



---

# Le vide dans les accélérateurs

P. Dolégiéviez

*dolegievieviez@ganil.fr*

Ecole des Accélérateurs - IN2P3  
La Londe Les Maures 14 - 18 Septembre 2009



# sommaire

---

1. Généralités
2. Eléments de théorie
3. Technologie du vide
4. Exemples de systèmes de vide :
  - le Ganil
  - le projet Spiral 2 : contraintes particulières



# 1. Généralités

---

## Qu'est ce que le vide ?

*Petit Larousse* : espace où les particules matérielles sont fortement raréfiées ( $P < P_{\text{atmosphérique}}$ )

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

Technique du vide : technologie mise en œuvre pour obtenir et maintenir des pressions  $< P_{\text{atm.}}$



# 1. Généralités

---

avant d'aller plus loin

unités de pression utilisées dans le domaine du vide :

le Pascal (SI)	(1N/m <sup>2</sup> )
le mbar (UE)	
le Torr (US)	
le mmHg ..	(=1Torr)
	1 Torr = 133,3 Pa

**1 Pa = 10<sup>-2</sup> mb**  
**1hPa = 1 mb**



# 1. Généralités

---

## 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

# 1/ Le vide : tout autour de nous

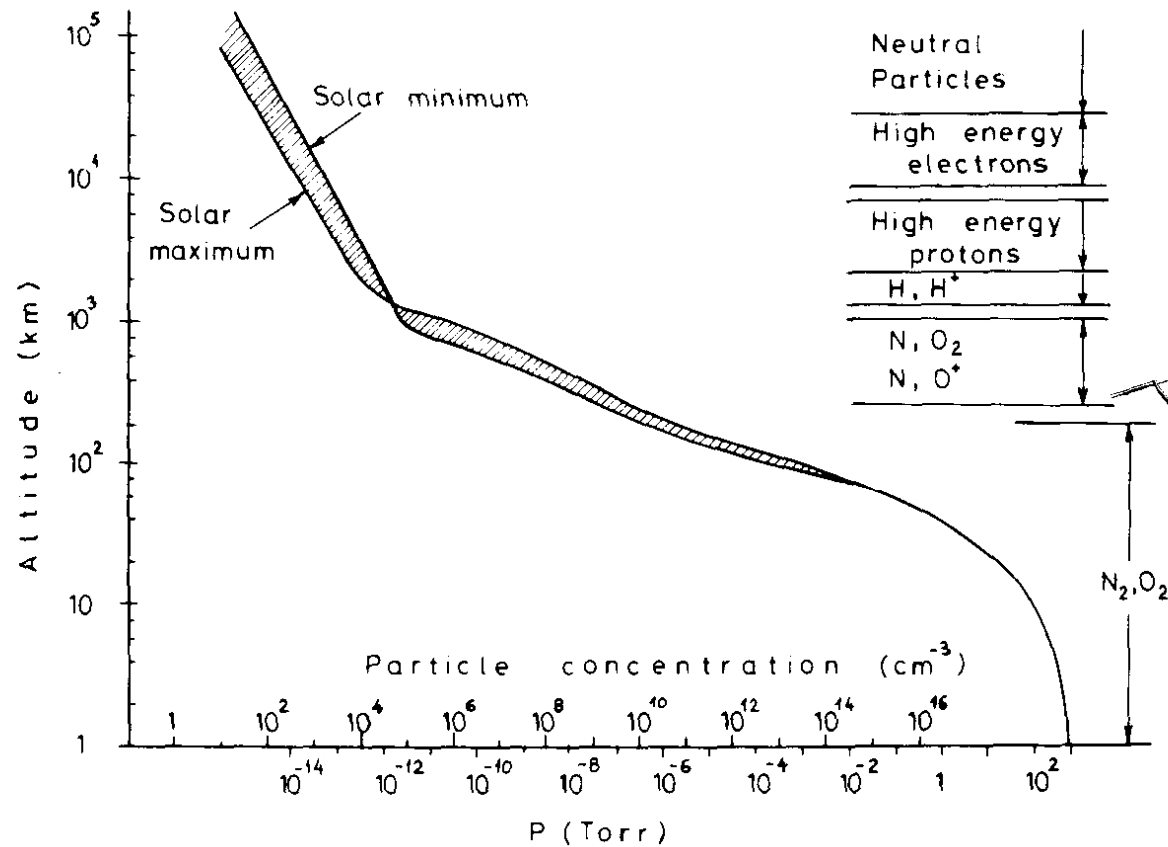


Fig. 1.2 Characteristics of the high altitude atmosphere surrounding the earth. Plotted after data from Nicolet (1960), Dushman and Lafferty (1962), Holkeboer *et al.* (1967), Rittehouse and Singletary (1968), Champion (1969).

# 1/ 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.)	$10^{-22} - 10^{-24}$


$P \Rightarrow \exp^{-h}$

$P_{\text{exp}} \sim 10^{-12} \text{ hPa}$

# 1/ Composition de l'air atmosphérique sec

		Concentration (%)	Pression partielle (mbar)
Azote	N <sub>2</sub>	78	780
Oxygène	O <sub>2</sub>	21	210
Argon	Ar	0.93	9.3
Gaz carbonique	CO <sub>2</sub>	0.03	0.3
Néon	Ne	0.0018	1.8 10 <sup>-2</sup>
Hélium	He	0.0005	5 10 <sup>-3</sup>
Krypton	Kr	0.0001	1 10 <sup>-3</sup>
Hydrogène	H <sub>2</sub>	0.00005	5 10 <sup>-4</sup>
Xénon	Xe	0.000006	6 10 <sup>-5</sup>

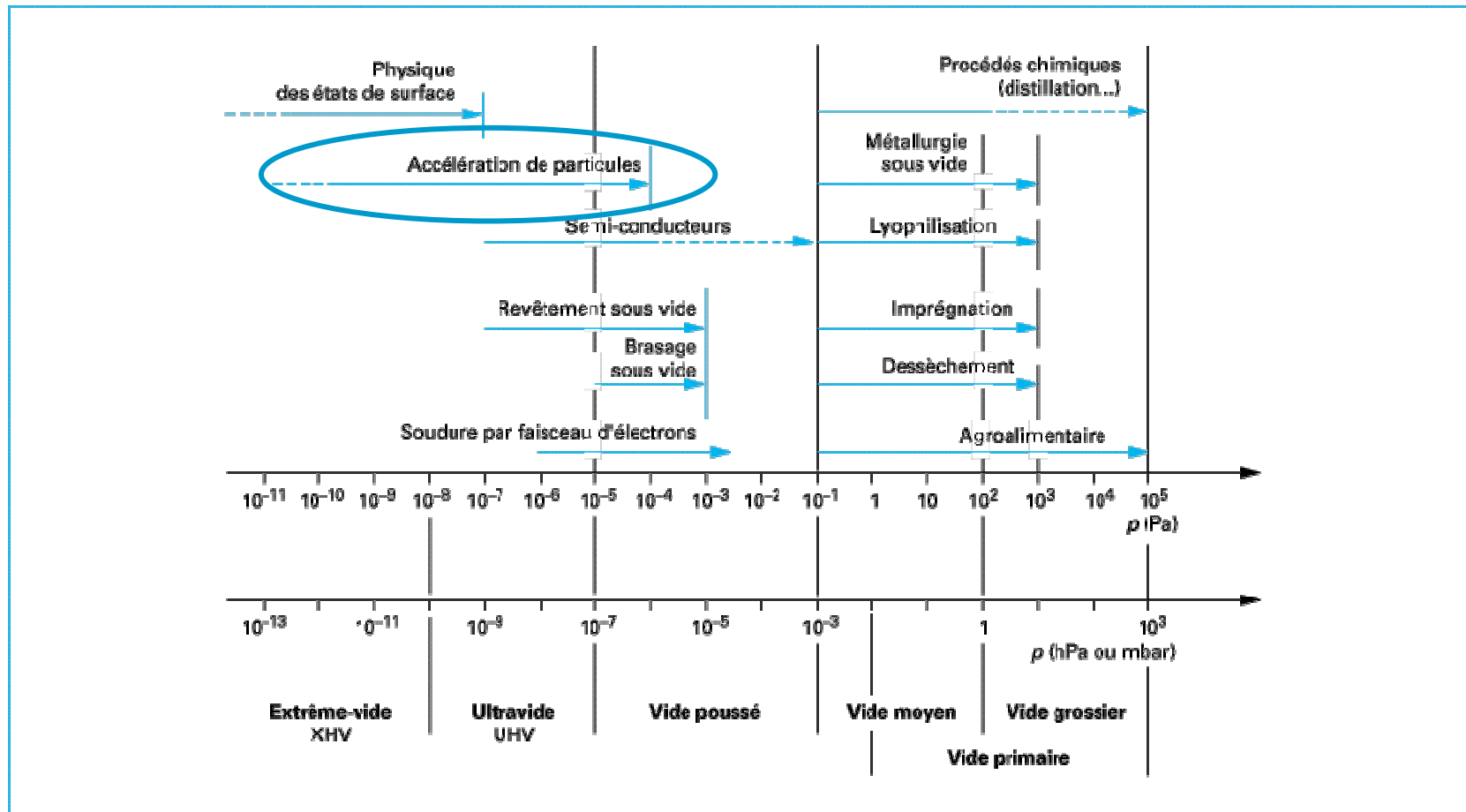
$\varepsilon = 65\%$   
 $P_p(\text{H}_2\text{O}) = 15 \text{ mb}$



$$P_T = \sum P_P$$



# 1/ Le vide : pourquoi faire ?



Domaine d'application étendu  $\longrightarrow$  choix d'une technologie adaptée

# 1/ Le vide : pourquoi faire ?

---

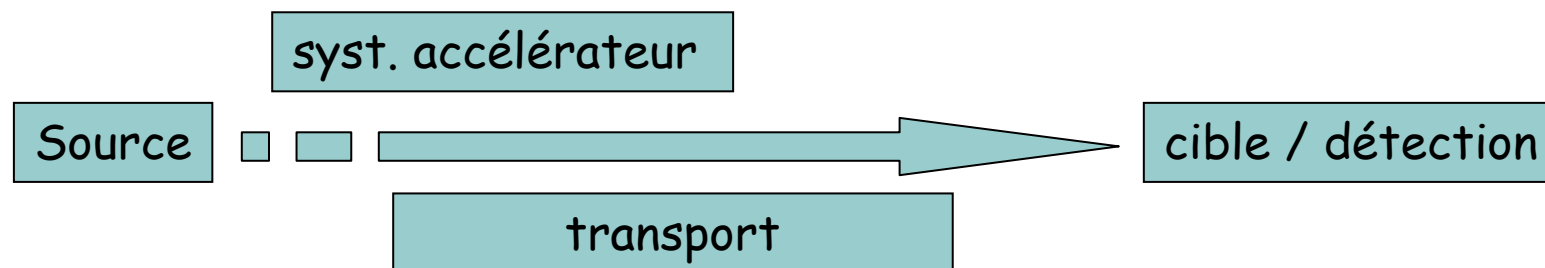
dans les accélérateurs de particules :

➤ limiter les interactions du faisceau avec le gaz résiduel  
perte du faisceau par collision avec le gaz résiduel

- Collisions élastiques
- Collisions inélastiques :
  - perte d'énergie
  - échange de charges 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..)



## 2.1/ Grandeurs fondamentales

P (hPa)	Force par unité de surface	Nb volumique (moléc./cm <sup>3</sup> )	Libre parcours moyen	Nb de chocs (cm <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )	Tps de formation d'une monocouche
1013	1 kg/cm <sup>2</sup>	2,5.10 <sup>19</sup>	0,1 μm	2,9.10 <sup>23</sup>	3,4.10 <sup>-9</sup> s
1	1 g/cm <sup>2</sup>	2,47.10 <sup>16</sup>	0,1 mm	2,9.10 <sup>20</sup>	3,4.10 <sup>-6</sup> s
10 <sup>-3</sup>	1 mg/cm <sup>2</sup>	2,47.10 <sup>13</sup>	10 cm	2,9.10 <sup>17</sup>	3,4.10 <sup>-3</sup> s
10 <sup>-6</sup>	1 μg/cm <sup>2</sup>	2,47.10 <sup>10</sup>	100 m	2,9.10 <sup>14</sup>	3,4 s
10 <sup>-9</sup>	10 μg/m <sup>2</sup>	2,47.10 <sup>7</sup>	100 km	2,9.10 <sup>11</sup>	1 heure
10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-2</sup> μg/m <sup>2</sup>	2,47.10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup> km	2,9.10 <sup>8</sup>	40 jours
10 <sup>-23</sup>	10 <sup>-7</sup> μg/km <sup>2</sup>	2,47.10 <sup>-7</sup>	10 <sup>16</sup> km	2,9.10 <sup>-3</sup>	10 <sup>10</sup> ans

## 2.2/ Description macroscopique : loi des gaz parfaits

---

*Hypothèses* : gaz permanents et vapeurs éloignées des conditions de liquéfaction

Loi d'Avogadro  $M = 29.d$   $M$ : masse molaire  
 $d$ : densité du gaz  
(273K / 1 atm.)

→ des volumes égaux de gaz différents (mêmes cond. de T et P) contiennent le même nb. de molécules

→ dans les conditions normales (TPN) une mole de gaz occupe 22,4l et contient  $N$  molécules

avec  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  molécules

Soit aux conditions TPN une densité moléculaire  
 $n = N_A / V = 2,7 \cdot 10^{19}$  molécules/cm<sup>3</sup>

Conditions TPN :

$$T_0 = 273,15 \text{ K}$$
$$P_0 = 1 \text{ atm} = 1013,25 \text{ hPa}$$

## 2.2/ Description macroscopique : Loi des gaz parfaits

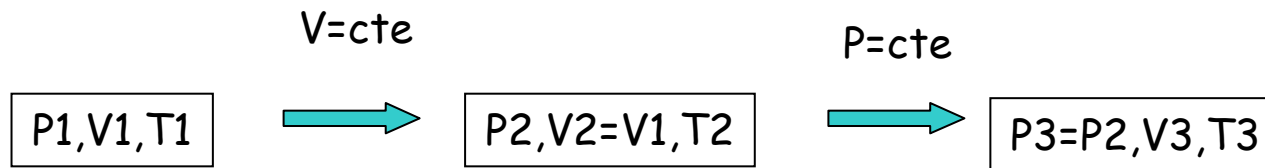
→ *Evolution du nb. de molécules avec la pression et la température*

Transformation isotherme :  $PV = \text{cte}$  (loi de Mariotte)

Transformation isobare :  $V/T = \text{cte}$  (loi de Gay Lussac)

Transformation isochore :  $P/T = \text{cte}$  (loi de Charles)

Un gaz vérifiant les trois lois précédentes serait soumis à la loi d'état :  $PV/T = \text{cte}$



$$P_2 = (P_1/T_1)T_2$$

$$V_3 = (V_2/T_2)T_3$$

$$P_2 V_3 = P_1 V_2 (T_3/T_1)$$

$$P_3 V_3 = (P_1 V_1)/T_1 \quad T_3$$

$P V = R T$

PV a la dimension d'une énergie ( $E_p$ )

$R =$  constante des gaz parfaits = 8,314 J / K. mole

## 2.2/ Description macroscopique : Loi des gaz parfaits

*pour n moles*  $P V = n R T$

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

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

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

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

avec  $n_V$  densité moléculaire

la pression est proport. à la densité moléculaire ...

loi des gaz parfaits => description macroscopique

- 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)

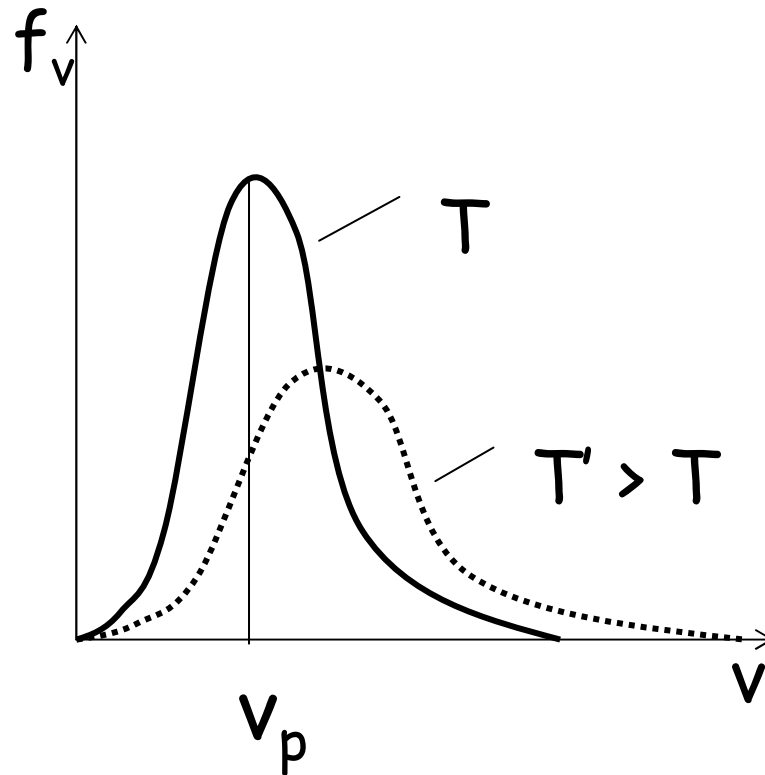
## 2.3/ Description microscopique : théorie cinétique des gaz

---

basée sur les hypothèses :

- gaz constitué 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)

## 2.3/ Distribution des vitesses (Maxwell - Boltzmann)



à  $20^\circ\text{C}$ ,  $v_p \sim 400 \text{ m/s}$  ( $\text{N}_2$ )  
 $v_p \sim 1500 \text{ m/s}$  ( $\text{H}_2$ ) 5400 km/h ...

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 ( $E_c$ )

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

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



## 2.3/ Pression et densité moléculaire

---

La force de pression résulte des chocs des molécules sur les parois. Si les molécules et les parois sont à la même  $T^\circ \Rightarrow$  pas d'échange d'énergie, chocs élastiques

D'où la force de pression = variation de la qtté de mouvement  $\Rightarrow 2mv$

Soit la pression  $P = 2mv \cdot G$  avec  $G$  nb de choc. $s^{-1}.m^{-2}$

Pour un cube de volume unitaire, toutes les directions de  $v$  sont équiprobables. Le nb de chocs sur une des 6 faces du cube est

$$G = n_v (v/6) \quad \text{avec } n_v \text{ densité moléculaire}$$

$$\text{d'où} \quad P = 1/3 \cdot n_v \cdot m \cdot v^2$$

en prenant la vitesse quadratique moyenne  $v_c$

$$P = n_v \cdot K \cdot T$$

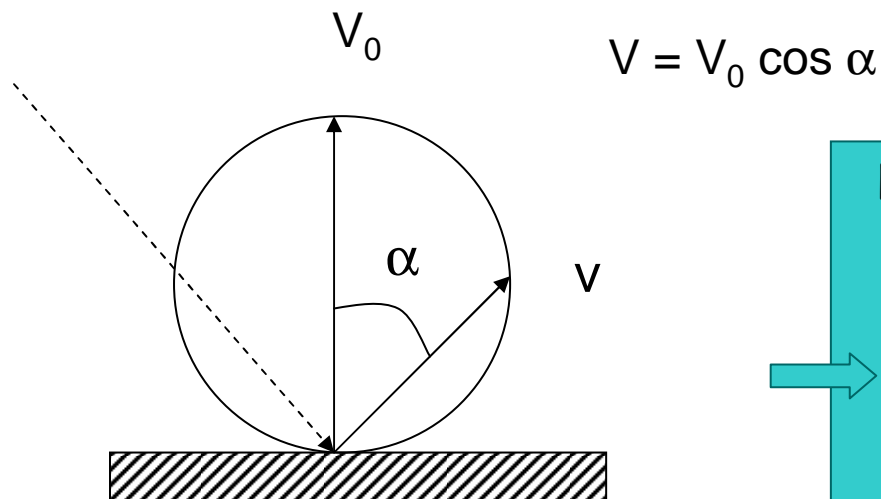
*Pour  $P = 10^{-11} \text{ Pa}$  technologie XHV ( $\sim$  limite exp.)*

*à 293 K, il reste 2500 molécules/cm<sup>3</sup> ...*

## 2.3/ Chocs sur les parois

- Le choc d'une particule gazeuse avec une paroi ne suit pas la loi de la réflexion (boule de billard)

La particule séjourne sur la paroi ( avec un **temps de séjour  $\tau_s$**  ) puis est ré-émise dans une direction avec une probabilité donnée par la loi de Lambert



Fondamental pour le calcul des écoulements gazeux à très basses pressions ( $l_m > d$ )

écoulement gazeux difficile à basses pressions (régime moléculaire)

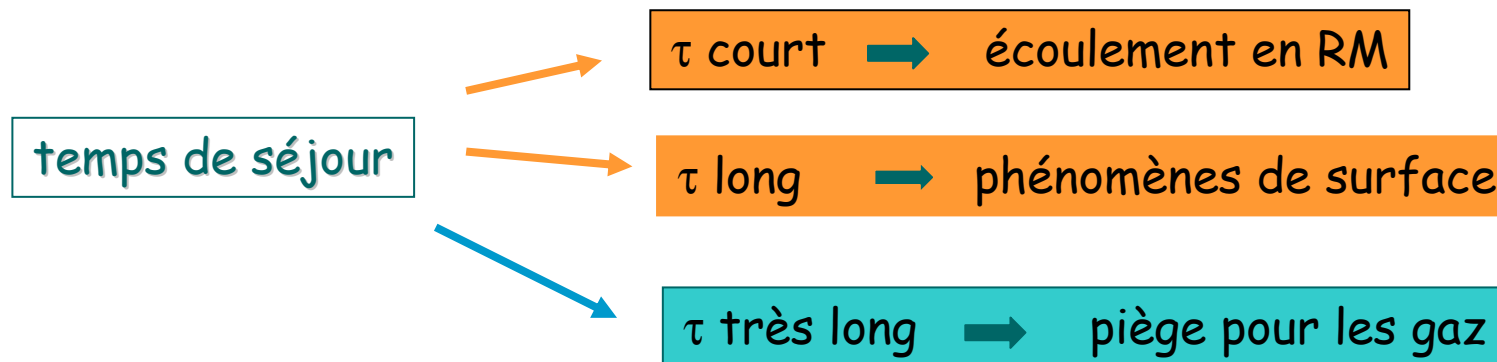
## 2.3/ temps de séjour sur la parois

$$\tau_{\text{séjour}} = \tau_0 \exp(E / RT)$$

avec  $E$  : chaleur d'adsorption  
 $\tau_0$  : période d'oscillation de la molécule adsorbée ( $\sim 10^{-13}$  s à  $20^\circ\text{C}$ )

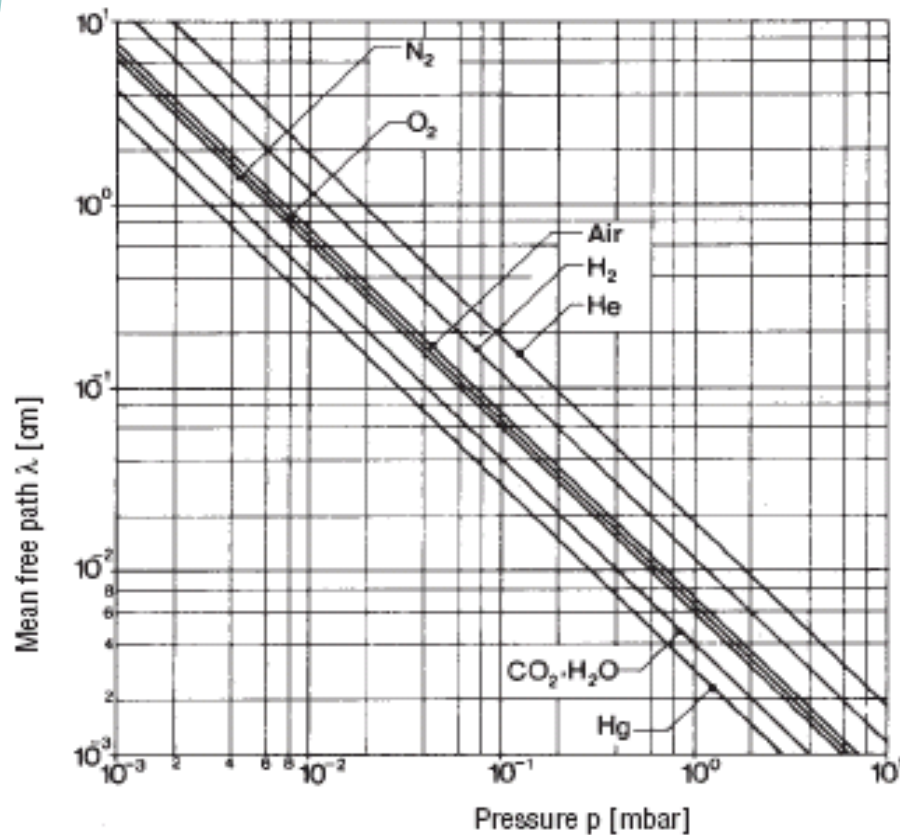
$E$  dépend de la nature du gaz et de la parois

$\text{N}_2$	2 à 3	kcal/mole	} physisorption	} adsorption
$\text{H}_2\text{O}$	10 à 25	kcal/mole		
$\text{H}/\text{H}_2$ sur Fe	32	kcal/mole	} chimisorption	



## 2.3/ libre parcours moyen

$$l_m = \frac{1}{n \cdot d^2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{d^2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} \frac{k \cdot T}{P}$$

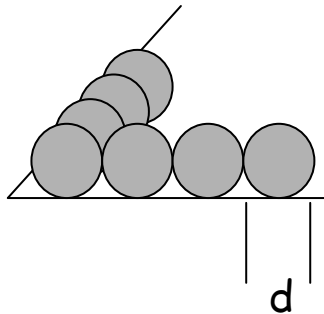


$L_m$  → définition du vide poussé  
(interaction des molécules de gaz avec les parois, régime d'écoulement)

## 2.3/ temps de formation d'une monocouche

Cas idéal, permet d'apprécier la propreté d'une surface  
(en terme de quantité de gaz)

Taux d'incidence ou nb de chocs de molécules par unité de temps et de surface :  
 $n = \frac{1}{4} \cdot n_v \cdot V_m$  (théorie cinétique)



Pour former une monocouche, il faut un temps :

$$\tau = \mu_s / n \quad (\mu_s \text{ nb de molécules par unité de surface})$$

pour des molécules alignées :

$$\mu_s = 1 / d^2 \quad (d \text{ diamètre de la molécule})$$

$$\tau = \frac{\mu_s}{1/4(nv_m)} = \frac{\sqrt{2\pi}}{d^2 n} \sqrt{\frac{M}{RT}}$$

*nb. de molécules pour une monocouche  
(pour  $N_2$  :  $\mu_s = 7 \cdot 10^{18} / m^2$ )*

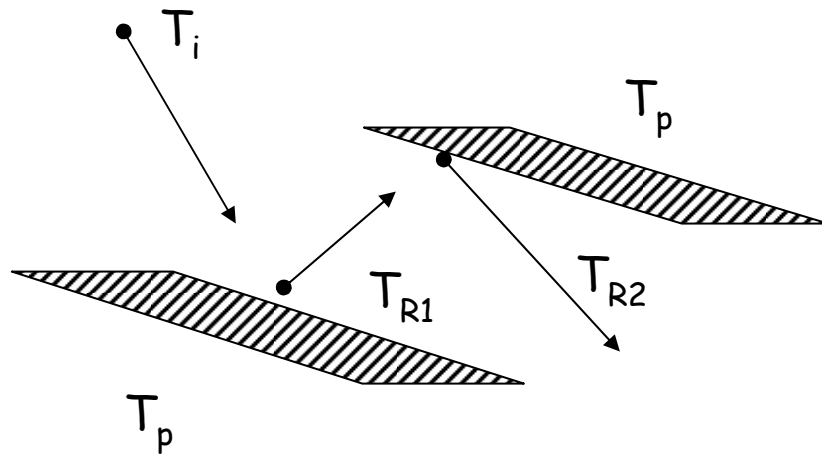
*pour  $N_2$  à 300K*

$$\tau = 2,5s \text{ à } 10^{-4} Pa$$

$$\sim 7h \text{ à } 10^{-8} Pa$$

## 2.3/ accomodation

$T_{\text{gaz}} \neq T_{\text{paroi}} \Rightarrow$  échange d'énergie entre le gaz et la paroi



$$\alpha = \frac{T_R - T_i}{T_p - T_i}$$

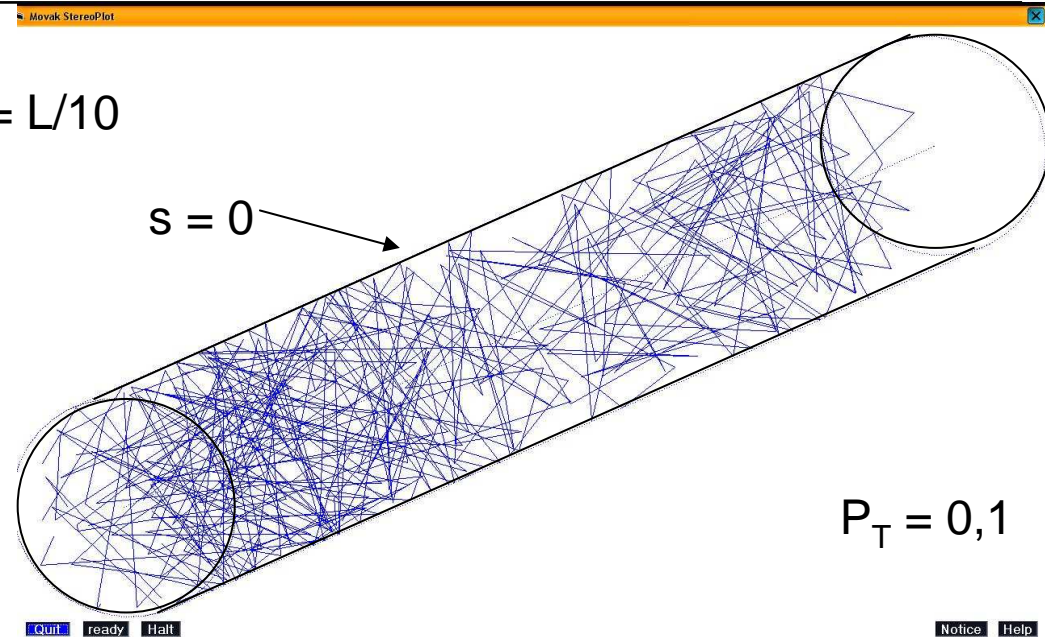
Le coefficient d'accommodation définit la capacité d'une paroi à échanger de l'énergie avec une molécule de gaz (modifier sa  $T^\circ$ ).

dans les cryopompes, optimisation du coefficient  $\alpha$  ( $\rightarrow 1$ ) et de la géométrie des surfaces froides pour 'thermaliser' le gaz

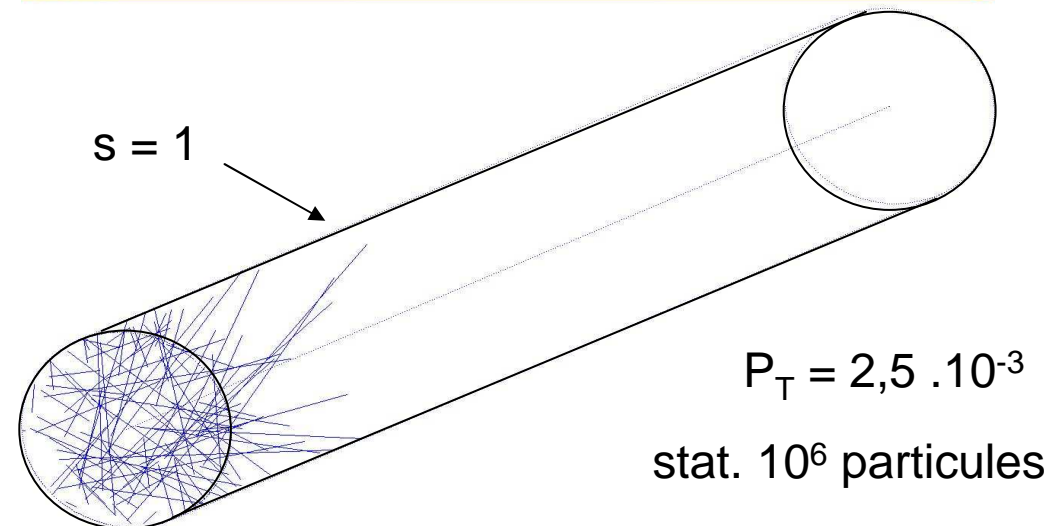
## 2/3 probabilité de transfert (régime moléculaire)

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

$$\Phi = L/10$$

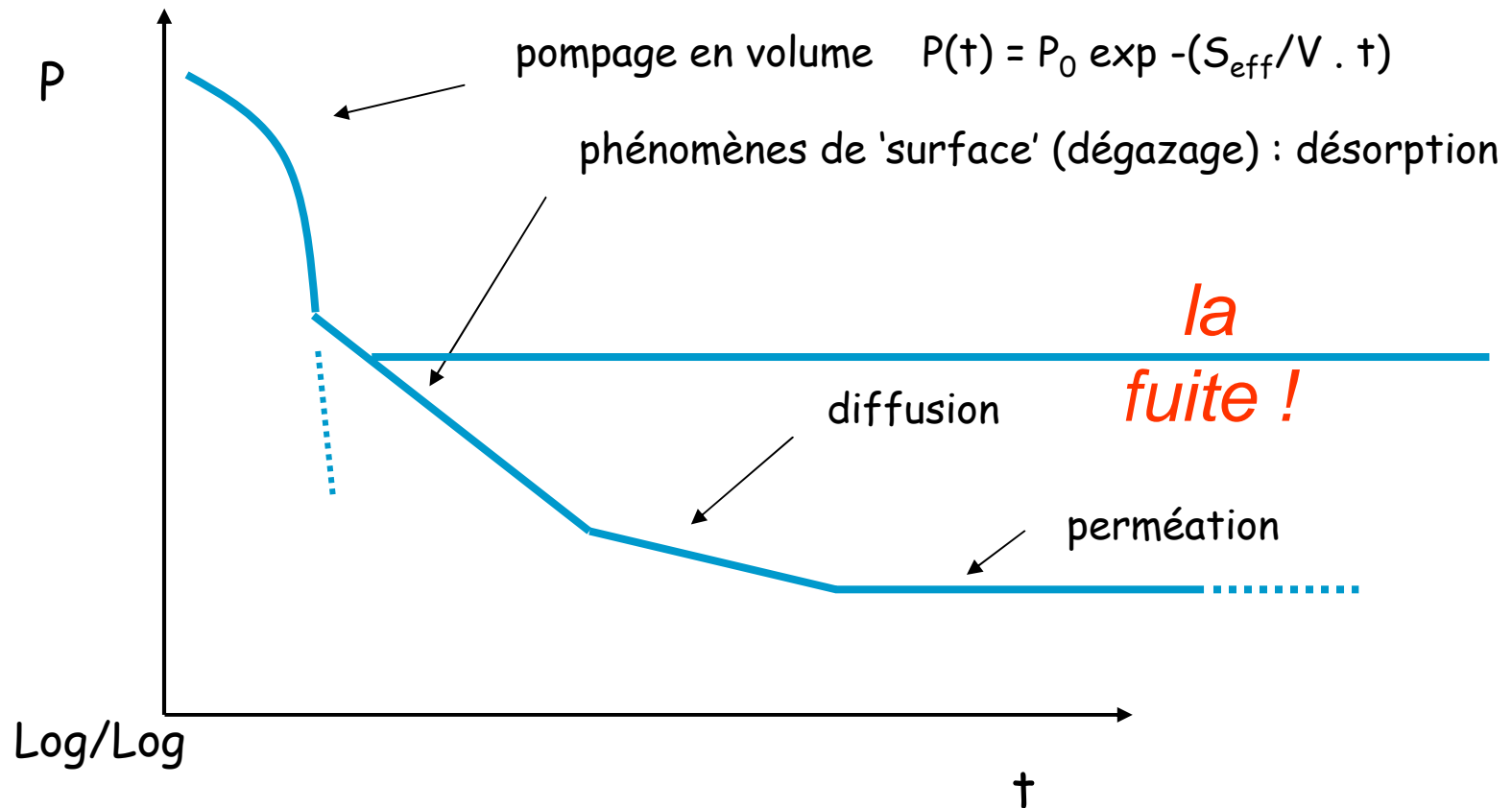


Prise en compte du coefficient de collage  $s$



## 2.4/ Bilan des flux gazeux

### Analyse de la descente en pression

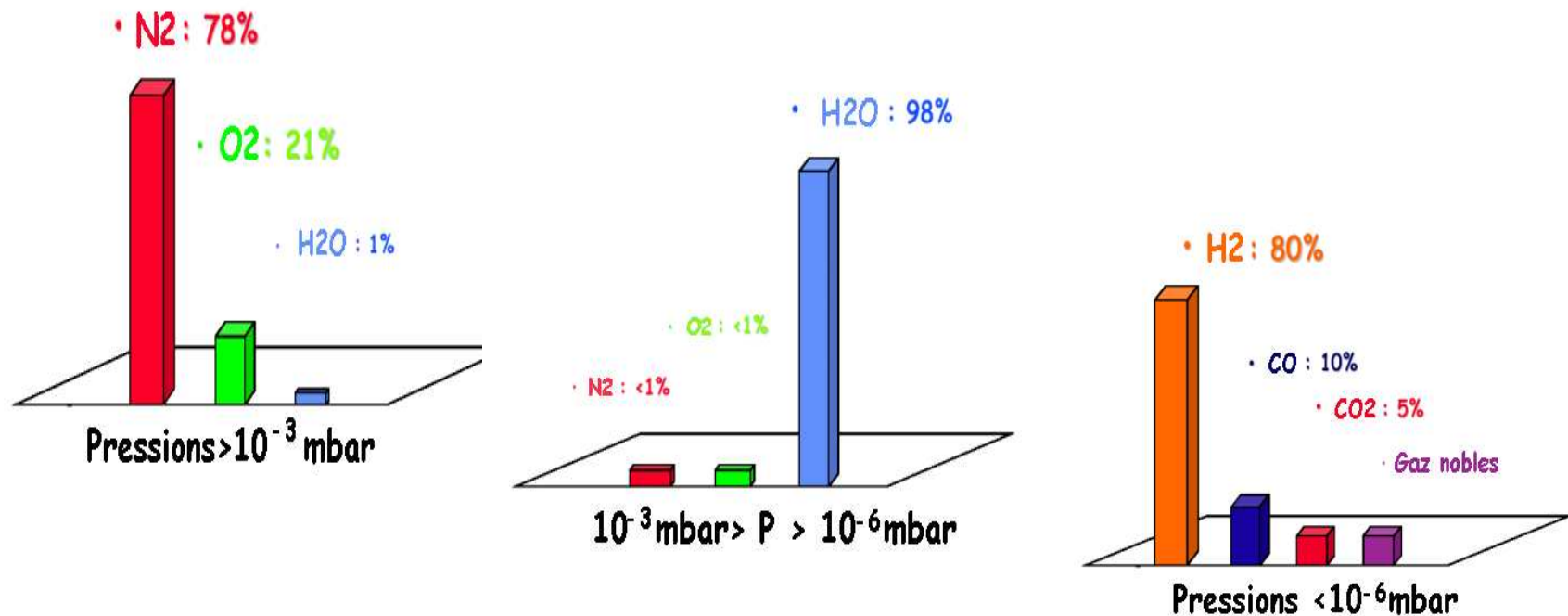




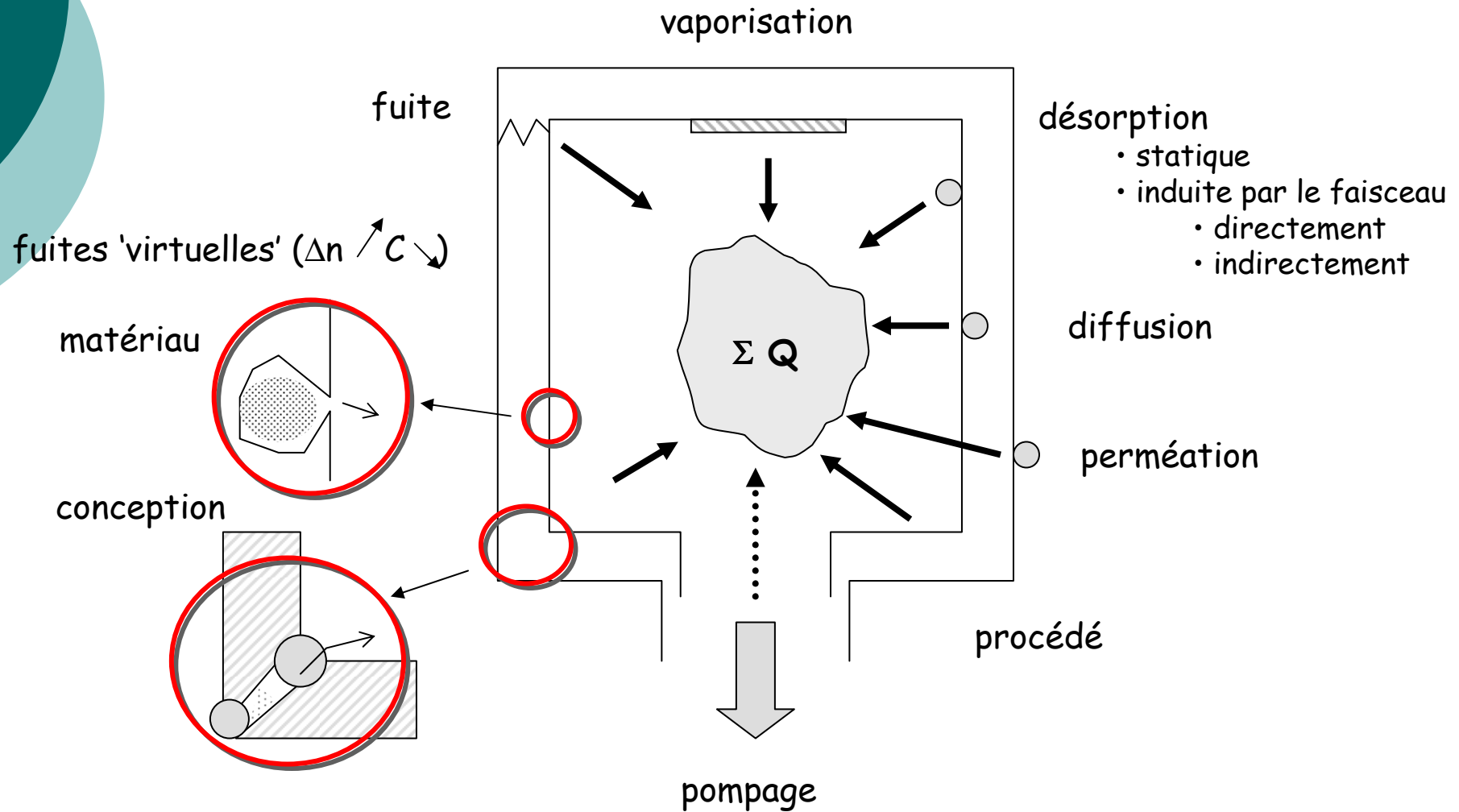
## 2.4/ Bilan des flux gazeux

Analyse de la descente en pression : aspect qualitatif

*évolution type de la composition du vide résiduel d'un système UHV*



## 2.4/ Bilan des flux gazeux



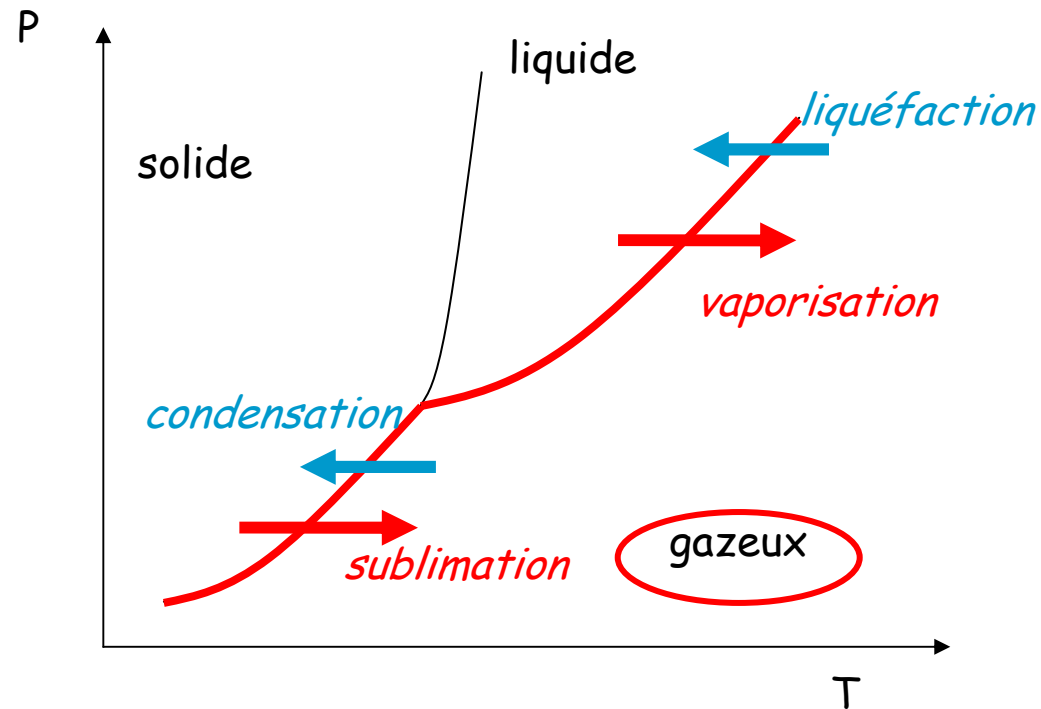
## 2.5/ Phénomènes de surface

Prise en charge par le système de vide d'un corps à l'état gazeux ou vapeur\*

\* phase gazeuse d'un corps solide ou liquide à P et T données

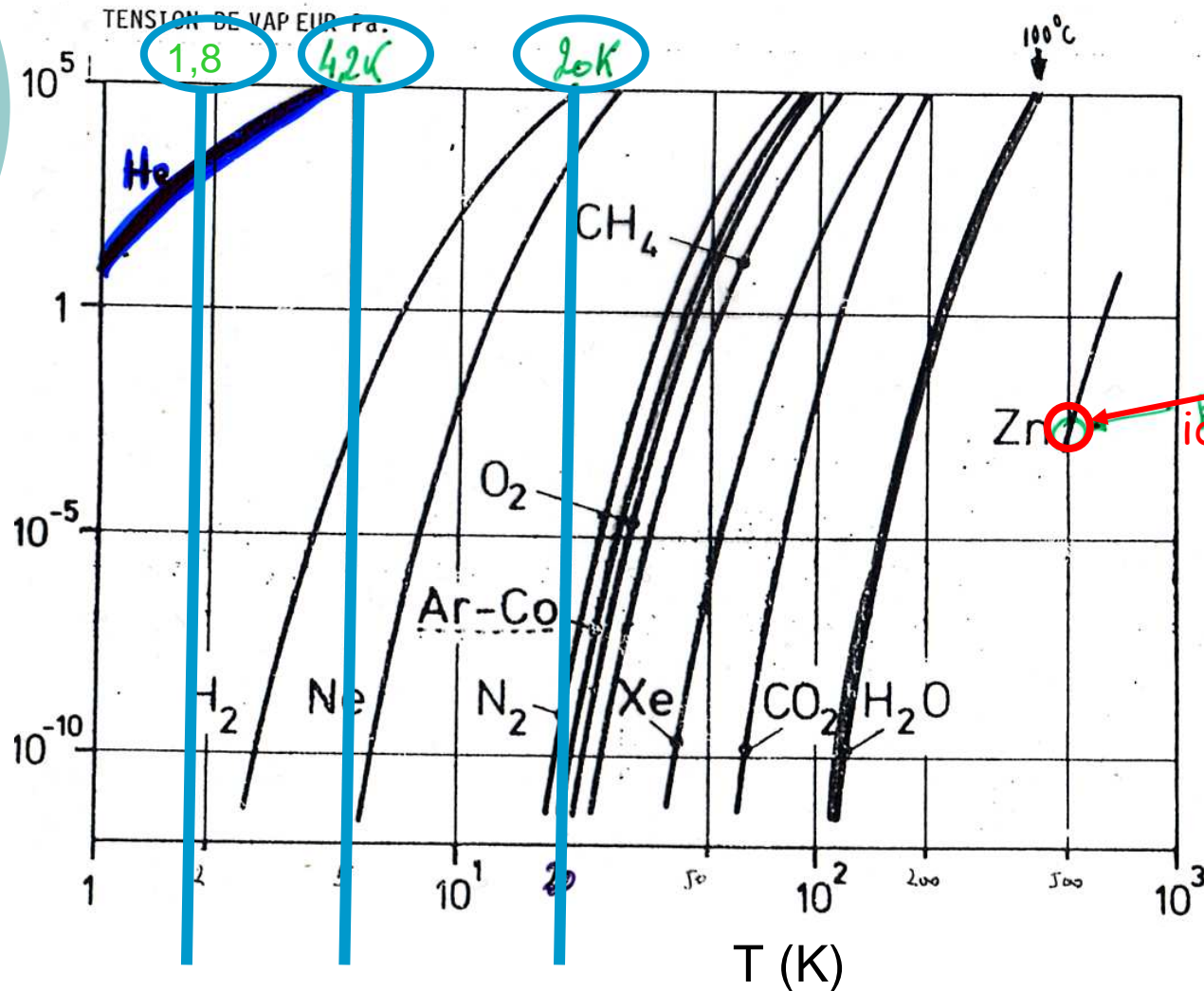
Diagramme de phases

Utilisation sous vide de corps non volatils (à basses tension de vapeur) aux températures d'utilisation



## 2.5/ Phénomènes de surface

*cryocondensation*



10<sup>-3</sup> Pa/200°C  
idem pour Mg à 290°C

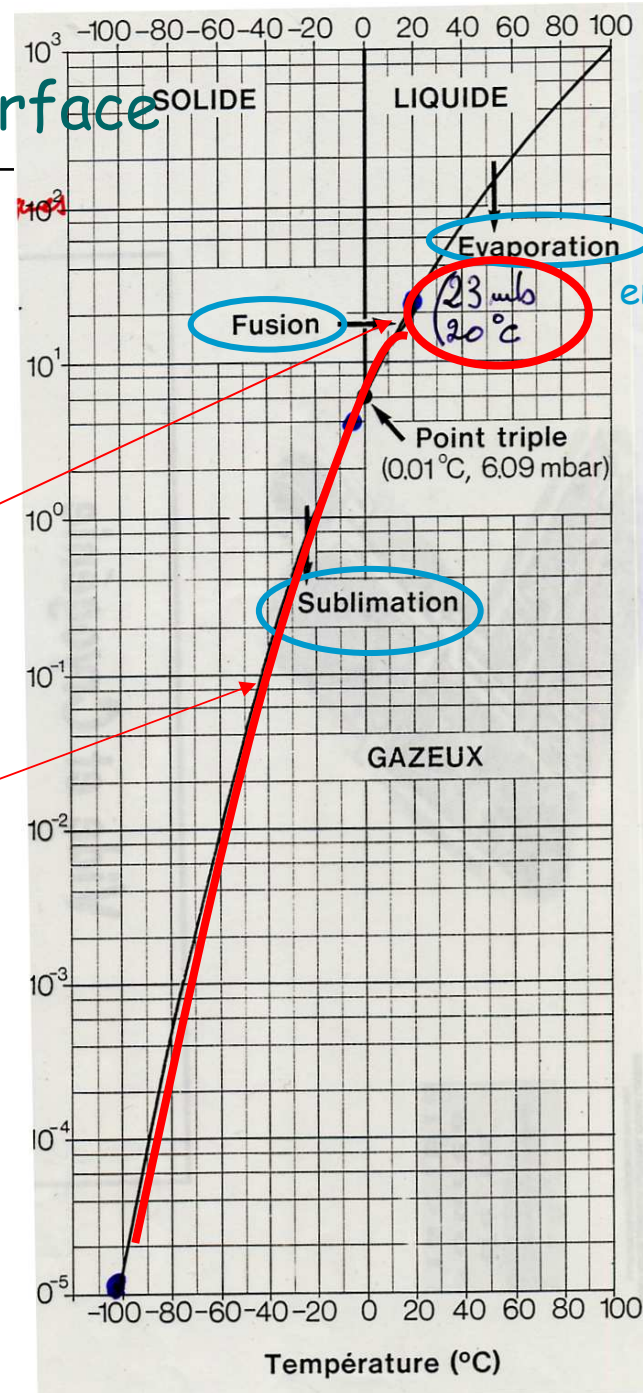
## 2.5/ Phénomènes de surface

l'eau et le vide



Fuite d'eau sous vide :

- quantité d'eau importante
- micro fuite sur un circuit de refroidissement évaporation en empruntant de la chaleur à l'eau restante => formation de glaçon => bouchage partiel de la fuite => sublimation de la glace



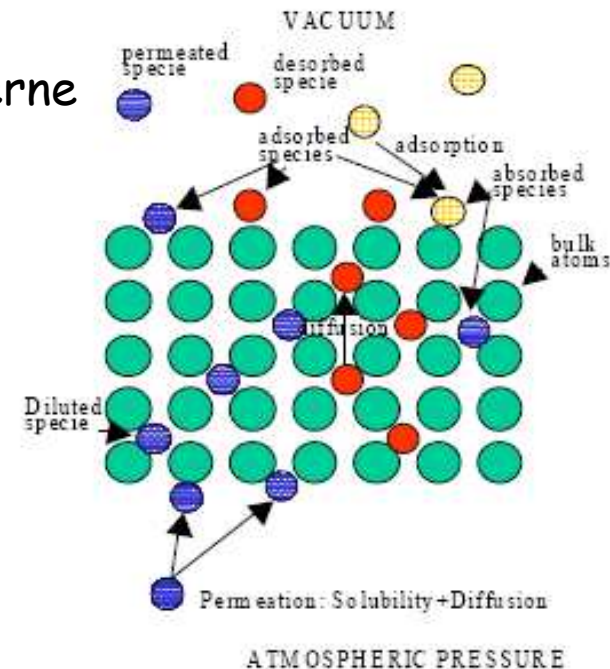
## 2.5/ Phénomènes de surface

### La perméation

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

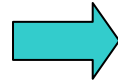
- Adsorption de la molécule sur la parois externe
- Dissociation de la molécule
- Dissolution dans le réseau
- Diffusion
- Recombinaison sur la parois interne
- Désorption sous vide

$$q_{gp} = J \cdot \frac{S}{e} f(P_1 - P_2)$$



## 2.5/ Phénomènes de surface

Absorption des gaz par physisorption



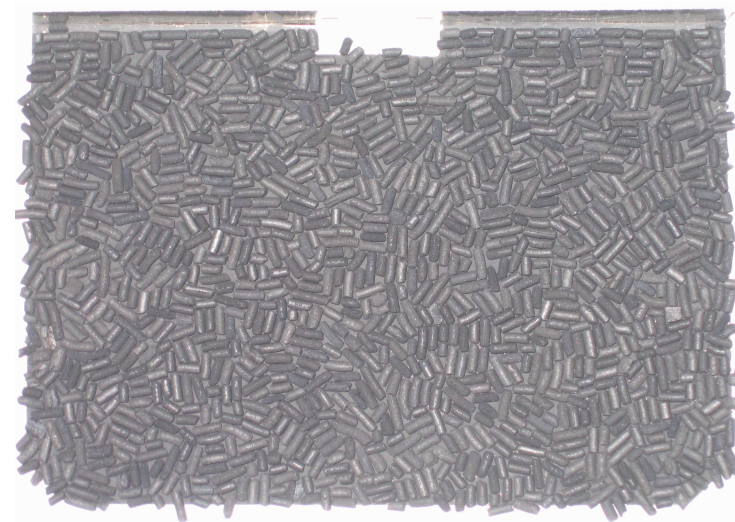
*largement utilisé en technique du vide pour piéger les molécules de gaz résiduel*

Principaux absorbants utilisés :

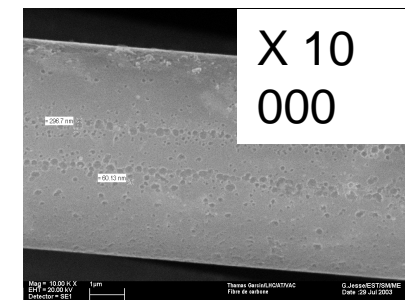
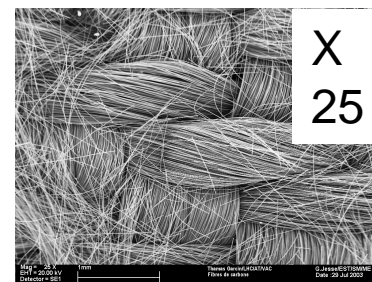
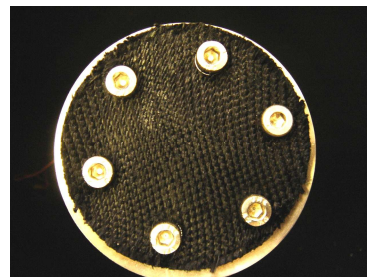
- Zéolites
- Silica-gel
- Charbon actif

Charbon actif : le meilleur absorbant

- 1000 à 1700 m<sup>2</sup>/g porosité qq diz. 10<sup>-10</sup> m
- utilisation sous forme de batonnets (diam. 3 mm, L: 4 à 5 mm)



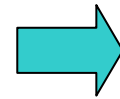
sous forme de fibres  
(V. Baglin CERN)



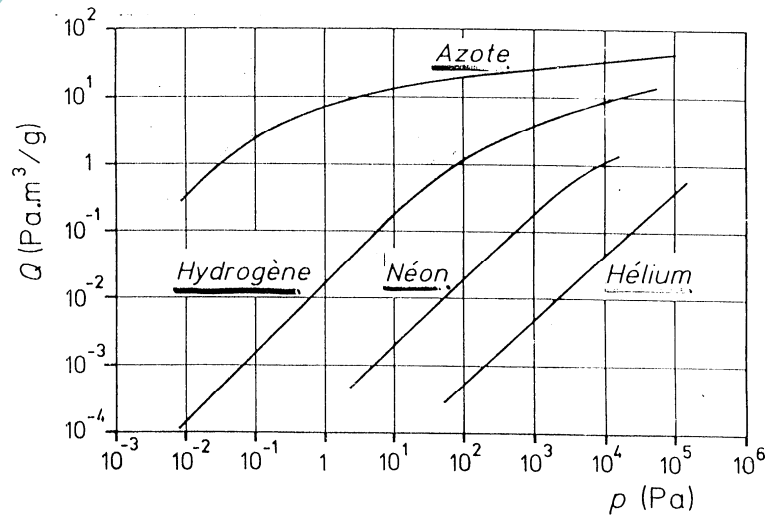
V. Anashin *et al.* Vacuum 75 (2004) 293-299

## 2.5/ Phénomènes de surface

Absorption des gaz par physisorption : la quantité de gaz absorbé dépend de la température et de la pression

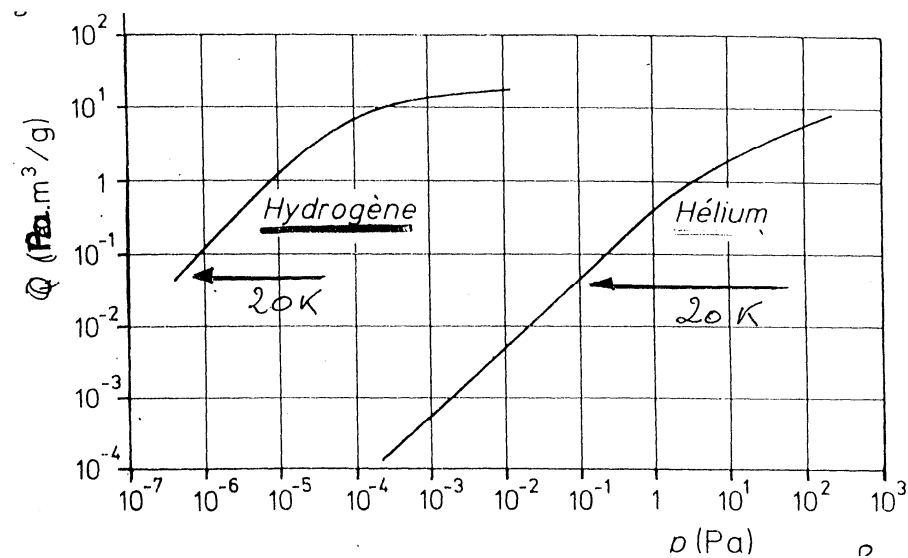


Utilisation d'isothermes d'absorption



T = 77 K

à basses P     $Q = k P$  (loi de Henry)



T = 20 K



## 2.5/ Phénomènes de surface

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)



## 2.5/ Phénomènes de surface

### Désorption - dégazage

Phénomène limitant l'obtention  
des basses pressions

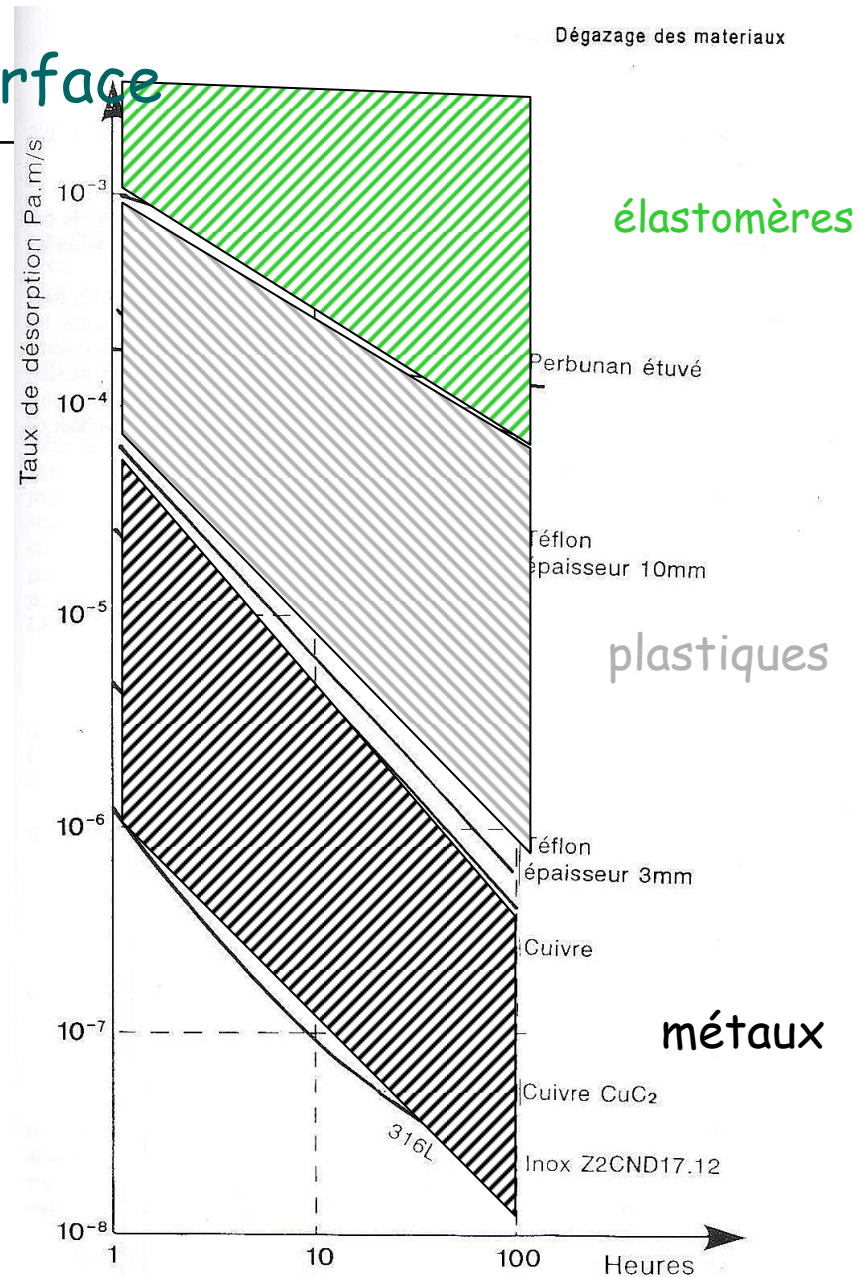
Évolution du dégazage sous vide

Élastomères et plastiques :

$$Q_g(t=0) \text{ et}$$
$$q_g \propto \frac{1}{\sqrt{t}}$$

Métaux :  $Q_g(t=0)$   
et

$$q_g \propto \frac{1}{t}$$





## 2.6/ flux gazeux : ordres de grandeur

---

### Taux de désorption

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

## 2.6/ flux gazeux : conséquences sur la conception

$$P(t) = \underbrace{\sum (q_{gu}(t) \cdot s)}_{\text{à évaluer}} + \underbrace{Q_{\text{perméation}}}_{\text{à limiter}} + \underbrace{Q_{\text{process}} + Q_{\text{dég.stimulé}}}_{\text{à évaluer}} + \underbrace{Q_{\text{fuite}} + Q_{\text{pollution}}}_{\text{à limiter}}$$

$S_{\text{eff}}$   
efficacité du système en terme de pompage

choix matériaux (technologie tt métal), épaisseur

choix des matériaux, optimisation des surfaces, nettoyage des surfaces

## 2.7/ Ecoulement des gaz

### Détermination des régimes d'écoulement gazeux

nb. de Reynolds

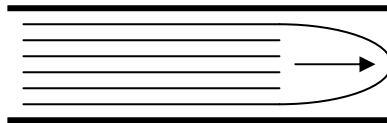
$$Re = \frac{4}{\pi \eta d} \frac{MQ}{RT}$$

Flux gazeux ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

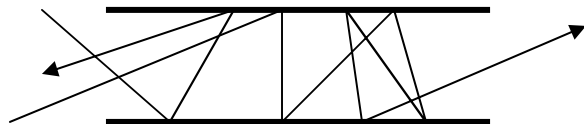
$$Q = P \cdot q_v$$



Turbulent  $Re > 2200$   $Q > 2,6 \cdot 10^3 d$  (air 20°C)



Laminaire  $Re < 1200$   $Q < 1,4 \cdot 10^3 d$   
 $d/l_m > 80$



Moléculaire

$d/l_m < 3$

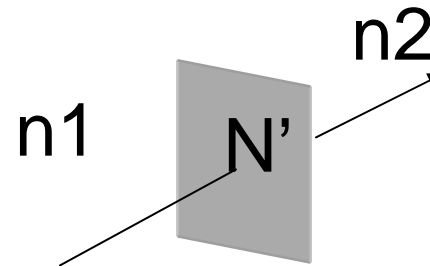
## 2.7/ écoulement des gaz : notion de conductance

En régime permanent, le nb. de molécules  $N'$  par unité de temps qui traverse un plan de canalisation est  $\propto \Delta n$

$$N' = C (n_1 - n_2)$$

Pour un ensemble isotherme :

$$\begin{aligned} N'kT &= C(n_1kT - n_2kT) \\ &= C (P_1 - P_2) \end{aligned}$$



En notant que  $N' = n q_v$

$$P q_v = C (P_1 - P_2)$$

$$Q = C \cdot \Delta P \quad (\text{avec } C \text{ en } \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$$

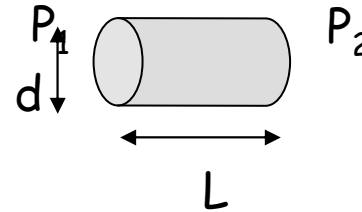
$$C = 1/Z = Q / \Delta P$$

### Combinaison des circuits

- en série  $\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i}$
- en parallèle  $C = \sum_i C_i$

## 2.7/ écoulement des gaz : notion de conductance

exemple de  
conductances  $C$  : tube  
de section circulaire



Régime laminaire

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

Régime moléculaire

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

ex :

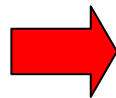
$d = 2\text{cm}$ ,  $L = 1\text{m}$

RL :  $\Delta P = 10^4 \text{ Pa}$   $\Rightarrow c = 2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$\Delta P = 10^2 \text{ Pa}$   $\Rightarrow c = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

RM :  $\Rightarrow c = 9,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

↓  
En régime moléculaire, pour un gaz à  
une température donnée, la  
conductance ne dépend que de la  
géométrie de l'élément de  
canalisation



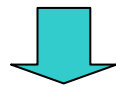
En régime d'écoulement moléculaire  
utiliser des canalisations courtes et de  
grands diamètres pour *optimiser* les  
conductances

## 2.7/ écoulement des gaz

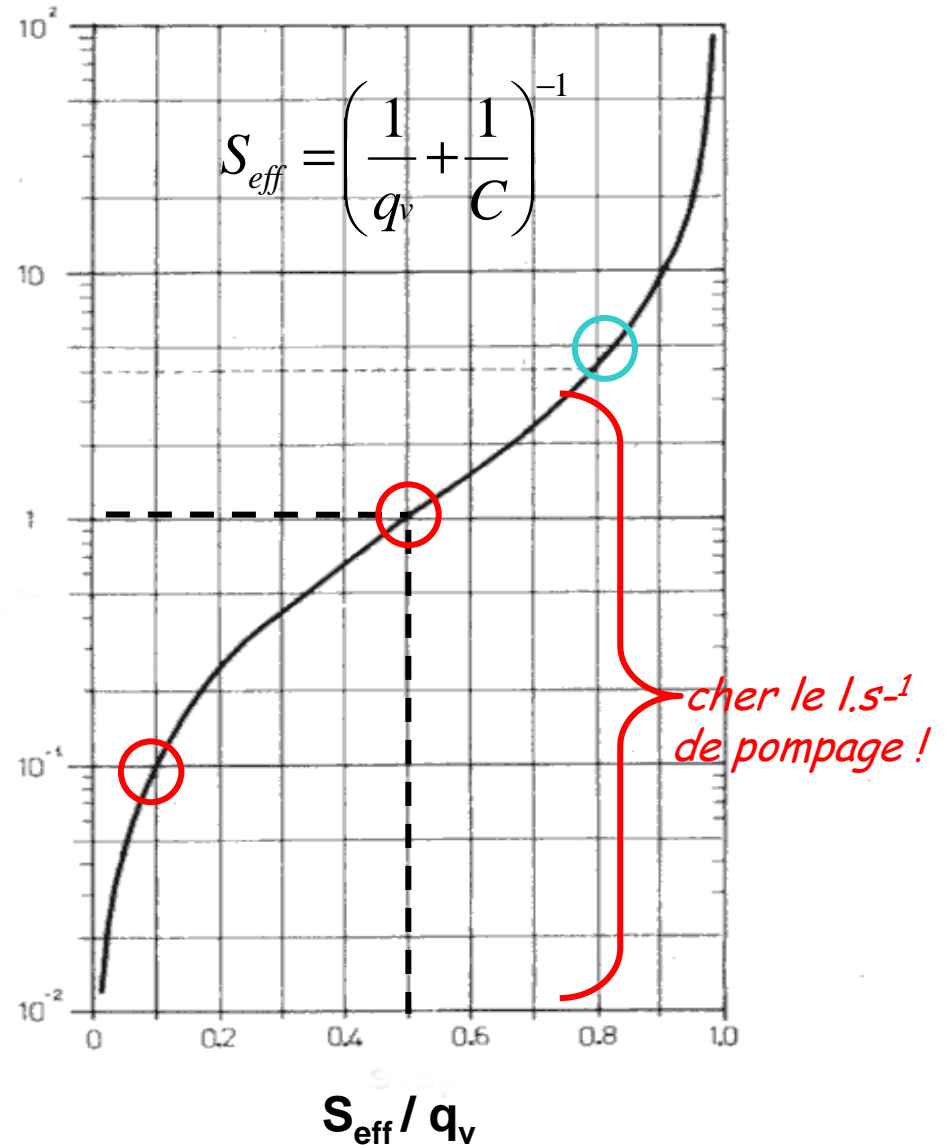
### Conductance et débit volume effectif

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

$C / q_v$



conductance : facteur limitant la vitesse de pompage effective

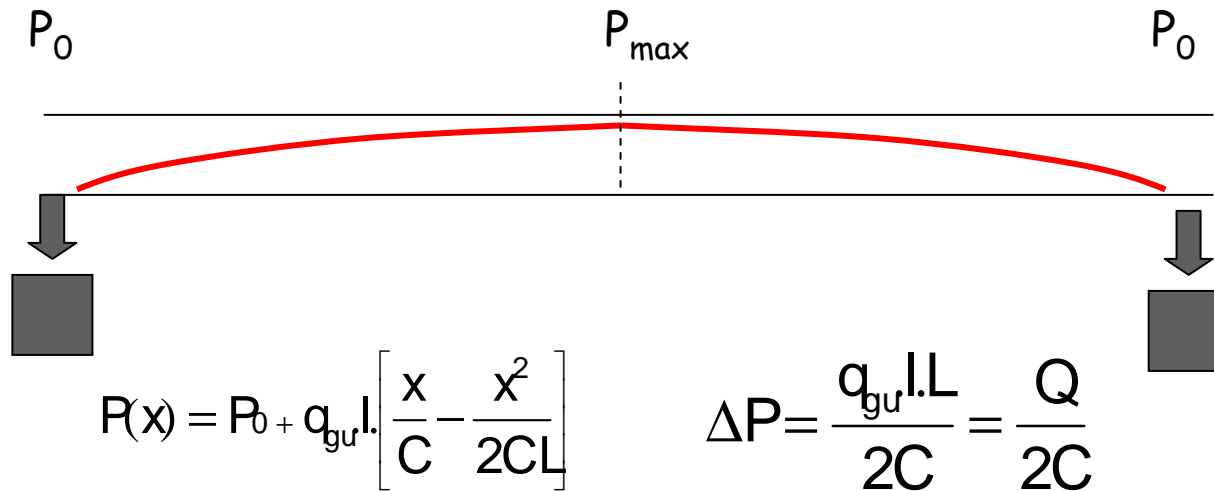




## 2.7/ écoulement des gaz

### 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



Pour une géométrie fixée,  $\Delta P$  ne dépend que du dégazage du tube

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

## 2.7/ écoulement des gaz

dégazage réparti => une solution : le pompage réparti

ruban NEG

LEP vacuum chamber section

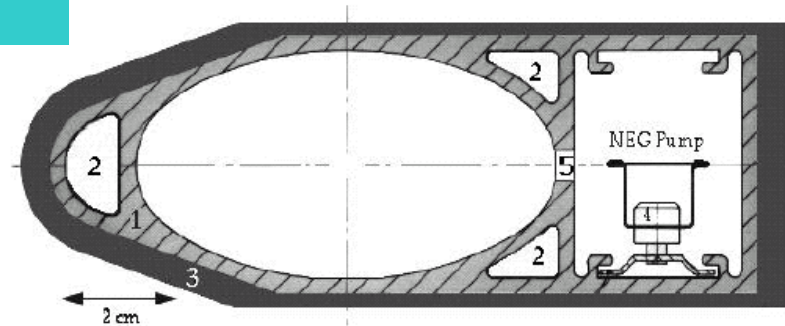
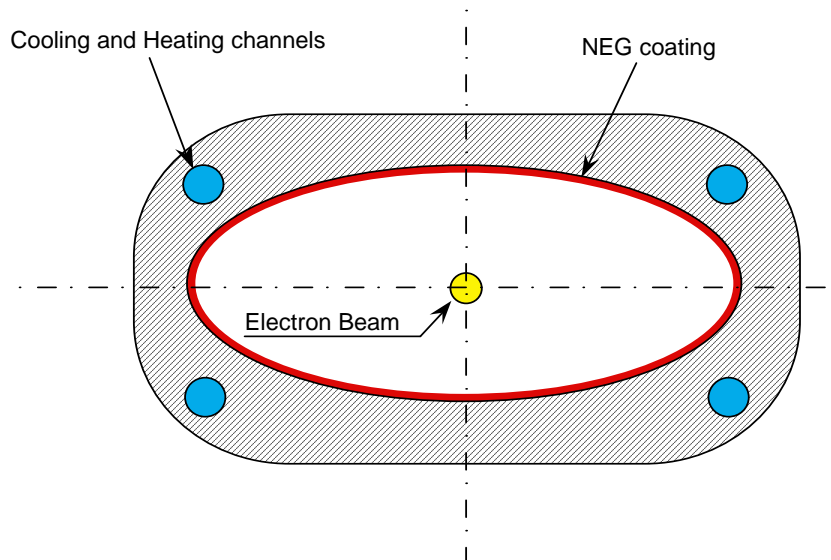


Fig. 2 : Vacuum chamber section made of (1) extruded aluminium profile with the elliptic beam channel, three cooling water ducts (2) and surrounded by 3 to 8 mm thick lead shield (3). The NEG pump (4) is housed in a separate pump channel connected to the beam channel by a row of longitudinal slots (5).

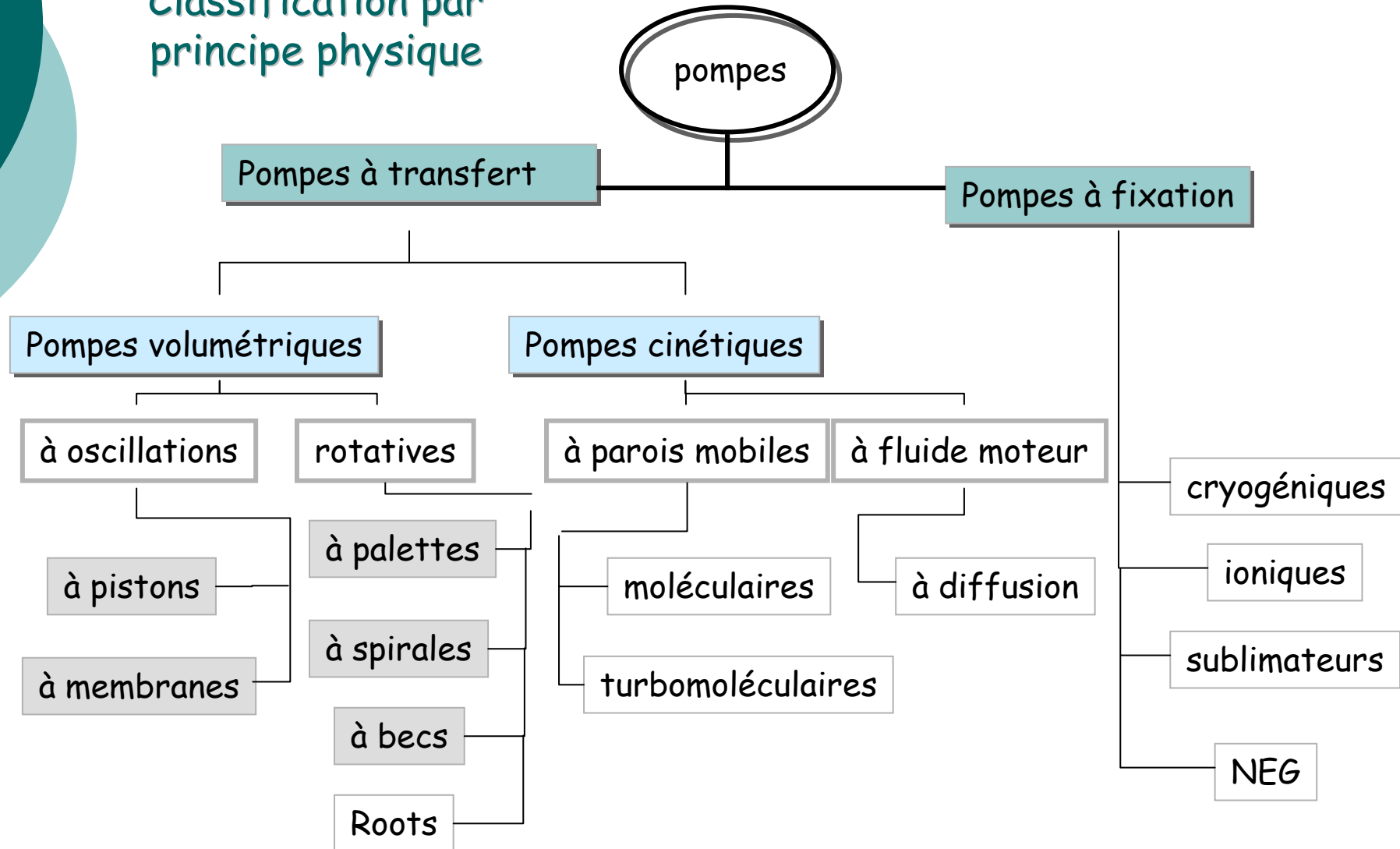


dépôt NEG

LHC vacuum chamber section

### 3/ Technologie : les moyens de pompage

Classification par principe physique



### 3/ Les moyens de pompage

---

#### Caractéristiques principales des pompes à vide, critères de choix

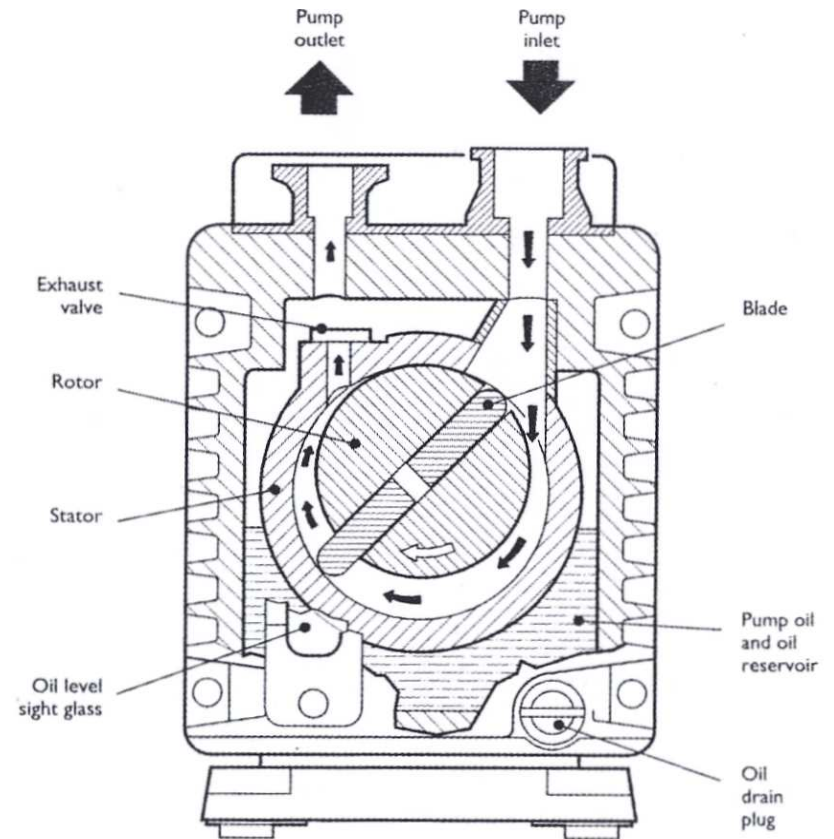
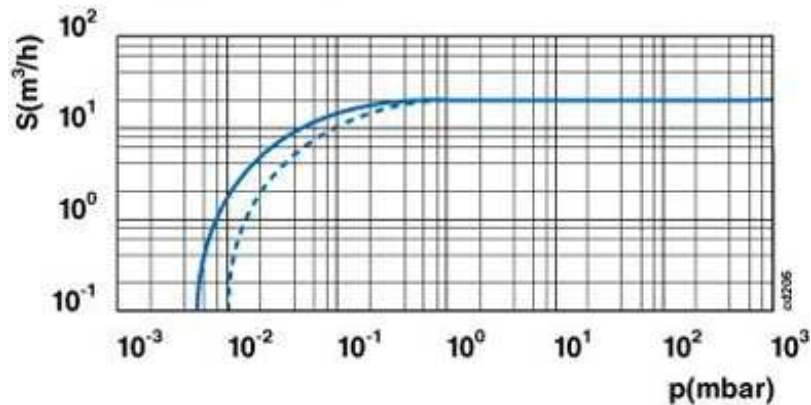
- ✓ Le débit-volume  $q_v = f(P, \text{gaz})$
- ✓ La pression limite
- ✓ La pression d'amorçage
- ✓ Le taux de compression  
pompes à transfert de flux  
 $k = P_{\text{ref}} / P_{\text{asp}} = f(P, \text{gaz})$
- ✓ Critères spécifiques au process
  - peu contaminante (technologie sèche)
  - pompage sélectif ou non
  - pas de vibration (paliers magnétiques)
  - critères de maintenance (zone INB)
  - ...
  - coût (investissement, maintenance)

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

## Pompe à palettes

Pompe volumétrique rotative

- $P_1 \sim 10^{-1}$  Pa
- Non sélective
- Présence d'huile (joint dynamique, lubrifiant, refroidissement)
- $P_1$  limitée par  $Q_f$  et  $Q_{dég. \text{ Huile}}$  (T !!)



-fiable, faible coût



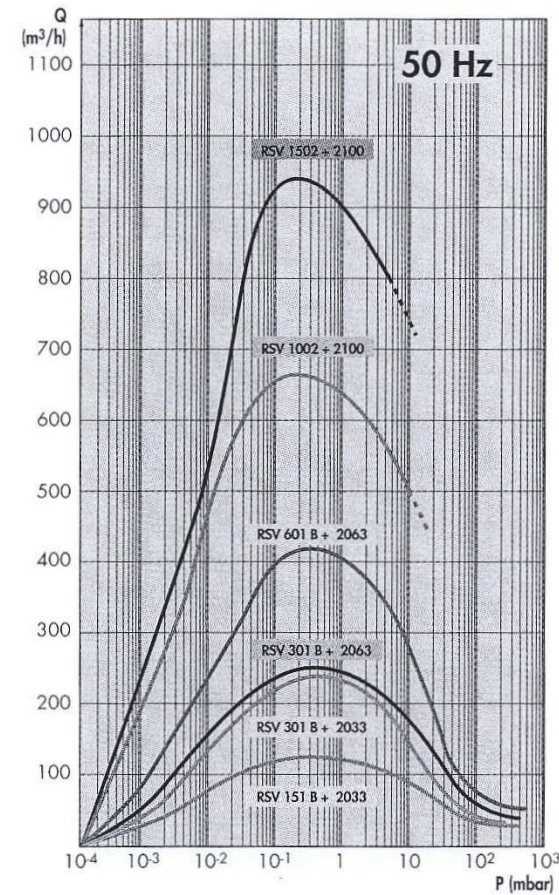
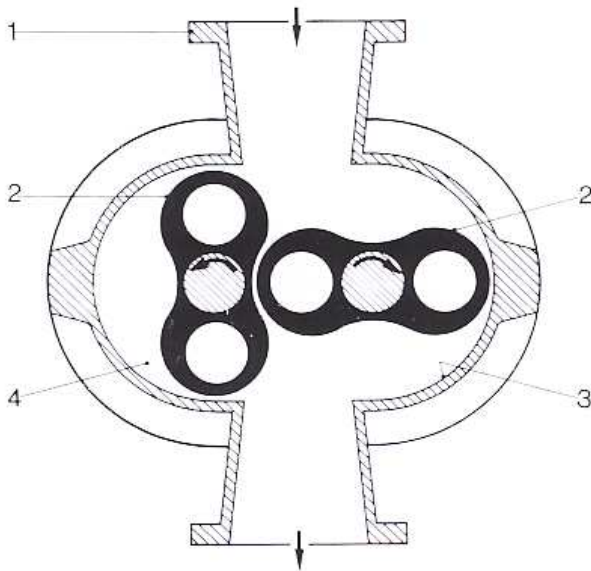
- présence d'huile

## 3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

### Pompe Roots

Pompe volumétrique sans huile

- $P_1 \sim 10^{-2}$  Pa
- Débit-volume élevé
- Pas de film d'huile  $\Rightarrow K \sim 50$
- Couplage à une pompe primaire



- débits-volumes élevés,  
robustes

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

#### Pompe à diffusion d'huile

Jet supersonique de molécules lourdes

- collisions avec le gaz
- direction privilégiée du gaz vers la zone HP

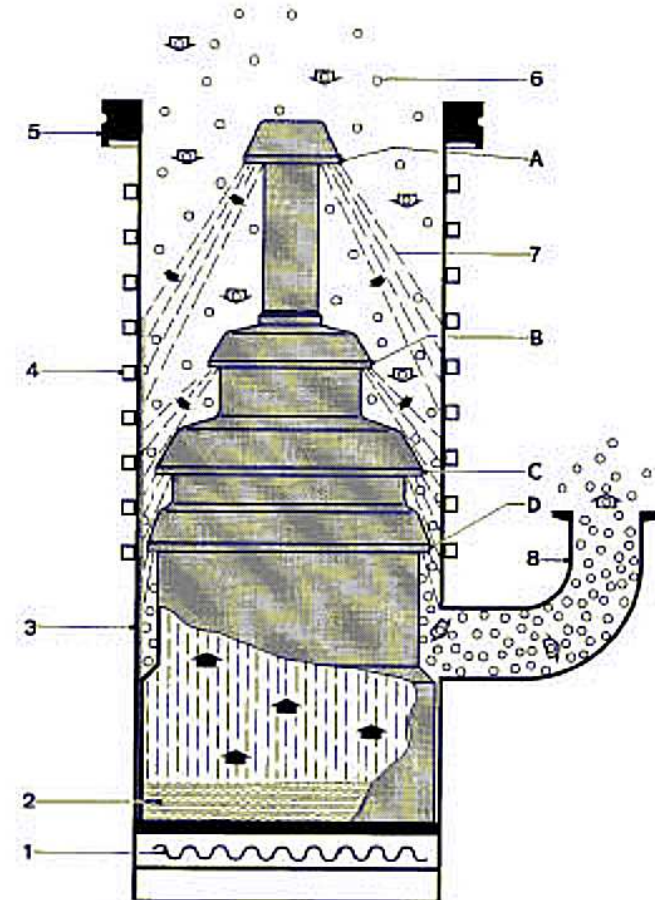
➤  $P_{\max} \sim 1 \text{ Pa}$     $P_l \sim 10^{-5} \text{ Pa}$  ( $P_v$  huile..)



- robustes, faible coût de maintenance



- risque de pollution  
retrodiffusion  
incident



- |                |                             |             |
|----------------|-----------------------------|-------------|
| 1 Heater       | 5 High vacuum flange        | A           |
| 2 Boiler       | 6 Gas molecules             | B           |
| 3 Pump body    | 7 Vapor jet                 | C } Nozzles |
| 4 Cooling coil | 8 Backing vacuum connection | D }         |

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

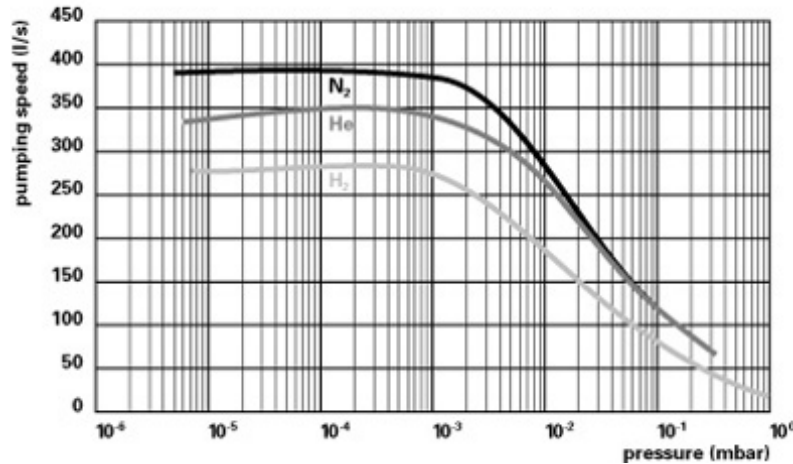
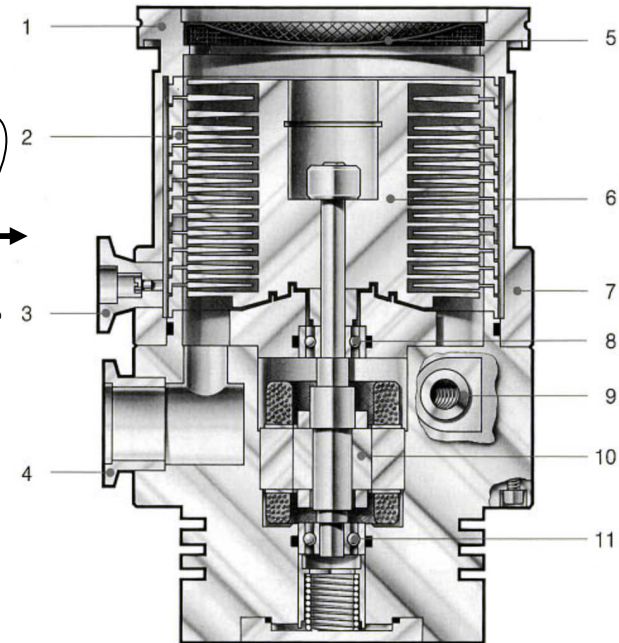
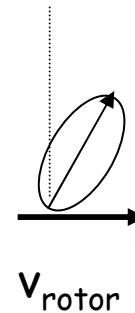
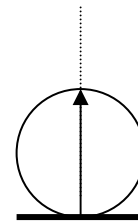
## Pompes turbomoléculaires

Pompes cinétiques à parois mobiles

$P_{\max} \sim 1\text{Pa}$   $P_1 \rightarrow \text{UHV}$

➤  $K$  dépend de  $\sqrt{M}$  de  $v_{\text{rotor}}$

➤ Couplage à une pompe primaire



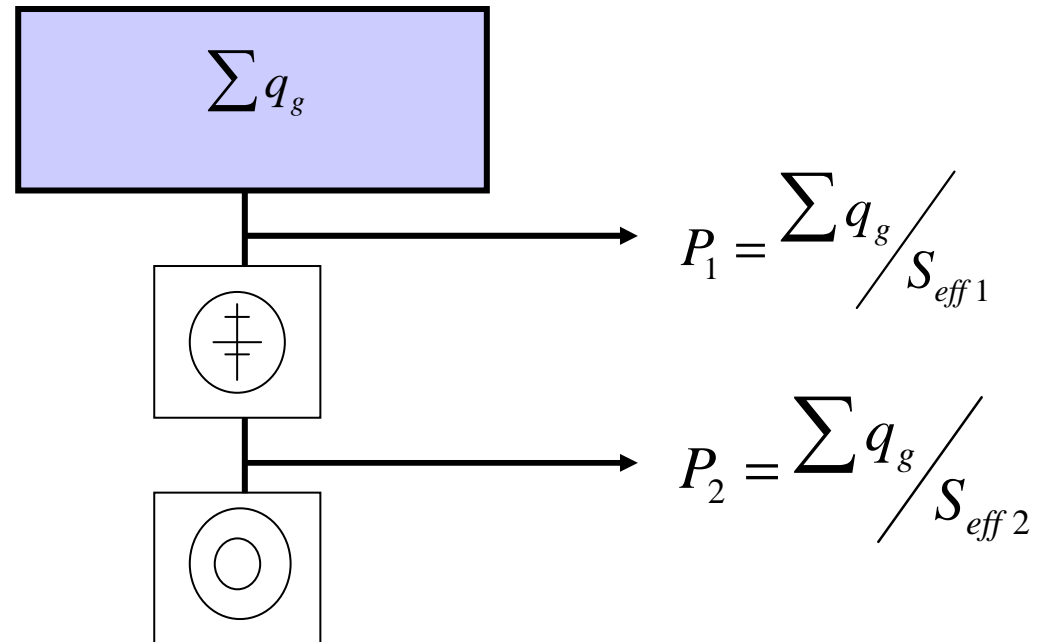
- pompage propre (magnétique)
- pompage à transfert de flux
- évolution vers des pompes moins sélectives ( $H_2$ )



### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

#### Couplage des pompes à transfert de flux

Dans un circuit en série, il y a conservation du flux  $\Sigma q_g = P_x \cdot S_x$

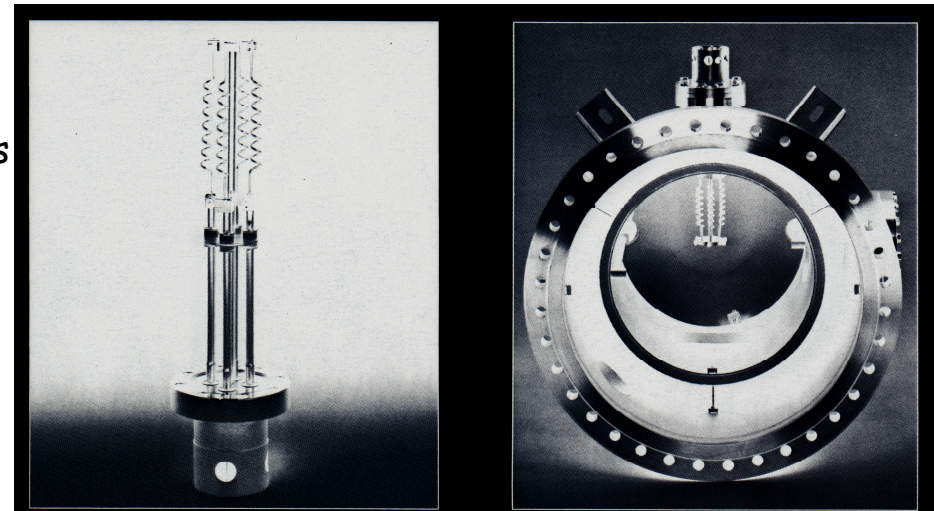
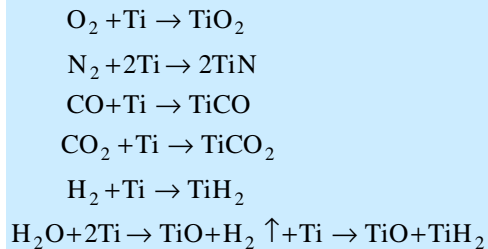


### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

#### 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)



Capacité d'aspiration d'une couche 'fraiche'

$$q_v = 1,15 (T/M)^{1/2} \cdot A \cdot s$$

avec  $A$  surface du film actif  
et  $s$  probabilité d'adsorption du gaz

Test Gas	Max. Sticking Coefficient- $\alpha_m$		Max. Speed <sup>a</sup> (liters/sec-cm <sup>2</sup> )		Max. Capacity of Film- $\times 10^{15}$ (molecules/cm <sup>2</sup> ) <sup>b</sup>	
	300 K	77 K	300 K	77 K	300 K	77 K
H <sub>2</sub>	0.06	0.4	2.6	17	8-230 <sup>c</sup>	7-70
D <sub>2</sub>	0.1	0.2	3.1	6.2	6-11	-
H <sub>2</sub> O	0.5	-	7.3	14.6	30	-
CO	0.7	0.95	8.2	11	5-23	50-160
N <sub>2</sub>	0.3	0.7	3.5	8.2	0.3-12	3-60
O <sub>2</sub>	0.8	1.0	8.7	11	24	-
CO <sub>2</sub>	0.5	-	4.7	9.3	4-12	-

a) Speed calculated at RT  
b) Wide variations due to film roughness  
c) Wide variations due to bulk diffusion into film

(Ref. "Sorption of Nitrogen by Titanium Films," Harra and Hayward, Proc. Int. Symp. On Residual Gases in Electron Tubes, 1967)

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

#### la pompe à sublimation de titane

Saturation du film avec la pression



renouvellement d'un dépôt de Ti (flash)  
fréq = f(P)

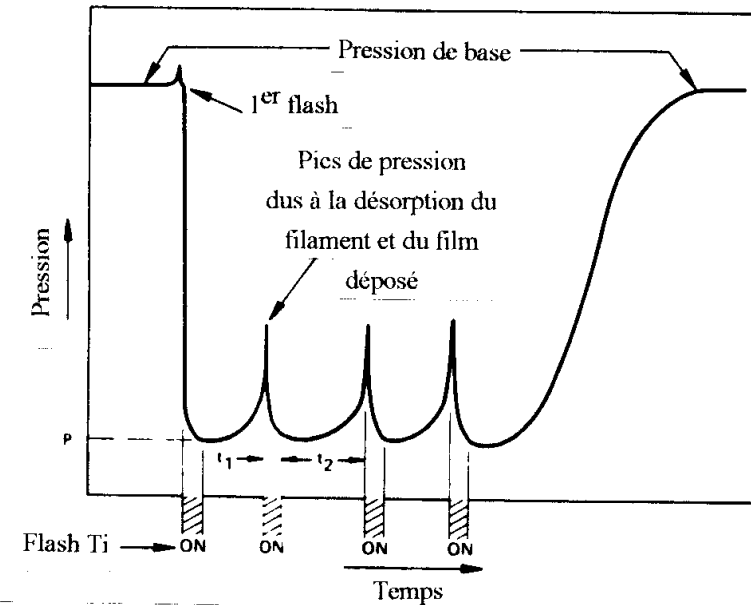
~1flash/h@10<sup>-8</sup> hPa



pompe sèche  
débits volumes importants  
simple



très sélective  
filament chauffé  
remontée de pression au flash



➤  $P_{\max} \ll 10^{-5}$  Pa  
 $P_1 \rightarrow$  UHV

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes 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 CH<sub>4</sub> ne sont pas pompés



LEP vacuum chamber section

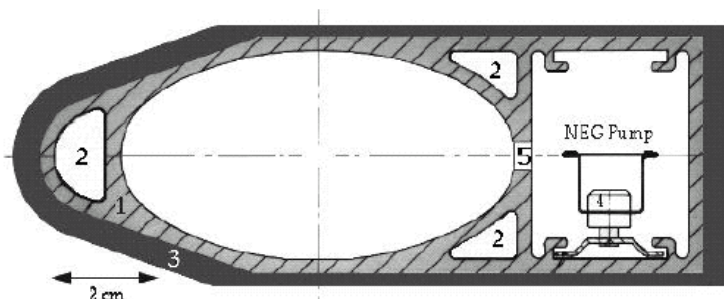


Fig. 2 : Vacuum chamber section made of (1) extruded aluminium profile with the elliptic beam channel, three cooling water ducts (2) and surrounded by 3 to 8 mm thick lead shield (3). The NEG pump (4) is housed in a separate pump channel connected to the beam channel by a row of longitudinal slots (5).



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



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

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

#### la pompe à getter (non évaporable)

recherche depuis 1995 (CERN) sur :

- méthode de déposition du getter dans la chambre à vide
- réduction  $T^\circ$  d'activation du dépôt (chambres Al extrudées)
- qualité mécanique et chimique du dépôt



- ✓ couche de Ti-Zr-V ( $\sim 1,5 \mu\text{m}$ )
- ✓ dépôt par pulvérisation cathodique magnétron
- ✓  $T^\circ_{\text{act}} 200^\circ\text{C}$

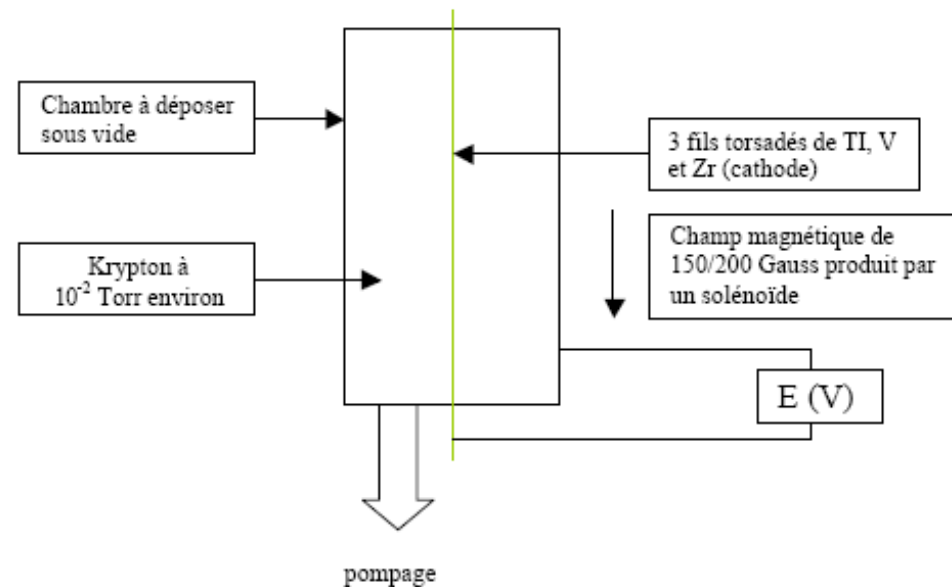


Schéma 1 : Dispositif de pulvérisation magnétron pour le dépôt d'une couche NEG

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

la pompe à getter (non évaporable)

le dépôt NEG



(R. Kersevan - ESRF)

qq chiffres (dépôt TiZrV  $1,5 \mu\text{m}$   $200^\circ\text{C}$ -24h) :

$qv$  ( $\text{l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ) : 0,5 pour  $\text{H}_2$  et 4 pour  $\text{CO}$

$s$  : 0,01 pour  $\text{H}_2$  et 0,7 pour  $\text{CO}$

capacité  $\text{CO} \sim 1$  monocouche ( $10^{15}$  molécules. $\text{cm}^{-2}$ )



(R. Kersevan - ESRF)

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

---

la pompe à getter (non évaporable)

le dépôt NEG



- 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*



- débit volume
- saturation
- activation à haute T°
- très sélective
- durée de vie (30-50 cycles)

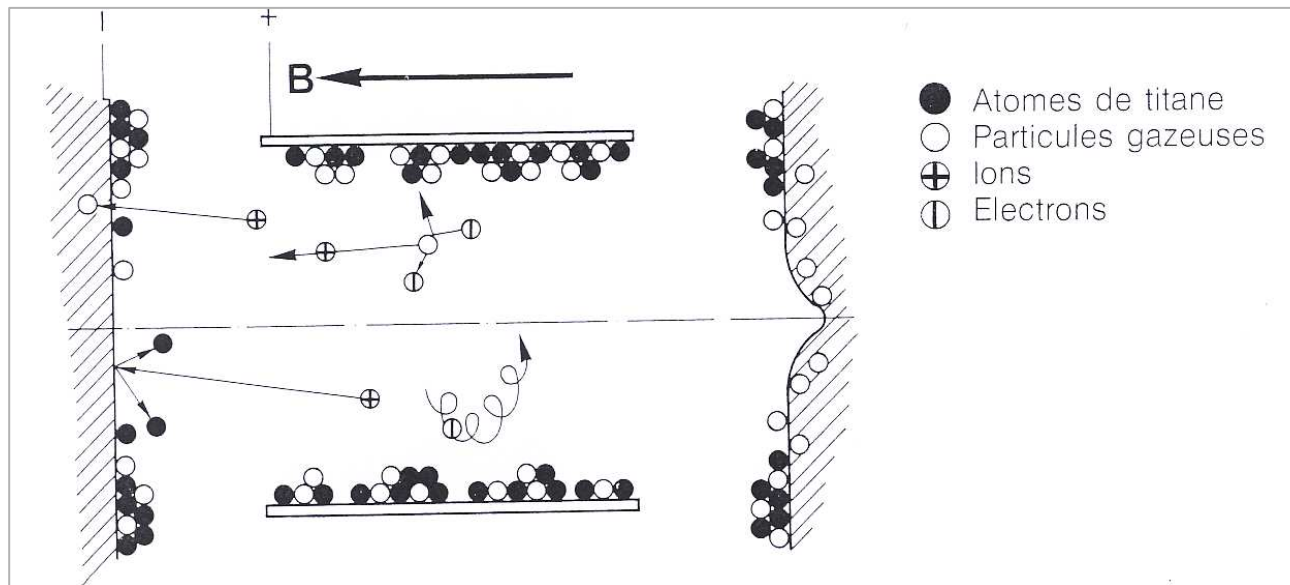
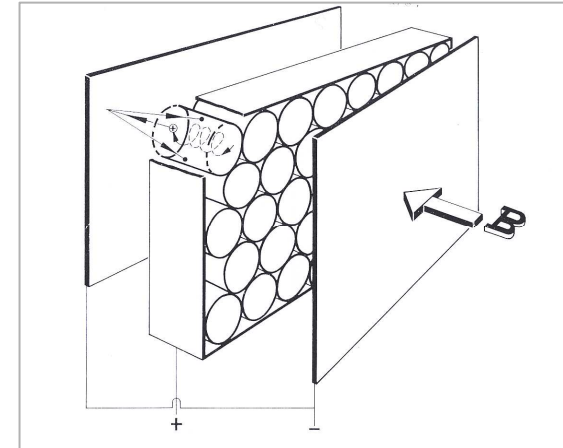
*Utilisation UHV (synchrotrons , LHC)*

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

#### la pompe ionique

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  $\Rightarrow$  pulvérisation de Ti
- pompage par chimisorption sur le film de Ti





### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

#### la pompe ionique



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



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



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

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

#### le cryopompage

- condensation : état d'équilibre selon  $P_s = f(T_f)$

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

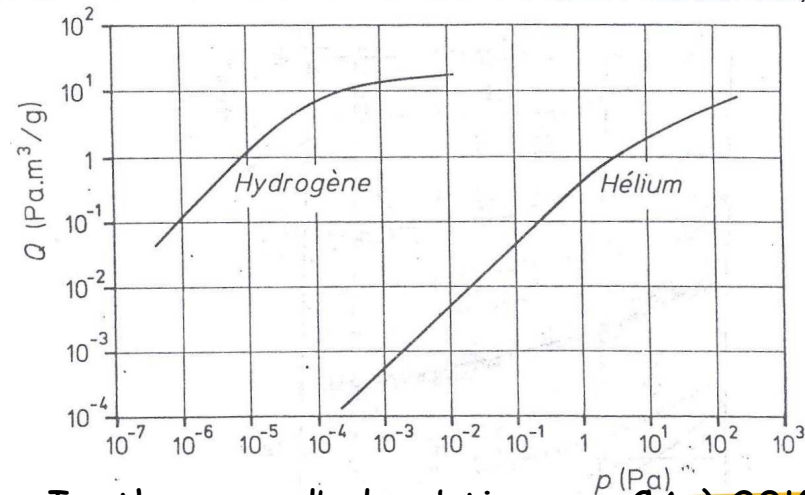
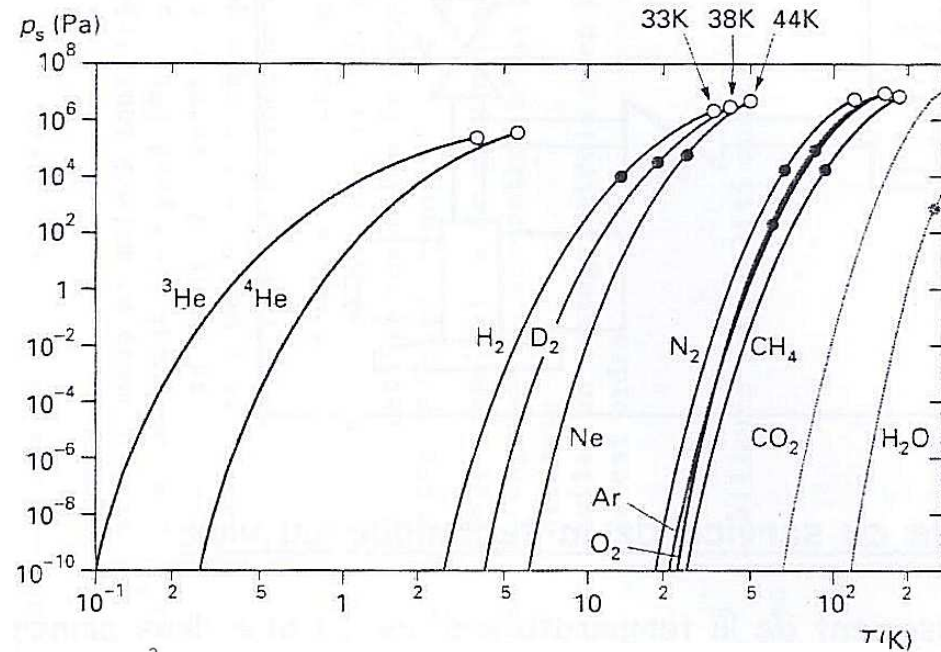
'trou noir' pour les molécules (à la conductance d'accès et au coeff de collage près)

$q_v \text{ max (c infinie et } s \sim 1)$

119  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  pour  $\text{N}_2$   
 148  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$  pour  $\text{H}_2\text{O}$

- cryosorption sur adsorbants solides refroidis (physisorption)

- cryotrapping



Isothermes d'adsorption sur CA à 20K

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

le cryopompage : sources froides

Les 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

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

### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

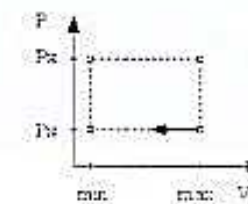
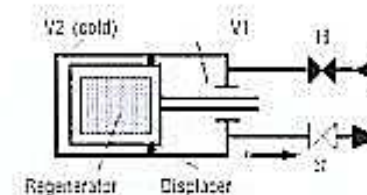
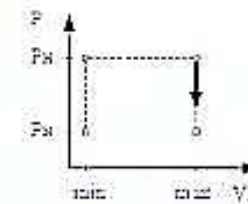
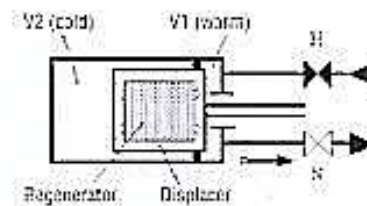
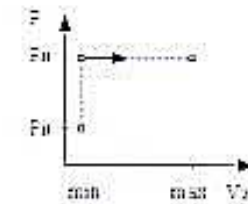
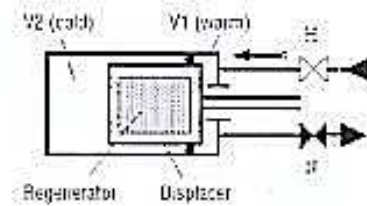
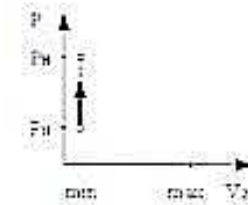
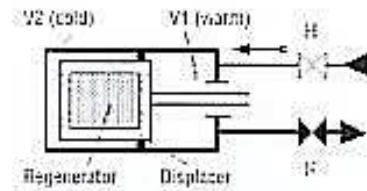
le cryopompage : sources froides

les cryogénérateurs

Système en cycle fermé  
constitué par

- ✓ un compresseur hélium
- ✓ un circuit d'hélium  
pressurisé
- ✓ une tête froide  
(cryogénérateurs)

- Refroidissement par détente d'hélium:  
couplage mécanique à l'utilisation
- Circulation du gaz en alternance sur un  
matériau régénérateur (stockage et  
restitution de la chaleur)



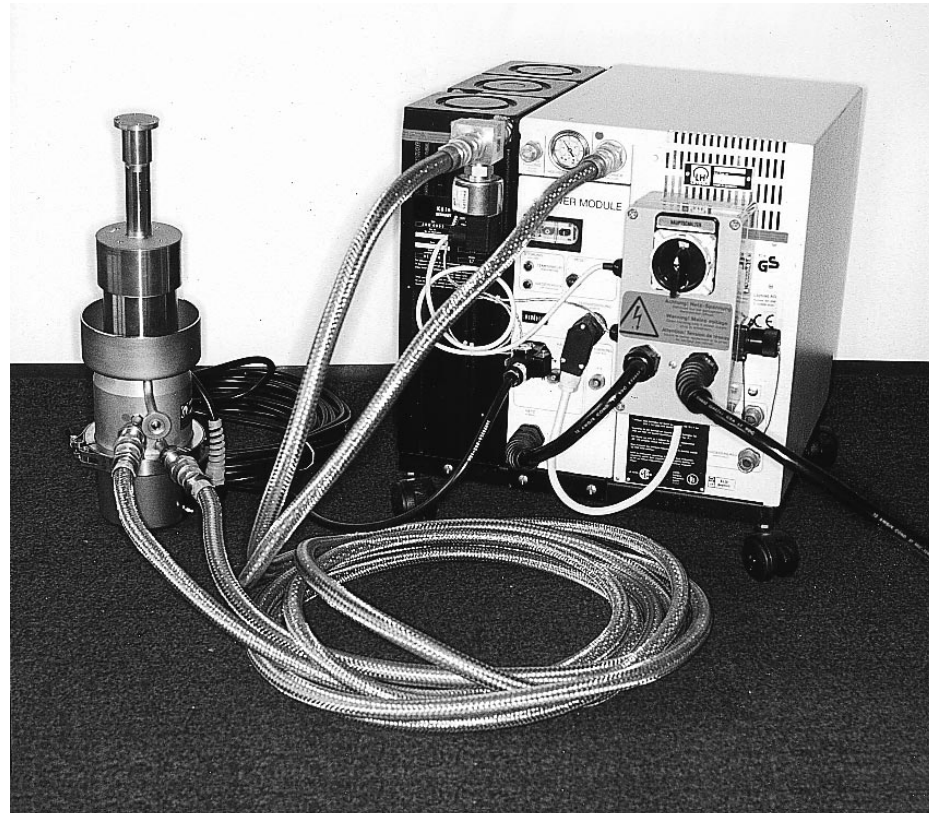
### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

---

le cryopompage : sources froides

les cryogénérateurs

- Couplage du cryogénérateur au compresseur par circuit pressurisé
- Utilisation d'hélium pur



### 3/ Les moyens de pompage : les pompes 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  
65W @ 80K

→ qq W @ 4K

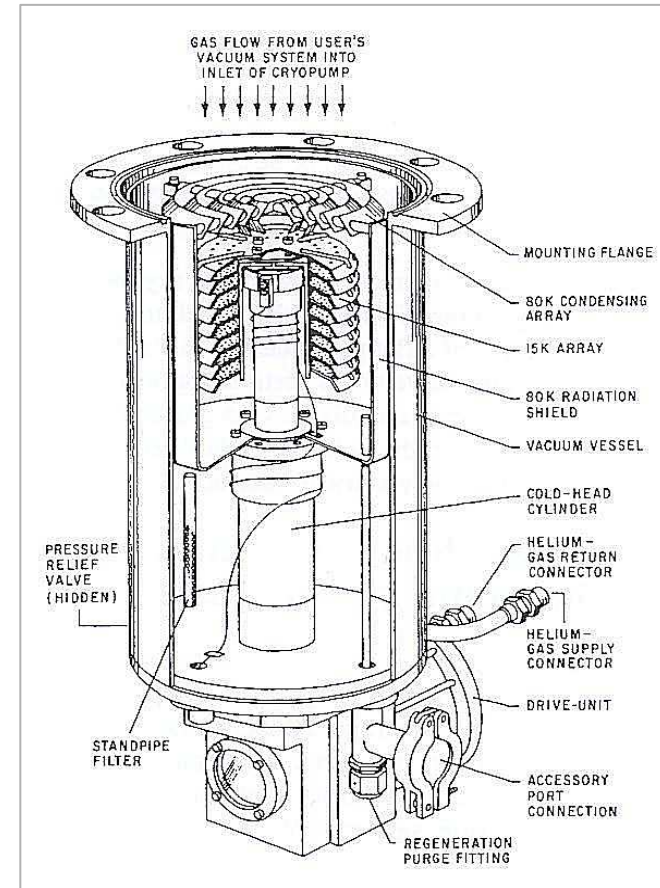
### 3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

#### Cryopompe à cryogénérateur

2 étages froids

- ✓ 80 K → écrans T°  
H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>
- ✓ 15 K → N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, CO
- CA sur 20 K → H<sub>2</sub>

➤  $P_{\max}^* \sim 10^{-4}$  hPa  $P_1 \rightarrow$  UHV



$q_v$  élevé



régénération, vibrations,  $q_v$  He

Φ 200 mm

4 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (H<sub>2</sub>O)

1,5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (N<sub>2</sub>)

2 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (H<sub>2</sub>)

5W @ 20K

20W @ 77K

### 3/ La mesure du vide

---

#### ○ Mesure de la pression totale : les manomètres

- mécaniques
  - hydrostatiques
  - thermiques
  - à viscosité
  - à ionisation
- }  $\rightarrow P = F/S$  ( indép. du gaz )
- $\rightarrow I = f(P)$
- friction avec le gaz =  $f(P)$
- $i_c \propto P$

#### ○ Mesure des pressions partielles : les analyseurs de gaz

- à séparation magnétique
- à séparation quadripolaire



### 3/ La mesure du vide

- manomètre à effet mécanique  $P^* > 1 \text{ hPa}$

manomètres de Bourdon

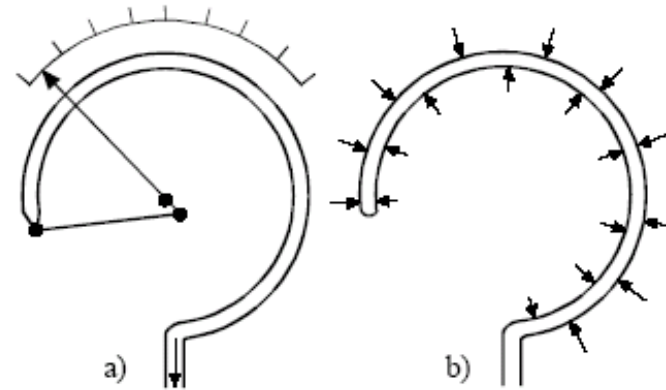
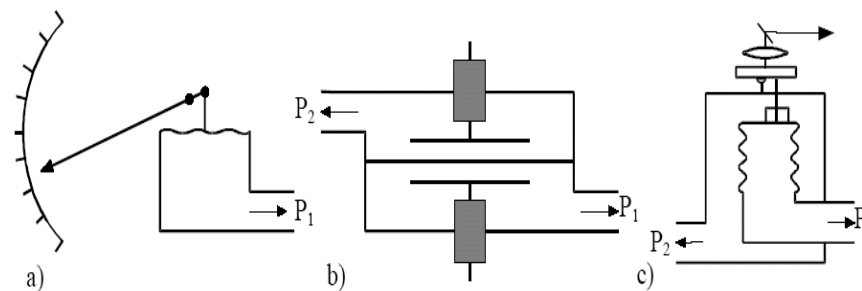


Fig. 2 Bourdon gauge, a) principe, b) distribution of forces

à membrane  
piézorésistif (dépôt Si)  
capacitif



### 3/ La mesure du vide

---

- manomètre thermique : la jauge de Pirani

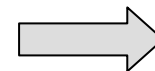
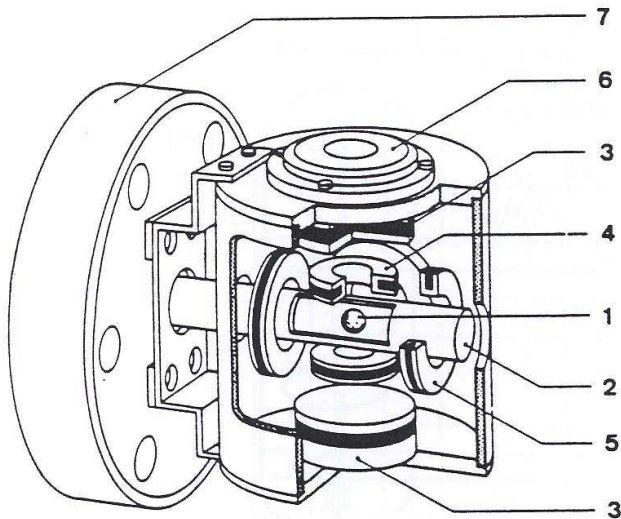
C'est une jauge à filament ( $W$ , Pt) alimenté à courant constant. La diminution des échanges thermiques lorsque  $P$  diminue se traduit par une variation de sa résistance.

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

- la jauge à viscosité

Mesure de la décélération d'une bille, maintenue en lévitation magnétique, par friction sur le gaz résiduel.

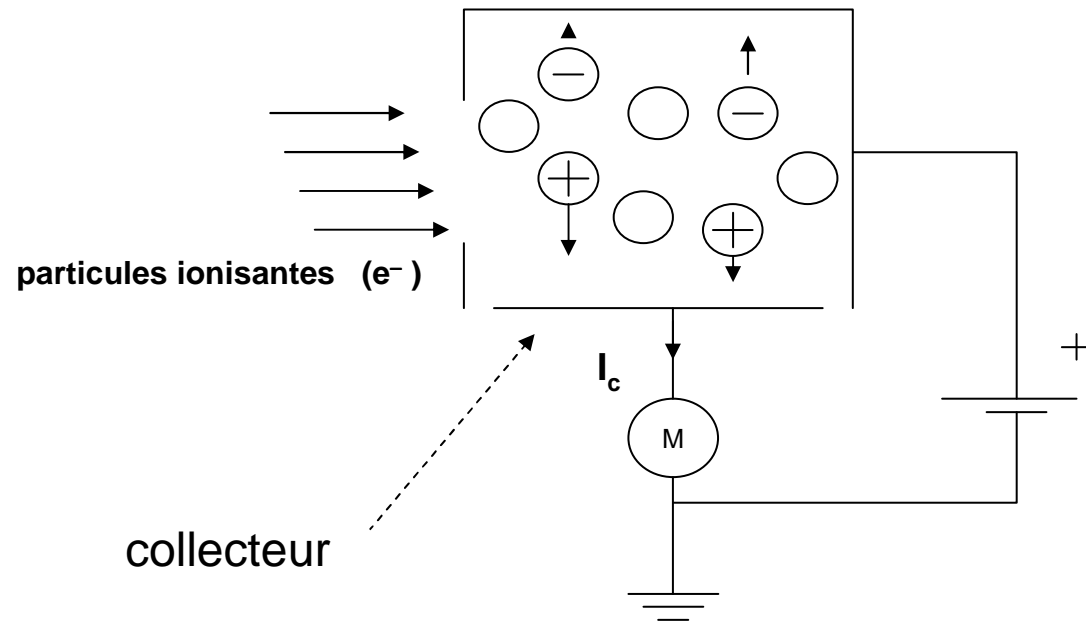
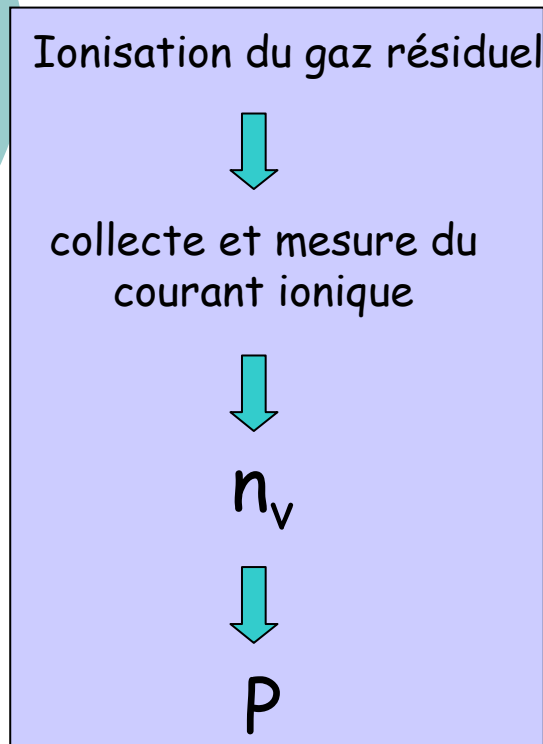
gamme :  $10^{-2} - 10^{-6}$  hPa



étalon secondaire

### 3/ La mesure du vide

- manomètres à ionisation

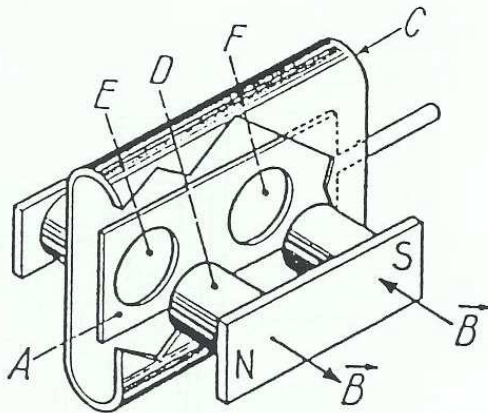


- $I_m > d_{enceinte}$  1 Pa -  $10^{-10}$  Pa
- pour une géométrie donnée, la sensibilité dépend de la nature du gaz  
 $s = (I_c / I_{e-}) \cdot 1/P$  (10 – 40 mb<sup>-1</sup>)

### 3/ La mesure du vide

- manomètre de Penning (cathode froide)

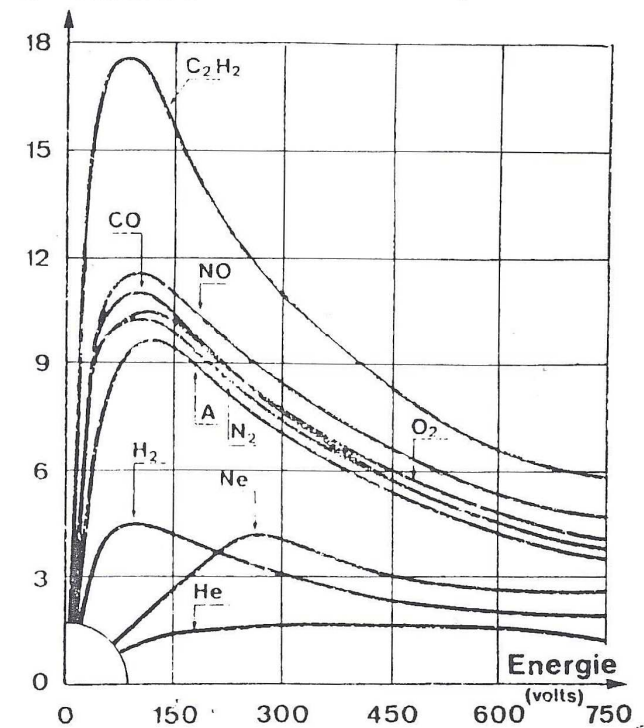
Ionisation du gaz par les électrons libres accélérés sous HT



$10^{-2} - 10^{-7}$  hPa

Amélioration :  
magnétron  
 $10^{-2} - 10^{-10}$  hPa

Probabilité  
d'ionisation



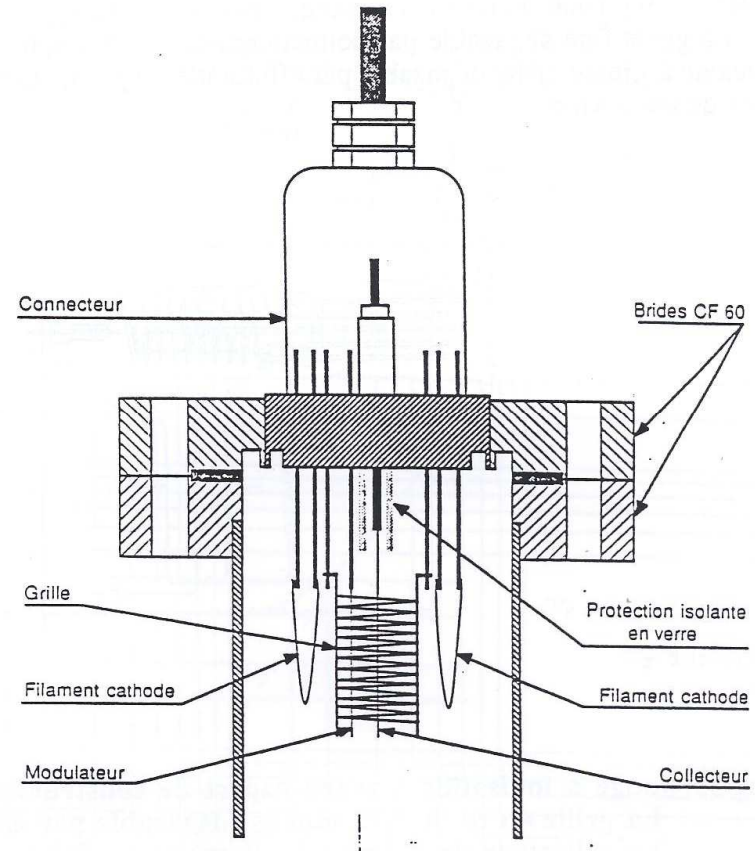
### 3/ La mesure du vide

- manomètre de Bayard-Alpert (cathode chaude)

Ionisation par les électrons émis par un filament (cathode) et accélérés par une grille (anode). Les ions sont recueillis sur le collecteur.

$10^{-3} - 10^{-10}$  hPa

extension à  $10^{-13}$  hPa  
avec les jauges BA à modulateur



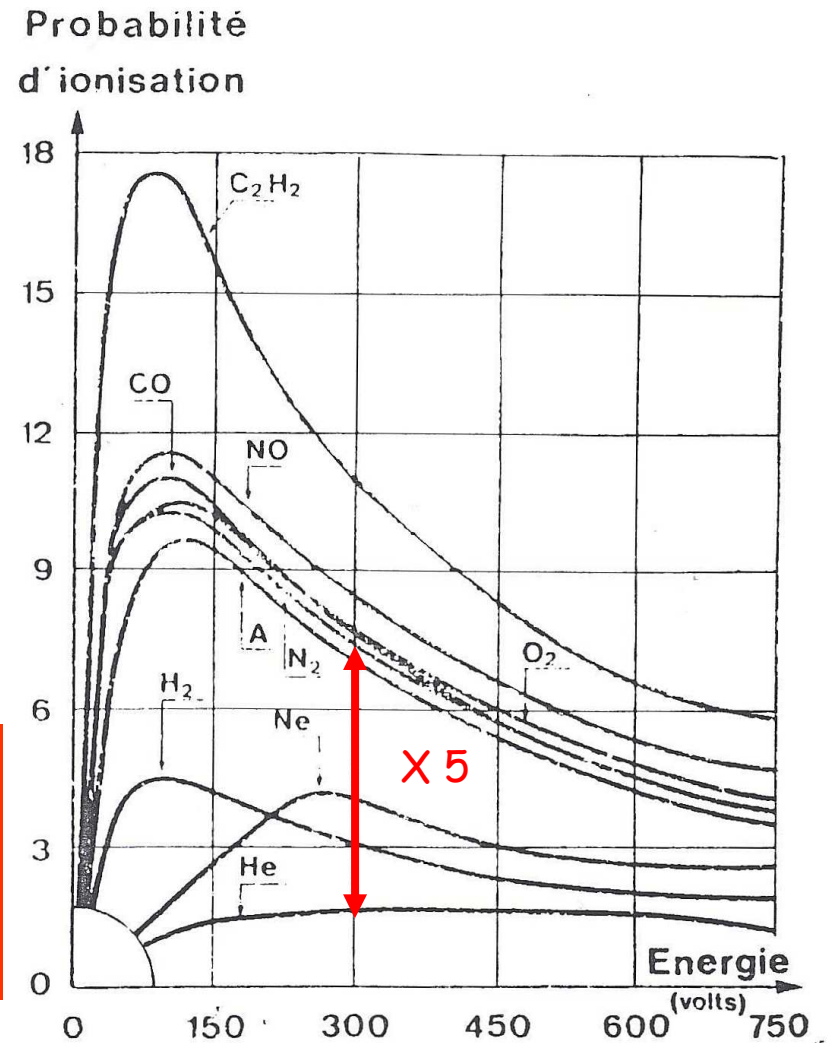
### 3/ La mesure du vide

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



## 3/ La mesure du vide

---

- mesure des pressions partielles : les 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

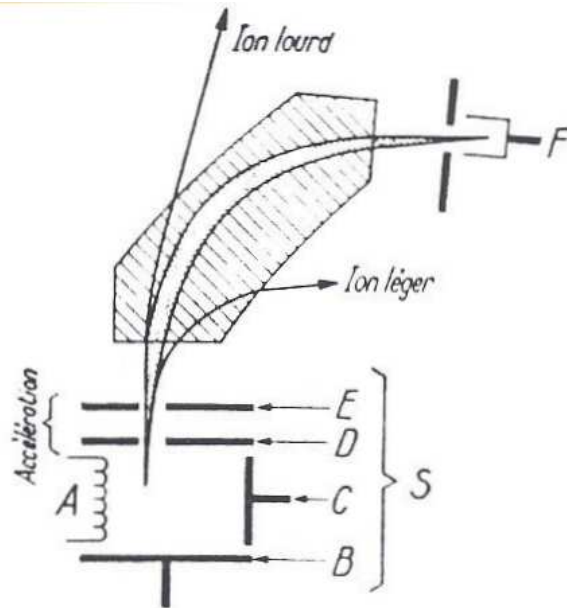
### Principe des analyseurs de gaz

- Ionisation des molécules de gaz
- Extraction et accélération des ions
- Séparation
- Détection

### 3/ La mesure du vide

- les analyseurs de gaz en technique du vide

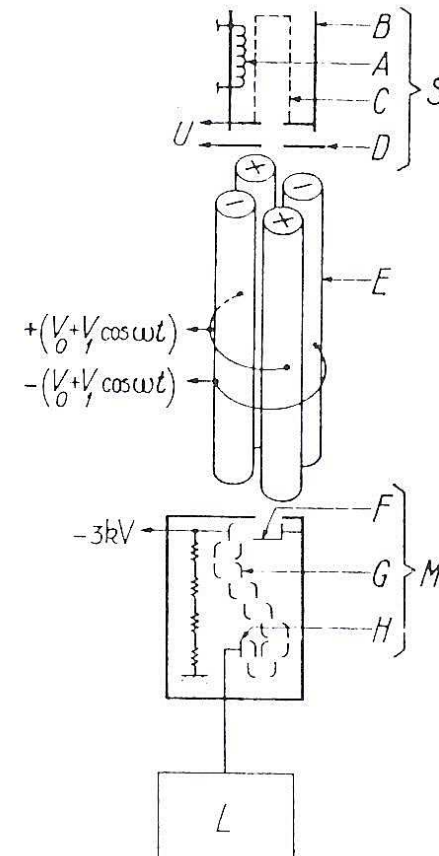
séparation magnétique



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

Détection de fuite (traceur He)

séparation quadripolaire





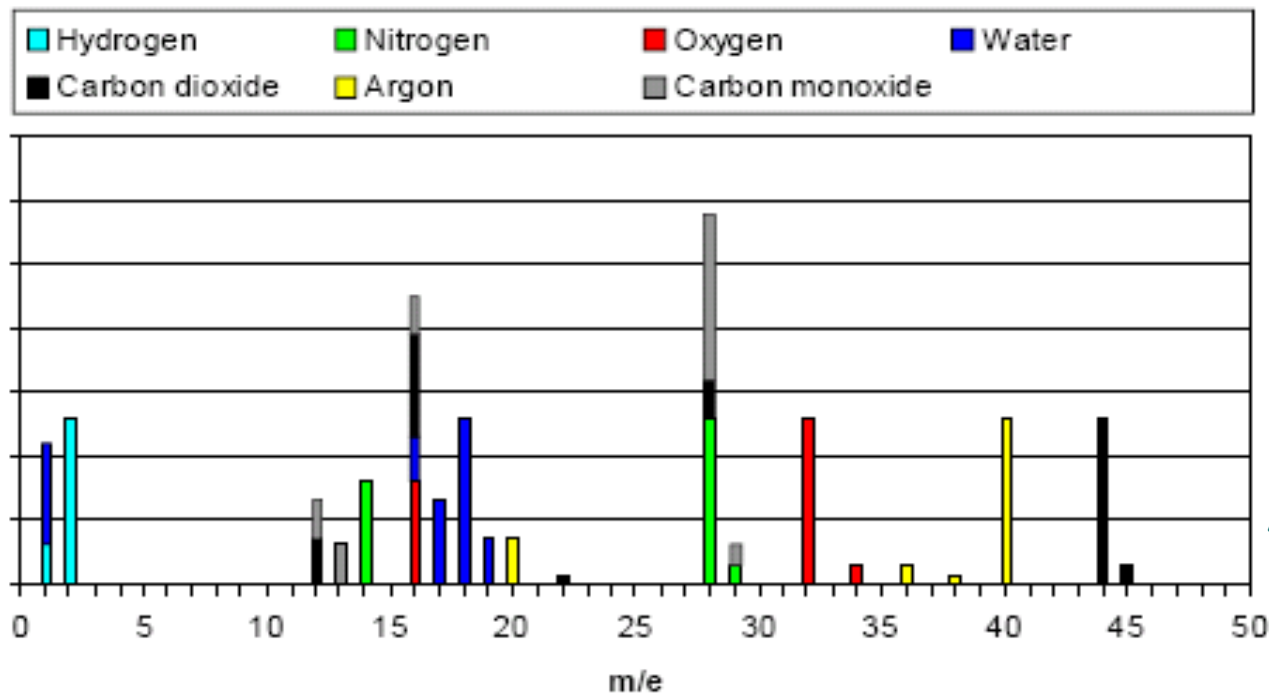
### 3/ La mesure du vide - analyse des pressions partielles

#### Interprétation des spectres

Pour un même corps :

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

→ analyse délicate



Pic 100 %  
N<sub>2</sub> et CO même 100%

H<sub>2</sub>O : 18 H<sub>2</sub>O+/  
17 OH+ / 16 O+  
/19 H<sub>3</sub>O+

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

# 3/ La mesure du vide - analyse des pressions partielles

Pression partielle du composant n

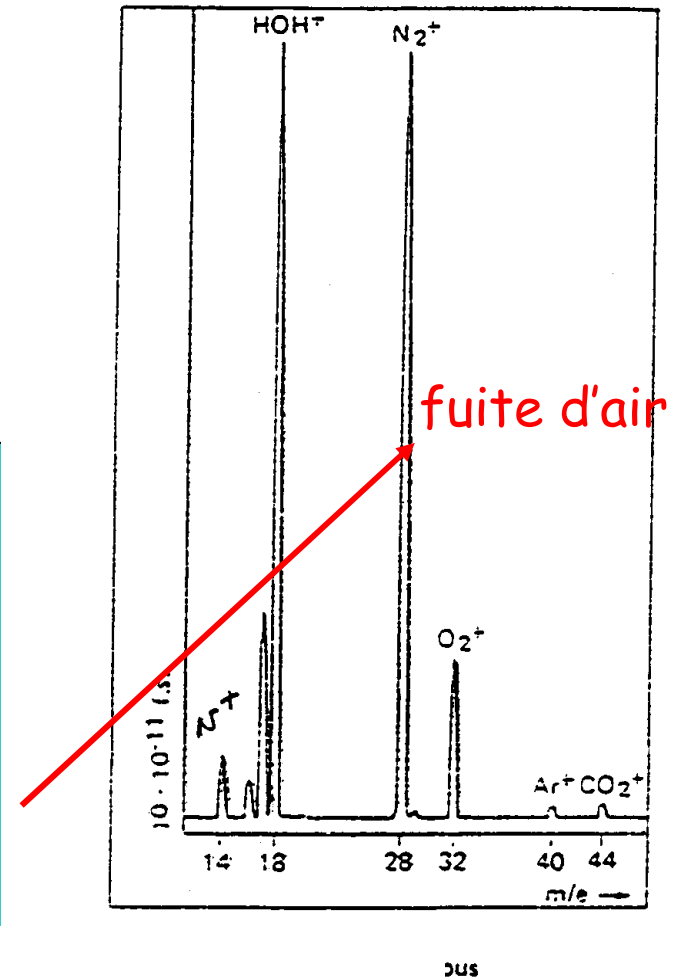
$$P_n = \frac{I_n^+}{S_n}$$

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

H2O	$2 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{mb}^{-1}$
N2	$2 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{mb}^{-1}$
O2	$1,4 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{mb}^{-1}$

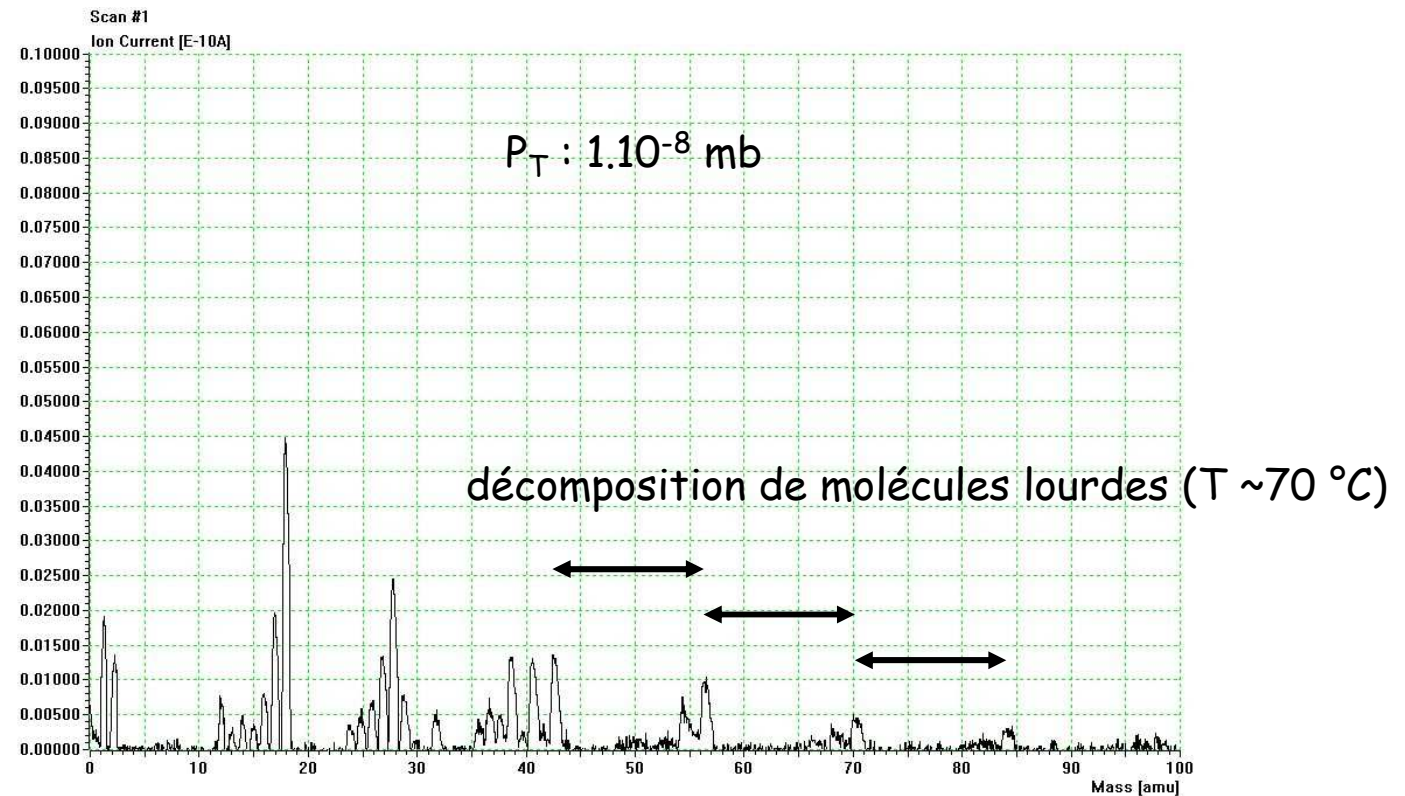
$P_{18} : 5 \cdot 10^{-7} \text{ mb}$   
 $P_{28} : 5 \cdot 10^{-7} \text{ mb} \Rightarrow$   
 $P_{32} : 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ mb}$

$P_{N_2} / P_{N_2} + P_{O_2} = 78\%$   
 $P_{O_2} / P_{N_2} + P_{O_2} = 21\%$



### 3/ La mesure du vide - analyse des pressions partielles

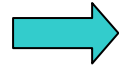
#### Évaluation de l'état des surfaces des ensembles sous vide



**Notion de vide propre** : après 100h,  $\text{H}_2 > 70\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} < 20\%$ , pas de 19 (F)  
de 35 et 37 (Cl) ni 48 (SO)  
Pas de pic  $> m/q : 50$

### 3/ La mesure du vide : l'étanchéité

---



Niveau d'étanchéité : spécification essentielle à la conception des systèmes de vide

Objectif : quantification et localisation de la fuite

flux de fuite : nombre de particules /s

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

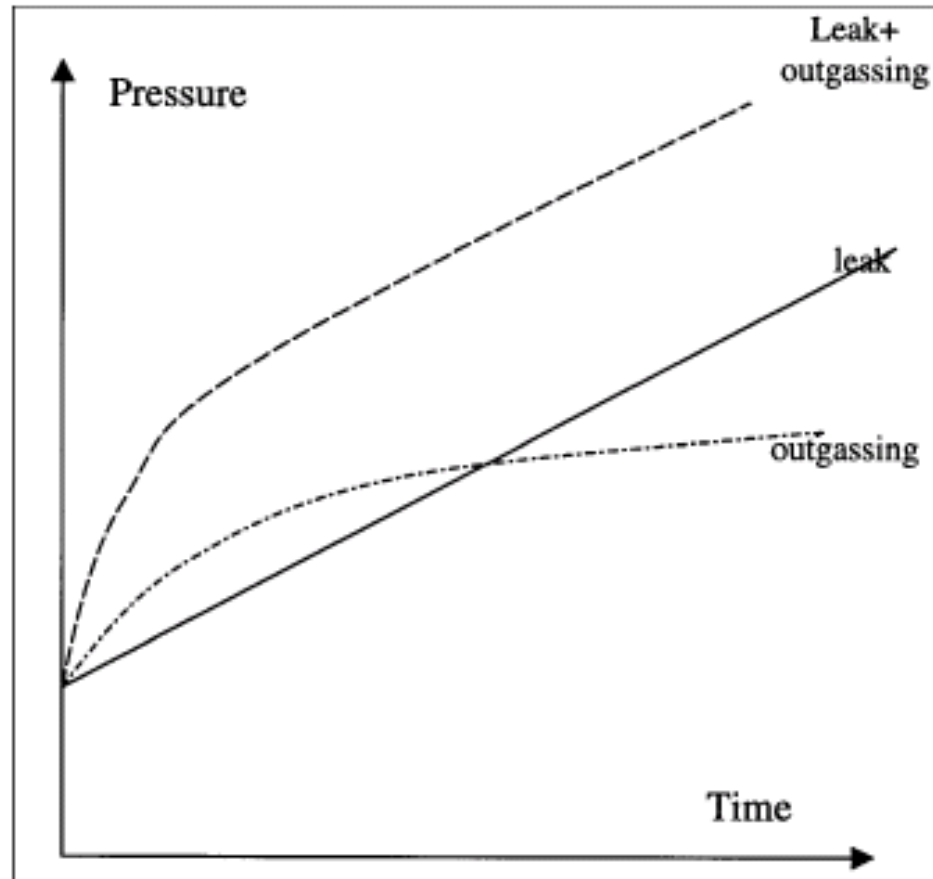
Unités :

- Pa.m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>
  - mb.l.s<sup>-1</sup>
  - atm.cm<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> (std. cc. s<sup>-1</sup>)
- 1 Pa. m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> = 10 mb.l.s<sup>-1</sup> ~ 10 atm.cc.s<sup>-1</sup>

### 3/ La mesure du vide : l'étanchéité

- mesure de  $P=f(t)$

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



## 3/ La mesure du vide : l'étanchéité

---

### par effets mécaniques

- sonore  $Q_f > 10^{-2} \text{ Pa.m}^3.\text{s}^{-1}$
- formation de bulles  $Q_f > 10^{-5} \text{ Pa.m}^3.\text{s}^{-1}$   
(mise en pression de la pièce à tester)

### 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

### 3/ La mesure du vide : l'étanchéité

#### La 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)*

Contrôle global ou par aspersion

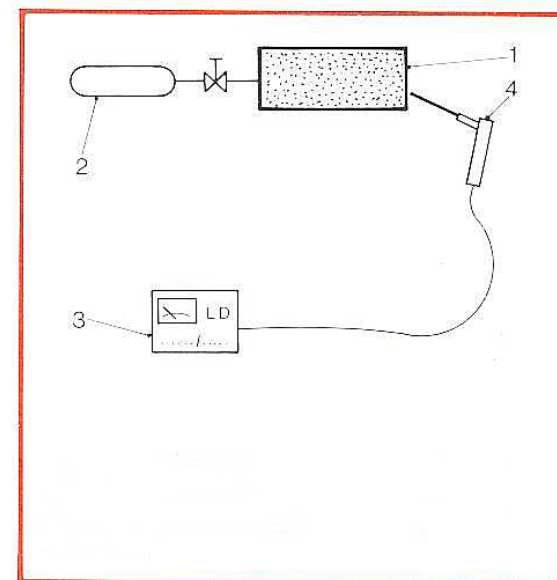
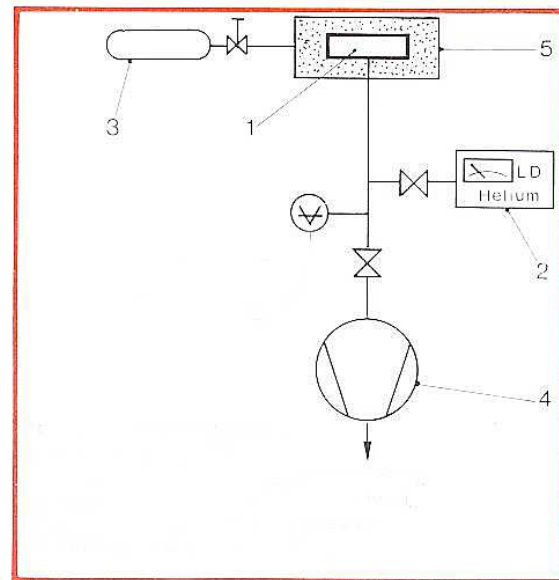
Contrôle par reniflage

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

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

! *temps de réponse*

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

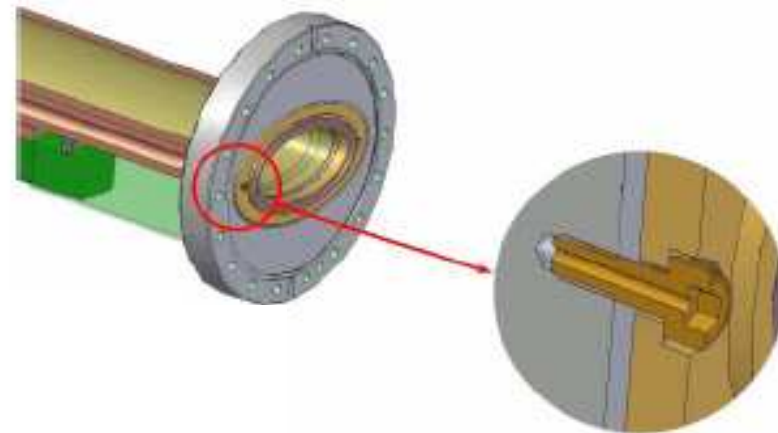
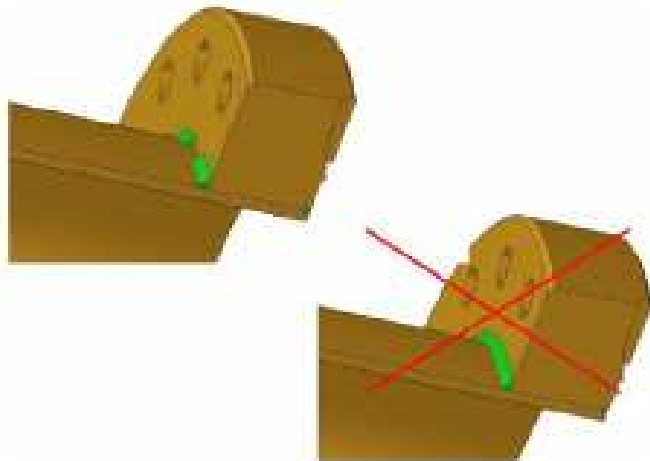


### 3/ La mesure du vide : l'étanchéité

Les fuites virtuelles → difficiles à identifier, à localiser, à réduire...



Spécifications pour la conception des ensembles mécaniques sous vide



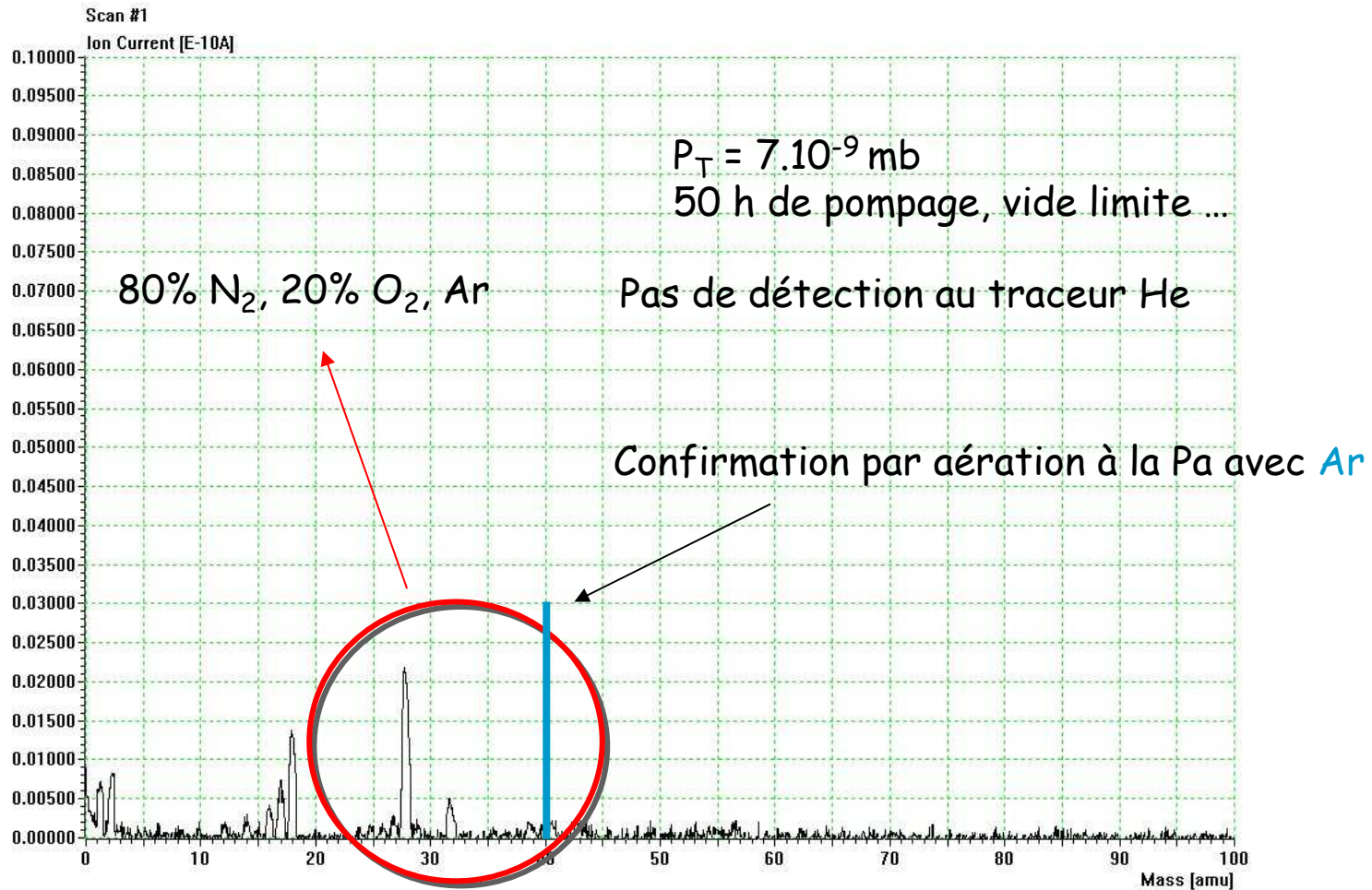
nb de molécules dans  $1 \text{ mm}^3$  à la Pa ?

$2,5 \cdot 10^{16}$  autant que dans  $10 \text{ m}^3$  à  $10^{-7} \text{ hPa}$ ..



### 3/ La mesure du vide : l'étanchéité

#### Les fuites virtuelles : identification





## 3/ technologie du vide : conception des systèmes

---

- **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



# quelques références bibliographiques

---

J. Delafosse & G. Mongodin.  
Les calculs de la Technique du Vide.  
SFV. Paris 1960.

G. Rommel.  
Les Techniques de l'Ingénieur B4020 à B4120. Paris.  
G. Rommel.  
Notions de base en Technique du Vide.  
SFV. Paris 1995.

J.M. Lafferty.  
Foundations of Vacuum Science and Technology. John Wiley & sons. New-York  
(1997).

S. Dushman & J.M. Lafferty.  
Scientific Foundations of Vacuum Technique.  
J. Wiley & sons. New-York 1966.

L'école du CERN : Vacuum Technology. CERN 99-05. 1995.  
**Vacuum in accelerators CERN 2007- 003**

# info : création du réseau des technologies du vide

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

**Réseau des technologies du vide** - Mozilla Firefox

Fichier Édition Affichage Historique Marque-pages Outils ?

http://rtvide.cnrs.fr/

Les plus visités RT vide messagerie CNRS/UR... Grand Accélérateur N... Presseurop | Google Mappy - plans, itinéraire...

Mission Ressources et Compétences Technologiques

MRCT Le CNRS Autres sites CNRS

**À la une**

**Ultravide des grands instruments.**

Le bureau régional de la formation de la DR4 organise une [formation sur ce thème](#) du 21 au 23 septembre 2009

**À noter**

**MRCT**  
La MRCT est une structure interdisciplinaire originale ayant un rôle directement opérationnel et (...)

**Présentation**

**Liste de diffusion**

**Formations**

**Journées du Réseau**

**Ressources et Liens**

**Contacts**