

LE VIDE

Généralités
Domaines de pression
Flux gazeux
Dégazage
Conductance
Régime d'écoulement
Installation type
Moyens de pompage
Moyens de mesure

<https://www.ijclab.in2p3.fr/>

philippe.rosier@ijclab.in2p3.fr
Bureau études mécaniques

Le vide

un gaz raréfié ou un mélange gaz/vapeur
caractérisé par une pression inférieure à la pression atmosphérique

La pression est la force exercée par les molécules de gaz sur une surface unité

$$P = F / S \quad \text{Unité S.I. : Pascal (N/m}^2\text{)}$$

La pression atmosphérique moyenne est environ 1013 hPa

Basées sur les principales propriétés du vide :

- atmosphère inerte, suppression de la contamination
- isolation thermique
- effet « mécanique »
- diminution des collisions entre molécules

Dans les accélérateurs et physique des particules :

- limiter les interactions du faisceau avec le gaz résiduel
perte du faisceau par collision avec le gaz résiduel
- permettre le fonctionnement de systèmes spécifiques
 - les sources de particules
 - les systèmes HT (cavités accélératrices HF..)
 - les cryosystèmes (cavités HF supra, cryomagnétisme, détecteurs..)

Unités de pression usuelles

Unité S.I. : Pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)

En pratique : on utilise le mbar (le Torr, le mm Hg)

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$; $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa} = 1 \text{ hPa}$; $1 \text{ Pa} = 10^{-2} \text{ mbar}$

$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Hg} = 133 \text{ Pa}$ et $1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 1,013 \text{ bar}$

Domaines de pression

Les limites doivent être considérées comme approximatives

de 10^5 à 10^2 Pa : **vide industriel ou vide primaire** Pas d'influence des parois - régime d'écoulement turbulent ou laminaire

de 10^2 à 10^{-1} Pa : **vide moyen**

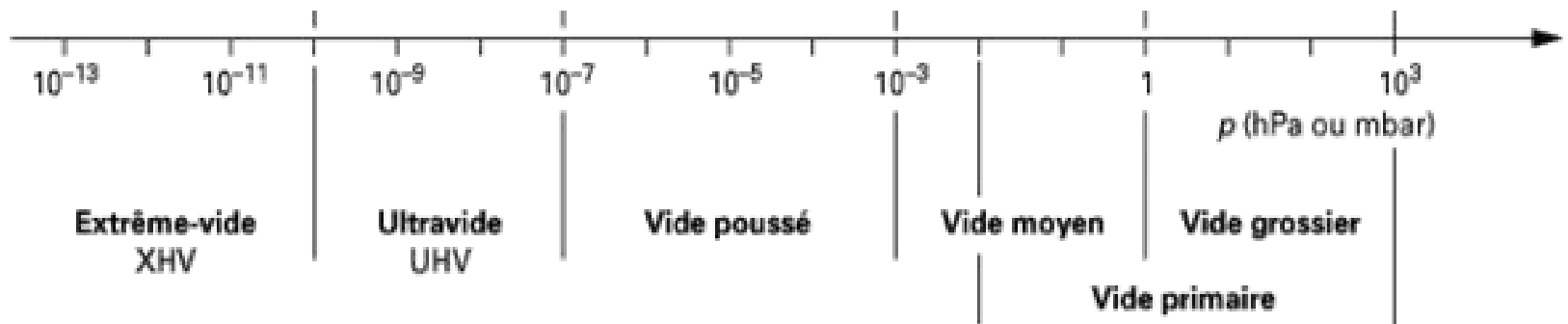
Variation de la viscosité et de K - régime laminaire ou moléculaire suivant les dimensions de l'enceinte à vide

de 10^{-1} à 10^{-5} Pa : **vide poussé**

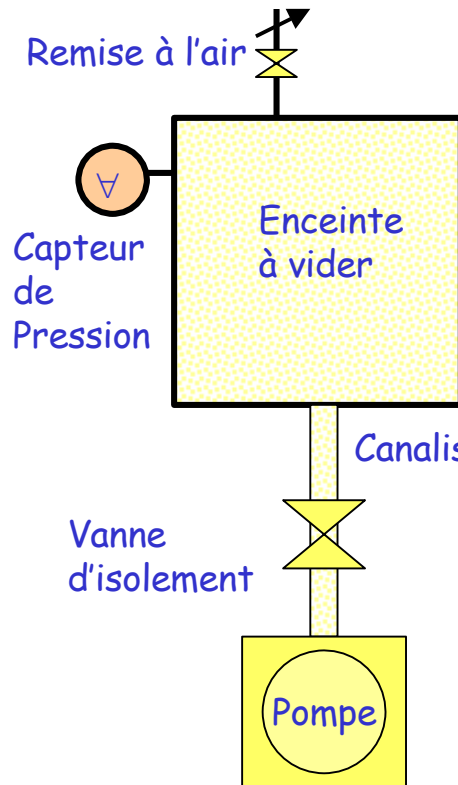
Les phénomènes de surface interviennent - régime d'écoulement moléculaire

< 10^{-5} Pa : **ultra-vide**

Domaine des faibles concentrations moléculaire - phénomènes de surface - technologie ultra-vide



Une installation de vide



Enceinte :

volume
pression
nature du gaz
surface (dégazage des parois)

Canalisation :

diamètre
longueur
nb d'éléments

↔

Régimes d'écoulement
Perte d'efficacité
(conductance)

Pompes :

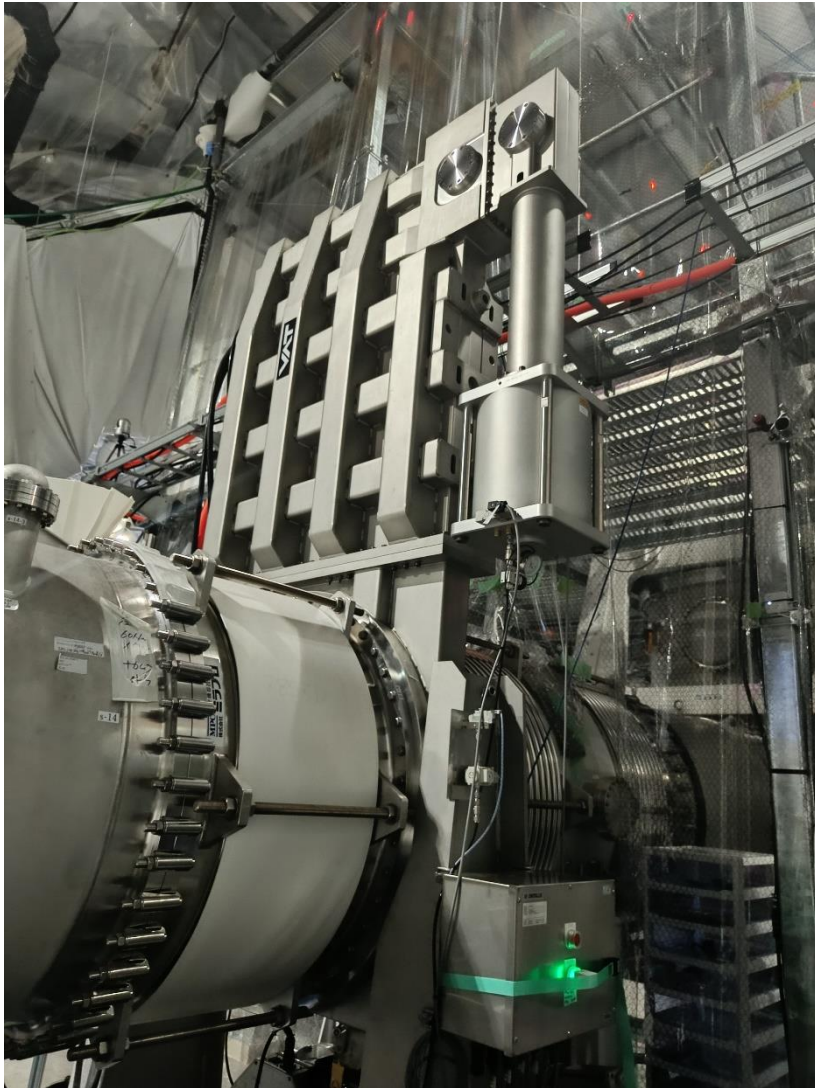
type
Débit volume (vitesse de pompage)
Pression limite (avec installation)
sélectivité de pompage (nature du gaz)

- 1) Pression initiale $\xrightarrow{\text{Temps donné}}$ Pression finale
- 2) Maintenir une pression donnée pendant des opérations spécifiques

Gate valve

$$P = F / S$$

*Attention à la force de pression sur les dispositifs sous vide
(écrasement soufflets, force sur piquages et flambage des enceintes)*



Les questions à se poser pour décrire et dimensionner une installation

- Que veut-on faire ?

pomper de l'air ... mais aussi des mélanges, gaz légers, inertes, réactifs, dangereux?

- Quel vide faut-il atteindre ?

les domaines du vide...et leurs techniques

- En combien de temps ?

vitesse de pompage

les pompes mais aussi les canalisations


=> montage en fonction du domaine du vide

- Le design ?

Brides, joints, matériaux, ...

Composition de l'air atmosphérique sec

		Concentration (%)	Pression partielle (mbar)
Azote	N ₂	78	780
Oxygène	O ₂	21	210
Argon	Ar	0.93	9.3
Gaz carbonique	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

$P_p(\text{H}_2\text{O})=15 \text{ mb}$


Description macroscopique : Loi des gaz parfaits

pour n moles $P V = n R T$

en introduisant le nb. de molécules $N = n N_A$

($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ molecules)
aux conditions TPN

$$P V = N (R/N_A) T$$

cte de Boltzmann

$$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad (\text{par molécule})$$

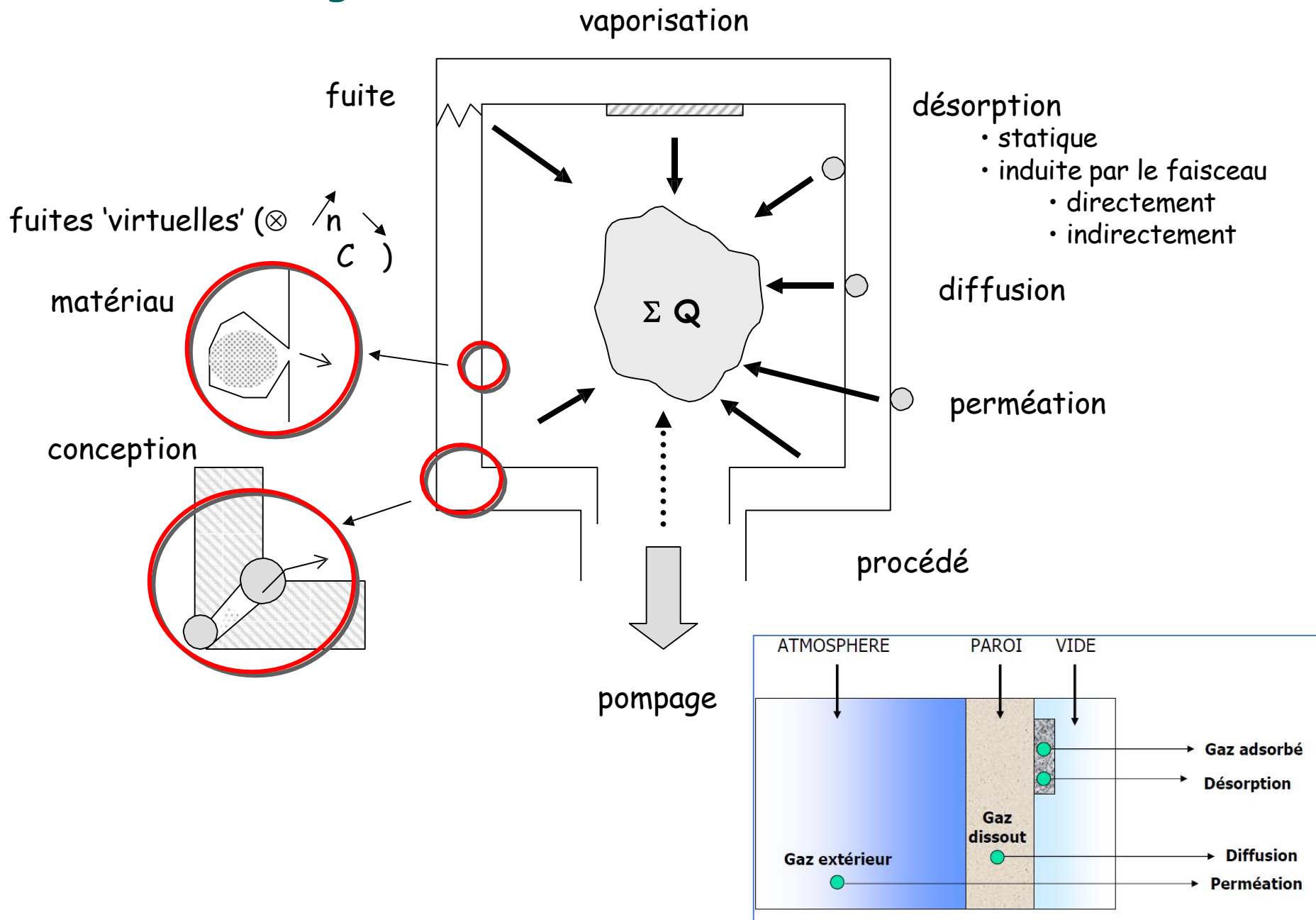
Soit $P V = N k T$ ou $P = n_V k T$

avec n_V densité moléculaire \Rightarrow la pression est proport. à la densité moléculaire ...

\Rightarrow La notion de pression partielle est importante car les machines utilisées en technique du vide (pompes et capteurs de pressions) se comportent différemment selon la nature des gaz

- * la pression résulte de l'ensemble des chocs des molécules sur les parois ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)
- * notion de pressions partielles
- * diminuer la pression revient à réduire le nombre de molécules ou leur vitesse (T)

Bilan des flux gazeux

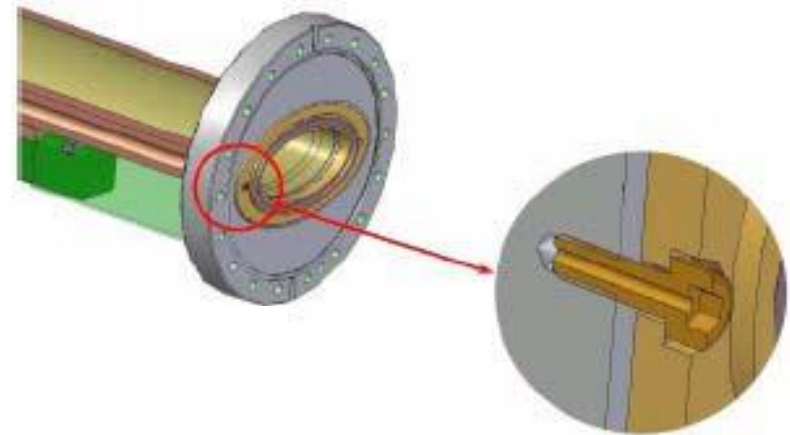
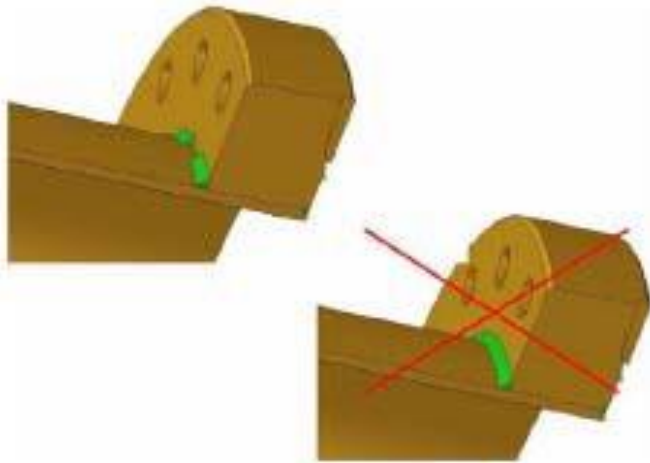


Les fuites virtuelles

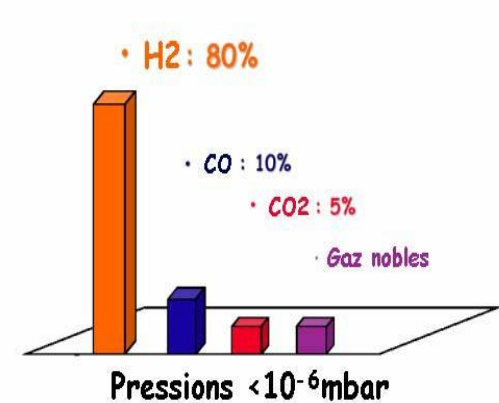
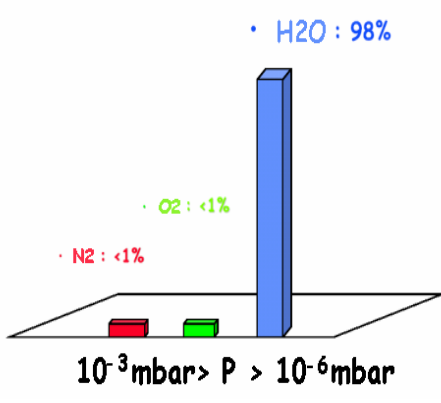
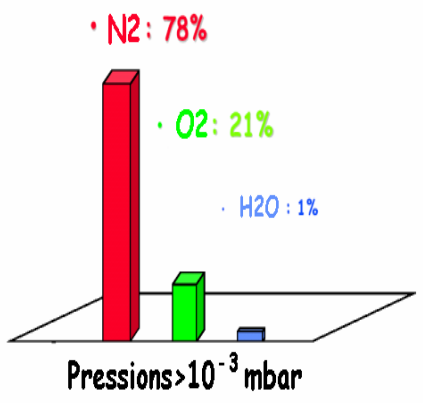
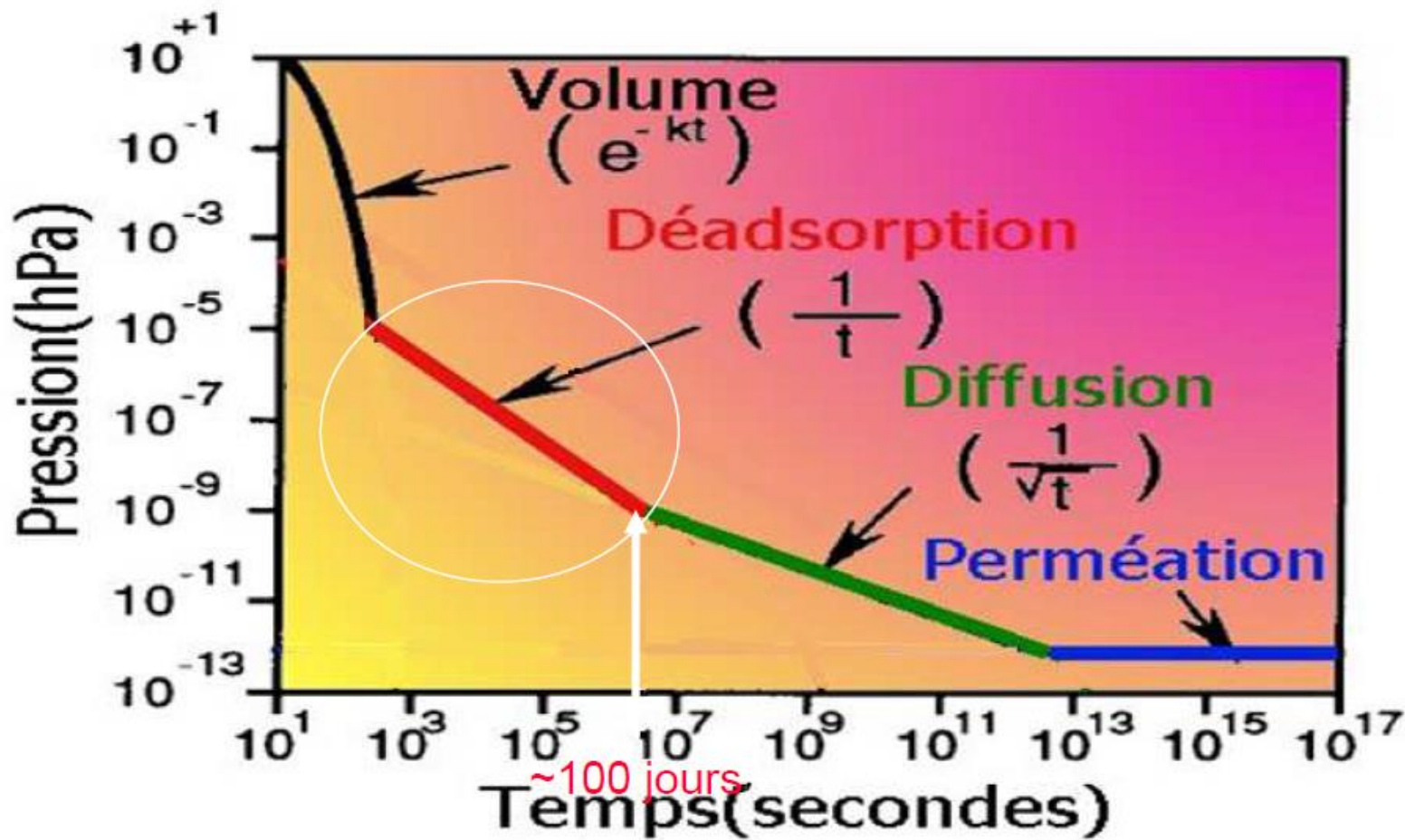
→ difficiles à identifier, à localiser, à réduire...



Spécifications pour la conception des ensembles mécaniques sous vide



*nb de molécules dans 1 mm³ à la Pa ?
2,5. 10¹⁶ autant que dans 10 m³ à 10⁻⁷ hPa..*

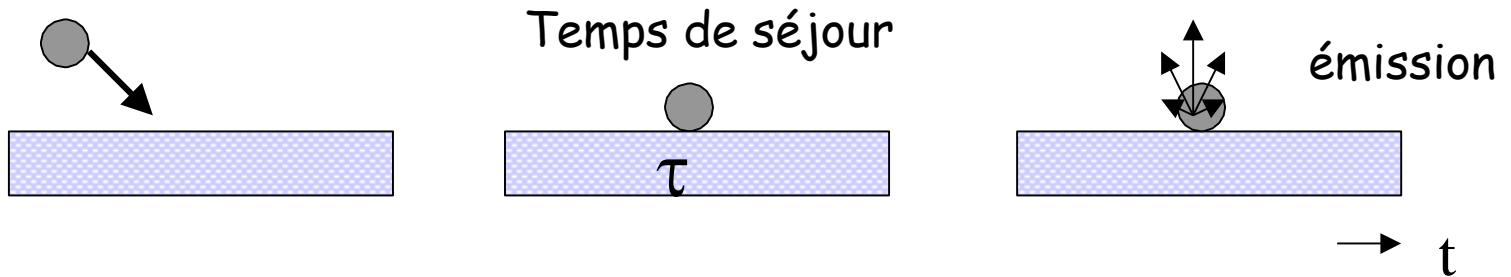


Chocs sur les parois (la particule séjourne)

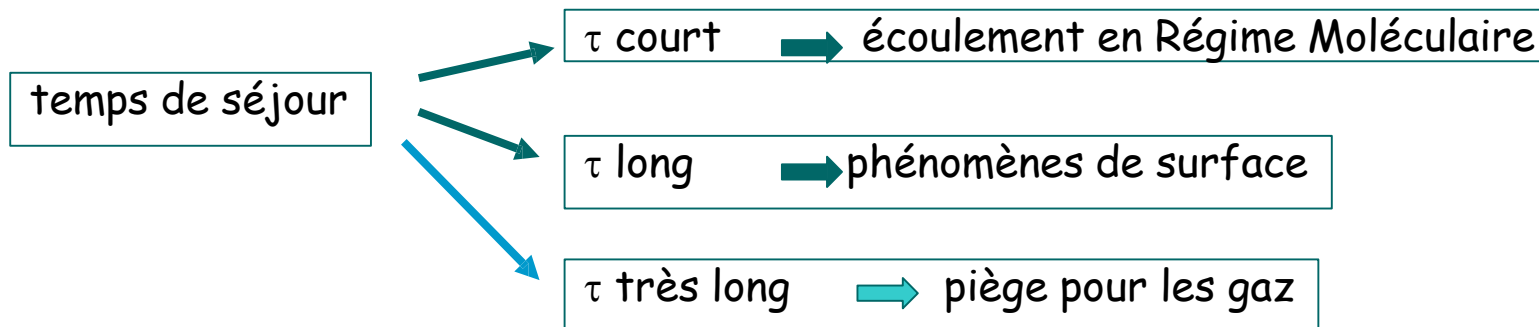
Fondamental pour le calcul des écoulements gazeux à très basses pressions
écoulement gazeux difficile à basses pressions (régime moléculaire)

Echanges gaz-surface : adsorption / désorption

- Phénomène général observé avec tous les couples solides - gaz
- la quantité de gaz adsorbé dépend de la surface du solide, pas de son volume



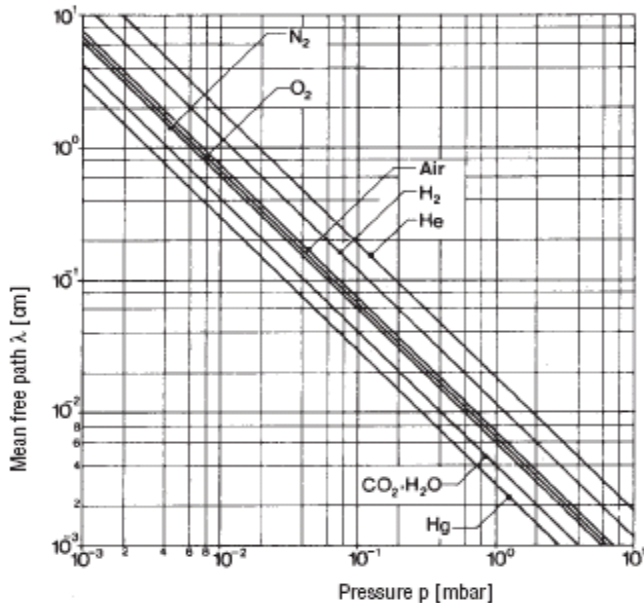
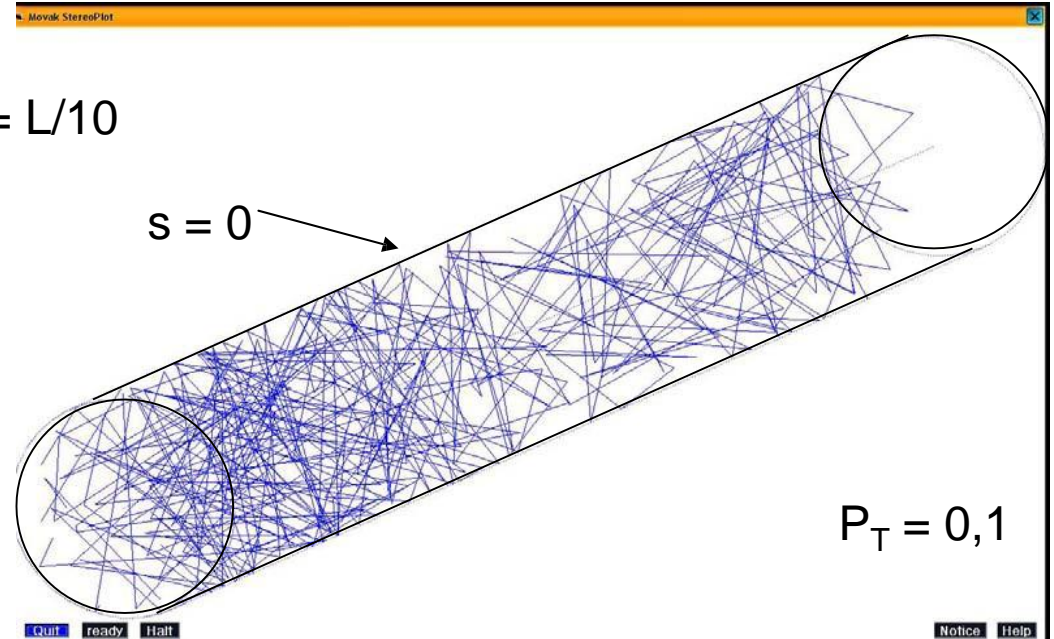
Sorption et désorption d'un gaz sur une surface



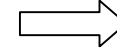
Probabilité de transfert (régime moléculaire)

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

$$\Phi = L/10$$



Libre parcours moyen
lm



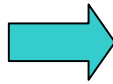
définition du vide poussé



(interaction des molécules de gaz avec les parois, régime d'écoulement)

Absorption

Absorption des gaz par
physiorption



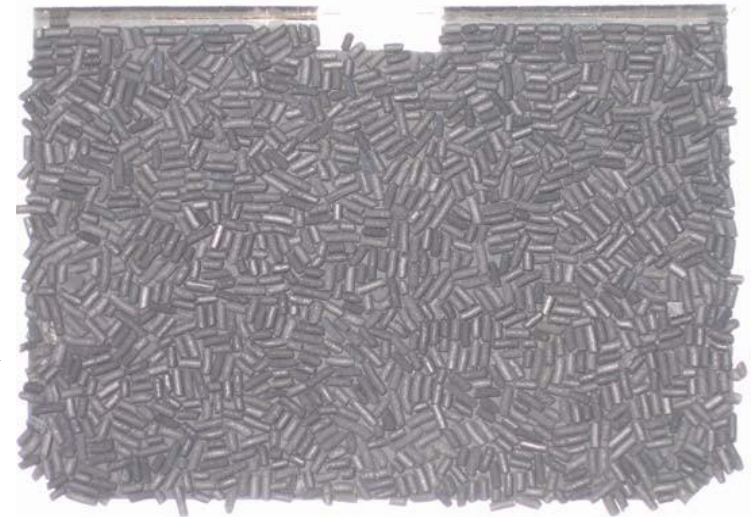
*largement utilisé en technique du vide
pour piéger les molécules de gaz résiduel*

Principaux absorbants utilisés :

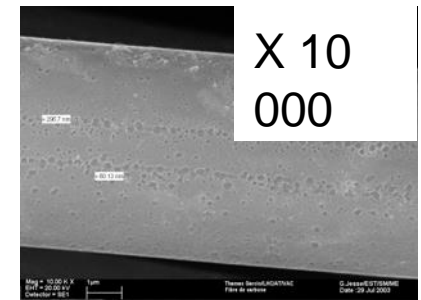
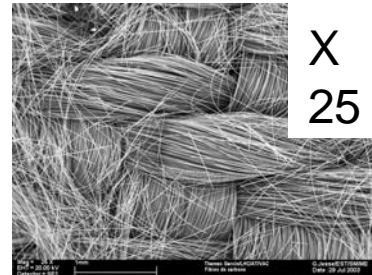
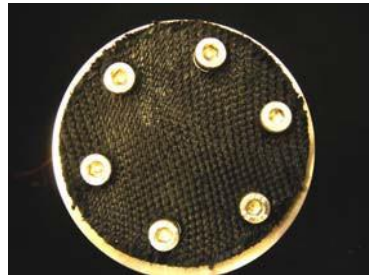
- Zéolites
- Silica-gel
- Charbon actif

Charbon actif : le meilleur absorbant

- 1000 à 1700 m²/g porosité qq diz. 10⁻¹⁰ m
- utilisation sous forme de batonnets
(diam. 3 mm, L: 4 à 5 mm)



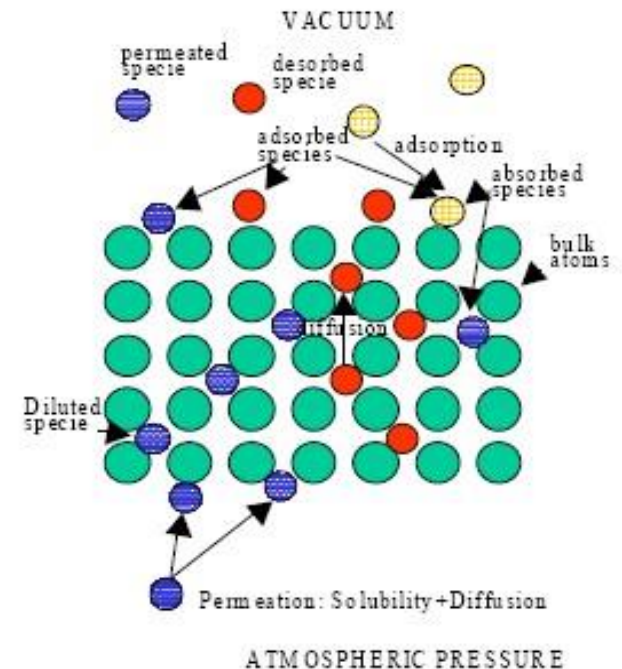
sous forme de fibres
(V. Baglin CERN)



La perméation

Les corps solides ne sont pas des obstacles aux gaz. Les gaz peuvent traverser les corps solides suivant un processus complexe :

- Adsorption de la molécule sur la parois externe
- Dissociation de la molécule
- Dissolution dans le réseau
- Diffusion
- Recombinaison sur la parois interne
- Désorption sous vide



Le dégazage (surtout en pompage secondaire)

Dans une installation de vide, le dégazage provient des parois plus ou moins rugueuses piègeant les molécules ou couvertes de dépôts pulvérulents, des joints élastomères, des matériaux poreux, des pièces qui sont chauffées au cours des opérations ...

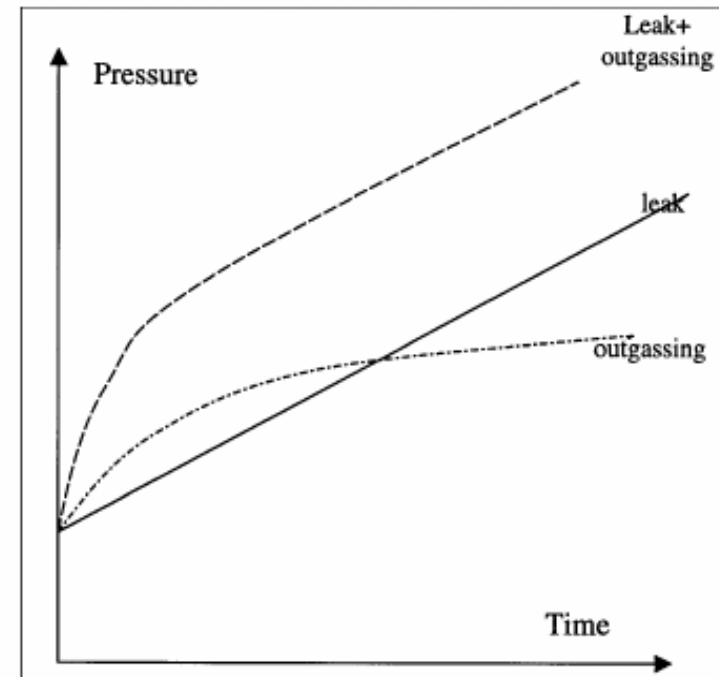
Phénomène inverse de l'adsorption : libération lente à basse pression des molécules adsorbées sur les surfaces

Comment le mesurer ?

- test de remontée de pression

Application :

- choix des matériaux (surfaces lisses, non poreuses)
- sas introduction
- remise à Patm avec N₂ pour éviter O₂ et H₂O



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

Taux de dégazage spécifique

- 0 après nettoyage et 100h de mise sous vide
 - Métaux (inox) qq. 10^{-8} Pa.m.s⁻¹ (qq. 10^{-11} mb.l.s⁻¹.cm⁻²)
 - élastomères qq. 10^{-4} Pa.m.s⁻¹
- 0 + traitement thermique (étuvage 120°C)
 - Métaux (inox) qq. 10^{-9} Pa.m.s⁻¹
 - élastomères (viton) qq. 10^{-6} Pa.m.s⁻¹
- 0 étuvage 300°C in-situ
 - Métaux (inox) qq. 10^{-11} Pa.m.s⁻¹

Phénomène limitant l'obtention des basses pressions

Etuvage



Flux gazeux : conséquences sur la conception

$$P(t) = \frac{\sum (q_{gu}(t) \cdot S) + Q_{perméation} + Q_{process} + Q_{dég.stimulé} + Q_{fuite} + Q_{pollution}}{S_{eff}}$$

à évaluer à limiter

S_{eff}
efficacité du système en terme de pompag

choix matériaux (technologie tt métal), épaisseur

choix des matériaux, optimisation des surfaces, nettoyage des surfaces

Flux gazeux : conséquences sur la conception

On part de la relation: $P = \frac{Q}{S}$

Flux gazeux

Vitesse de pompage

$$Q = Q_{\text{fuite}} + Q_{\text{dégazage}} + Q_{\text{perméation}} + Q_{\text{rétrodiffusion}}$$

$$Q_f \approx 0$$

$$Q_d = Q_{dp} + Q_{dc} + Q_{di} + Q_{dd}$$

Q_{dp} : Désorption des gaz adsorbés physiquement en surface (chauffage à 100°C)

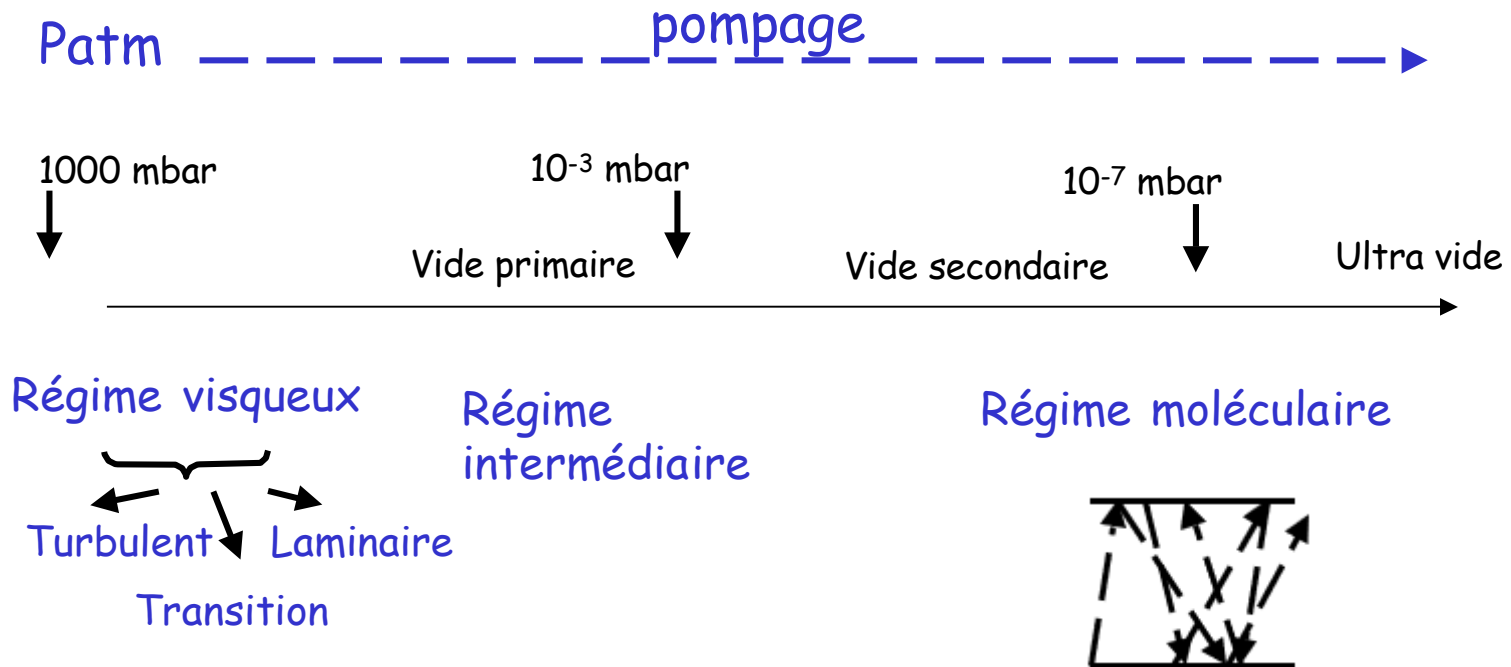
Q_{dc} : Désorption à partir des gaz absorbés chimiquement (chauffage à 300, 400° C)

Q_{di} : diffusion des gaz à partir de l'intérieur du métal, Q_{di} augmente lorsque la température augmente

Q_{dd} : résultat de la décomposition des molécules adsorbées à la surface du métal par chimisorption.
Ce sont surtout des oxydes qui restent stables aux températures habituelles d'étuvage
(Q_{di} diminue si bombardement électronique, ionique, photonique,.....)

Q_p : faible pour les métaux (sauf Pd, Pt pour H₂ et He), grand pour le verre, quartz et constitue une limitation

Les différents régimes

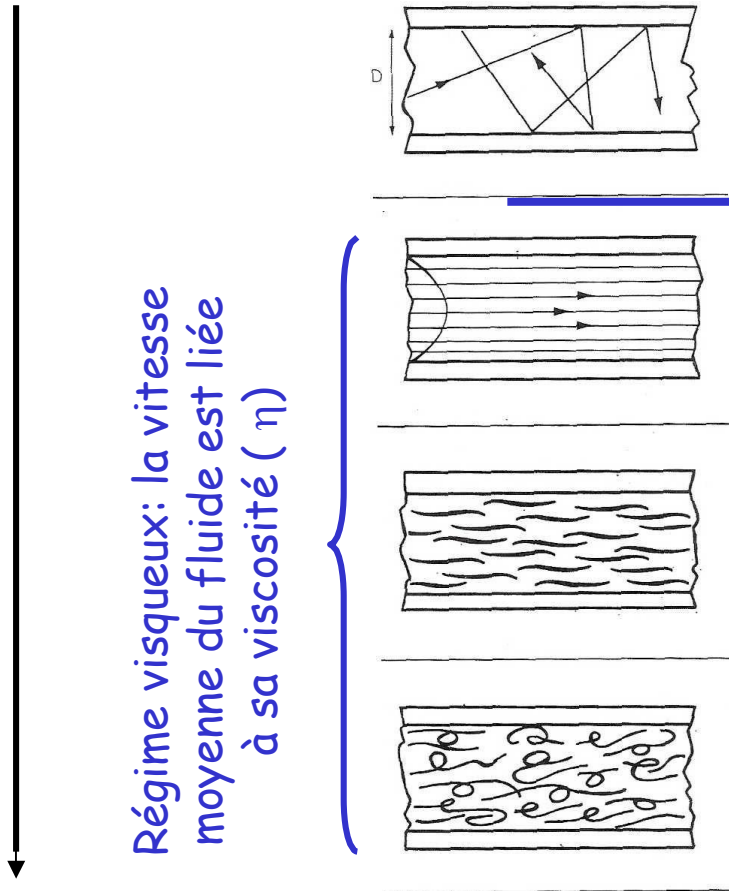


La valeur de la pression ne suffit pas à déterminer le régime, il faut tenir compte de la dimension des enceintes et canalisations, en particulier de leur diamètre.

Comment caractériser ces régimes?

La perte de charge dans la canalisation ne provient plus de la viscosité du fluide. Les collisions avec les parois sont responsables de la résistance à l'écoulement. Le principal paramètre à considérer sera le libre parcours moyen

Vide



Régime moléculaire

$$\lambda \geq \frac{D}{3}$$

Régime intermédiaire

Régime laminaire

$$\lambda < \frac{D}{100}$$
$$Re < 1200$$

Régime de transition

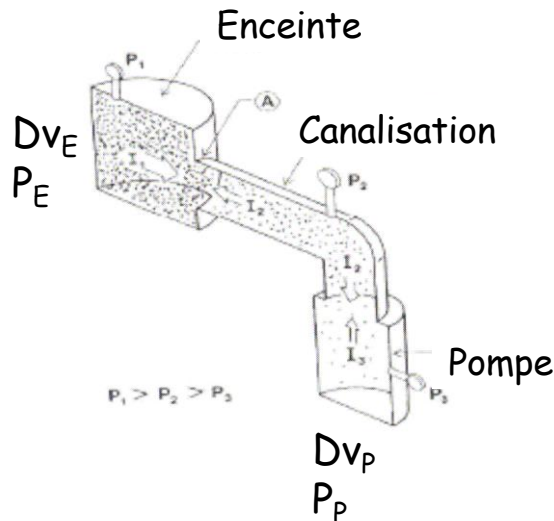
$$1200 < Re < 2200$$

Régime turbulent

$$Re > 2200$$

Pression atmosphérique

Vitesse de pompage effective et conductance



Pour une chambre reliée à une pompe,
le flux Q qui circule est :

$$Q = P_E \cdot DV_E = P_P \cdot DV_P = C(P_E - P_P)$$

$$\frac{1}{DV_E} = \frac{1}{DV_P} + \frac{1}{C}$$

$$DV_E = \frac{CDV_P}{DV_P + C}$$

DV_P = débit volume intrinsèque de la pompe

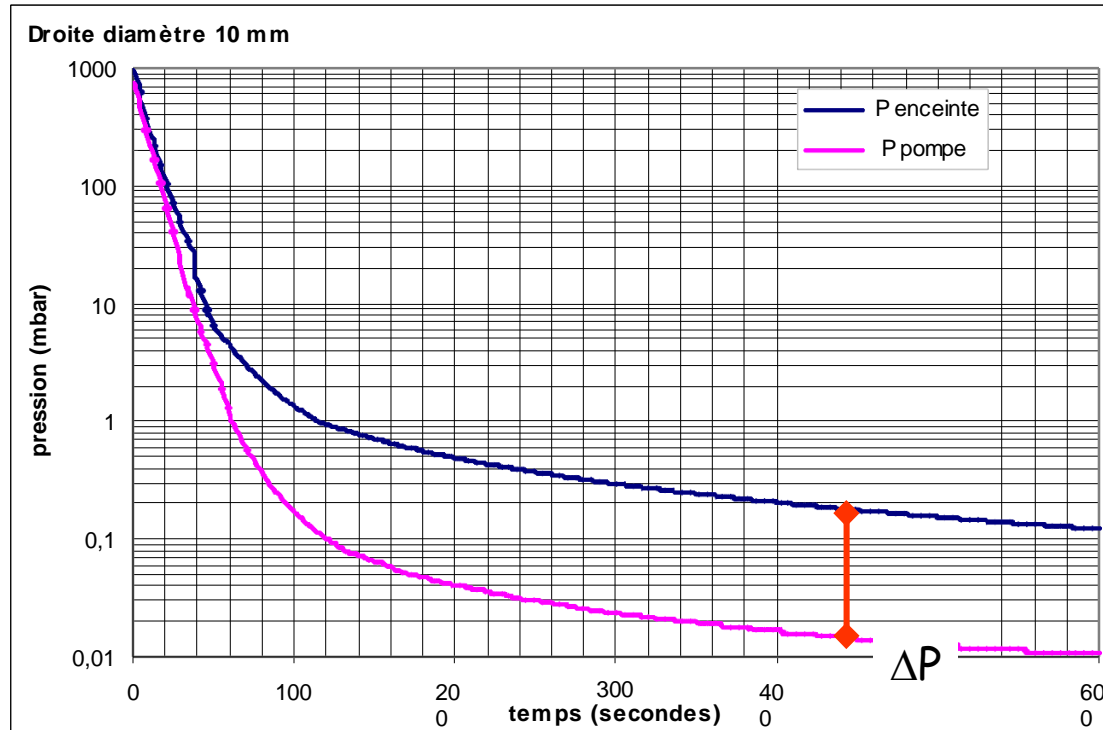
DV_E = Vitesse de pompage effective

Lorsqu'une pompe est raccordée à une enceinte par l'intermédiaire d'une canalisation de conductance C , l'efficacité de la pompe est diminuée.

- si $C \approx \infty \Rightarrow DV_E \approx DV_P$: faible perte de charge
- si $C \ll DV_P \Rightarrow DV_E \approx C, \forall DV_P$: le pompage dans la chambre est faible même avec une pompe puissante

conductance : facteur limitant la vitesse de pompage effective

Effet d'une canalisation sur le pompage effectif

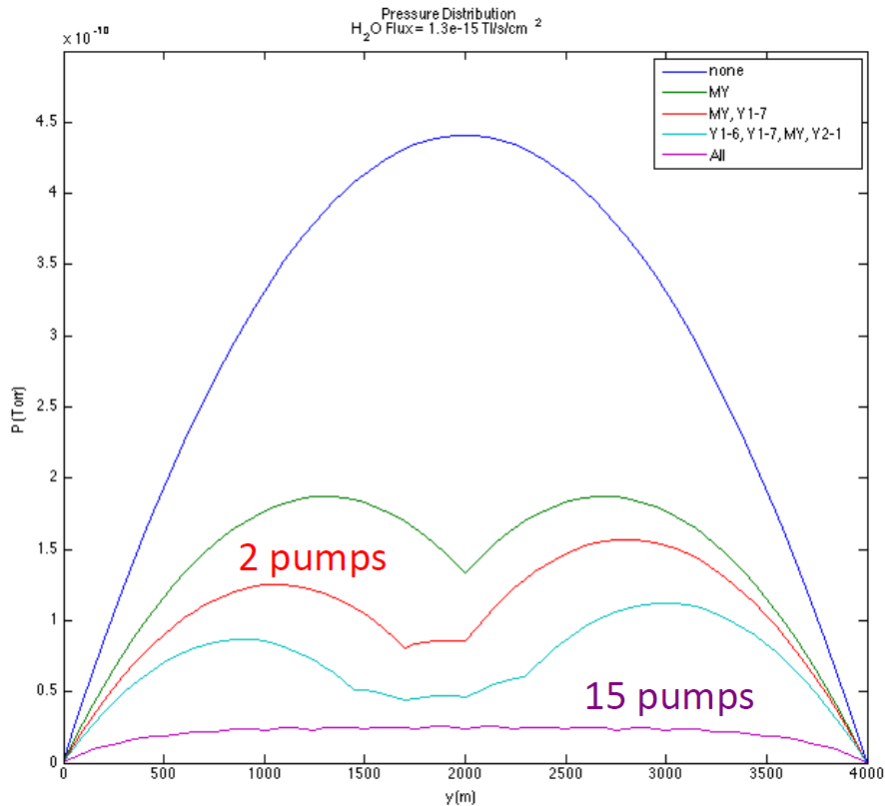


$$\Delta P = P_E - P_P = Q / C$$

Écoulement du gaz et pompage réparti

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 (CERN NEG pump)
- nb de pompes



Exemple R&D tube Einstein Telescope
De 4 km de long

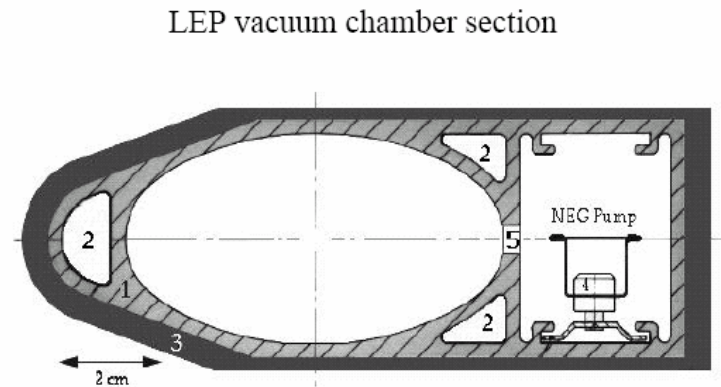
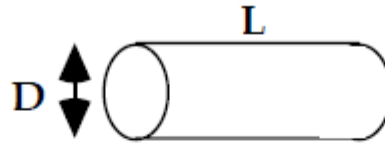


Fig. 2 : Vacuum chamber section made of (1) extruded aluminium profile with the elliptic beam channel, three cooling water ducts (2) and surrounded by 3 to 8 mm thick lead shield (3). The NEG pump (4) is housed in a separate pump channel connected to the beam channel by a row of longitudinal slots (5).

Conductance



Définition

- On définit la résistance à l'écoulement d'un flux dans une canalisation par sa conductance C .
- La conductance d'une canalisation est le rapport entre le flux gazeux qui circule et la différence de pression entre les deux extrémités

$$C = \frac{Q}{P_1 - P_2}$$

En régime d'écoulement moléculaire utiliser des canalisations courtes et de grands diamètres pour *optimiser* les conductances

Le calcul d'une conductance nécessite de connaître le régime d'écoulement dans la canalisation

Régime moléculaire

s^2 : surface de la section
U : périmètre de la canalisation
L : longueur de la canalisation

$$C = \frac{16}{3} \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} \cdot \frac{s^2}{UL}$$

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L} \quad \text{pour l'air à } 20^\circ\text{C}$$

Régime intermédiaire

$$C = 12,1 \frac{D^3}{L} \cdot J$$
$$J = \frac{1 + 271D \cdot \bar{P} + 4790(D \cdot \bar{P})^2}{1 + 3/6D \cdot \bar{P}}$$

Calcul du flux de dégazage total

$$Q_T = \text{flux unitaire} \times \text{surface}$$

Vitesse effective de pompage

$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C}$$

S_{eff} : vitesse effective de pompage au niveau de l'enceinte

S_p : vitesse de pompage au niveau de la pompe sans canalisation

C : conductance totale de la canalisation

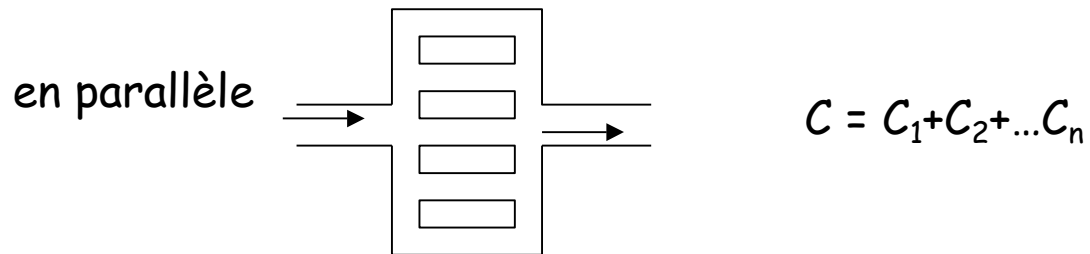
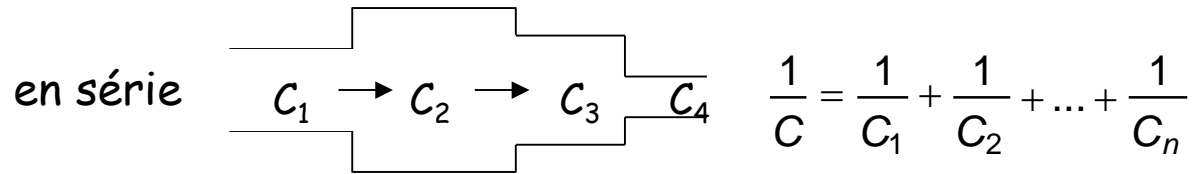
Vide limite

$$Q_T = P S_{\text{eff}} \Rightarrow P = \frac{Q_T}{S_{\text{eff}}}$$

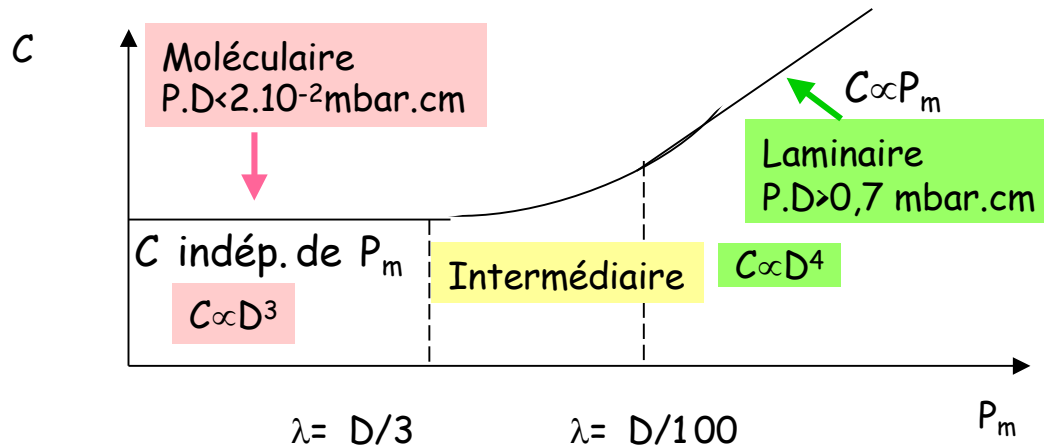
$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C} \Rightarrow \frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{C + S_p}{C S_p}$$

$$P = Q_T \times \frac{C + S_p}{C S_p}$$

Lois pour un réseau complexe de canalisations



Résumé, conséquences



A savoir!

Régime moléculaire : C est indépendante de P , les collisions avec les surfaces sont responsables de la résistance au pompage

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

Régime Laminaire: même lorsque la vitesse de pompage est constante (pompe), cette vitesse dépend de P_m au niveau du récipient

$$C = \frac{\pi D^4}{128 L \eta} P_m$$

Installations

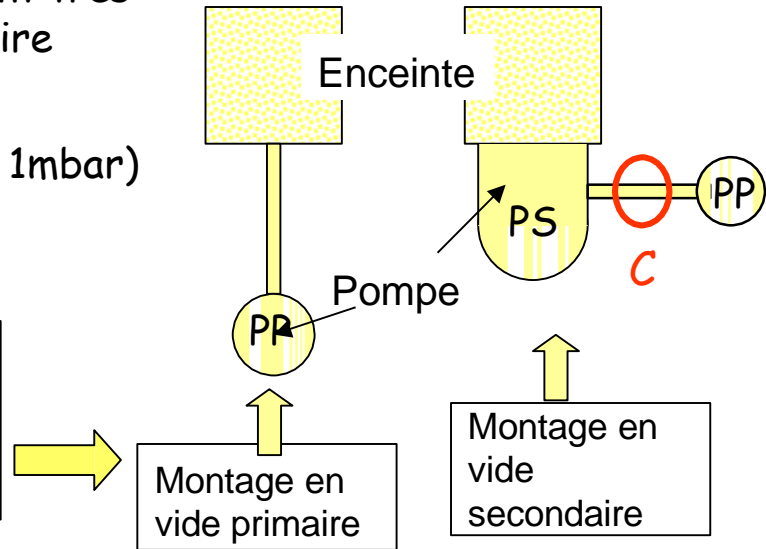
les conductances en régime visqueux sont très supérieures à celles du régime moléculaire

-> $\propto D^4 / D^3$

-> $\propto P_m$ (souvent supérieure à 1mbar)

-> Coefficient supérieur

Peu d'effet en régime visqueux, au début du pompage mais les pompes secondaires sont montées directement sur l'enceinte (C_{max})



Variation des conductances en fonction des gaz :

- peu utile en régime visqueux
 - important en régime moléculaire : correction en fonction de $\sqrt{\frac{T}{m}}$
- Ex : $C(H_2) = 3,8 C(\text{air})$
 $C(He) = 2,7 C(\text{air})$
 $C(\text{air à } 77K) = 0,51 C(\text{air à } 293 K)$

L'ultra vide (UHV)

Conditionné par 3 facteurs :

- **étanchéité parfaite** : surfaces lisses sans défaut, joints cuivre écrasés
- **absence de dégazage** : choix des matériaux (inox spécial), surfaces polies, **étuvage** pour effectuer le dégazage avant utilisation
- **propreté parfaite**: précautions de manipulation

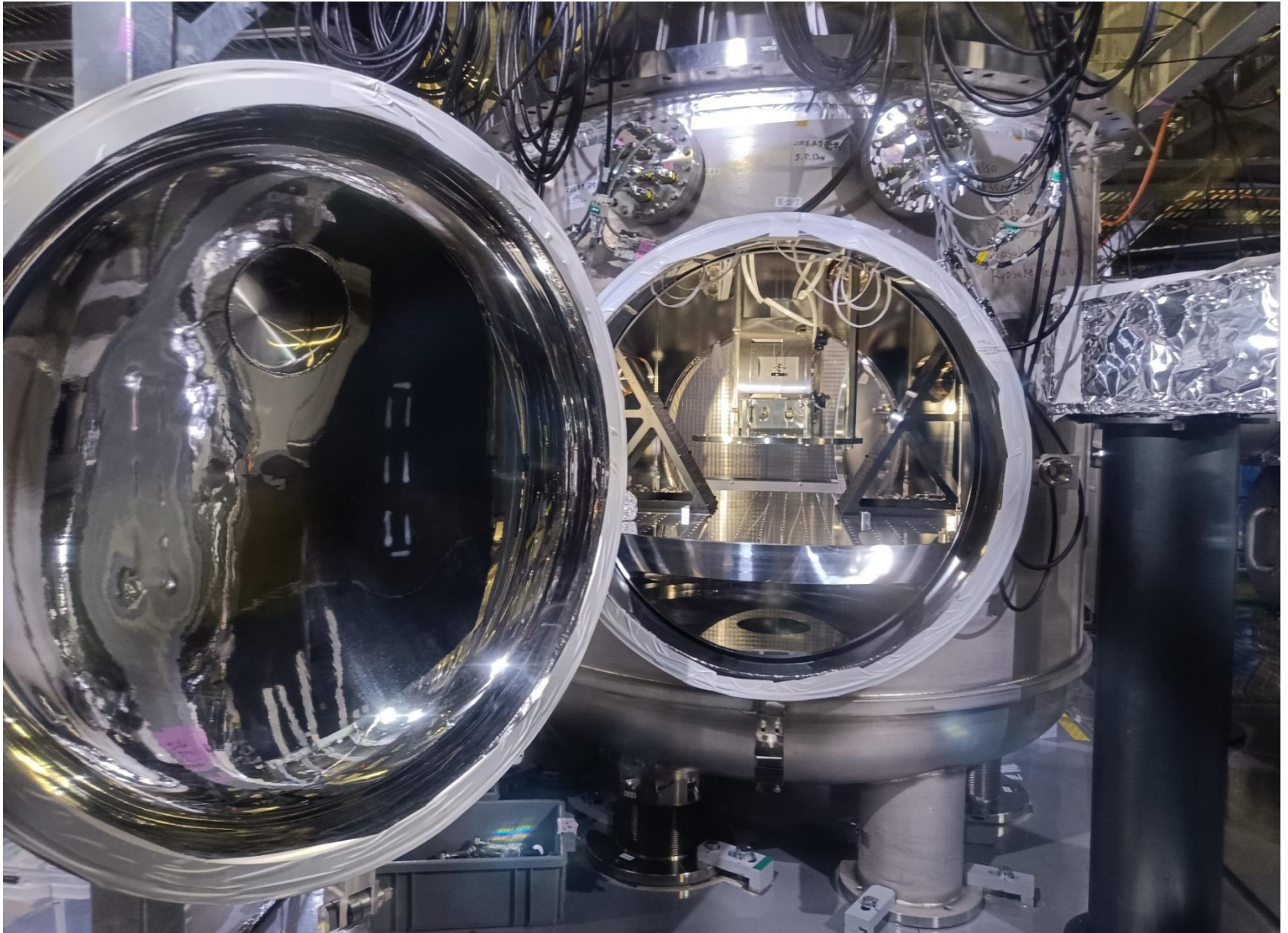
Etuvage :

- chauffage par rubans, caissons, lampe IR
- durée : 10 à 50 h
- température : 120 à 450 °C
- température uniforme nécessaire (point froid = condensation)
- les pompes sont aussi étuvées

Rappel :

- à 10^{-8} mbar, il faut 100 s pour former une monocouche de contamination
- à 10^{-10} mbar, il faut 3h...

Exemple chambre KAGRA

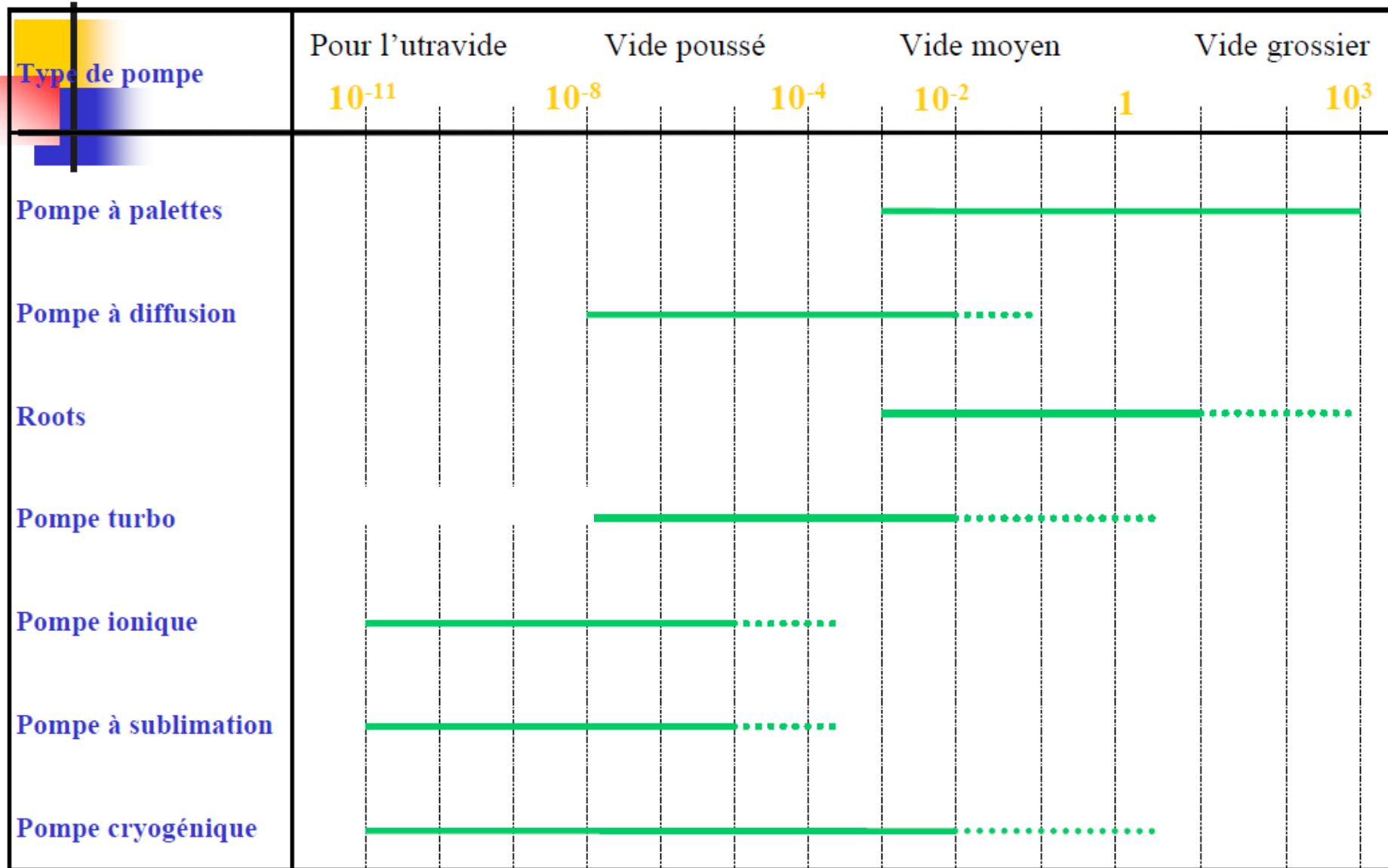


Les moyens de pompage

Caractéristiques principales des pompes à vide, 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 process
 - peu contaminante (technologie sèche)
 - pompage sélectif ou non
 - pas de vibration (paliers magnétiques)
 - critères de maintenance (zone INB)
 - ...
 - coût (investissement, maintenance)

Les moyens de pompage



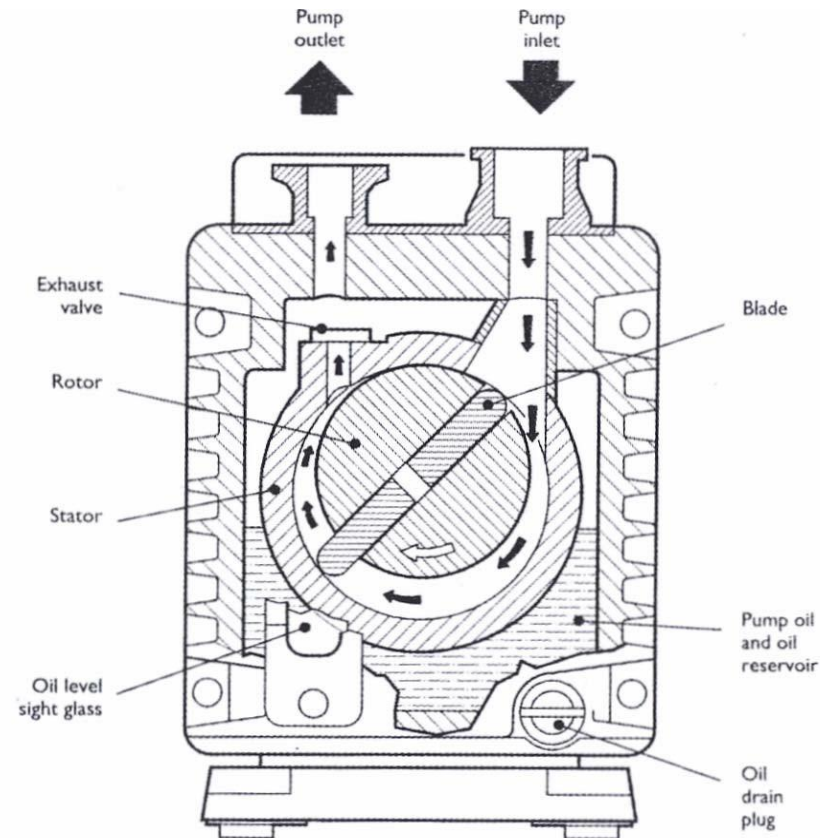
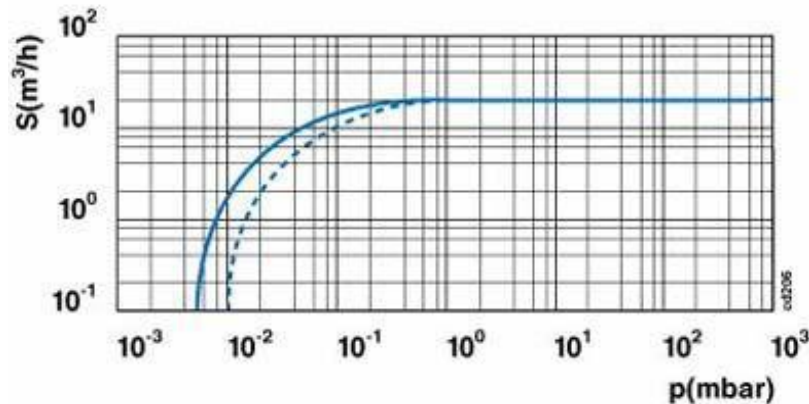
..... Zones de démarrage

Les moyens de pompage: pompe à transfert

Pompe à palettes

Pompe volumétrique rotative

- Y $P_i \sim 10^{-1}$ Pa
- Y Non sélective
- Y Présence d'huile (joint dynamique, lubrifiant, refroidissement)
- Y P_i limitée par Q_f et $Q_{dég. Huile}$ (T !!)



-fiable, faible coût



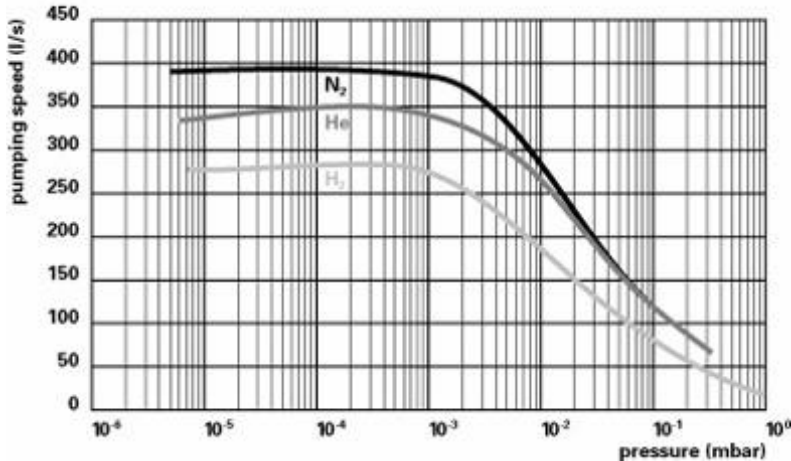
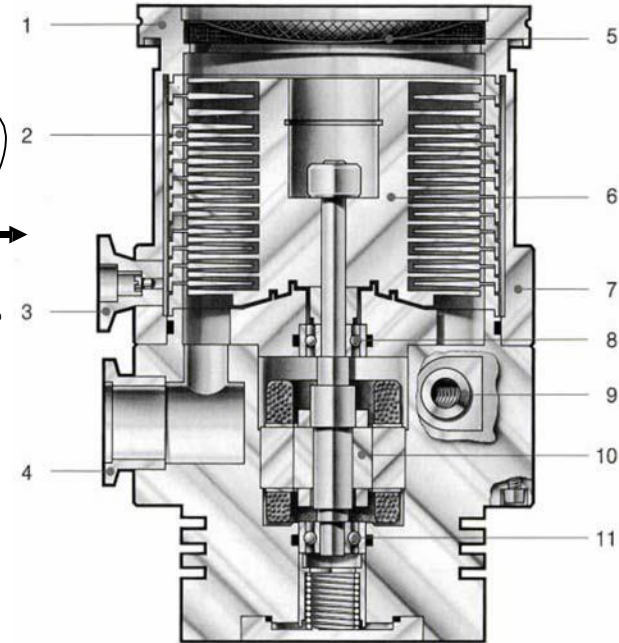
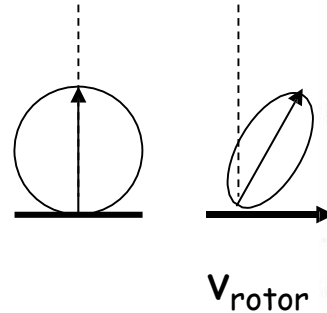
- présence d'huile

Les moyens de pompage: pompe à transfert

Pompes turbomoléculaires

Pompes cinétiques à parois mobiles

$P_{\max} \sim 1\text{Pa}$ $P_1 \rightarrow \text{UHV}$
 γK dépend de \sqrt{M} de v_{rotor}
 γ Couplage à une pompe primaire



- pompage propre (magnétique)
- pompage à transfert de flux
- évolution vers des pompes moins sélectives (H_2)

Les moyens de pompage: pompe à fixation

la pompe à sublimation de titane

Principe : un film de Titane sublimé est déposé sur une paroi et capture par chimisorption les particules gazeuses (formation d'un composé chimique stable -hydrure, nitrure, oxyde)

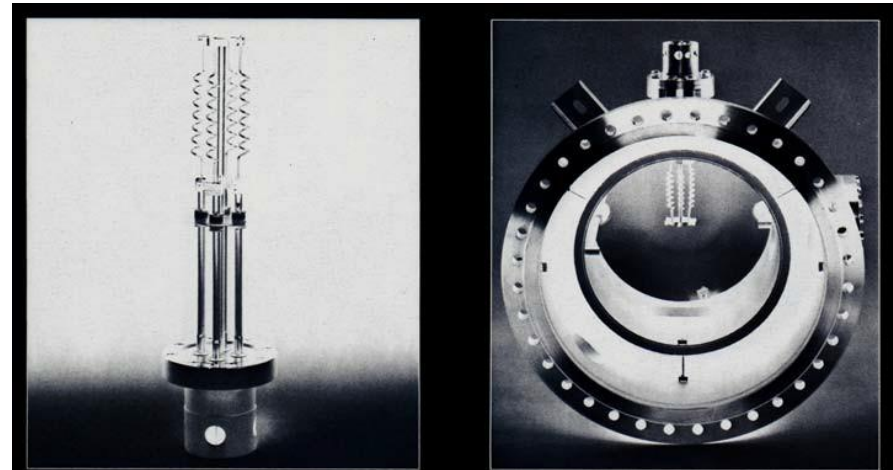
Les gaz nobles sont mal pompés (physisorption ou enterrement)



pompe sèche
débits volumes importants
simple



très sélective
filament chauffé
remontée de pression au flash



Les moyens de pompage: pompe à fixation

la pompe à getter (non évaporable)

- Pompage par **adsorption** sur un matériau getter suivi d'une **diffusion** dans le matériau.
- getter sous forme de ruban (alliage 84% Zr - 16% Al)
- le getter est **activé** à haute température par effet joule (700°C puis 400°C)
- les gaz rares et CH₄ ne sont pas pompés



H₂ pour UHV



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



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

Les moyens de pompage: pompe à fixation

la pompe ionique



Pompe utilisée en ultra vide, s'amorce en vide secondaire donc couplée à un groupe primaire+ secondaire (PTM par ex.)

$$P_{\max} \ll 10^{-4} \text{ Pa}$$

$$10^{-4} \text{ à } 10^{-12} \text{ mbar}$$



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



- faible q_v , pompe lourde
- durée de vie $\propto P^{-1}$
- effet mémoire

Dv faibles : ex 25 l.s⁻¹

Sélectives : bonne pour H₂, O₂, H₂O, moins pour He, Ne, pompe mal Ar

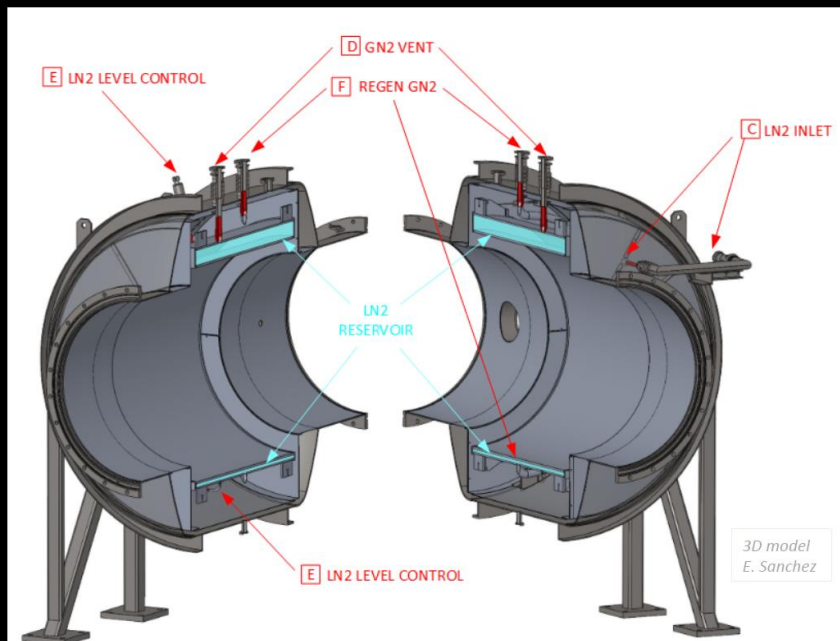
Les moyens de pompage: pompe à fixation

le cryopompage

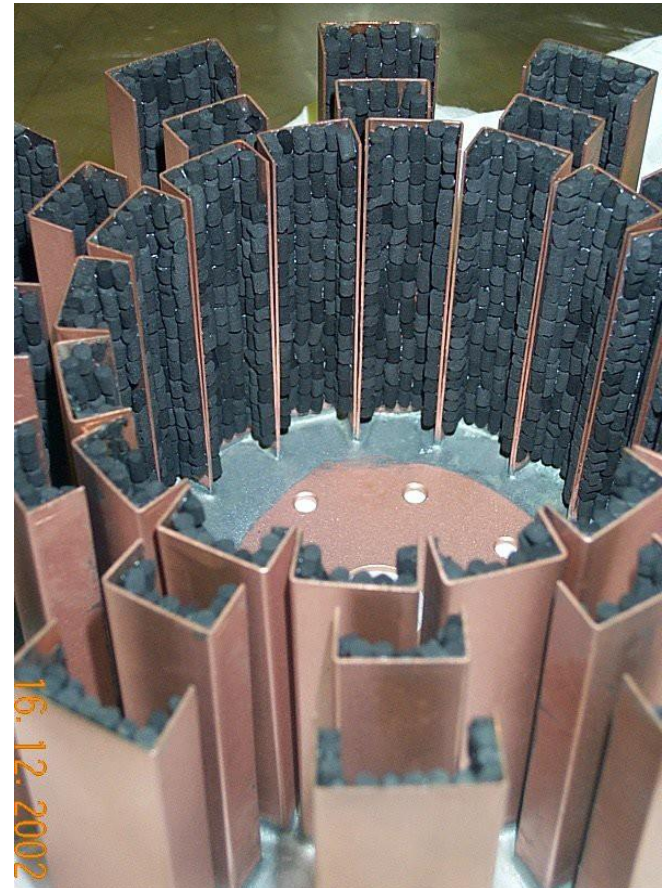
- condensation
- cryosorption sur adsorbants solides refroidis (physisorption)
- cryotrapping

Cryosorption de l' H_2 sur charbon actif refroidi à 20 K (couplage thermique par collage sur la source cryogénique)
Étage 20K sur cryopompe DN 800
(CSS - Ganil)

Passive 80K cryotraps pump water from detector components



9/1/2017



Les moyens de pompage: pompe à fixation

le cryopompage : sources froides

fluides cryogéniques (LHe, LN2)

- + puissance cryogénique, fiabilité
- gestion des cryofluides

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

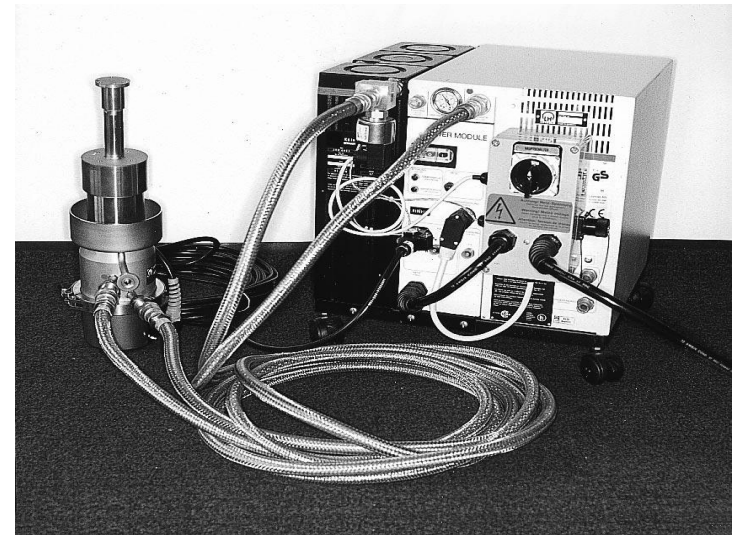
- + autonomie
- vibrations
- puissance limitée (12W@20K)



q_v élevé



régénération, vibrations, q_v He



Caractéristiques d'une pompe cryogénique

- **gamme de fonctionnement** : $10^{-3} > P > 10^{-10}$ mbar
- P élevée: la paroi est réchauffée par le gaz et la saturation est rapide
- pompe primaire nécessaire
 - pour abaisser pression dans la pompe avant mise en froid
 - pour abaisser P de l'enceinte sous 10^{-3} mbar

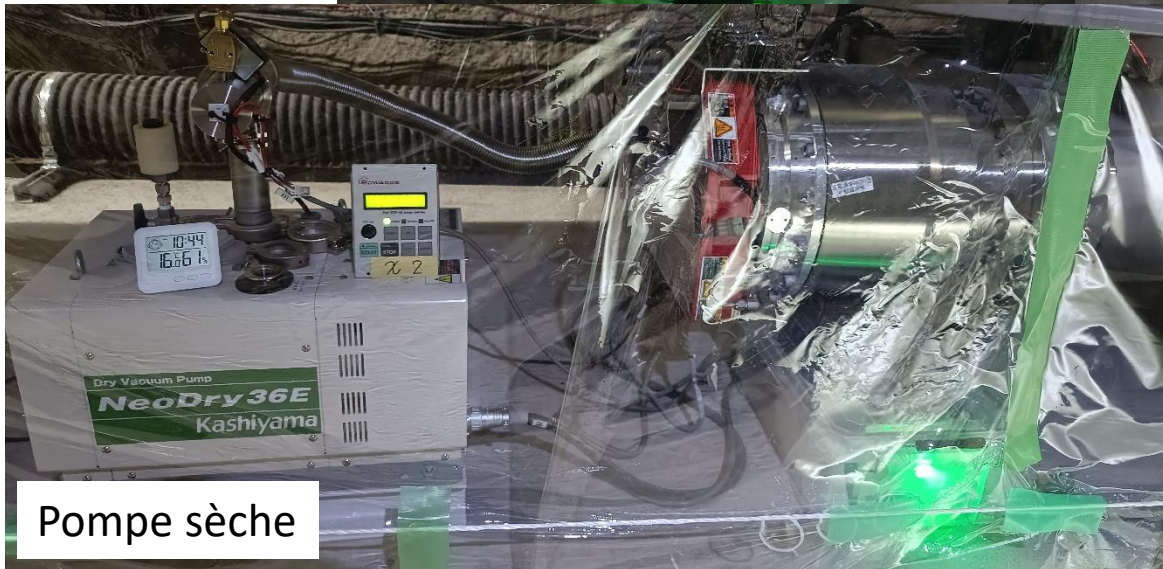
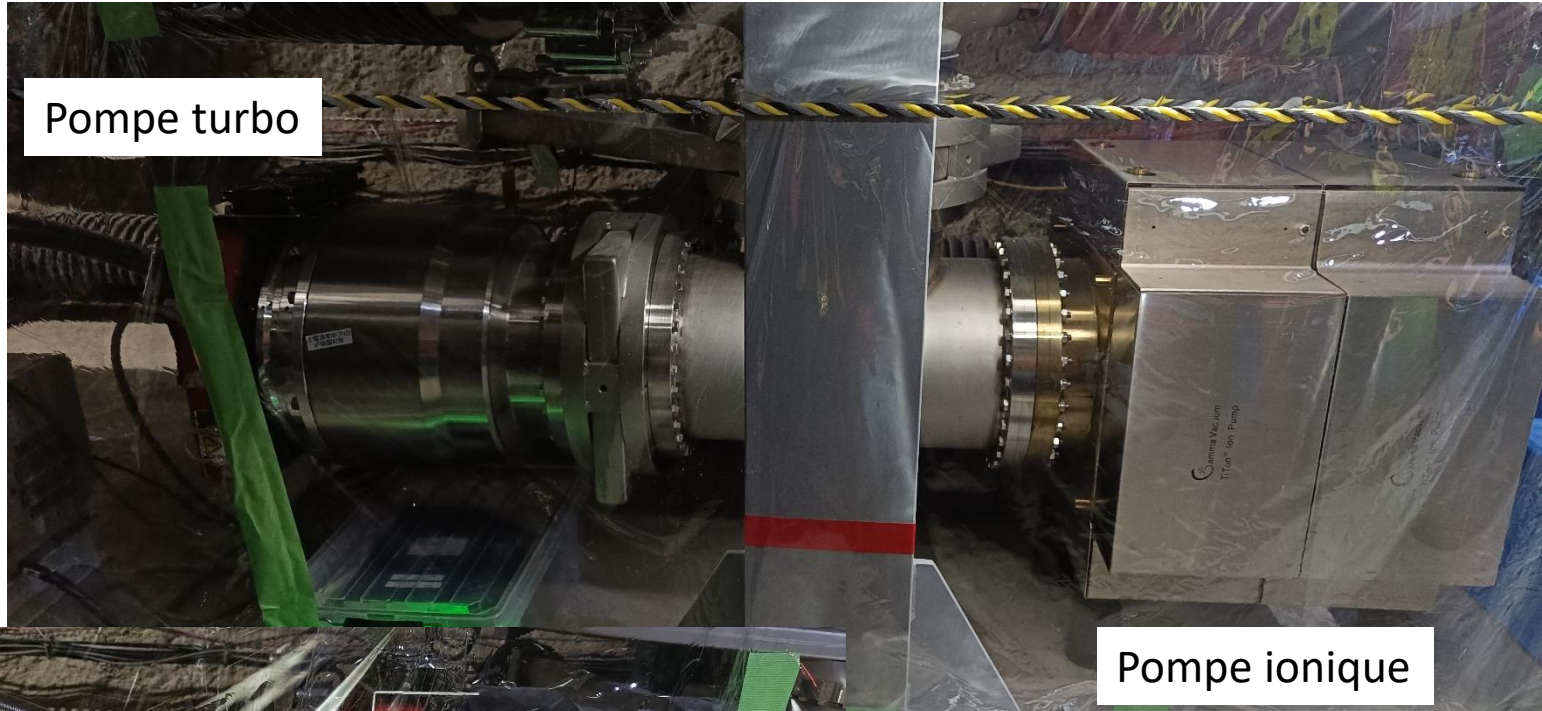
Ensuite, la pompe cryogénique peut être isolée (pas de transfert)

• **régénération nécessaire** : capacité de piégeage finie, l'épaisseur du "condensat" augmente, créant un gradient de température, la pompe est saturée et doit être réchauffée sous pompage

- **débit volume dépend de la nature du gaz**, très efficace pour vapeur d'eau
 - air : 1000 litres/s
 - eau : 3 à 4000 l/s
 - argon : 600 l/s
 - H₂ : 600l/s

- **efficace pour de forts débits à $P < 10^{-6}$ mbar**
- vide propre
- peut être « empoisonnée » si remontée de pression => régénération
- utilisée en fonctionnement continu
- vibrations basse fréquence

Exemple installation tube KAGRA



Mesure du vide

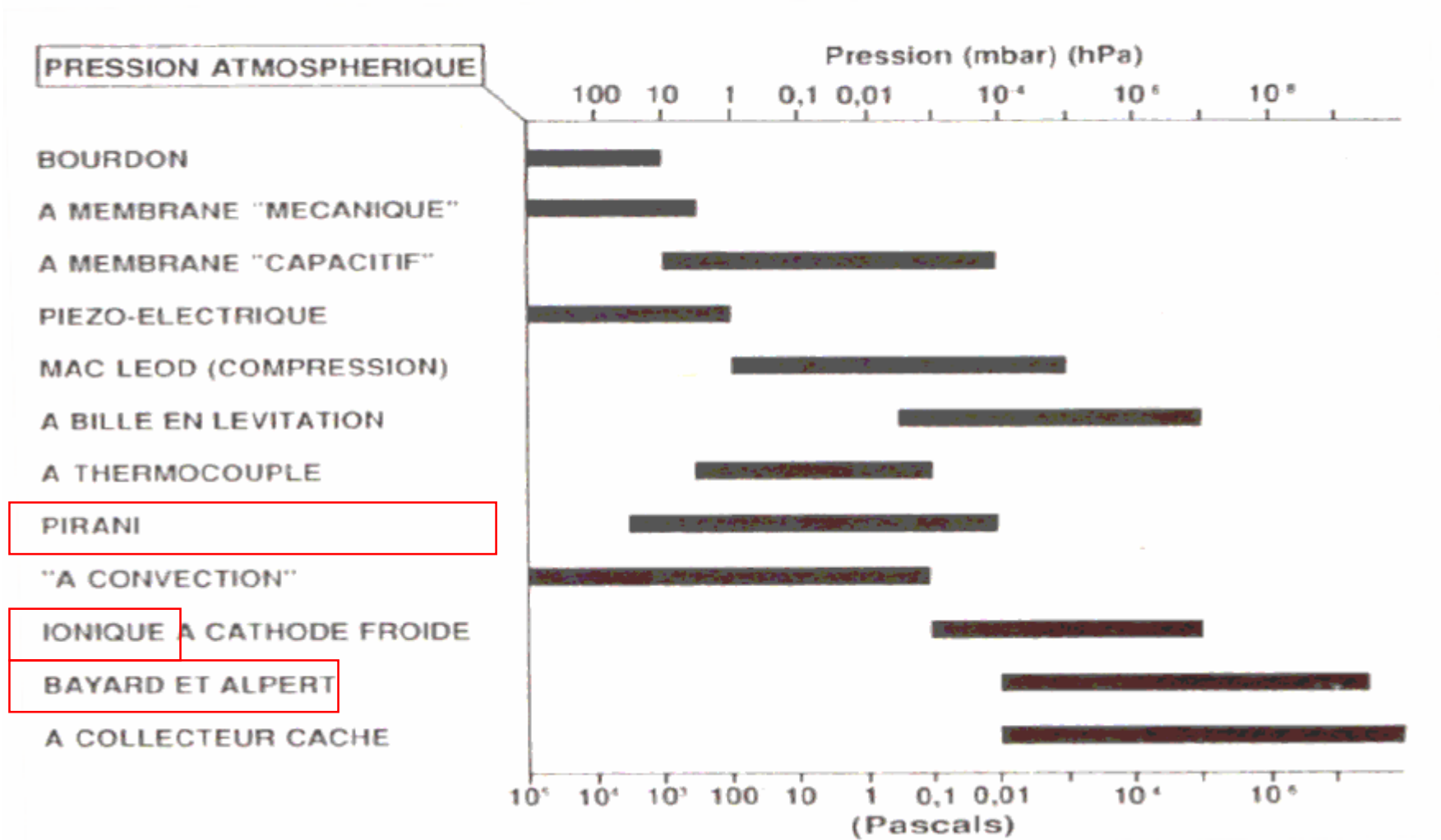
Qu'est-ce qu'on mesure ?

- directement la pression (**capteur vrai**)
- une propriété du gaz (le plus souvent)
- une pression qui ne dépend pas de la nature du gaz (**capteur absolu**)
- une pression qui dépend du gaz (**capteur relatif**, étalonné pour N₂)
- la pression totale
- les pressions partielles : **spectrométrie de masse**

Remarques :

- L'étendue de la gamme des pressions à mesurer (15 décades de Patm à UHV) implique **l'utilisation de plusieurs types de capteurs**
- les capteurs de vide sont plus de **bons indicateurs** du niveau de vide que des instruments de métrologie
- **à basse pression, la mesure de la pression se fait avec les capteurs à ionisation dont l'indication dépend de la nature du gaz** (la sensibilité peut varier d'un facteur 10, ils sont étalonnés pour N₂)

Type de manomètres



Manomètre à effet mécanique

manomètres de Bourdon

$P^* > 1 \text{ hPa}$

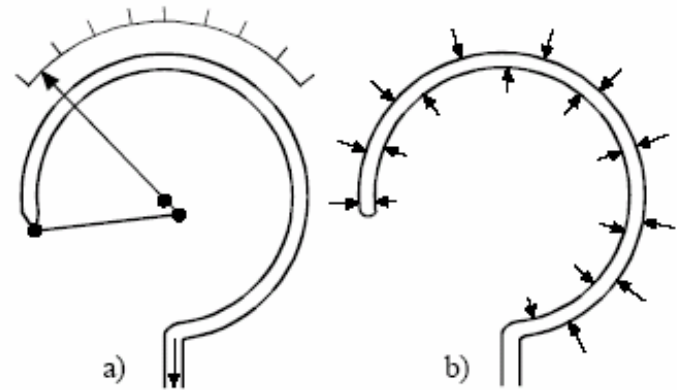
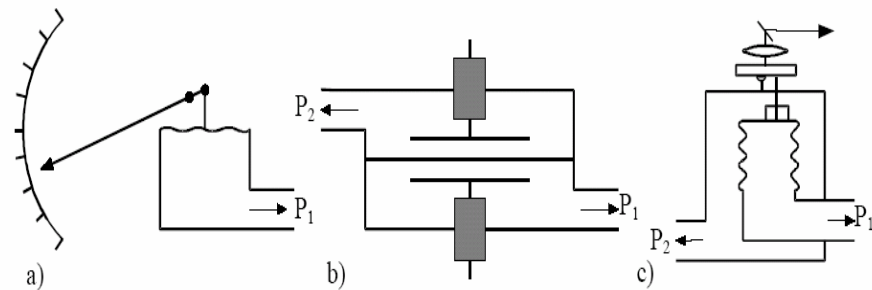


Fig. 2 Bourdon gauge, a) principle, b) distribution of forces

à membrane
piézorésistif (dépôt Si)
capacitif

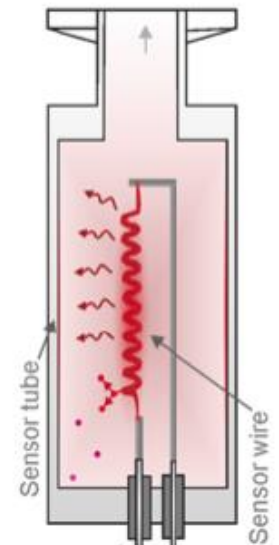


Manomètre thermique : la jauge de Pirani

C'est une jauge à filament (W, Pt) alimenté à courant constant. La diminution des échanges thermiques lorsque P diminue se traduit par une variation de sa résistance.

gamme : $50 - 10^{-3}$ hPa

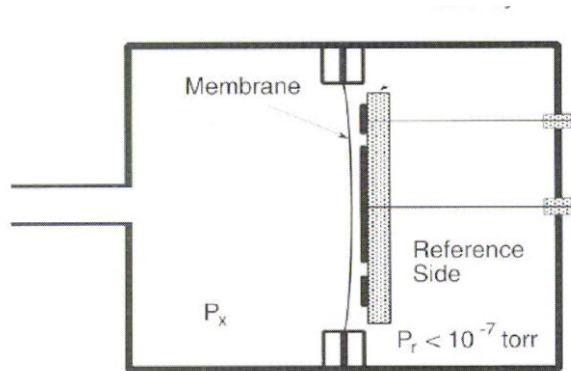
- capteur de vide primaire : de 60 mbar à 10^{-3} mbar
- capteur relatif : la sensibilité du capteur varie en fonction de la nature du gaz, étalonné pour N_2 en général (correction pour $H_2=0,67$, pour $Ar=1,58$)
- capteur robuste, indicateur du niveau de vide



Capteur à membrane

- principe basé sur la déformation d'une membrane suite à une différence de pression par rapport à une pression de référence
- capteur vrai, absolu
- capteur très sensible, rapide, robuste (gaz corrosifs)

Capteur à membrane capacitif (Baratron) $C = \frac{\epsilon \cdot S}{d}$ Variation de d en fonction de P



- Très utilisé
- grande dynamique : 4 décades de pression
- gamme : 10^3 à 10^{-4} mbar, selon membrane
- seul capteur précis entre 10^{-1} et 10^{-4} mbar

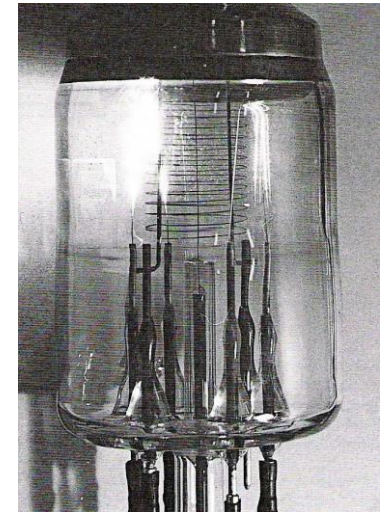
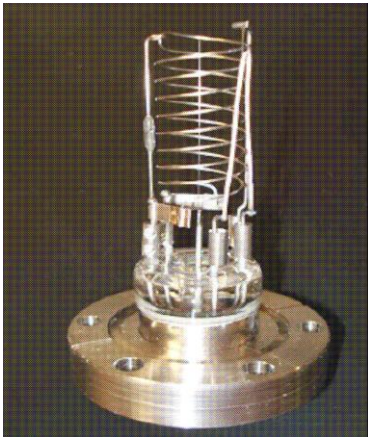
Autre type: **piézorésistif** :
membrane en matériau à fort effet piézorésistif (Si dopé)
Inconvénient : dérive thermique

Principe : ionisation du gaz résiduel

- ⇒ mesure la densité du gaz
- ⇒ mesure d'un courant ionique proportionnel à la pression : $i^+ \propto K P i^-$
- ⇒ dépend de la nature du gaz (probabilité d'ionisation)

Capteur ionisation - Bayard-Alpert

- capteur sensible, précis
- gamme de pression: 10^{-4} - 10^{-10} mbar
- étalonné pour N₂ (sensibilité varie en fonction de la nature des gaz)
- défaut : fragilité due au filament chaud, ne supporte pas les remontées de pression
- doit être dégazé : il se forme une couche de gaz adsorbés sur l'anode qui peuvent être désorbés sous forme d'ions (fluctuations)



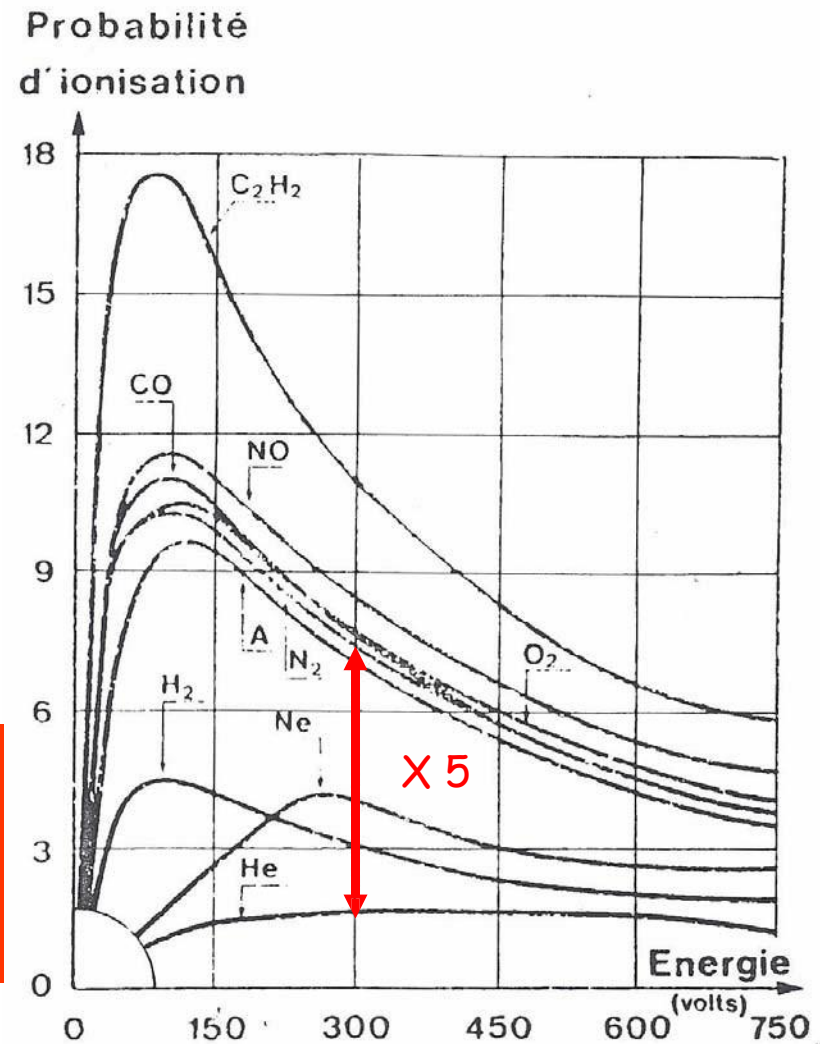
Inconvénient : pour $P < 10^{-10}$ mbar, les e^- émis par la cathode libèrent des X mous qui créent des photoélectrons. Ceux-ci induisent un courant "positif" ou "négatif" au collecteur.

Sensibilité des manomètres à ionisation suivant la nature du 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



Spectromètre de masse en techniques du vide

Analyseur de gaz résiduel (RGA)

Mesure du vide

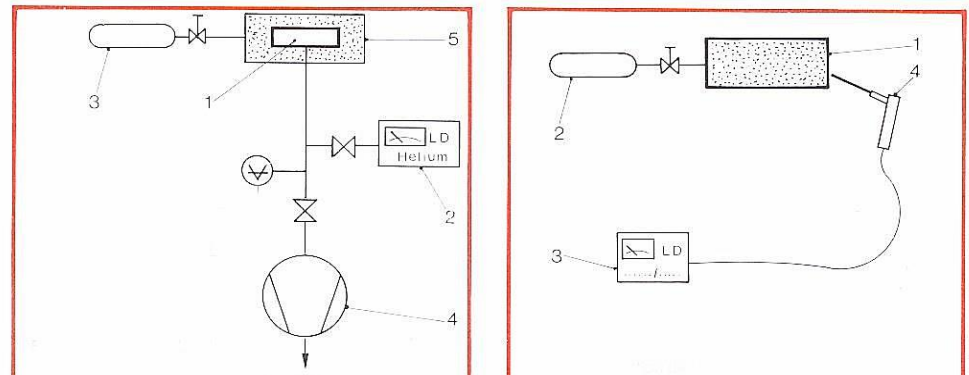
- les pompes aspirent chacun des gaz comme s'ils étaient seuls et sont plus ou moins sélectives
- modification de la composition le long d'une ligne de pompage (conductances)
- la mesure de la pression totale donne la somme de toutes les pressions partielles, gaz parfaits et vapeurs condensables

Contrôle de procédés

- déterminer les sources de pollutions, de dégazage, de fuites
- caractériser des réactions (décomposition, traitement thermique...)

! temps de réponse

$$\theta_{63\%} = \frac{V}{S_{He}}$$



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

Pression partielle du composant n

$$P_n = \frac{I_n^+}{S_n}$$

I_n = courant ionique mesuré du composant n
 S_n = sensibilité de l'appareil pour le gaz n

H ₂ O	$2 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{mb}^{-1}$
N ₂	$2 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{mb}^{-1}$
O ₂	$1,4 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{mb}^{-1}$

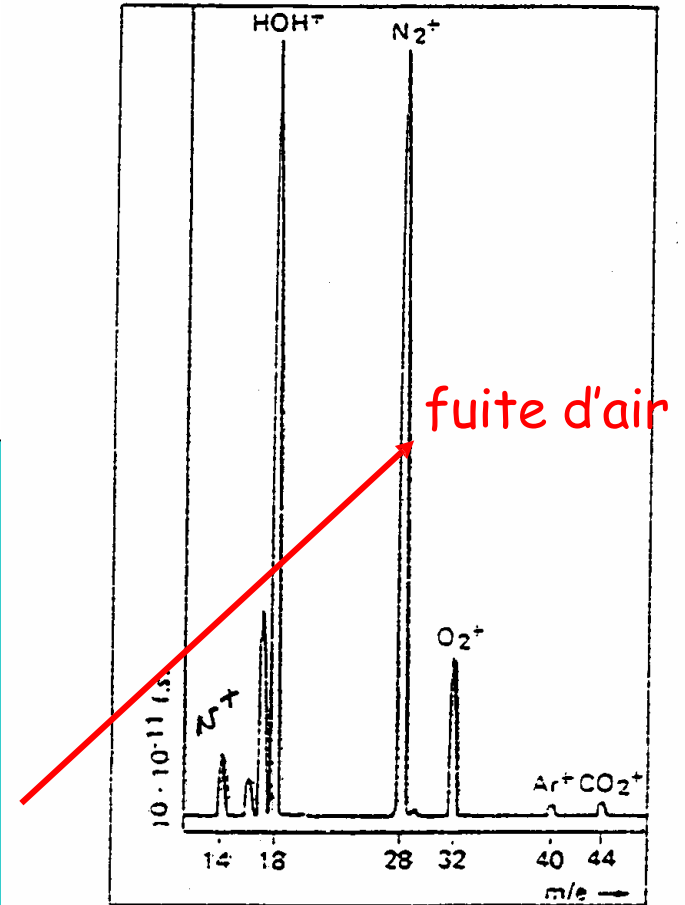
$$P_{18} : 5 \cdot 10^{-7} \text{ mb}$$

$$P_{28} : 5 \cdot 10^{-7} \text{ mb} \Rightarrow$$

$$P_{32} : 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ mb}$$

$$P_{N_2} / P_{N_2} + P_{O_2} = 78\%$$

$$P_{O_2} / P_{N_2} + P_{O_2} = 21\%$$



Quelques références

P. Dolégiéviez - Le vide - Ecole des accélérateurs – Novembre 2007

Christian GIANESE – Institut NEEL

Simone CASSETTE – Polytech 2011

Ludovic SALVAGNAC – Le vide

Bruno MERCIER – Le degazage – Lille - 2011

G. Rommel.

Les Techniques de l'Ingénieur B4020 à B4120. Paris.

Merci de votre attention