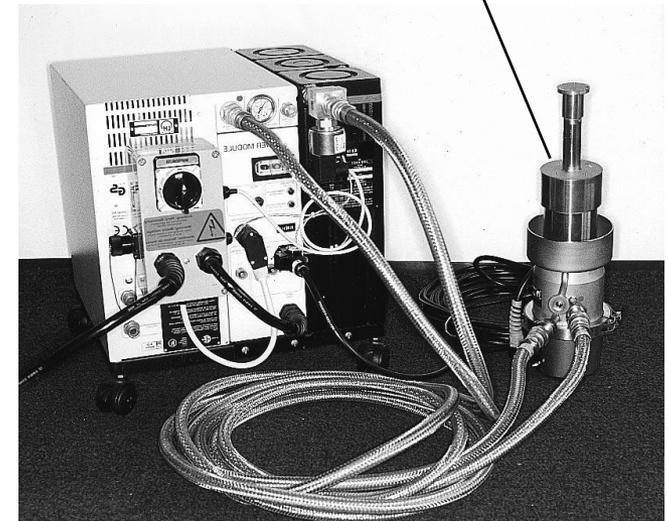
Les pompes à fixation : pompes à cryogénérateur

Système en cycle fermé constitué par :

- ✓ un compresseur hélium
- ✓ un circuit d'hélium pur pressurisé
- ✓ une tête froide (cryogénérateurs)
- ✓ Le refroidissement se fait par détente d'hélium
- ✓ Le gaz est refroidit en passant un travers un matériau régénérateur refroidit à chaque cycle



*Pompe développée au GANIL de 20m³/s
Diamètre 800mm*



Les moyens de pompage

Les pompes à fixation : pompes à fluide ou cryogénérateur ?

Fluides cryogéniques (LHe, LN2)

- + puissance cryogénique, fiabilité
- gestion des cryofluides

Cryogénérateurs : détente d'hélium associée à une circulation sur des régénérateurs

- + autonomie
 - vibrations
 - puissance limitée*
 - ~12W @ 20K
 - 65W @ 80K
- ⇒ qq W @ 4K

Les moyens de pompage

Pompes à fixation : Pompes à sublimation de titane

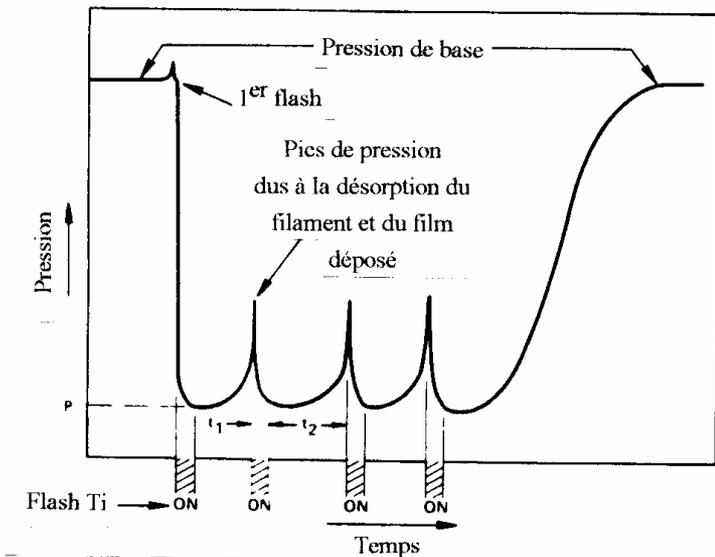
Principe : Un filament chauffé dépose un film de Titane qui réagit chimiquement avec le gaz de l'enceinte ($P_{max} \ll 10^{-7} \text{hPa}$ obtention UHV)

Réaction chimique	Coeff collage à 300K	Capacité $\times 10^{15}$ (molécules/cm ²)
$O_2 + Ti \rightarrow TiO_2$	0,8	24
$N_2 + 2Ti \rightarrow 2TiN$	0,3	0,3-12
$H_2 + Ti \rightarrow TiH_2$	0,06	8-230
$CO_2 + Ti \rightarrow TiCo_2$	0,5	4-12



😊 pompe sèche
débits volumes importants
simple

☹️ très sélective
filament chauffé
remontée de pression au flash



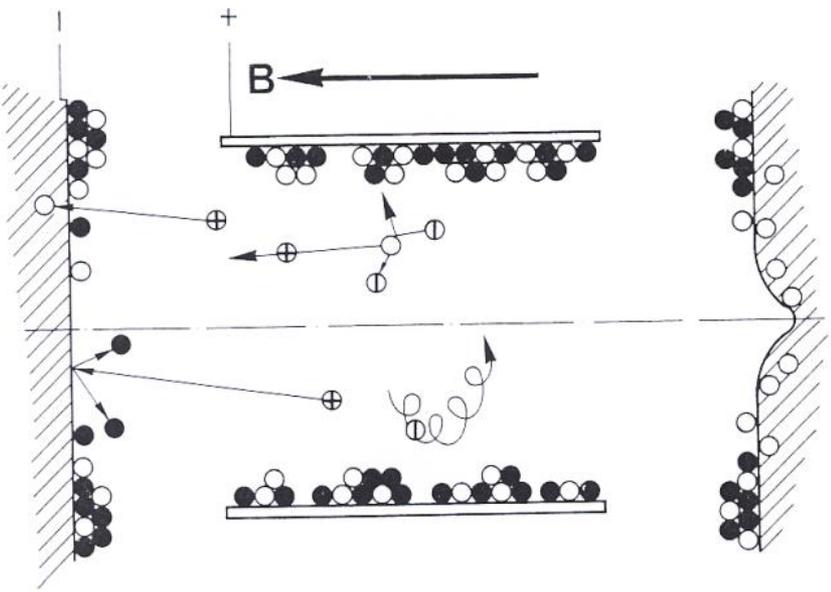
Saturation du film -> flash
(fréquence dépend de la pression)

Les moyens de pompage

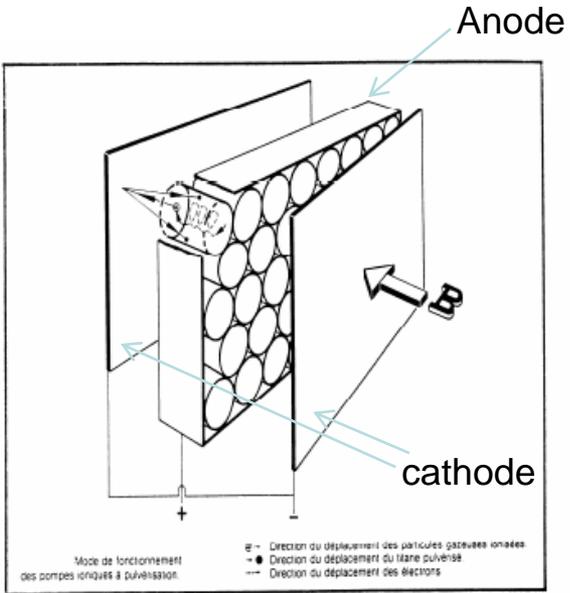
Pompes à fixation : Pompes ionique 1/2

Principe

- Décharge entre anode et cathode en Ti sous B
- ionisation du gaz par les électrons
- pompage ionique par la cathode (absorption par implantation , gaz rares inclus)
- impact => pulvérisation de Ti
- pompage par chimisorption sur le film de Ti



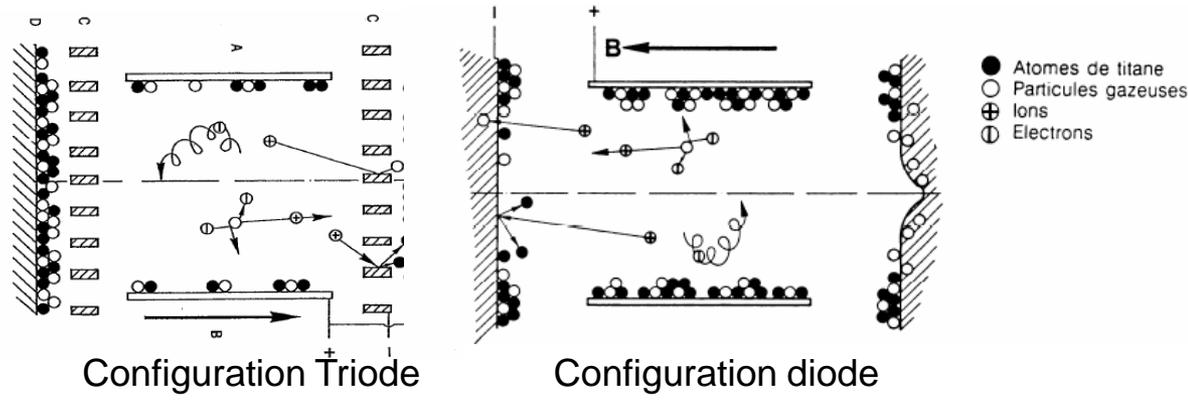
- Atomes de titane
- Particules gazeuses
- ⊕ Ions
- ⊖ Electrons



Les moyens de pompage

Pompes à fixation : Pompes ionique 2/2

- Géométries interne en fonction des gaz à pomper
- Association possible pour pomper la majorité des gaz



➤ $P_{max} \ll 10^{-4} Pa$ $P_i \rightarrow UHV$



- vide propre, pas de vibration
- maintenance, mesure de P

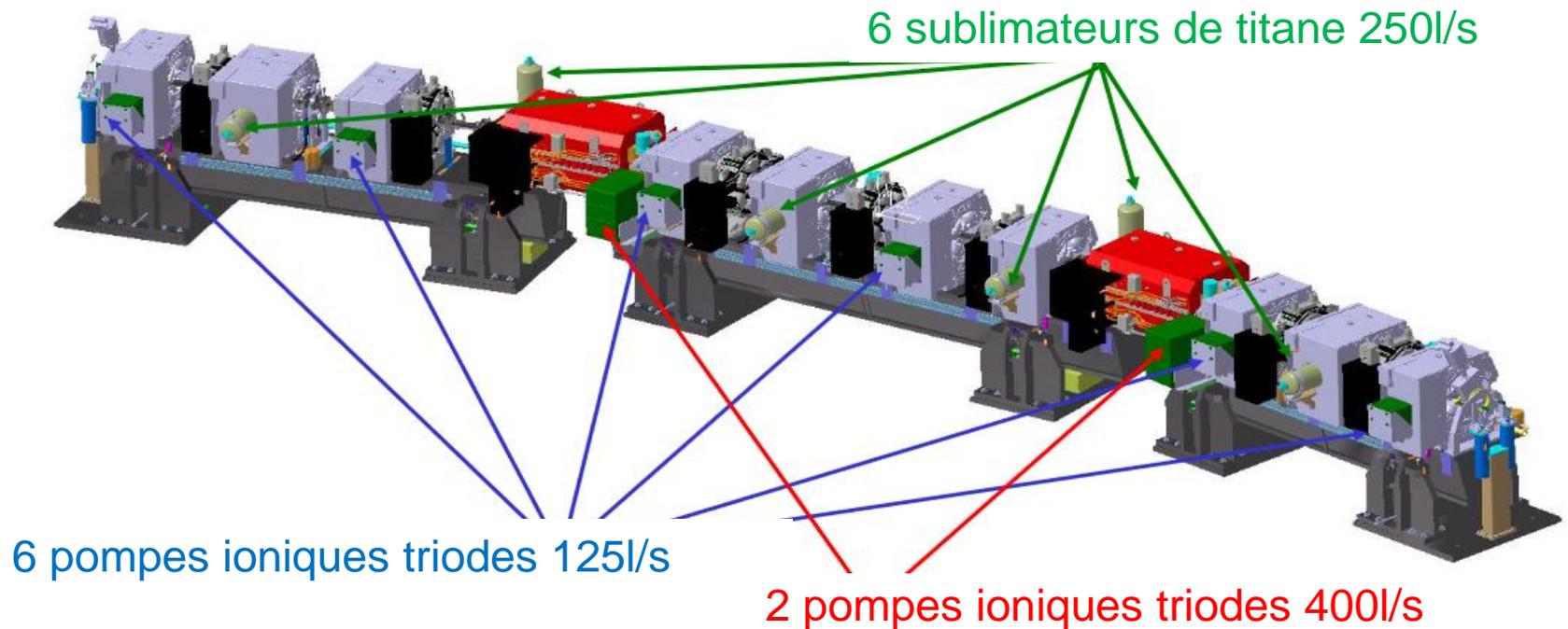


- faible q_v , pompe lourde
- durée de vie $\propto P^{-1}$
- effet mémoire (!\ fuites d'air avec Ar)

Les moyens de pompage

Complémentarité des systèmes de pompage à fixation

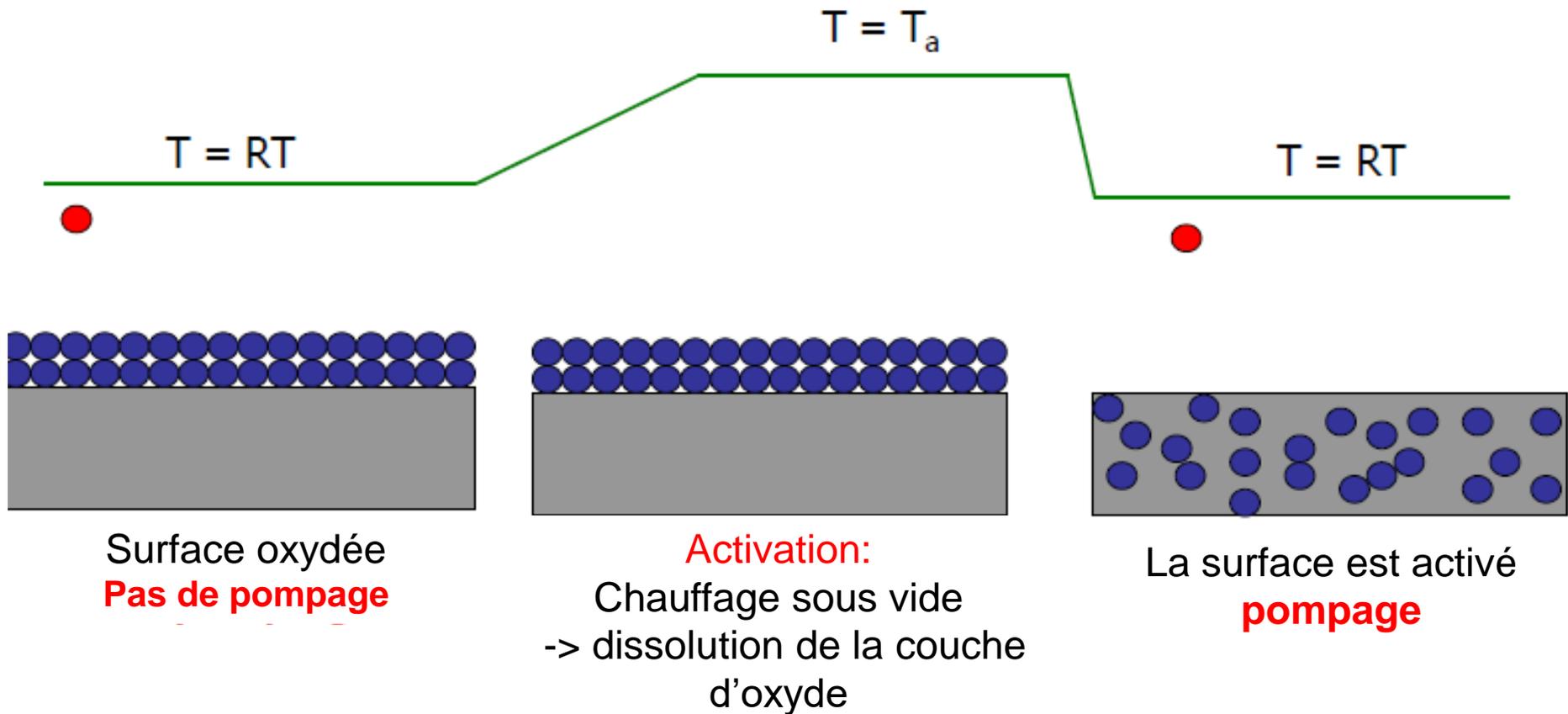
Exemple du système de pompage du synchrotron SOLEIL (source N. Béchu, SOLEIL)



Pompage total hors NEG : 3000l/s
Avec pompage réparti : 2000l/s (320l/s/m)

Les moyens de pompage

Pompes à fixation : NEG (Non Evaporable Getter)



Paolo Chiggiato (CERN)

Les moyens de pompage

Pompes à fixation : NEG (Non Evaporable Getter)

- Pompage par **adsorption** sur un matériau getter (Ti, V, Zr, Nb, Hf, Ta) à haute solubilité et diffusion d'Oxygène pour permettre sa diffusion.
- getter sous forme de ruban (exl : alliage 84% Zr – 16% Al)
- le getter est **activé** à haute température par effet joule (exl : 700° C puis 400° C)
- les gaz rares et CH₄ ne sont pas pompés



LEP vacuum chamber section

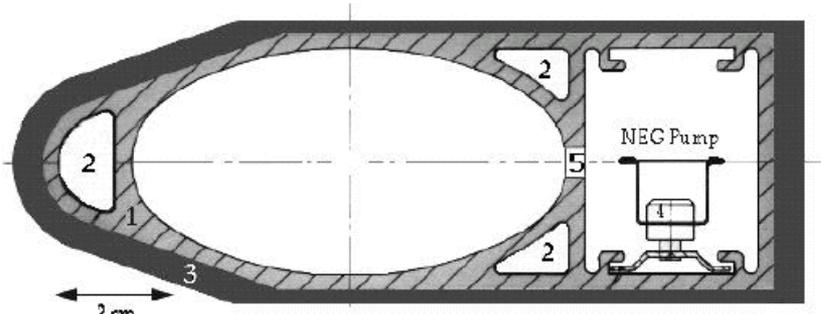


Fig. 2 : Vacuum chamber section made of (1) extruded aluminium profile with the elliptic beam channel, three cooling water ducts (2) and surrounded by 3 to 8 mm thick lead shield (3). The NEG pump (4) is housed in a separate pump channel connected to the beam channel by a row of longitudinal slots (5).



- vide propre,
- simple
- intégrable (pompage réparti)



- faible q_v saturation
- activation à haute T°
- très sélective

Les moyens de pompage

Pompes à fixation : NEG (Non Evaporable Getter)

CERN : recherche du meilleur assemblage de matériaux. En 2002, choix de :

- Dépôt de Ti-Zr-V (~ 1,5 mm)
- Activation par étuvage sous vide à 180° C pendant 24h° C (seulement !!!)

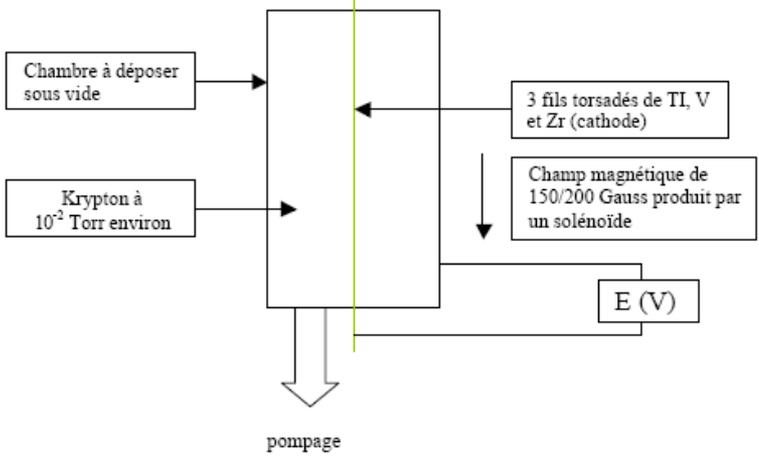
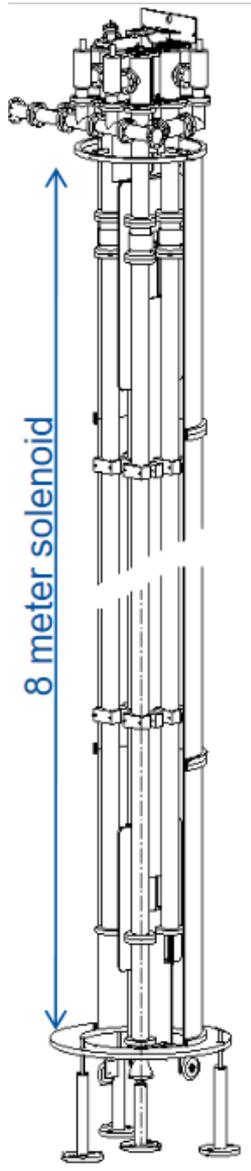
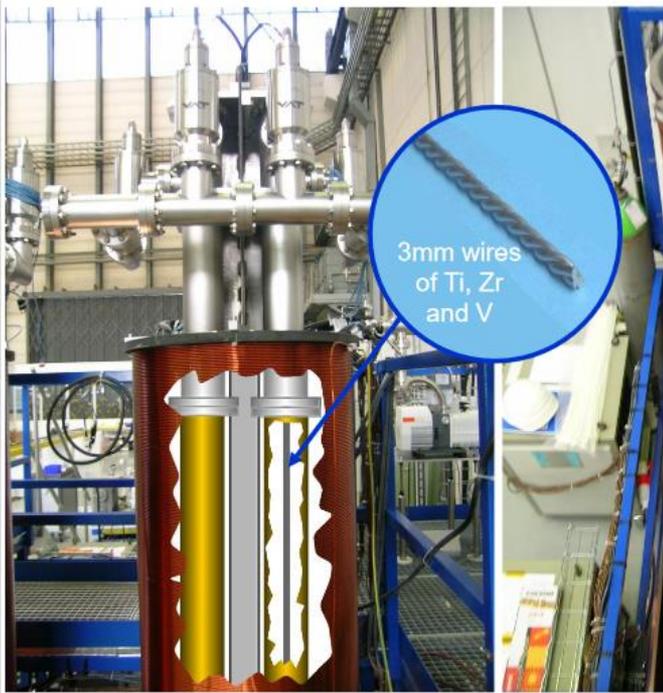


Schéma 1 : Dispositif de pulvérisation magnétron pour le dépôt d'une couche NEG



Les moyens de pompage

Pompes à fixation : Pompes à Getter mise en application au CERN (source P. Costa. Pinto)

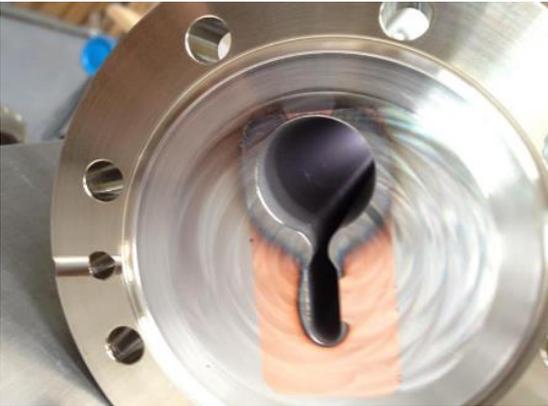


Chambre déposées NEG pour le LHC



ELENA - Extra Low Energy Antiproton Ring

Chambre en cours de dépôt



Chambre déposées NEG pour MAX IV



Laboratoire de dépôt NEG du CERN

Les moyens de pompage

Pompes à fixation : Pompes à Getter mise en application au CERN (source P. Costa. Pinto)



- vide propre
- pompage réparti
- surface de pompage importante
- réduction du dégazage statique et stimulé
- limite les équipements de pompage



Adapté aux faibles conductances et au dégazage stimulé dans les synchrotrons et anneaux de stockage



- saturation
- activation à haute T°
- très sélective (fuite Argon interdite !!!)
- durée de vie ?

Utilisation UHV (synchrotrons , LHC)

Principes

Mesure de pression totale : les manomètres

- Mécaniques $\Rightarrow P = F/S$
- Thermiques \Rightarrow échanges thermiques avec le gaz
- A viscosité \Rightarrow friction avec le gaz
- A ionisation $\Rightarrow P = f(I_{\text{ionique}})$

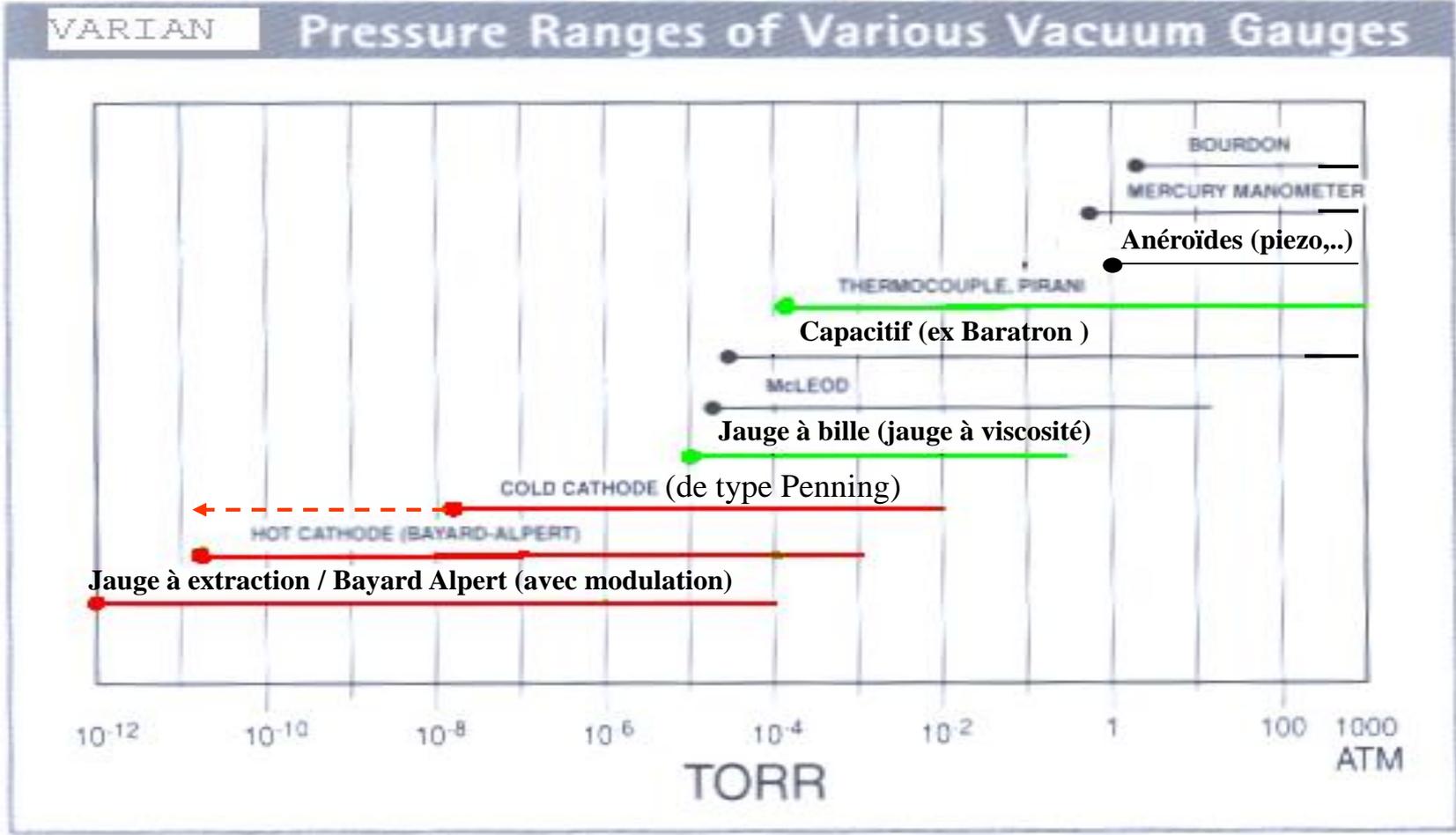
Mesure des pressions partielles : les analyseurs de gaz

- A séparation magnétique
- A séparation quadripolaire

Mesure de pression sous vide

Classification

- — Jauges à ionisation } Dépend de la nature du gaz
- — Jauges à transfert d'énergie } Dépend de la nature du gaz
- — Jauges à équilibre } Ne Dépend pas de la nature du gaz



Mesure de pression sous vide

Manomètres à effets mécaniques

Manomètres de Bourdon

- $P_{atm} > P > 1hPa$

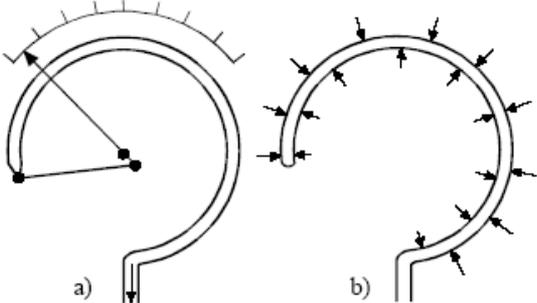
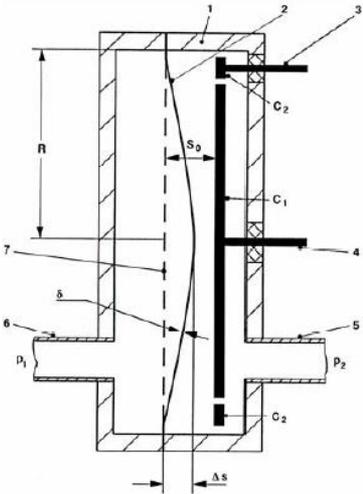


Fig. 2 Bourdon gauge, a) principle, b) distribution of forces



Jauge capacitive

- $P_{atm} > P > 1.10^{-4}$
- Gamme sur 3 ordres de grandeurs

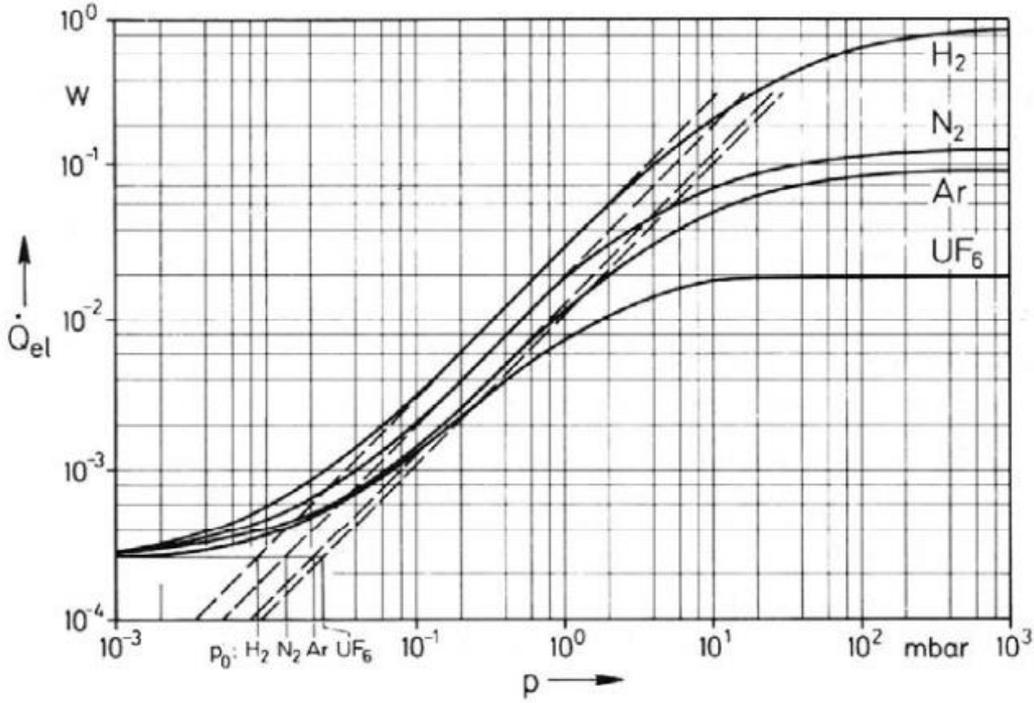
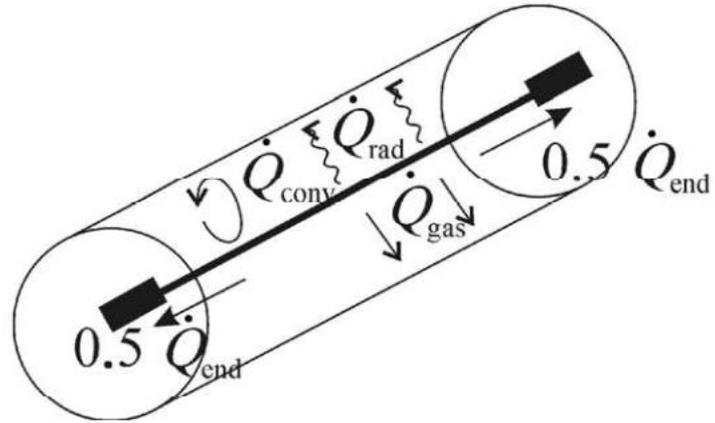


Mesure de pression sous vide

Jauge Pirani

Jauge à échange thermique

- $100\text{hPa} > P > 10^{-3}$
- Sensible
 - à l'orientation
 - nature du gaz
 - État du filament

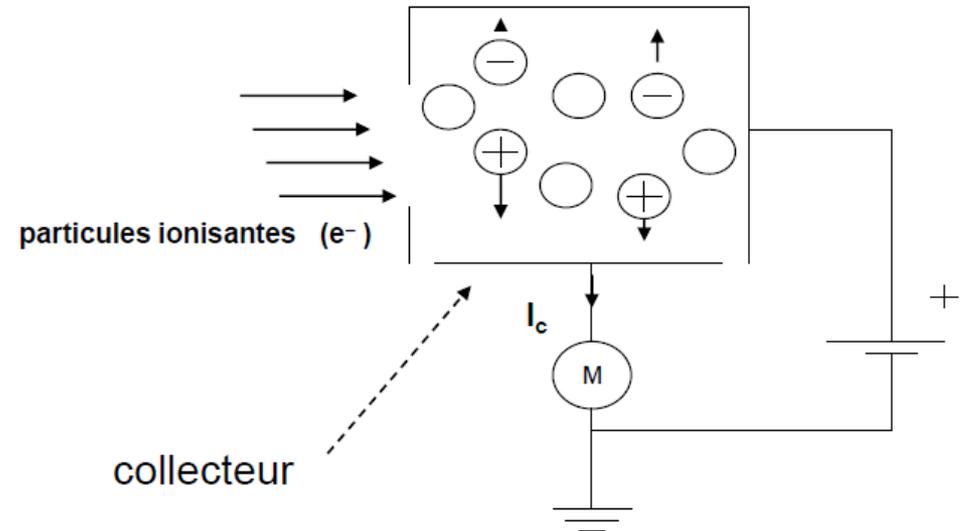
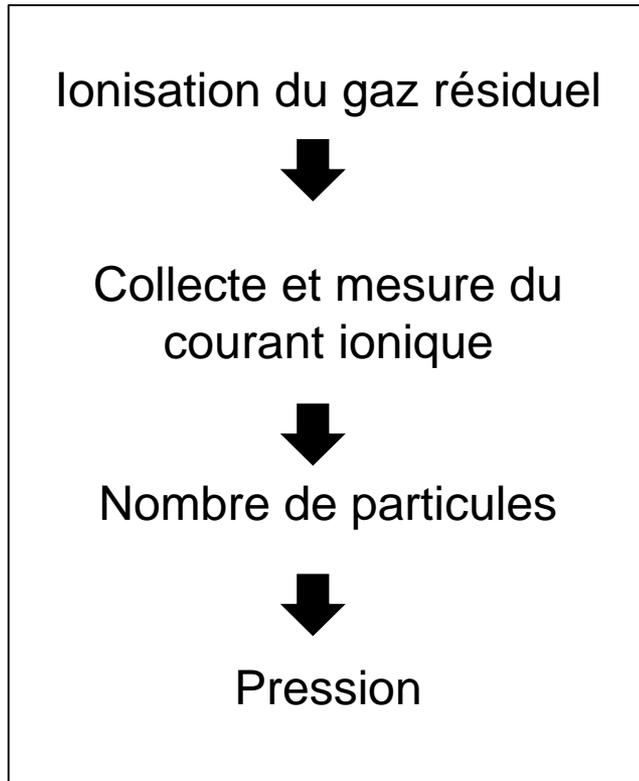


Précautions

- Recaler périodiquement 0 et P_{atm}
- Si dépôt : éviter vision directe du procédé
- Protection par une grille (attention au bouchage)

Mesure de pression sous vide

Jauges à ionisation



- $10^{-2} > P > \text{UHV}$
- Pour une géométrie donnée, la sensibilité dépend de la nature du gaz
- $s = (I_c / I_{e^-}) \cdot 1/P (10 - 40 \text{ mb}^{-1})$

Mesure de pression sous vide

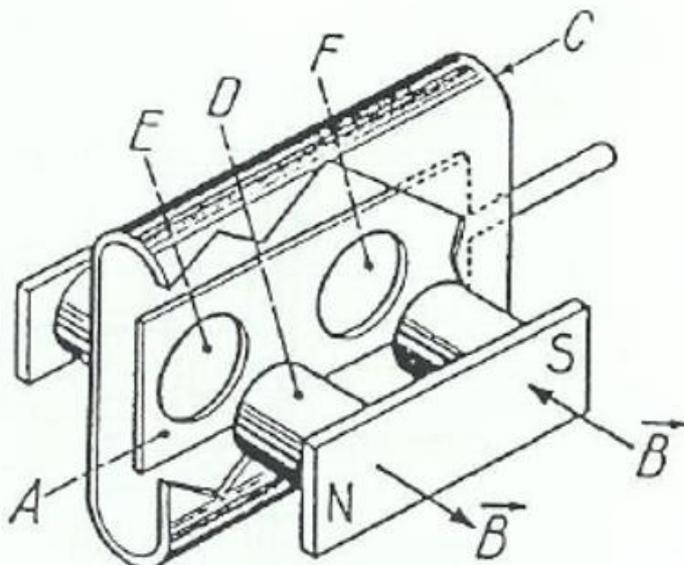
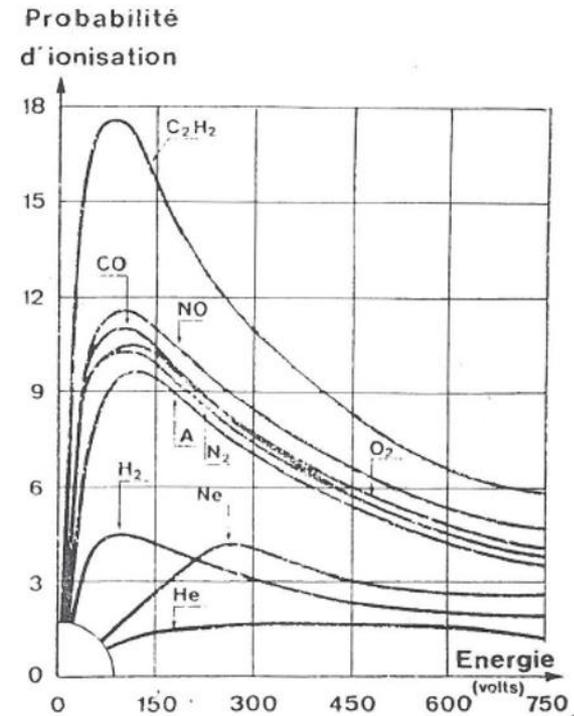
Jauges à ionisation : Jauge Penning / Cathode froide

Principe :

Ionisation par les électrons libres accélérés sous HT + champs magnétique

Pression de fonctionnement :

- $10^{-2} \gg 10^{-7}$ hPa
- Étendu à 10^{-10} en magnétron inverse



Précautions :

- Allumage $10^{-4} > P > 10^{-5}$ hPa
- Sensible au gaz
- Pas de signal -> très bon vide

Mesure de pression sous vide

Jauges à ionisation : Manomètre de Bayard-Alpert / Cathode chaude

Principe :

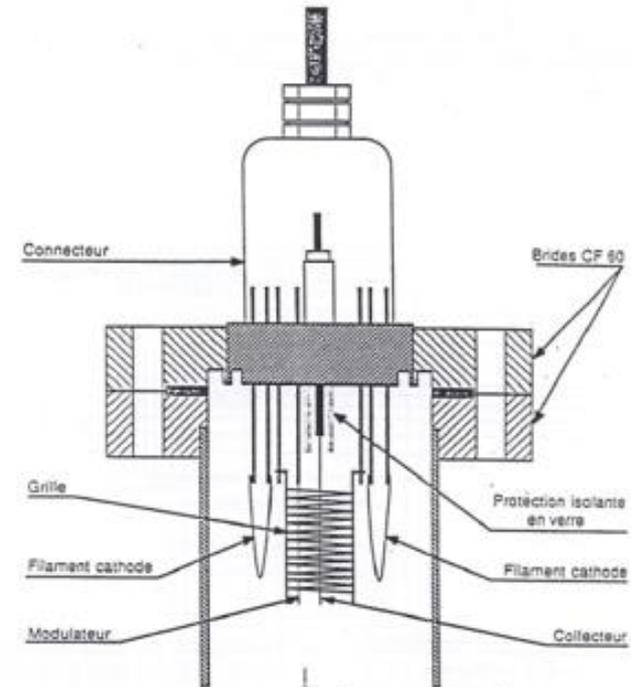
Ionisation par les électrons émis par un filament, accélérés par une grille.
Les ions sont recueillis par le collecteur

Pression de fonctionnement

- $10^{-3} \gg 10^{-10}$ hPa
- Extension à 10^{-12} avec autres géométrie et modulateur

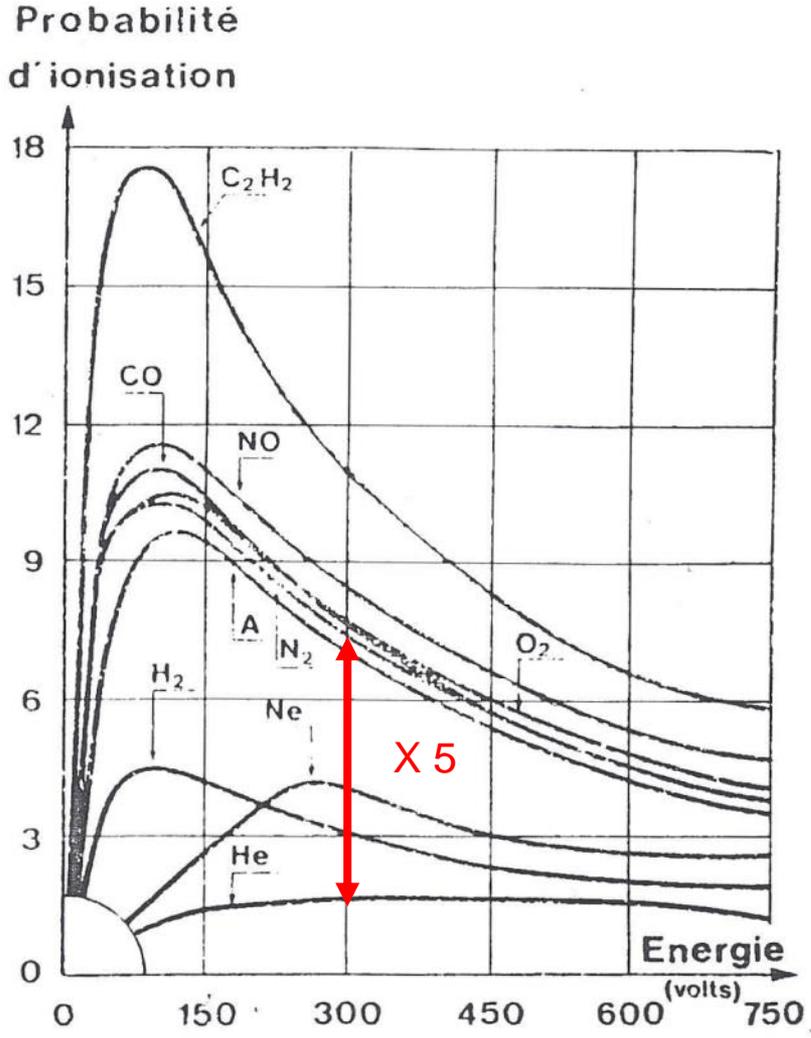
Précautions

- Démarrage $P < 10^{-4}$ hPa
- /!\ signaux parasites à très basse pression (X, électrons) et à l'allumage (dégazage de la jauge)
- Sensibilité par rapport aux gaz



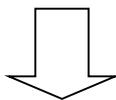
Mesure de pression sous vide

Jauges à ionisation : sensibilité par rapport au gaz



Si gaz résiduel 100% He

$$P_{\text{vraie}} = P_{\text{lue}} \times 5$$



- Nécessité de connaître la nature du gaz résiduel
- Tenir compte du facteur de sensibilité de la jauge

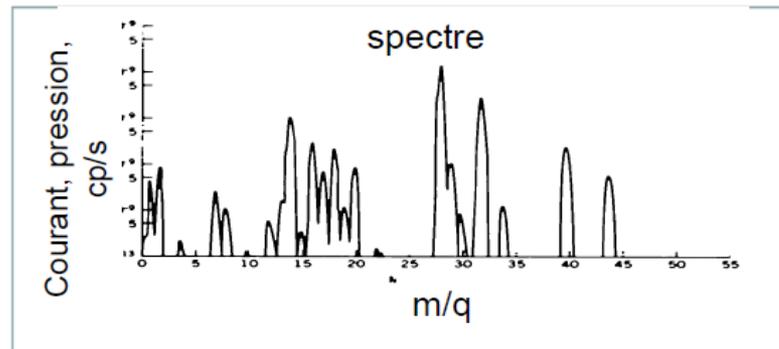
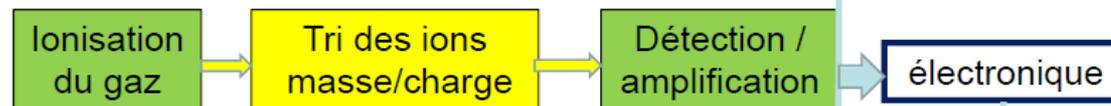
Mesure de pression sous vide

Mesure de pression partielle : analyseurs de gaz

La connaissance de la composition du gaz résiduel est **indispensable** dans le domaine des basses pressions

- ✓ Identification de l'origine des flux gazeux
- ✓ Utilisation de systèmes de pompage sélectif
- ✓ Étalonnage des manomètres à ionisation

Chambre à vide ou système d'injection

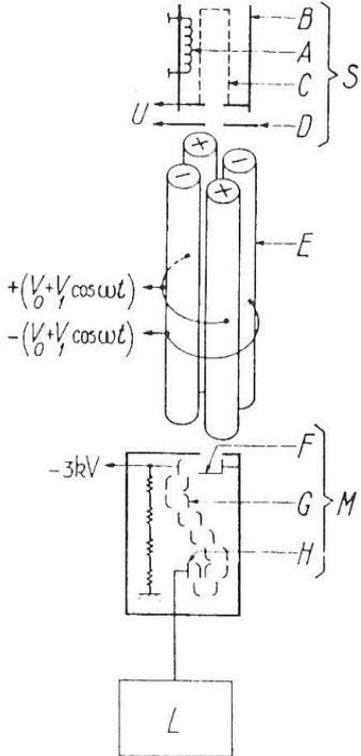


Mesure de pression sous vide

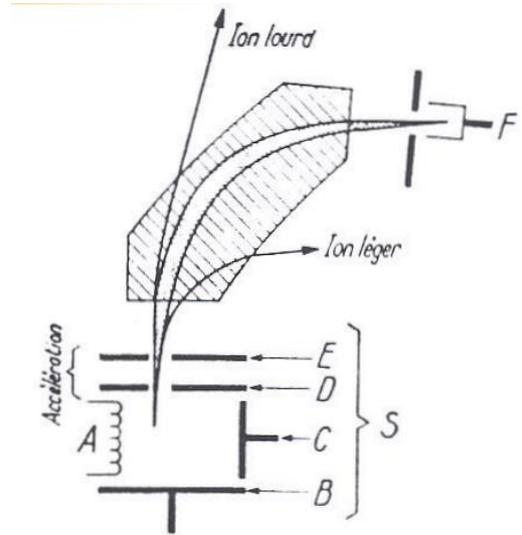
Mesure de pression partielle : type de spectromètre

Séparation quadripolaire (RGA)

$P_{\max}^* 10^{-4}$ hPa
 $P_i \rightarrow$ UHV
 $P_{\min}^* \sim 10^{-14}$ hPa
gamme de masses :
0-100
0-200
0-300



Séparation magnétique



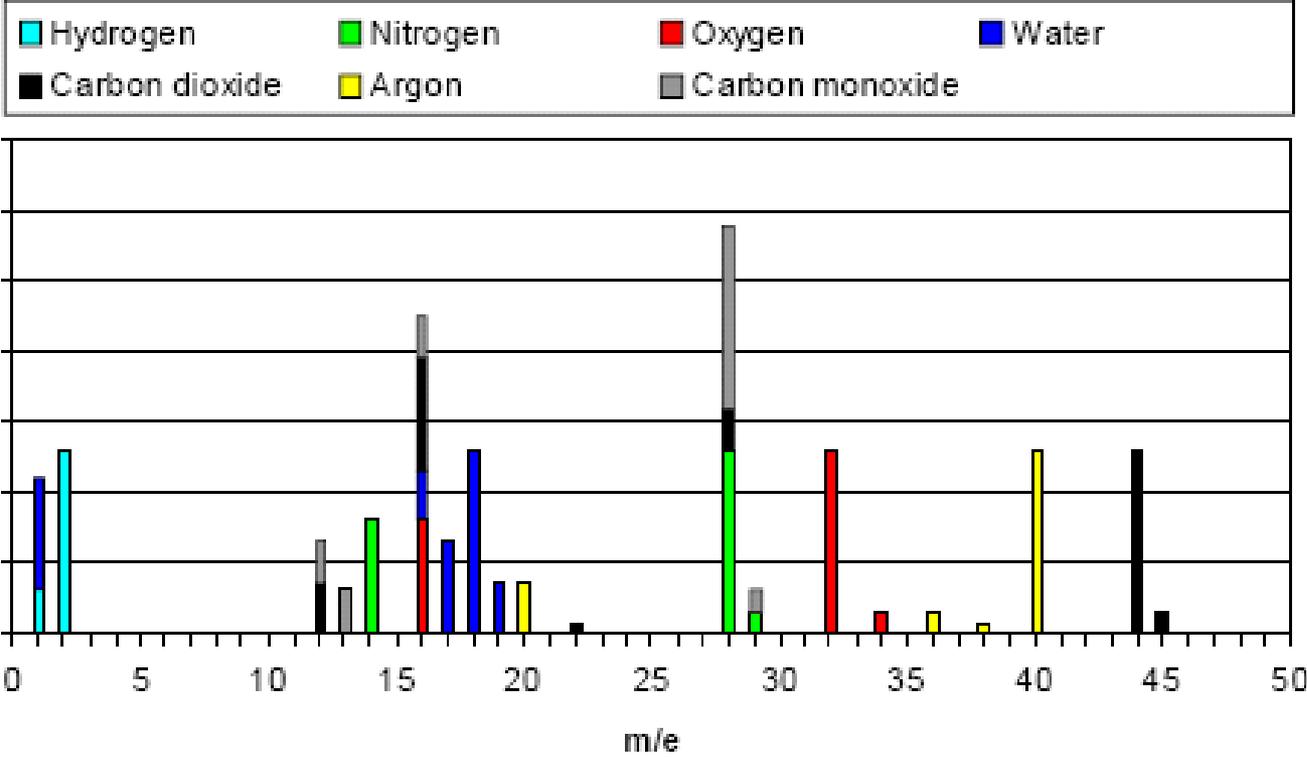
Détection de fuite (traceur He, H2)

Mesure de pression sous vide

Mesure de pression partielle : RGA

Pour un même corps :

- ion simple (mono chargé)
- ion multi chargé
- décomposition par craking



Pic 100 %
N2 et CO même 100%

H₂O : 18 H₂O+ / 17
OH+ / 16 O+
/19 H₃O+

Ar : 40 Ar+ / 20 Ar 2+
/36-38 Ar+

➡ Analyse délicate

Mesure de pression sous vide

L'étanchéité

Lors de la conception, une spécification essentielle à la conception des systèmes de vide
Cette spécification devra pouvoir être contrôlée lors de réception

flux de fuite : nombre de particules /s

$$\frac{d(P.V)}{dt} = (R.T) \cdot \frac{dn}{dt}$$

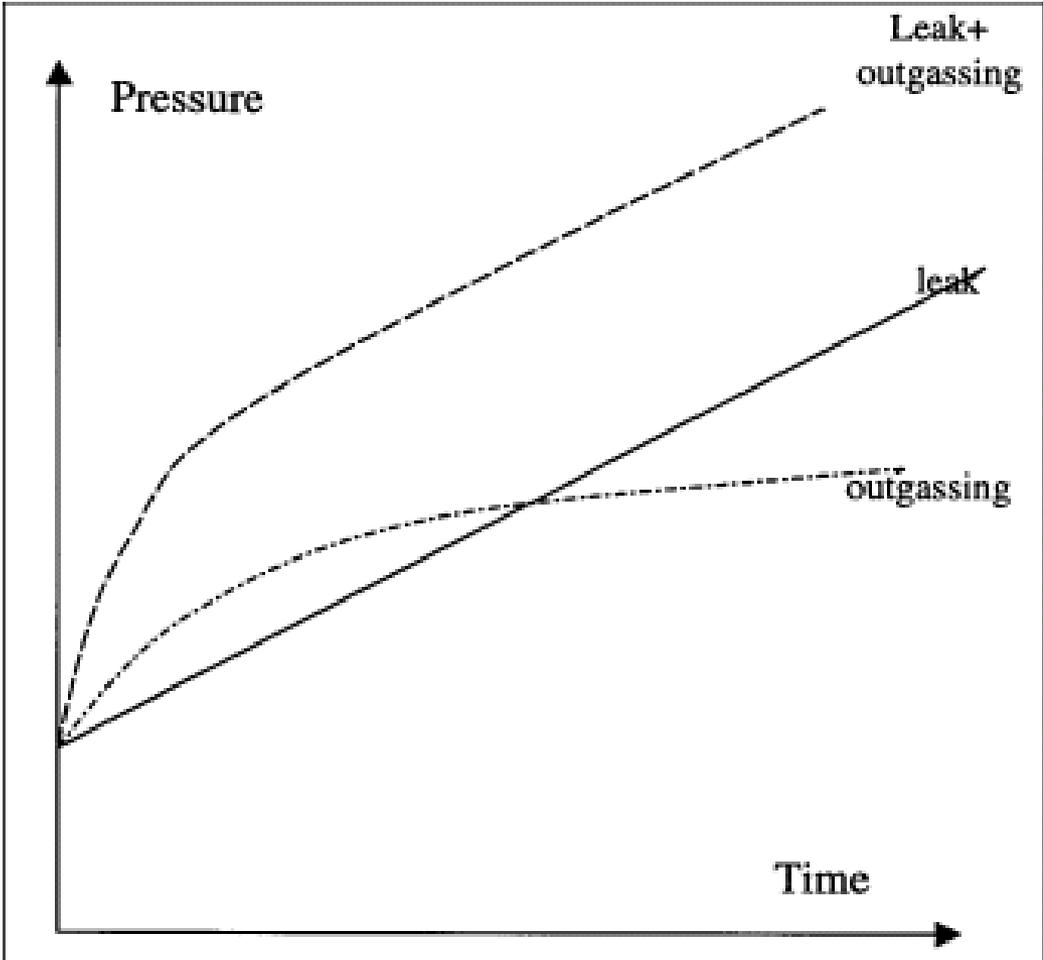
Unités :

- Pa.m³.s⁻¹
 - mbar.l.s⁻¹
 - atm.cm³.s⁻¹ (std. cc. s⁻¹)
- 1 Pa. m³.s⁻¹ = 10 mb.l.s⁻¹ ~ 10 atm.cc.s⁻¹

Mesure de pression sous vide

L'étanchéité

Evolution de la pression dans une enceinte isolée (pas de pompage)



L'étanchéité : détection de fuite

Par effets mécaniques

- Sonore
- formation de bulles
(mise en pression de la pièce à tester)

$$Q_f > 10^{-2} \text{ Pa.m}^3.\text{s}^{-1}$$

$$Q_f > 10^{-5} \text{ Pa.m}^3.\text{s}^{-1}$$

Par l'utilisation de traceur

Changement local de la composition du gaz dans l'enceinte à tester, au niveau de la fuite)

⇒ **modification des propriétés du gaz**

- conductivité thermique : jauge thermique (Pirani)
- section efficace d'ionisation : jauge à ionisation
- débit-volume conductance : mesure de P associée à C
- masse: spectro de masse

Mesure de pression sous vide

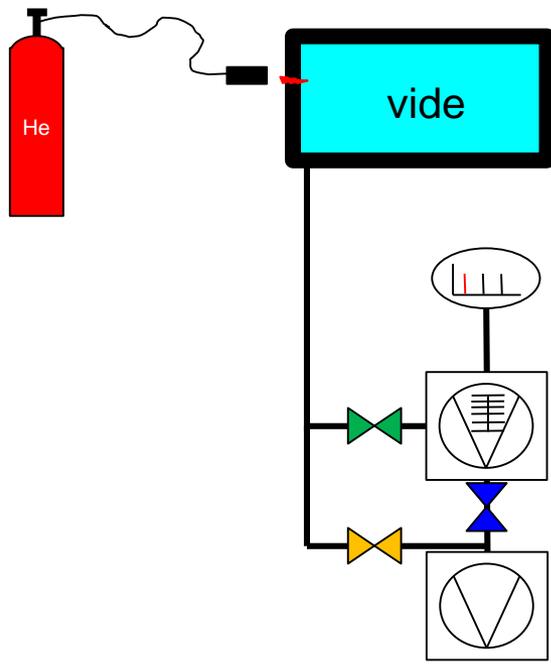
L'étanchéité : détection de fuite par spectromètre de masse

Utilisation d'un gaz traceur pour localiser et quantifier la valeur du flux de fuite :

- Hélium (5ppm dans l'air, gaz inerte)
- H₂ (0,5ppm dans l'air, gaz explosif -> dilué <4% dans gaz support)

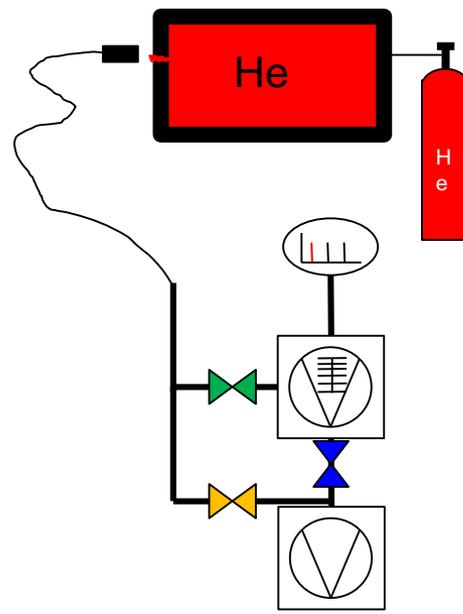
Contrôle global ou par aspersion

$$q_{\text{fuite mini}} \sim 10^{-12} \text{ Pa.m}^3.\text{s}^{-1}$$



Contrôle par reniflage

$$q_{\text{fuite mini}} > 10^{-8} \text{ Pa.m}^3.\text{s}^{-1}$$



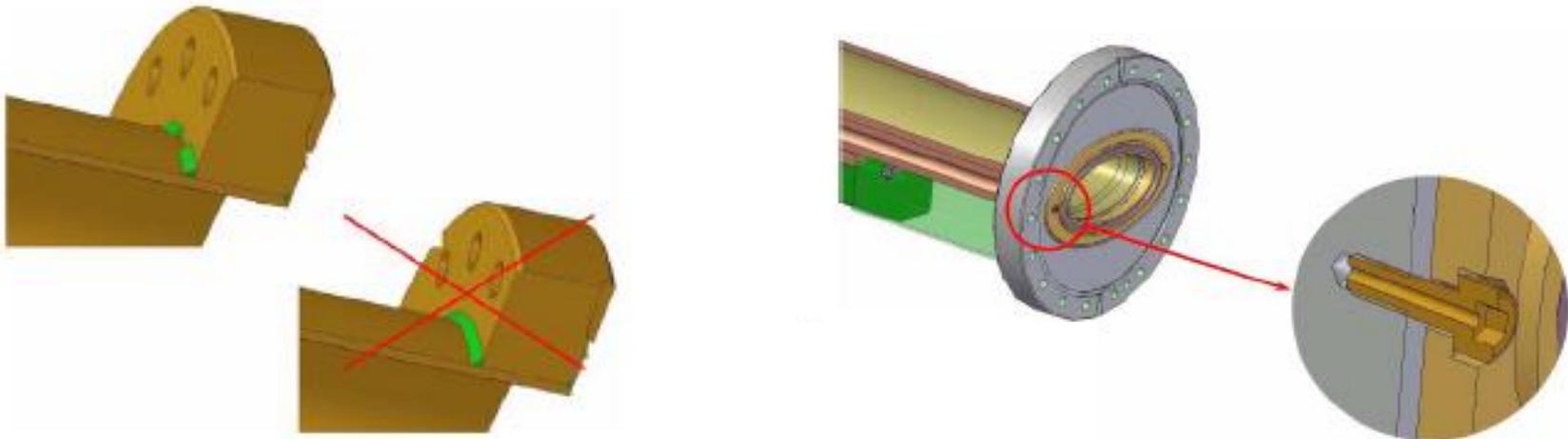
Attention au temps de réponse

Mesure de pression sous vide

L'étanchéité : conception mécanique

Les fuites virtuelles sont complexes à localiser / réparer → Définition de spécifications pour la conception des ensembles mécaniques

Exemple : vis non percées / rainurées



nb de molécules dans 1 mm³ à la P_{atm} ?

2,5. 10¹⁶ autant que dans 10 m³ à 10⁻⁷ hPa..

- **Phase de conception :**

Importance de la *juste définition du besoin* pour fixer les spécifications

- niveau et qualité du vide requis
- contraintes d'environnement
- contraintes d'exploitation

- **Phase de construction :**

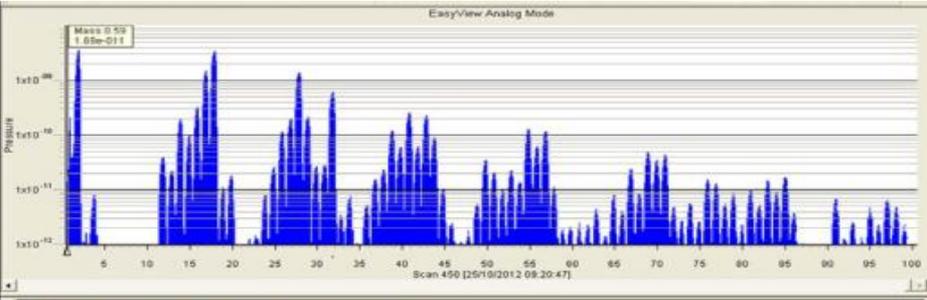
Importance du *suivi de réalisation*

- suivi des spec pour tous les éléments en interface avec le vide ...
- nettoyage chimique et critères de propreté garantis jusqu'aux phases de montage

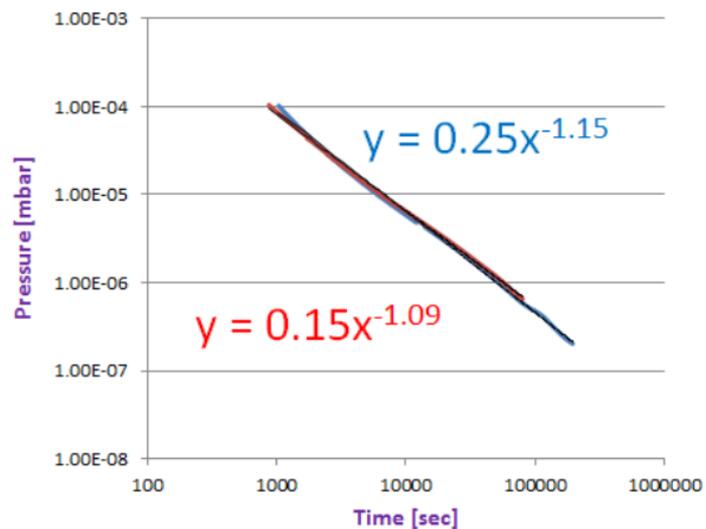
Conception

Réception des équipements allant sous vide

Pollution dans le vide résiduel

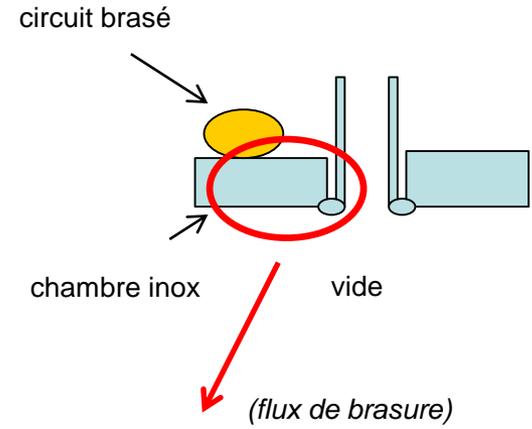


Analyse de gaz résiduels



Mesure de la pente de descente en pression

Corrosion / mauvais nettoyage



Corrosion de la chambre inox coté vide

Conception

Jointes élastomères

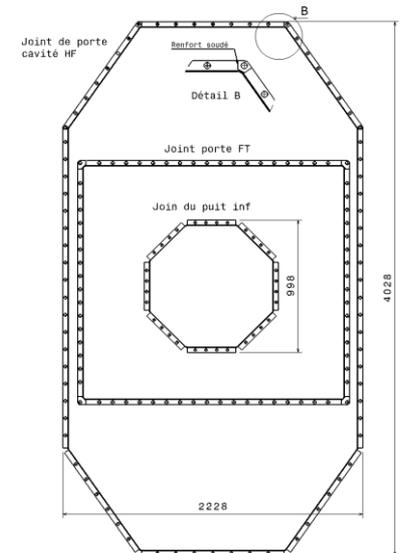
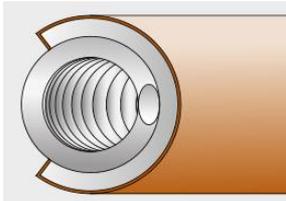
- **Viton, EPDM, Perbunan, etc...**
 - Facilité de mise en place
 - Etanchéité simple à obtenir
 - Faible résistance aux agressions (rayonnements, température, etc...)
 - Dégazage important et perméation



Conception

Jointes métalliques

- Aluminium, cuivre, indium, etc... (métaux mous)
 - Mise en œuvre parfois complexe (état de surface, serrage, ...)
 - forte résistance aux agressions
 - Dégazage des métaux



Quelques références

- Cern Accelerator school (1999 ; 2006 ; 2017), <https://cas.web.cern.ch/previous-schools>
- Site du RT Vide (<http://rtvide.cnrs.fr/>)
- Technique du Vide, (*J.Arianer*) <https://cel.hal.science/cel-00092956v1>
- Fundamentals of Vacuum Technology (*RedHead*)
- U.S Particle Accelerator School
- Vacuum in particle accelerators (O. B. Malyshev)

Merci de votre attention !



Réseau des Technologies du Vide

<http://rtvide.cnrs.fr/>