Le vide dans les accélérateurs

P. Dolégiéviez

dolegieviez@ganil.fr

Ecole des Accélérateurs – IN2P3
La Londe Les Maures 11 – 16 Novembre 2007

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 ($P < P_{atmosphérique}$)

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

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

1. Généralités

avant d'aller plus loin

unités de pression utilisées dans le domaine du vide :

le Pascal (SI) (1N/m²)
le mbar (UE)
le Torr (US)
le mmHg .. (=1Torr)
1 Torr = 133,3 Pa

1 Pa = 10^{-2} 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

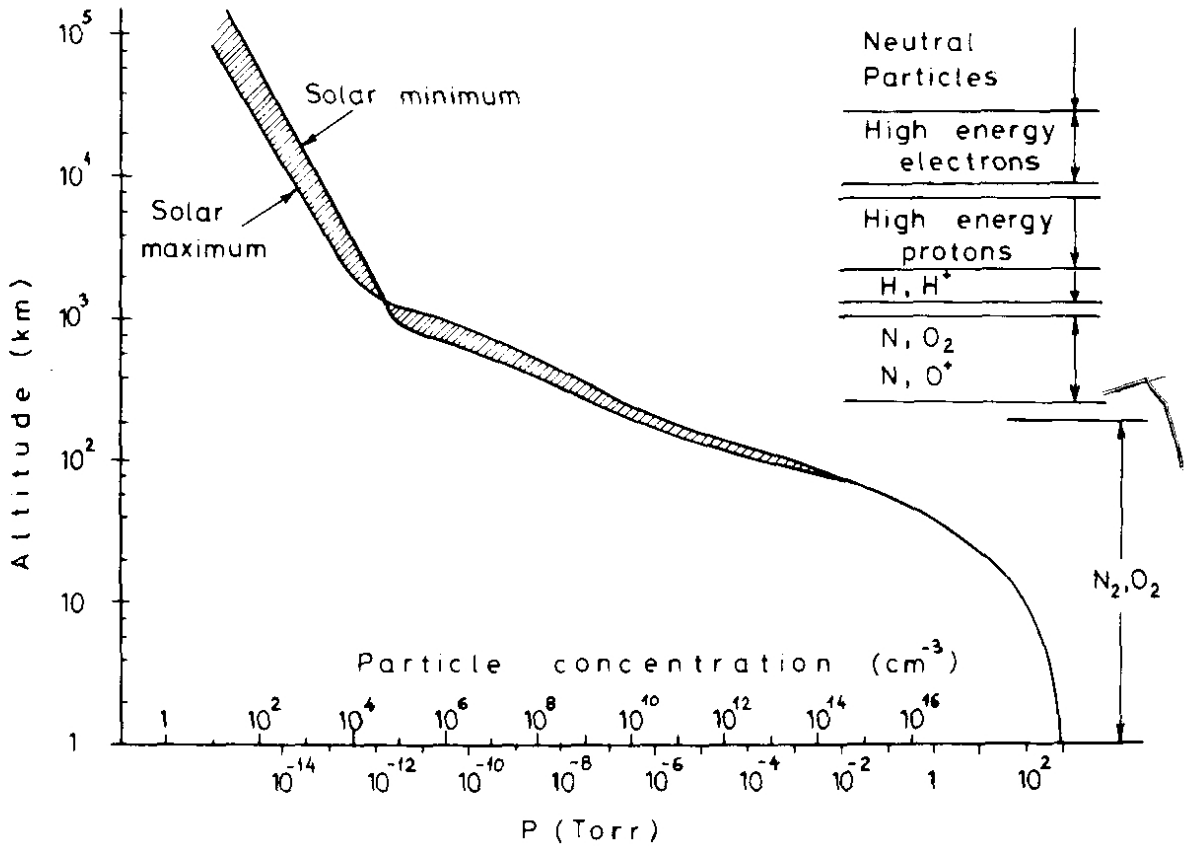


Fig. 1.2 Characteristics of the high altitude atmosphere surrounding the earth. Plotted after data from Nicolet (1960), Dushman and Lafferty (1962), Holkeboer *et al.* (1967), Rittehouse and Singletary (1968), Champion (1969).

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	2.10^{-5}
Au voisinage du sol lunaire	0	5.10^{-7}
A l'altitude de la lune	384000	5.10^{-9}
Dans notre galaxie	(estim.)	10^{-15} - 10^{-17}
Espace inter-galactique	(estim.)	10^{-22} - 10^{-24}

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

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

1/ Composition de l'air atmosphérique sec

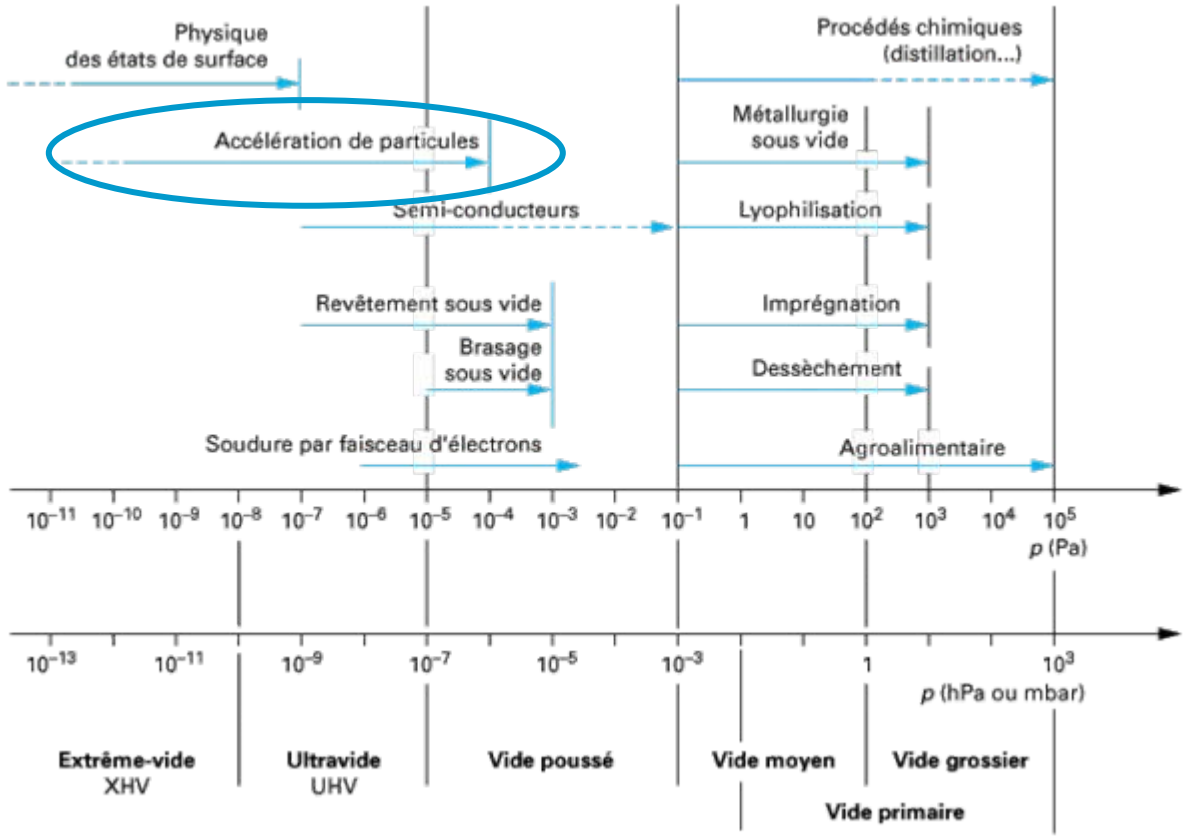
		Concentration (%)	Pression partielle (mbar)
Azote	N2	78	780
Oxygène	O2	21	210
Argon	Ar	0.93	9.3
Gaz carbonique	C02	0.03	0.3
Néon	Ne	0.0018	$1.8\ 10^{-2}$
Hélium	He	O.OOO5	$5\ 10^{-3}$
Krypton	Kr	0.0001	$1\ 10^{-3}$
Hydrogène	H2	0.00005	$5\ 10^{-4}$
Xénon	Xe	O.000006	$6\ 10^{-5}$

$\varepsilon = 65\%$

$P_p(H_2O)=15$ mb

$$P_T = \sum P_P$$

1/ Le vide : pourquoi faire ?



Domaine d'application étendu ⇒ choix d'une technologie adaptée

1/ Le vide : pourquoi faire ?

dans les accélérateurs de particules :

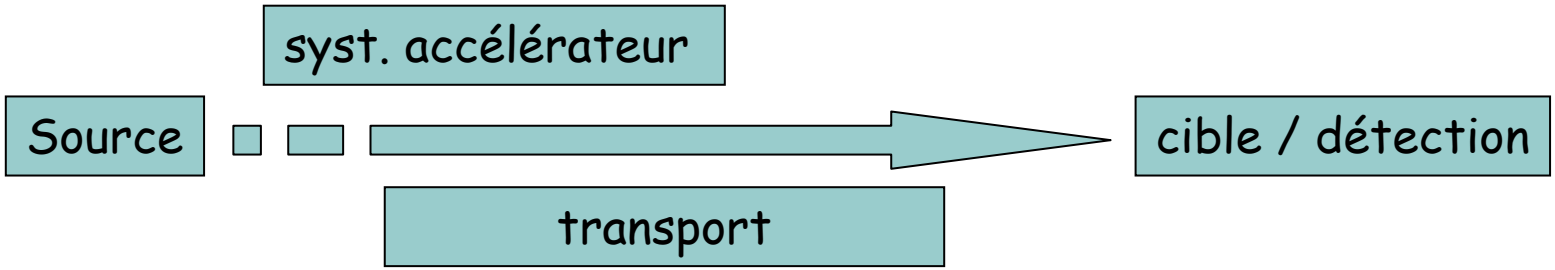
➢ limiter les interactions du faisceau avec le gaz résiduel

perte du faisceau par collision avec le gaz résiduel

- Collisions élastiques
- Collisions inélastiques :
  - perte d'energie
  - 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^3)	Libre parcours moyen	Nb de chocs ($cm^{-2}.s^{-1}$)	Tps de formation d'une monocouche
1013	1 kg/cm^2	$2,5.10^{19}$	0,1 µm	$2,9.10^{23}$	$3,4.10^{-9}$ s
1	1 g/cm^2	$2,47.10^{16}$	0,1 mm	$2,9.10^{20}$	$3,4.10^{-6}$ s
10^{-3}	1 mg/cm^2	$2,47.10^{13}$	10 cm	$2,9.10^{17}$	$3,4.10^{-3}$ s
10^{-6}	1 $\mu g/cm^2$	$2,47.10^{10}$	100 m	$2,9.10^{14}$	3,4 s
10^{-9}	10 $\mu g/m^2$	$2,47.10^{7}$	100 km	$2,9.10^{11}$	1 heure
10^{-12}	10^{-2} $\mu g/m^2$	$2,47.10^{4}$	10^5 km	$2,9.10^{8}$	40 jours
10^{-23}	10^{-7} $\mu g/km^2$	$2,47.10^{-7}$	10^{16} km	$2,9.10^{-3}$	10^{10} 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 <u>normales</u> (TPN) une mole de gaz occupe 22,4l et contient N molécules

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

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

<u>Conditions TPN :</u>

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

2.2/ Description macroscopique : Loi des gaz parfaits

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

Transformation isotherme : PV = cte (loi de Mariotte)
Transformation isobare : V/T = cte (loi de Gay Lussac)
Transformation isochore : P/T = cte (loi de Charles)

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

V=cte P=cte

P1,V1,T1 → P2,V2=V1,T2 → P3=P2,V3,T3

P2 = (P1/T1)T2 V3 = (V2/T2)T3

P2 V3 = P1V2 (T3/T1)

P3 V3 = (P1V1)/T1 T3

$$P\ V = R\ T$$

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
$k = 1{,}381.10^{-23}$ J/K (par molécule)

Soit $P V = N k T$ ou $\mathbf{P = n_V k T}$

avec n_V densité moléculaire

la pression est proport. à la densité moléculaire …

loi des gaz parfaits => description macroscopique

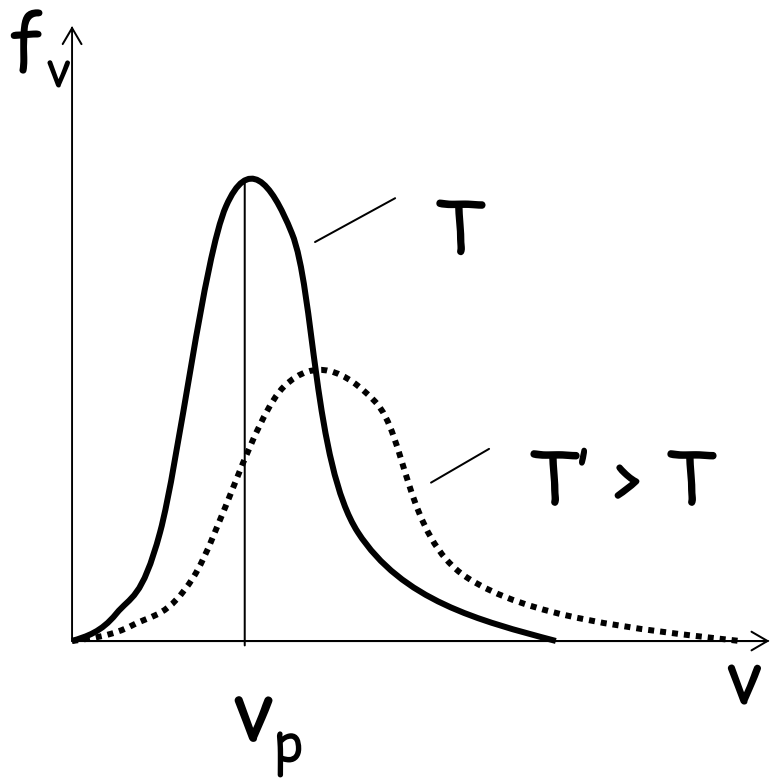
- la pression résulte de l'ensemble des chocs des molécules sur les parois (1 Pa = 1 N/m^2)
- notion de pressions partielles
- diminuer la pression revient à réduire le nombre de molécules ou leur vitesse (T)

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 ($E_{cinétique}$) 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)



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)

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

à 20°C, v_p ~400 m/s (N_2)
v_p ~1500 m/s (H_2) 5400 km/h …

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° => pas d'échange d'énergie, chocs élastiques

D'où la force de pression = variation de la qtté de mouvement => 2mv

Soit la pression **P = 2mv.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

$G = n_v (v/6)$ avec n_v densité moléculaire

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

en prenant la vitesse quadratique moyenne v_c

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

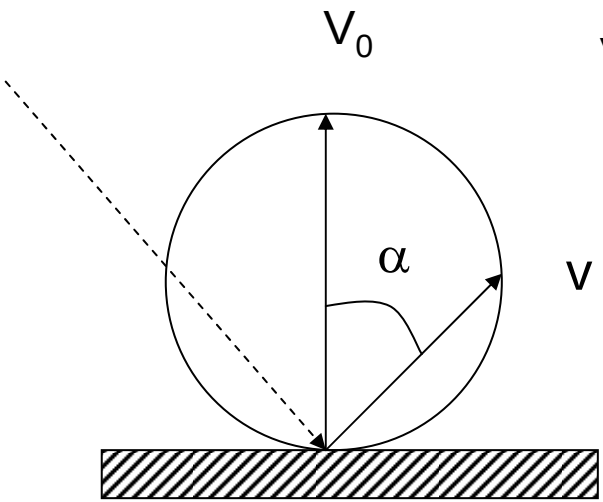
Pour P = 10^{-11} Pa technologie XHV (~ limite exp.)

à 293 K , il reste 2500 molécules/cm^3 …

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 parois (avec un temps de séjour τ_s) puis est ré-émise dans une direction avec une probabilité donnée par la loi de Lambert



$$V = V_0 \cos \alpha$$

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

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

avec E : chaleur d'adsorption
t_0 : période d'oscillation de la molécule adsorbée (~10^{-13} s à 20°C)

E dépend de la nature du gaz et de la parois

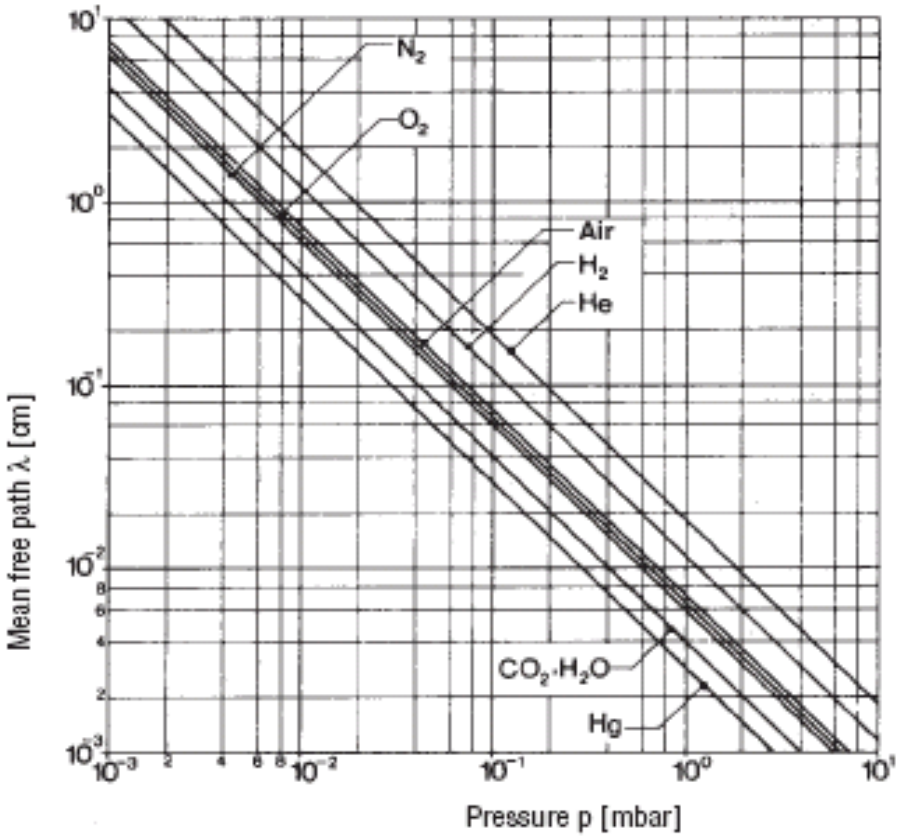
N_2	2 à 3	kcal/mole	physisorption	adsorption
H_2O	10 à 25	kcal/mole		
H/H_2 sur Fe	32	kcal/mole	chimisorption	

temps de séjour

- τ court ➡ écoulement en RM
- τ long ➡ phénomènes de surface
- τ très long ➡ piège pour les gaz

2.3/ libre parcours moyen

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



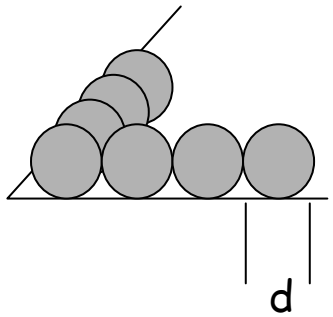
Lm ➡ définition du vide poussé
(intéraction des molécules de gaz avec les parois, régime d'écoulement)

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 :

$n = \frac{1}{4} . n_V . V_m$ (théorie cinétique)



Pour former une monocouche , il faut un temps :

$\tau = \mu_s / n$ (μ_s nb de molécules par unité de surface)

pour des molécules alignées :

$\mu_s = 1 / d^2$ (d diamètre de la molécule)

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

nb. de molécules pour une monocouche (pour N_2 : $\mu_s = 7.10^{18}$ /m²)

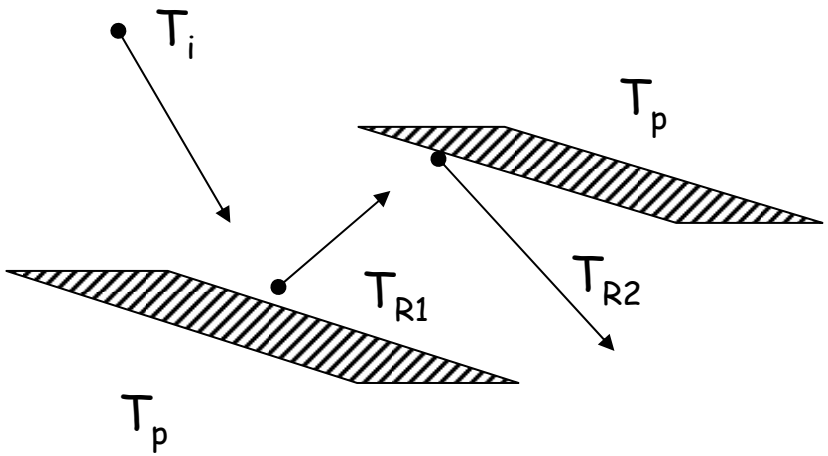
pour N_2 à 300K

τ = 2,5s à 10^{-4} Pa

~7h à 10^{-8} Pa

2.3/ accomodation

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



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

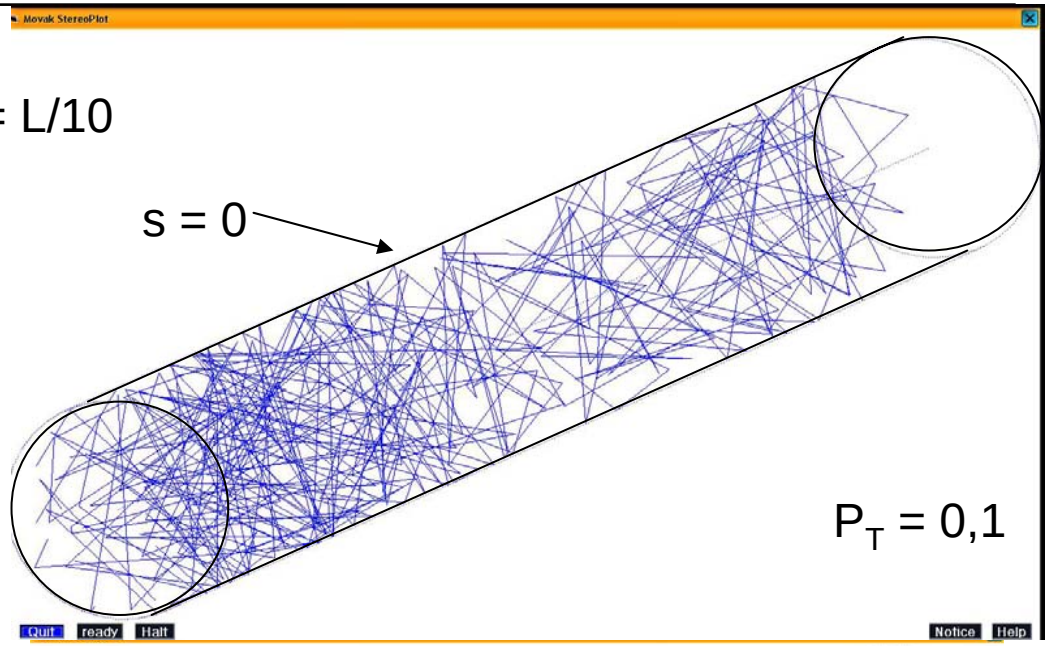
Le coefficient d'accommodation définit la capacité d'une paroi à échanger de l'énergie avec une molécule de gaz (modifier sa T°).

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

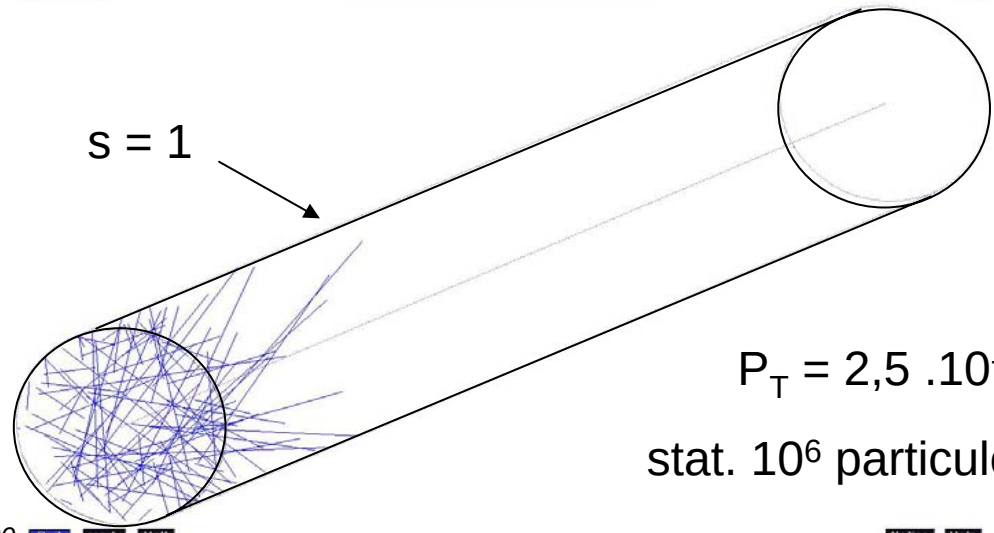
2/3 probabilité de transfert (régime moléculaire)

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

$\Phi = L/10$

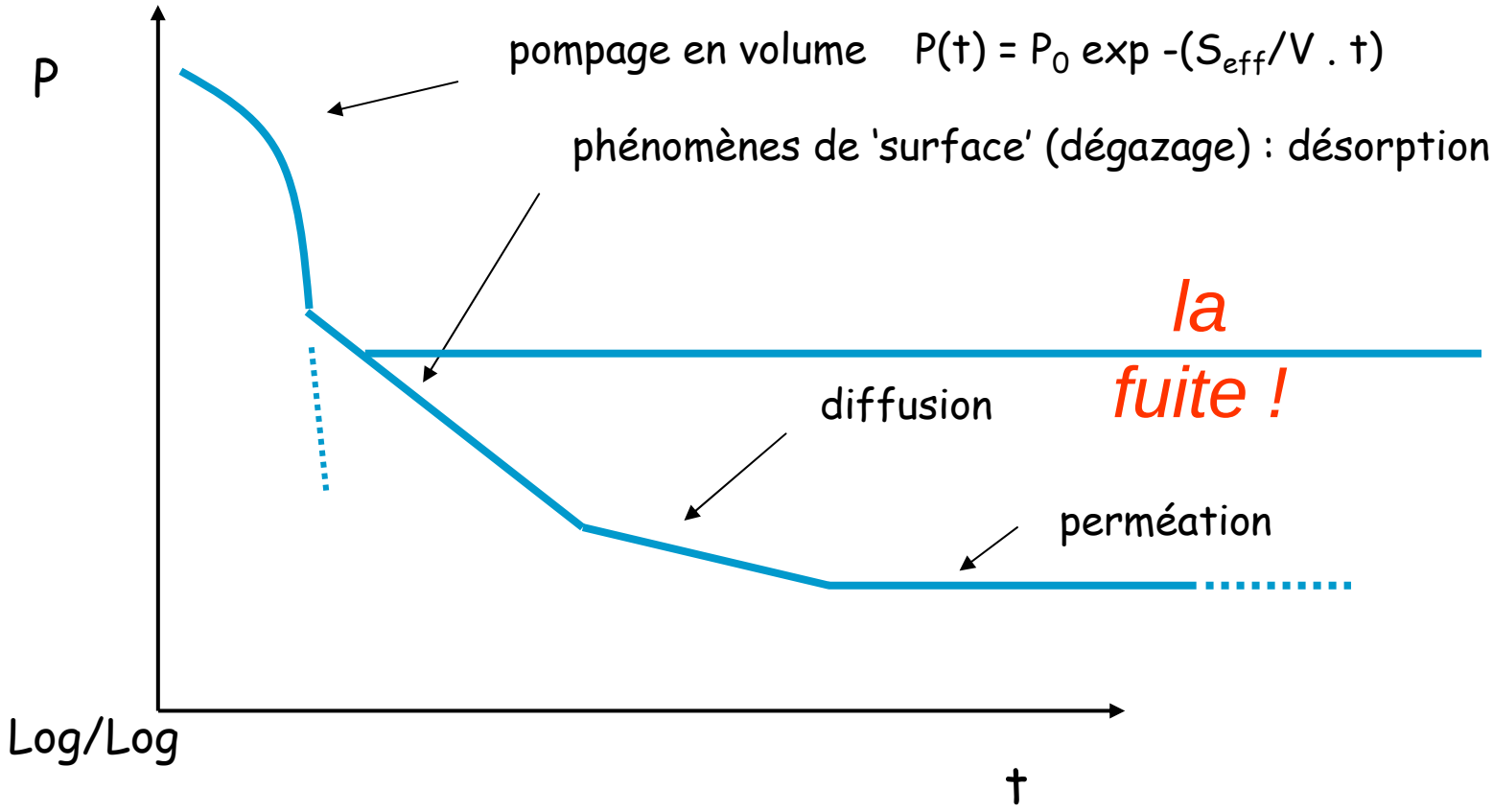


Prise en compte du coefficient de collage s



2.4/ Bilan des flux gazeux

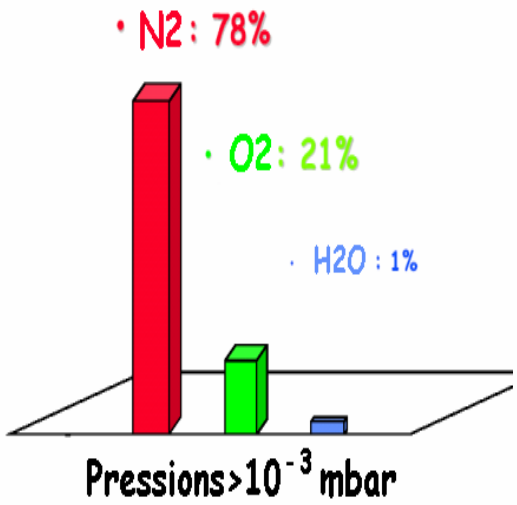
Analyse de la descente en pression

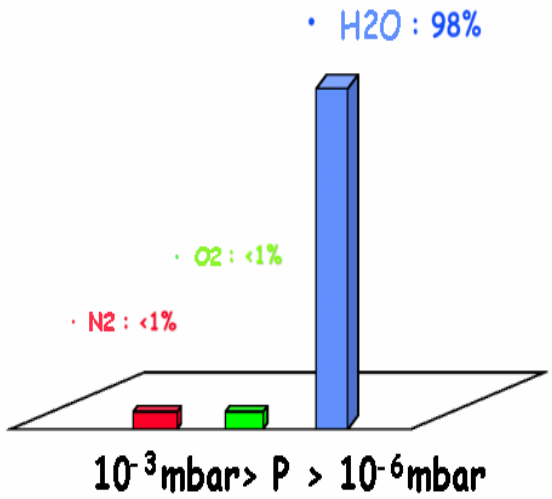


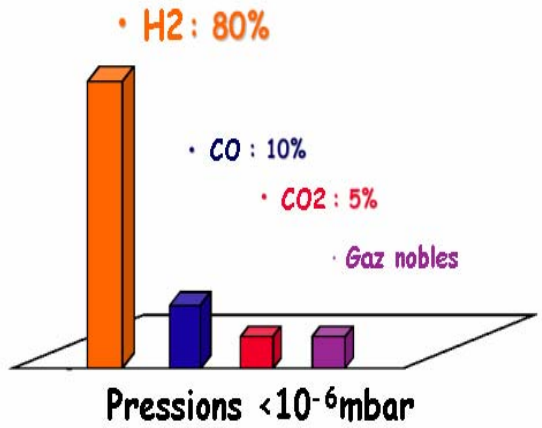
2.4/ Bilan des flux gazeux

Analyse de la descente en pression : aspect qualitatif

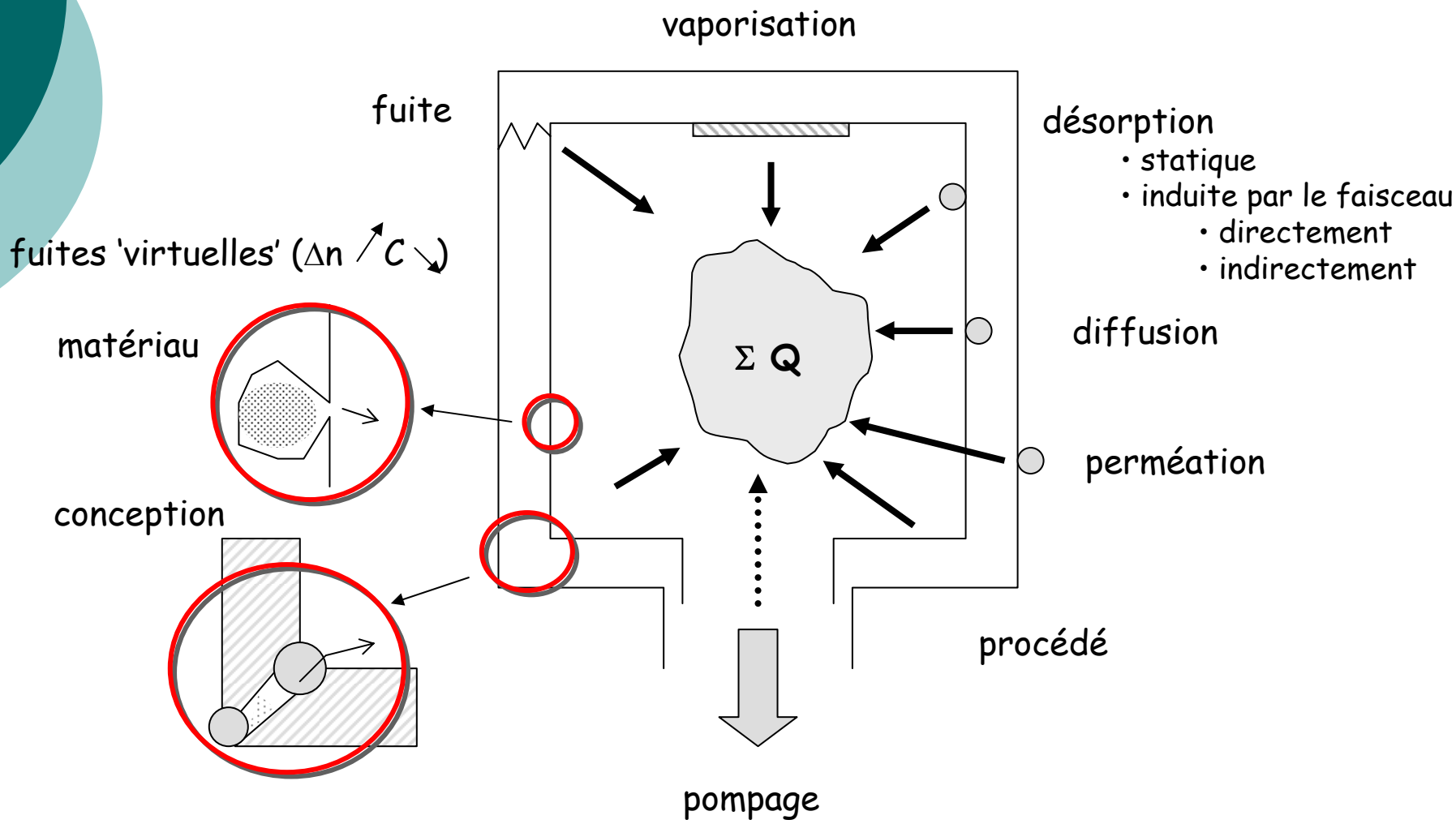
évolution type de la composition du vide résiduel d'un système UHV







2.4/ Bilan des flux gazeux

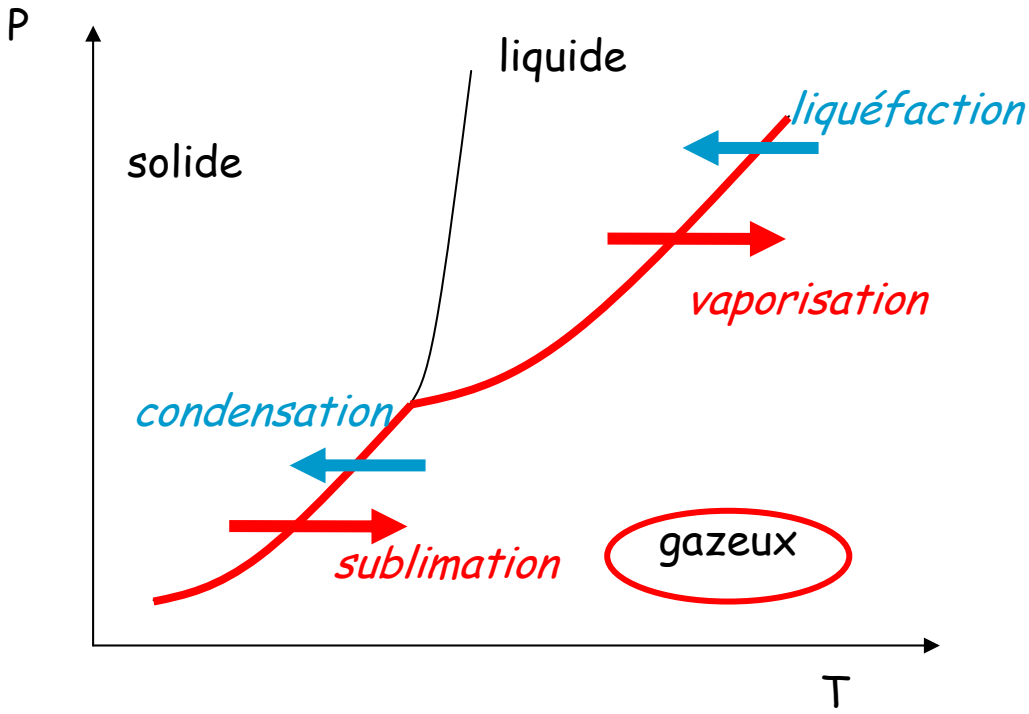


2.5/ Phénomènes de surface

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

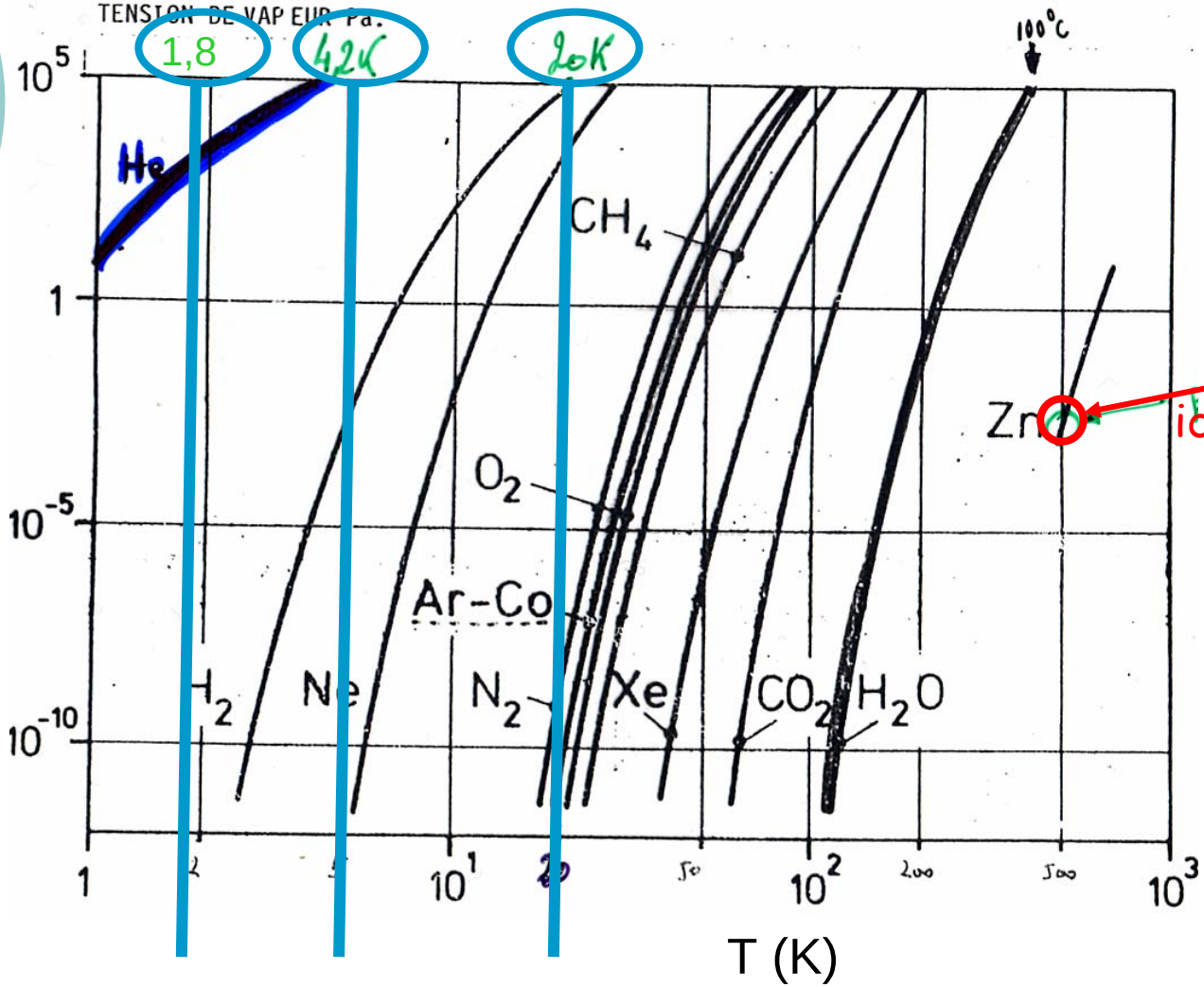
Diagramme de phases



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

2.5/ Phénomènes de surface

cryocondensation



10^{-3} Pa/200°C
idem pour Mg à 290°C

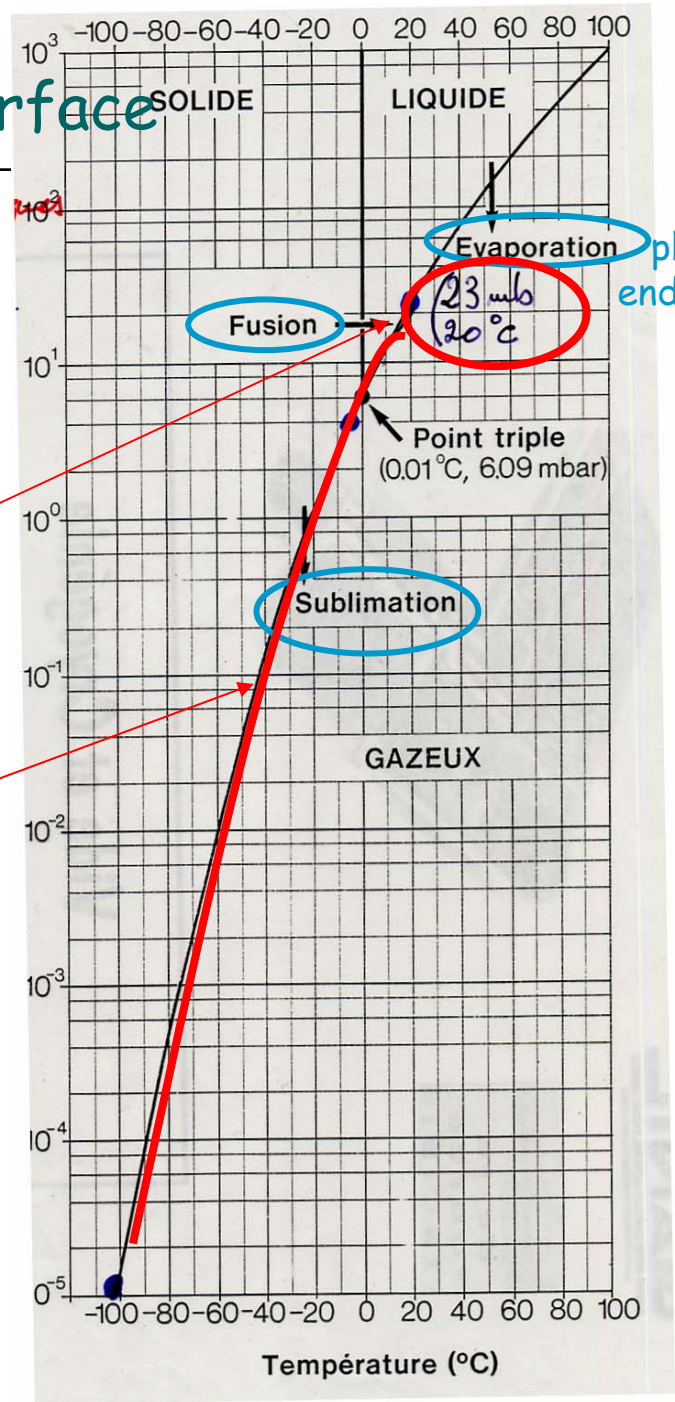
2.5/ Phénomènes de surface

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



phènomènes endothermiques

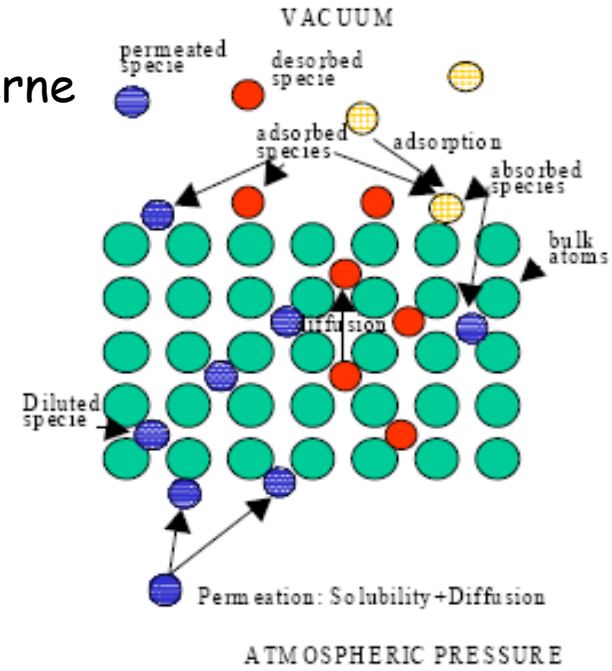
2.5/ Phénomènes de surface

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

$$q_{gp} = J.\frac{S}{e} f(P1 - P2)$$

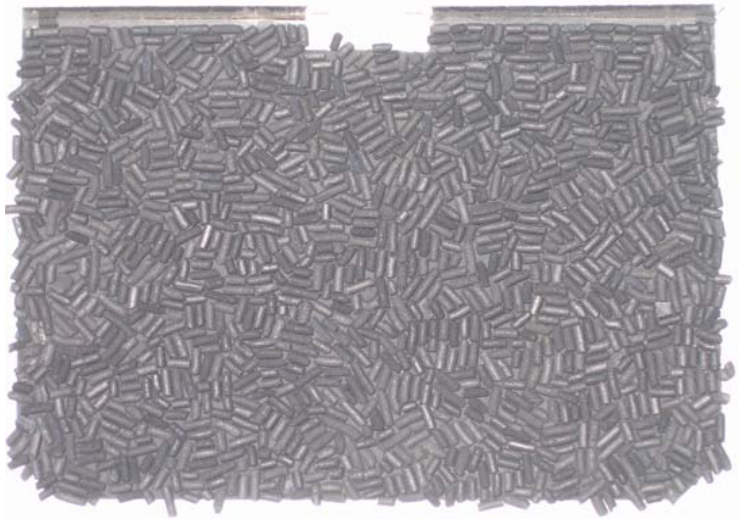


2.5/ Phénomènes de surface

Absorption des gaz par physisorption → *largement utilisé en technique du vide pour pièger les molécules de gaz résiduel*

Principaux absorbants utilisés :

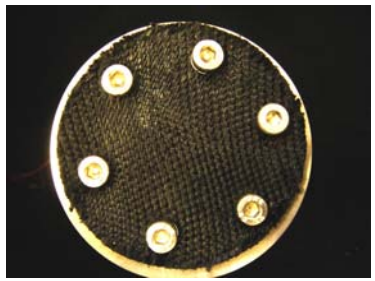
- Zéolites
- Silica-gel
- Charbon actif

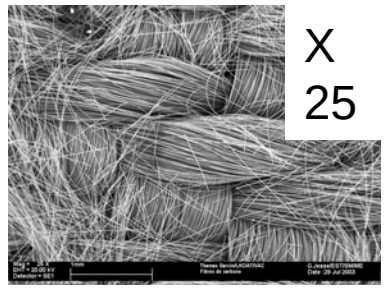


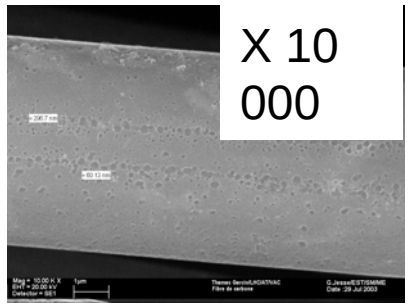
Charbon actif : le meilleur absorbant

- 1000 à 1700 m^2/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)





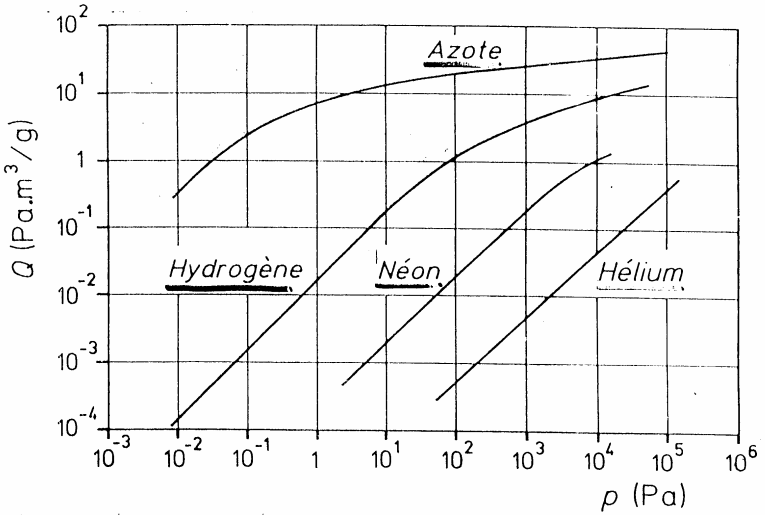


V. Anashin *et al.* Vacuum 75 (2004) 293-299

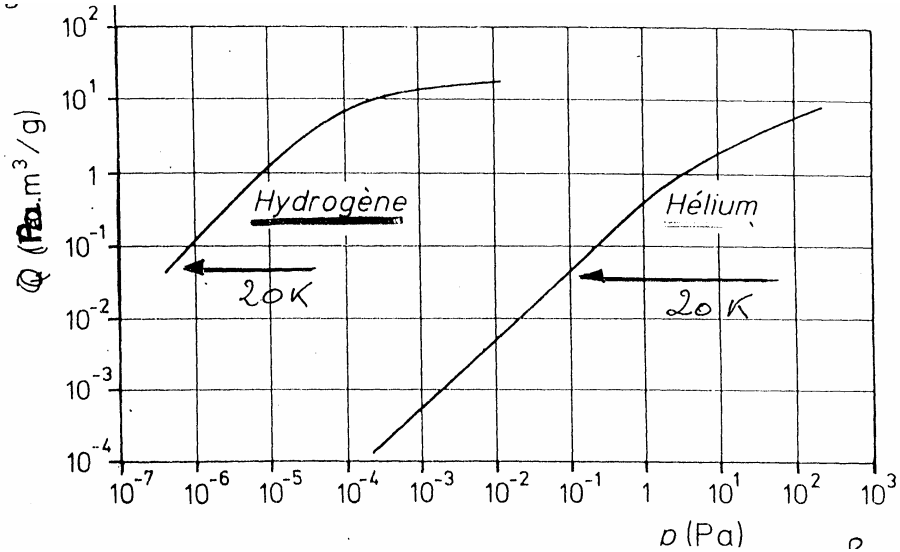
2.5/ Phénomènes de surface

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

Utilisation d'isothermes d'absorbtion



T = 77 K



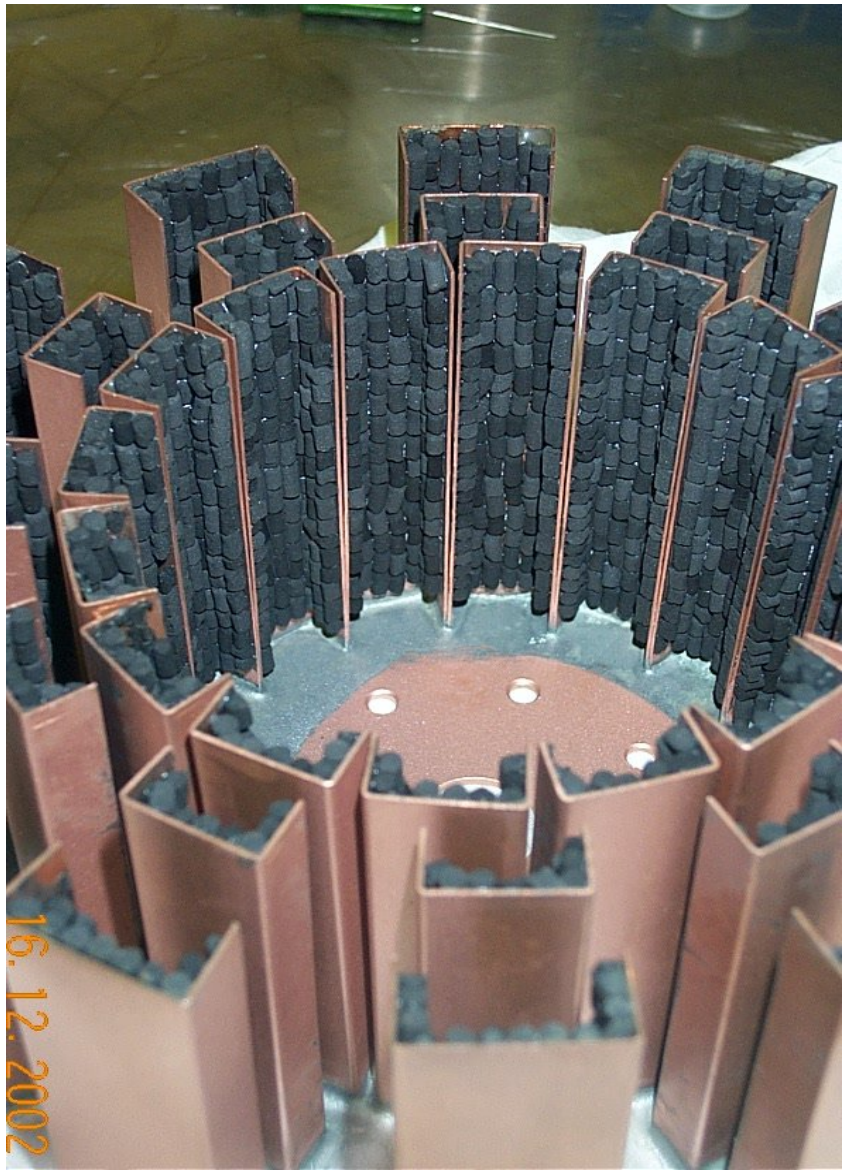
T = 20 K

à basses P Q = k P (loi de Henry)

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

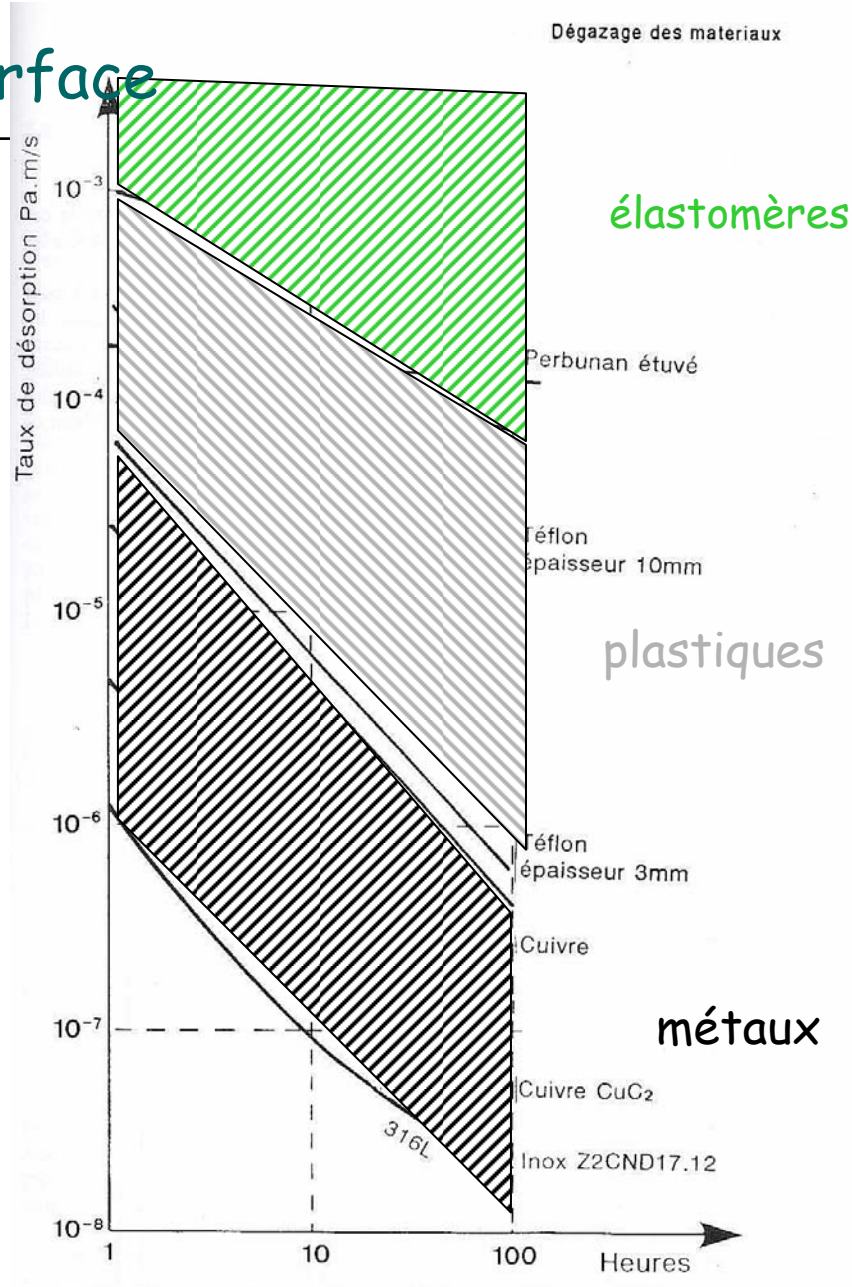
Évolution du dégazage sous vide

Élastomères et plastiques :
$Q_{g\,(t=0)}$ et

$$q_g \propto 1/\sqrt{t}$$

Métaux : $Q_{g\,(t=0)}$ et

$$q_g \propto 1/t$$

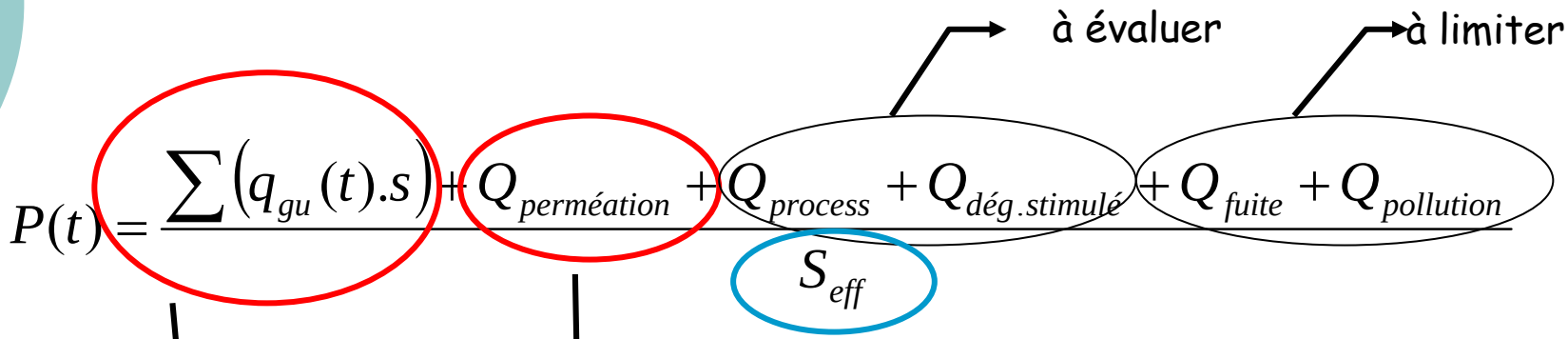


2.6/ flux gazeux : ordres de grandeur

Taux de désorption

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

2.6/ flux gazeux : conséquences sur la conception



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

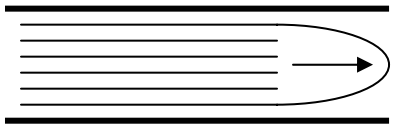
nb. de Reynolds

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

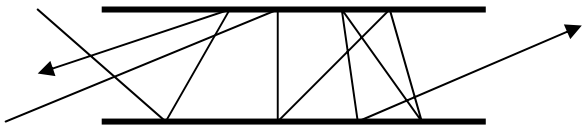
Flux gazeux ($Pa.m^3.s^{-1}$)

$$Q = P.q_V$$

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



Laminaire Re < 1200 Q < 1,4 10^3 d d/lm > 80



Moléculaire d/lm < 3

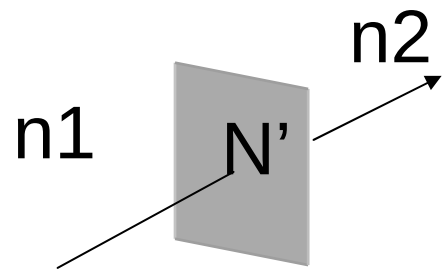
2.7/ écoulement des gaz : notion de conductance

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

$$N' = C\,(n1-n2)$$

Pour un ensemble isotherme :

$$N'kT = C(n1kT - n2kT)$$
$$= C\,(P1-P2)$$



En notant que $N' = n\,q_V$

$$P\,q_V = C\,(P1-P2)$$
$$Q = C\,.\,\Delta P \quad \text{(avec } C \text{ en } m^3.s^{-1})$$

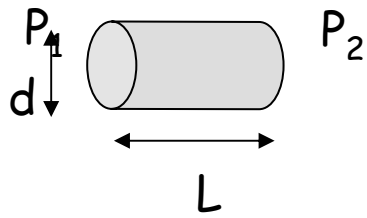
$C = 1/Z = Q / \Delta P$

Combinaison des circuits

- en série $\dfrac{1}{C} = \sum_i \dfrac{1}{C_i}$
- 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= 2cm, L=1m
RL : $\Delta P = 10^4$ Pa => c = 2,2 $m^3.s^{-1}$
$\Delta P = 10^2$ Pa => c = 2,2 10^{-2} $m^3.s^{-1}$
RM : => c = 9,8 10^{-4} $m^3.s^{-1}$

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

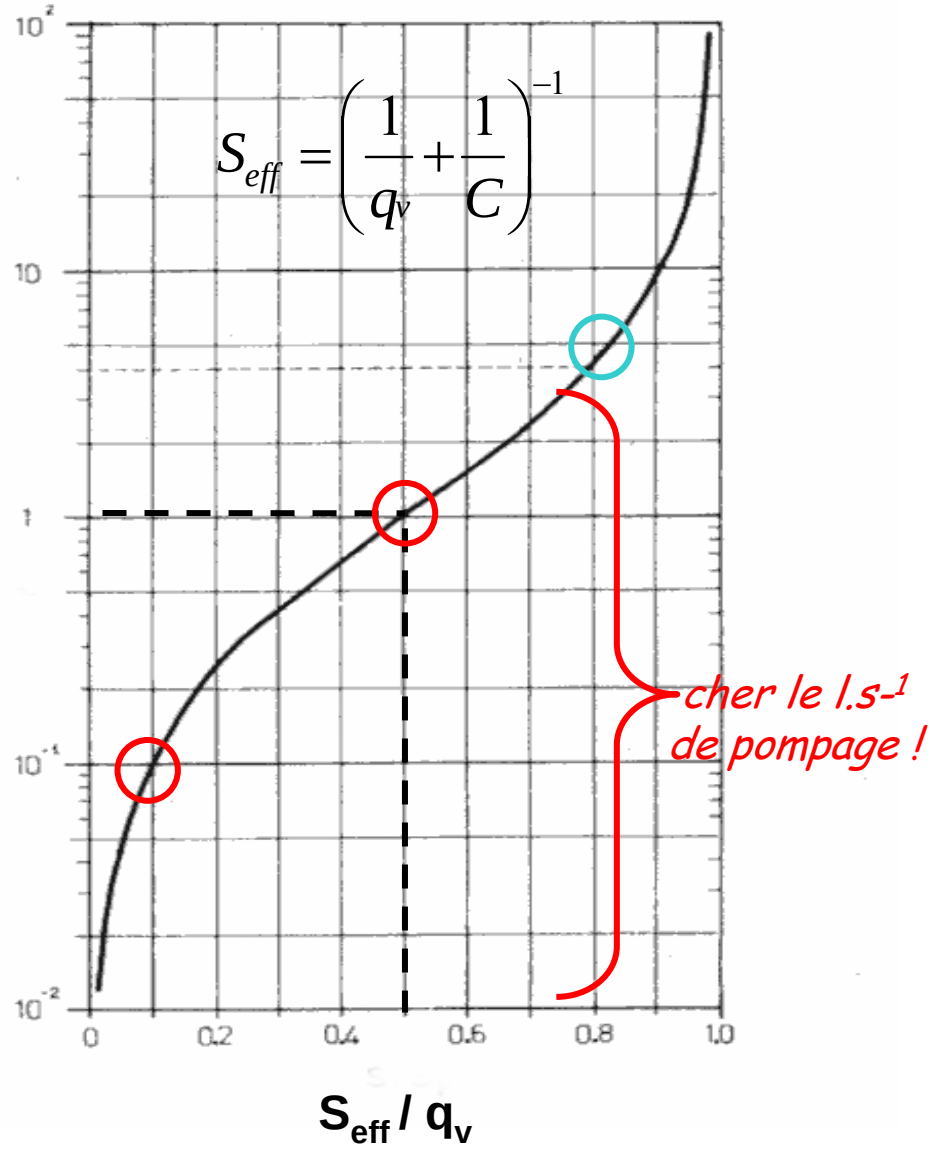
En régime d 'écoulement moléculaire utiliser des canalisations courtes et de grands diamètres pour *optimiser* les conductances

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

$$S_{eff} = \left(\frac{1}{q_v} + \frac{1}{C} \right)^{-1}$$

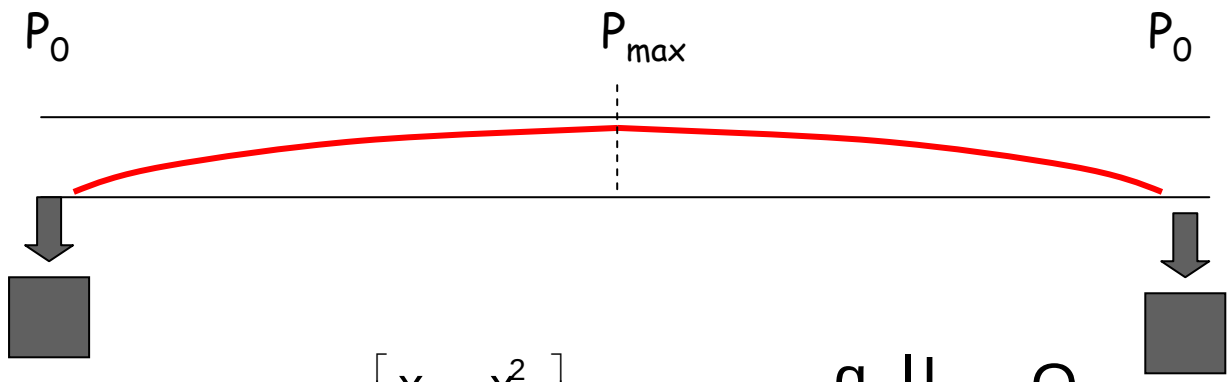


conductance : facteur limitant la vitesse de pompage effective

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



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

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

2.7/ écoulement des gaz

dégazage réparti => une solution : le pompage réparti

ruban NEG

LEP vacuum chamber section

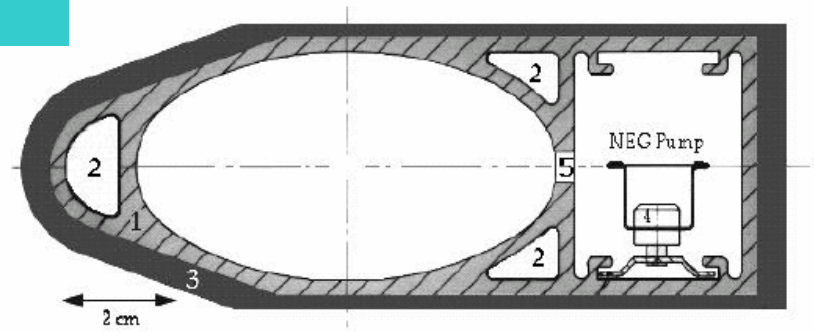
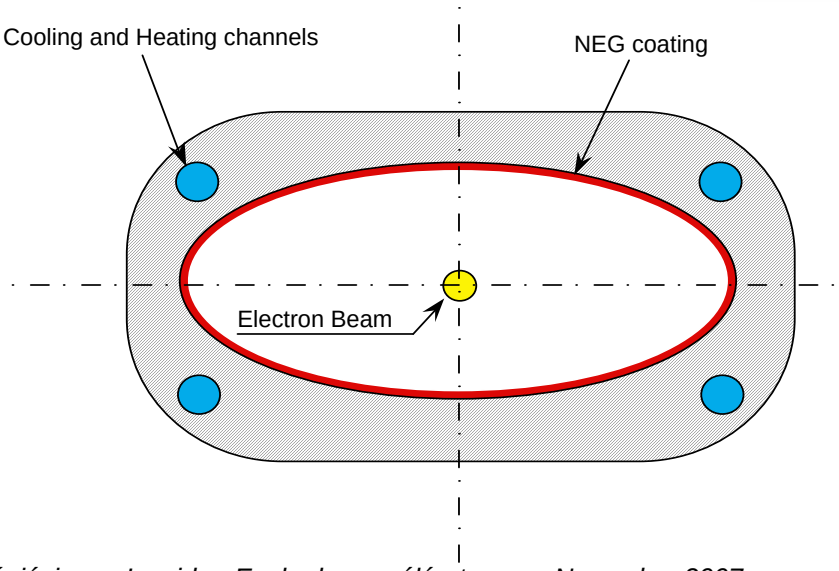


Fig. 2 : Vacuum chamber section made of (1) extruded aluminium profile with the elliptic beam channel, three cooling water ducts (2) and surrounded by 3 to 8 mm thick lead shield (3). The NEG pump (4) is housed in a separate pump channel connected to the beam channel by a row of longitudinal slots (5).

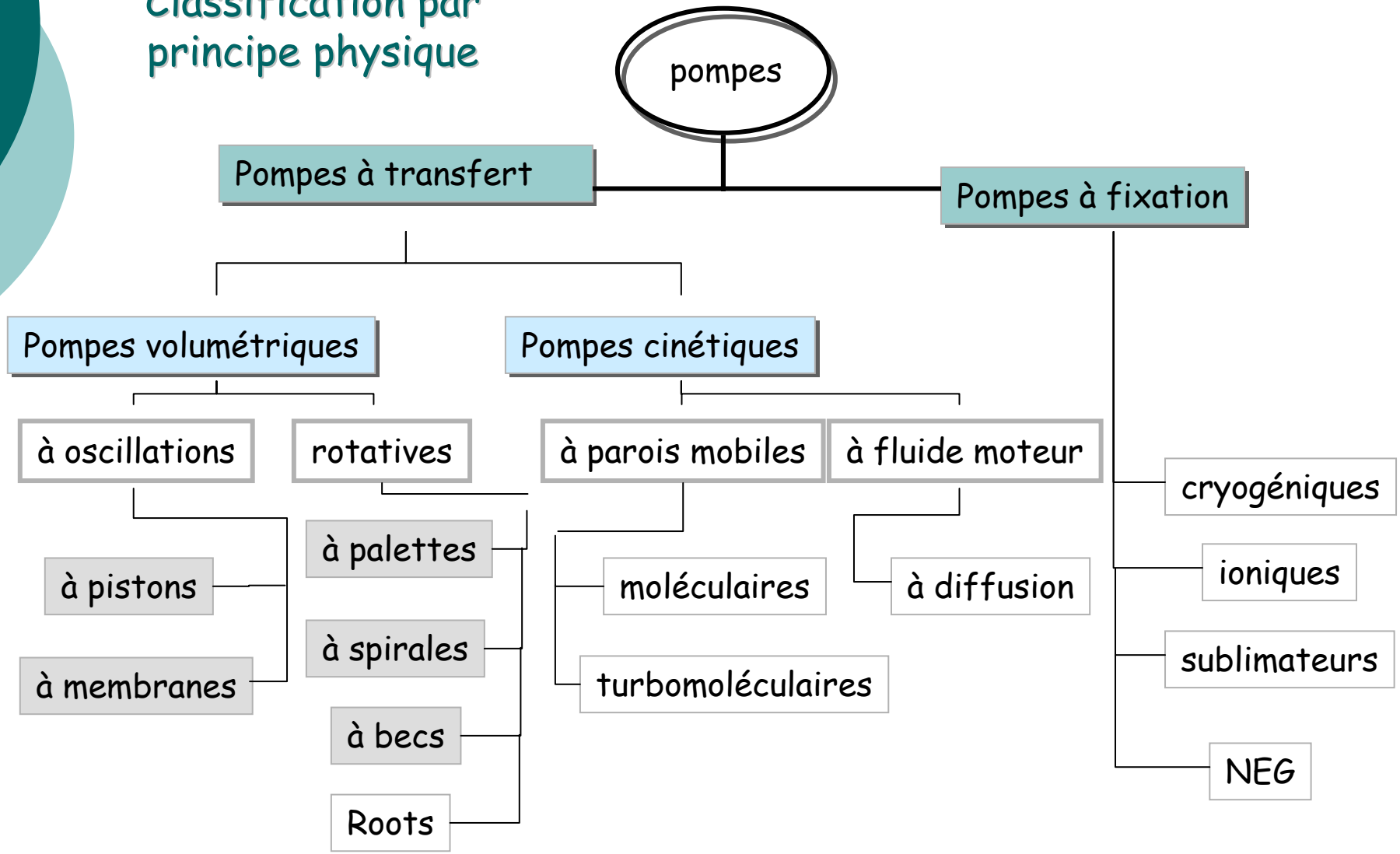


dépôt NEG

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 $q_v = f(P, gaz)$
- ✓ La pression limite
- ✓ La pression d'amorçage
- ✓ Le taux de compression

  pompes à transfert de flux

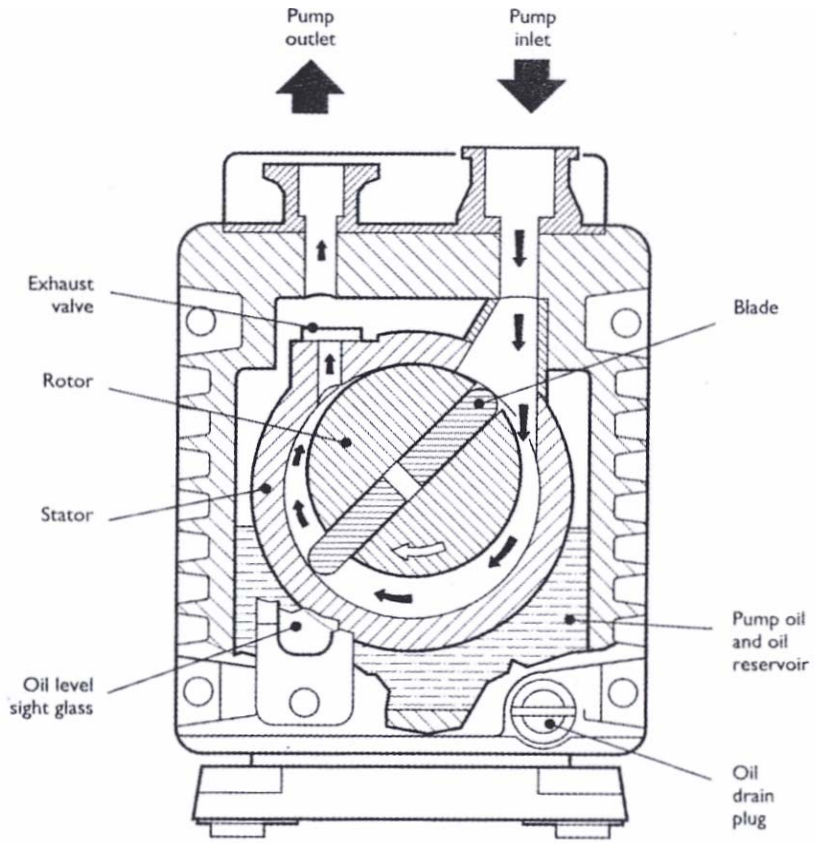
  $k = P_{ref} / P_{asp} = f(P, gaz)$
- ✓ Critères spécifiques au process
  - peu contaminante (technologie sèche)
  - pompage sélectif ou non
  - pas de vibration (paliers magnétiques)
  - critères de maintenance (zone INB)
  - …
  - coût (investissement, maintenance)

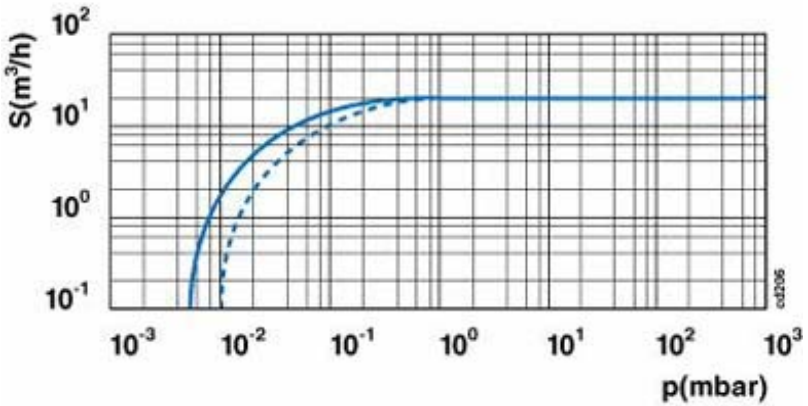
3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

Pompe à palettes

Pompe volumétrique rotative

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





-fiable, faible coût

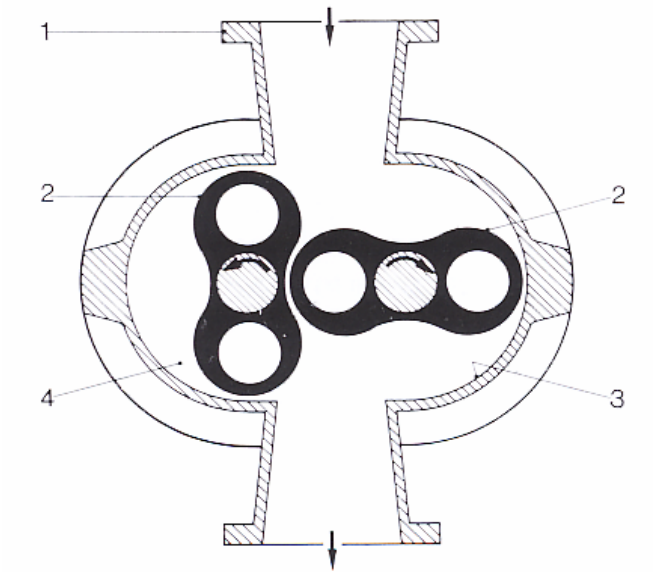
- présence d'huile

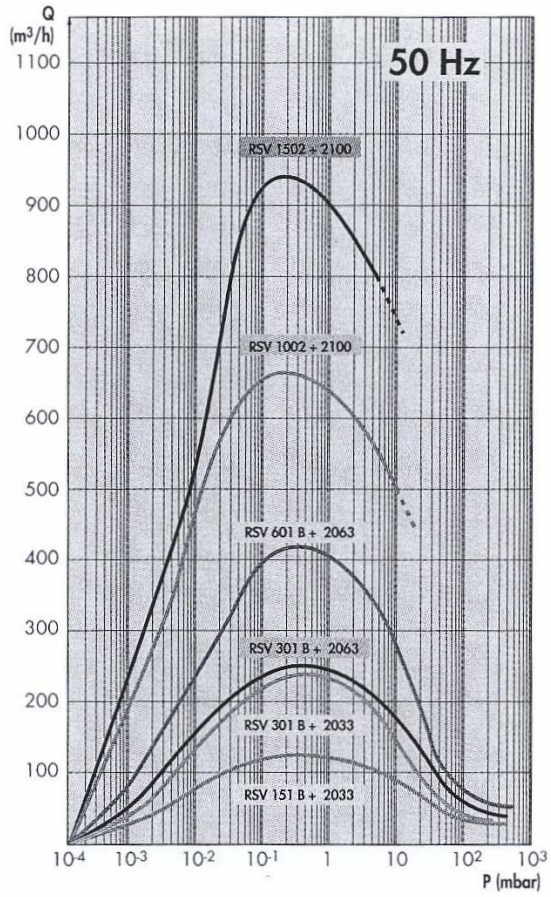
3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

Pompe Roots

Pompe volumétrique sans huile

- P_l~10^{-2} Pa
- Débit-volume élevé
- Pas de film d'huile => K ~ 50
- Couplage à une pompe primaire





- débits-volumes élevés, robustes

3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

Pompe à diffusion d'huile

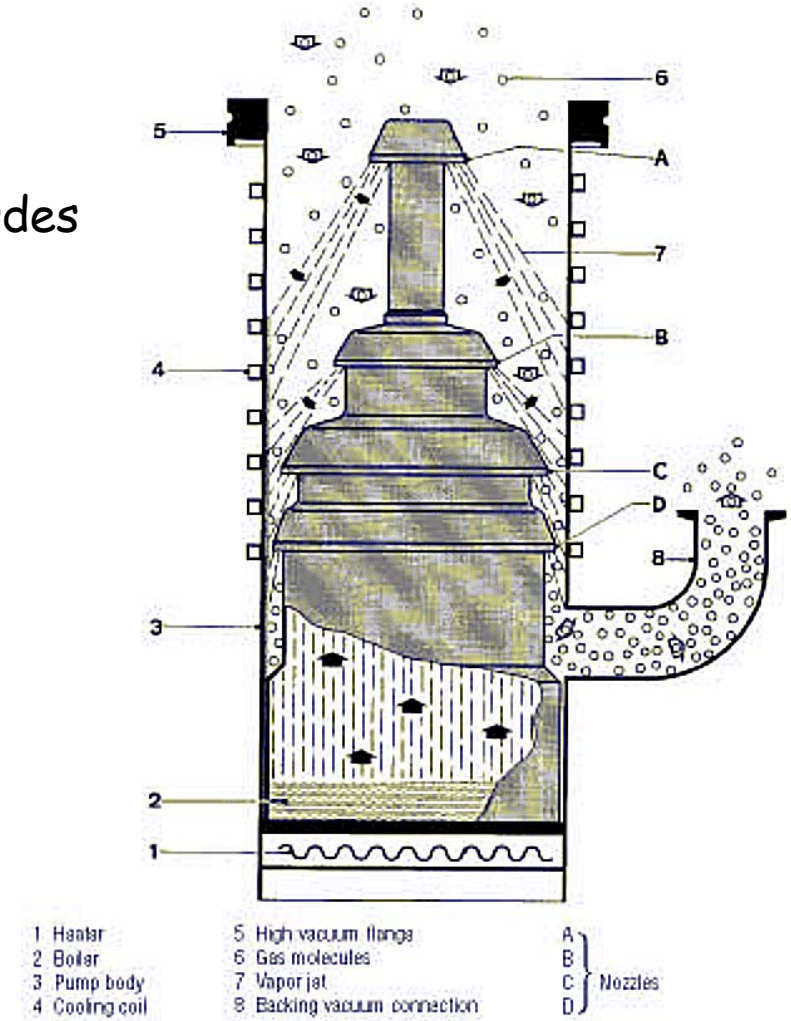
Jet supersonique de molécules lourdes

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

- P_{max} ~1 Pa P_l ~10^{-5} Pa (P_v huile..)

☺ - robustes, faible coût de maintenance

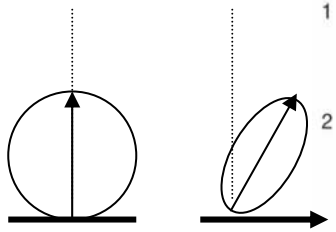
☹ - risque de pollution
retrodiffusion
incident

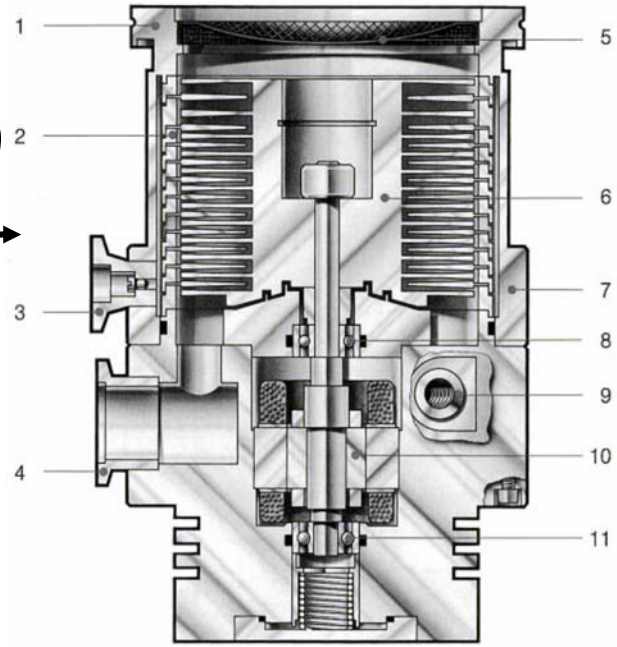


3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

Pompes turbomoléculaires

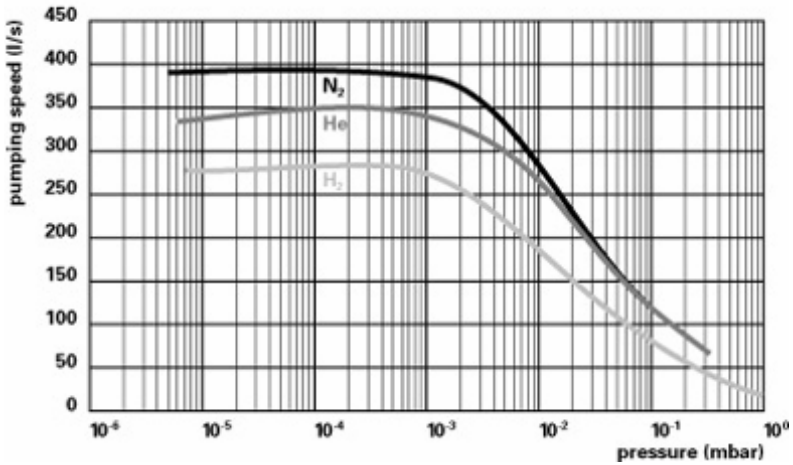
Pompes cinétiques à parois mobiles





P_{max} ~ 1Pa P_l ->UHV

- K dépend de $\sqrt{M}$ de v_{rotor}
- Couplage à une pompe primaire

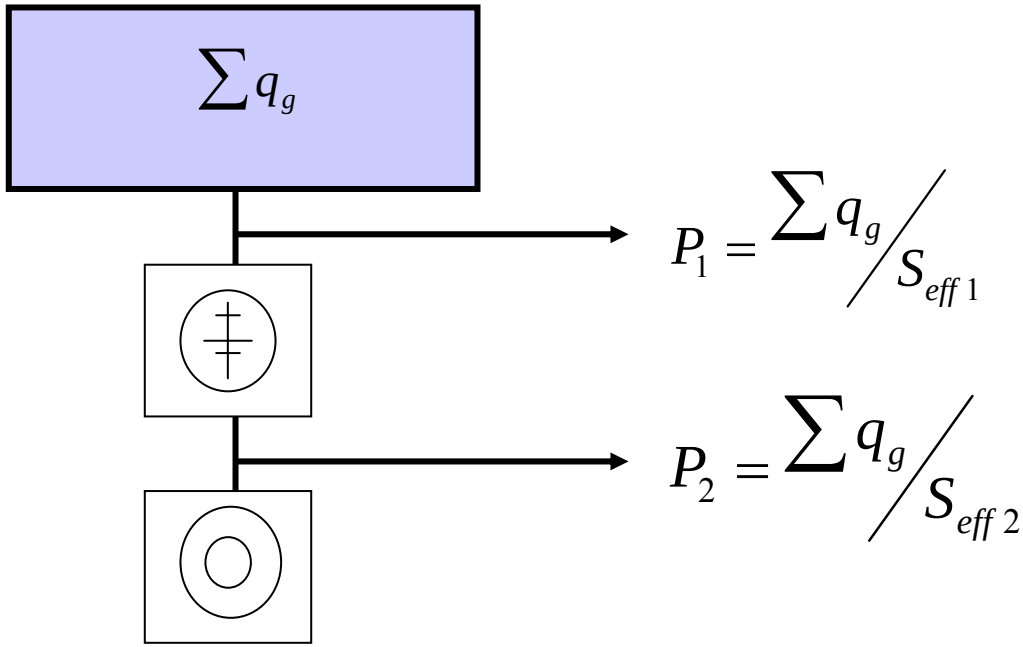


- pompage propre (magnétique)
- pompage à transfert de flux
- évolution vers des pompes moins sélectives (H_2)

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 $\Sigma q_g = P_x . S_x$

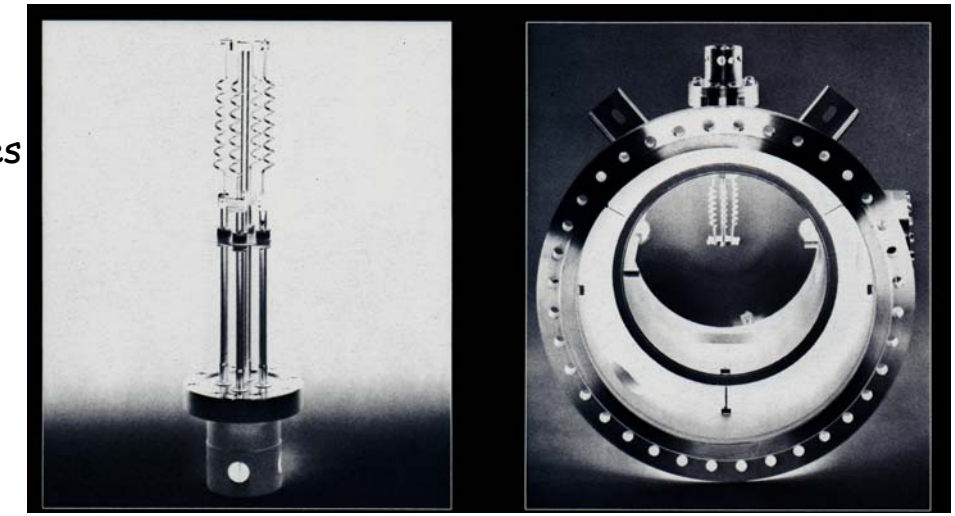


3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

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)



$$O_2 + Ti \rightarrow TiO_2$$
$$N_2 + 2Ti \rightarrow 2TiN$$
$$CO + Ti \rightarrow TiCO$$
$$CO_2 + Ti \rightarrow TiCO_2$$
$$H_2 + Ti \rightarrow TiH_2$$
$$H_2O + 2Ti \rightarrow TiO + H_2 \uparrow + Ti \rightarrow TiO + TiH_2$$

Test Gas	Max. Sticking Coefficient-α_m		Max. Speed[a] (liters/sec-cm^2)		Max. Capacity of Film- x10^{15} (molecules/cm2) [b]	
	300 K	77 K	300 K	77 K	300 K	77 K
H_2	0.06	0.4	2.6	17	8-230[c]	7-70
D_2	0.1	0.2	3.1	6.2	6-11	-
H_2O	0.5	-	7.3	14.6	30	-
CO	0.7	0.95	8.2	11	5-23	50-160
N_2	0.3	0.7	3.5	8.2	0.3-12	3-60
O_2	0.8	1.0	8.7	11	24	-
CO_2	0.5	-	4.7	9.3	4-12	-

a) Speed calculated at RT
b) Wide vaiations 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)

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

3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

la pompe à sublimation de titane

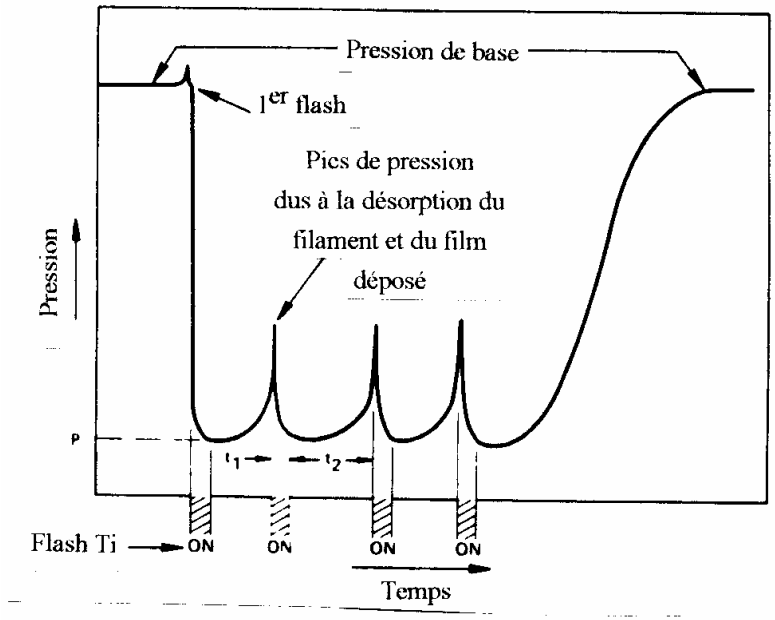
Saturation du film avec la pression

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

~1flash/h@10^{-8} hPa

pompe sèche
débits volumes importants
simple

très sélective
filament chauffé
remontée de pression au flash



- P_{max} << 10^{-5} Pa
  P_I -> 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_4 ne sont pas pompés

LEP vacuum chamber section

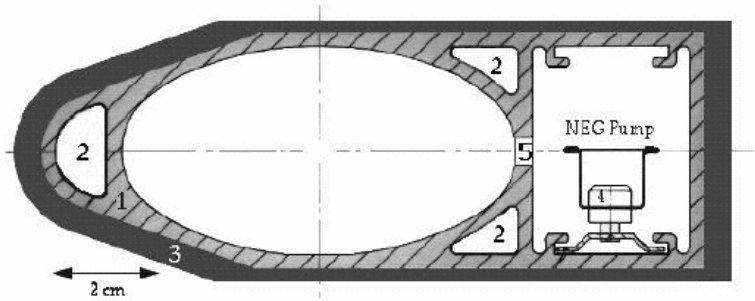


Fig. 2 : Vacuum chamber section made of (1) extruded aluminium profile with the elliptic beam channel, three cooling water ducts (2) and surrounded by 3 to 8 mm thick lead shield (3). The NEG pump (4) is housed in a separate pump channel connected to the beam channel by a row of longitudinal slots (5).

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

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

H_2 pour UHV

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° d'activation du dépôt (chambres Al extrudées)
- qualité mécanique et chimique du dépôt

✓ couche de Ti-Zr-V (~ 1,5 μm)
✓ dépôt par pulvérisation cathodique magnétron
✓ $T°_{act}$ 200°C

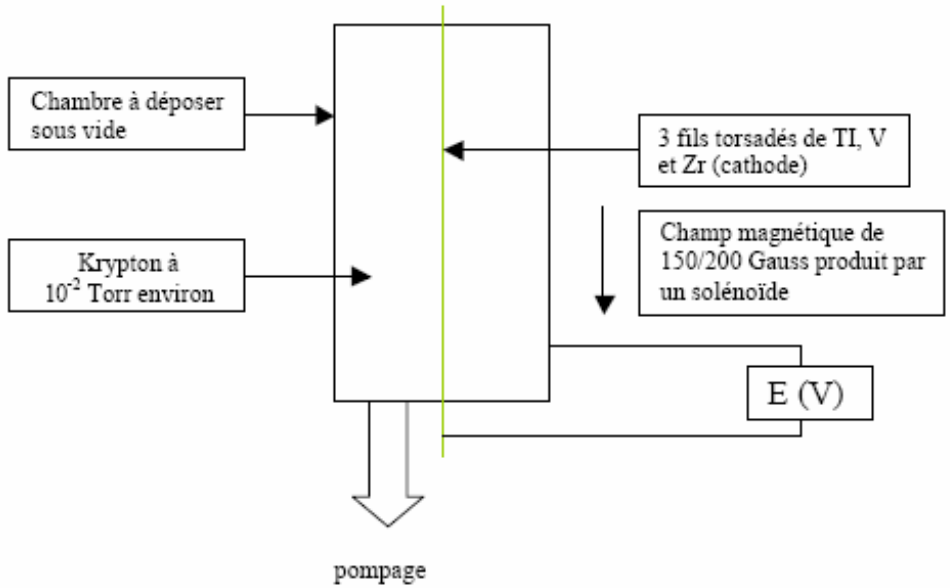


Schéma 1 : Dispositif de pulvérisation magnétron pour le dépôt d'une couche NEG

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 μm 200°C-24h) :

qv ($l.s^{-1}.cm^{-2}$) : 0,5 pour H2 et 4 pour CO
s : 0,01 pour H2 et 0,7 pour CO
capacité CO ~ 1 monocouche (10^{15} molécules.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

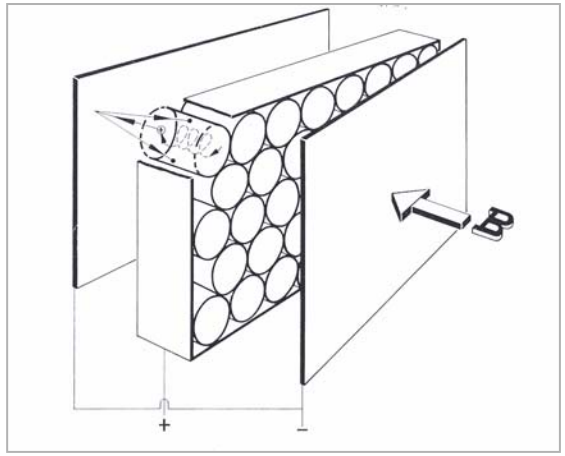
- débit volume
- saturation
- activation à haute T°
- très sélective
- durée de vie (30-50 cycles)

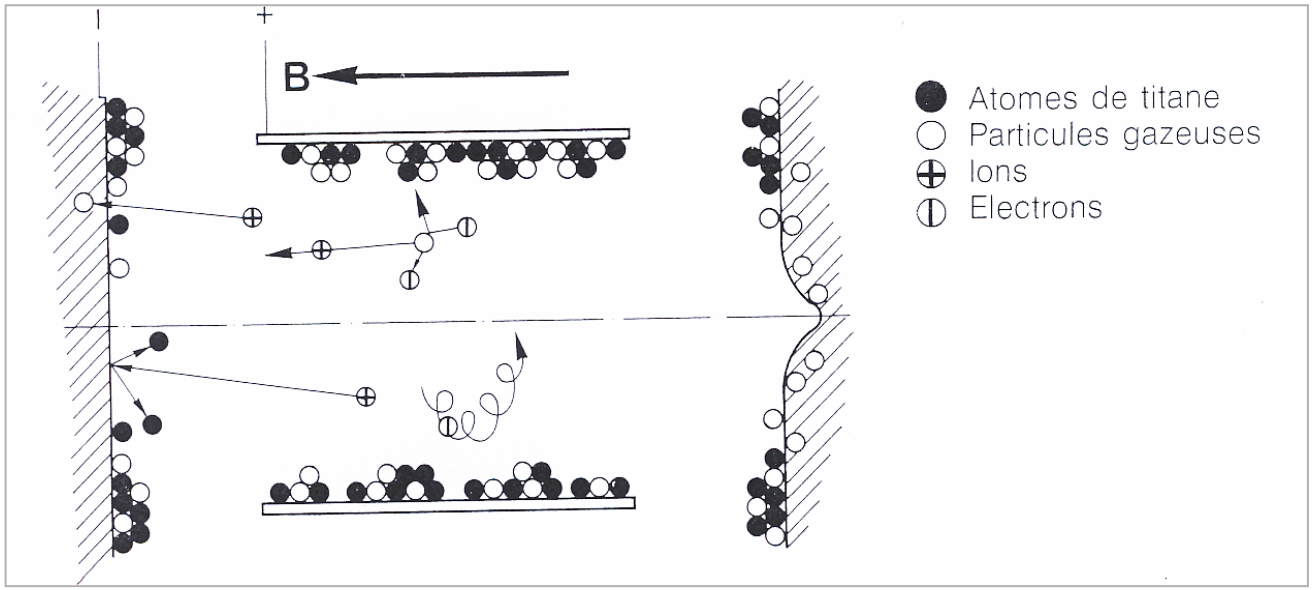
Utilisation UHV (synchrotrons , LHC)

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 => 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} << 10^{-4} Pa P_I -> 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 Ps = f(T_f)

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

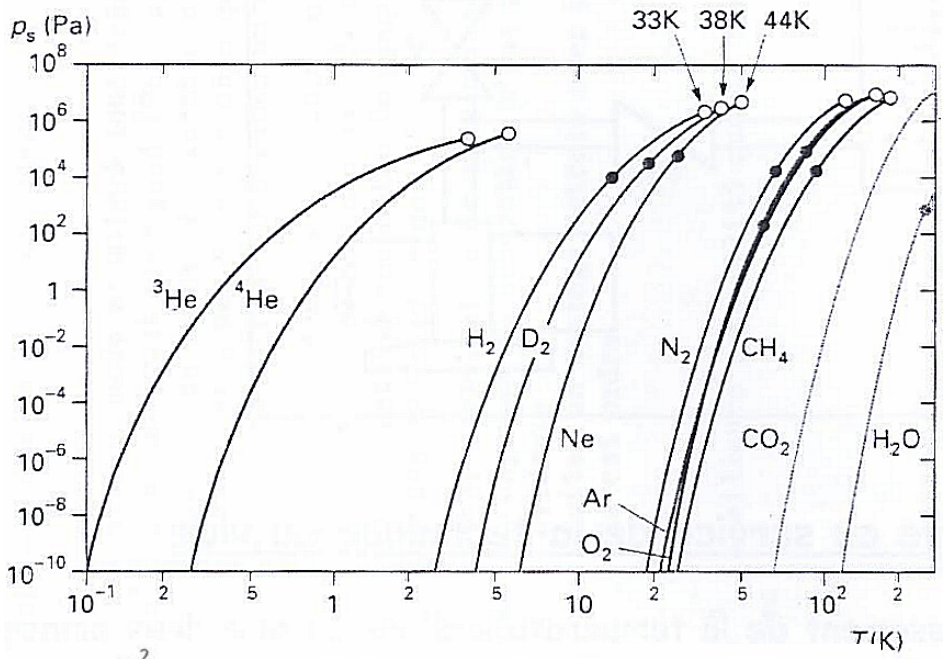
'trou noir' pour les molécules (à la conductance d'accès et au coeff de collage près)

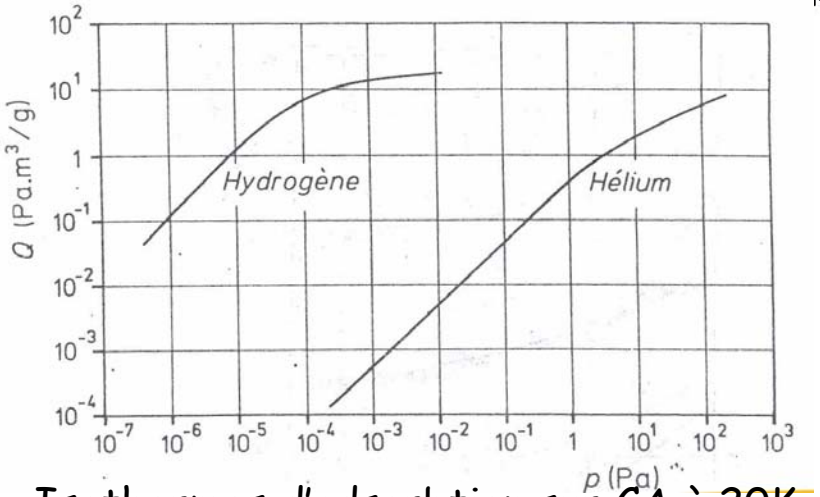
q_V max (c infinie et s~1

119 $m^3.s^{-1}.m^{-2}$ pour N_2
148 $m^3.s^{-1}.m^{-2}$ pour H_2O

- cryosorption sur adsorbants solides refroidis (physisorption)

- cryotrapping





Isothermes d'adsorbtion sur CA à 20K

3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

le cryopompage : sources froides

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

Les fluides cryogéniques

Fluides	$T_{éb.}$ (K) (NTP)	V_g/V_l (NTP/NBP)	L (J/g) (NBP)	H (J/g) $T_{éb.}$ -> 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

3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

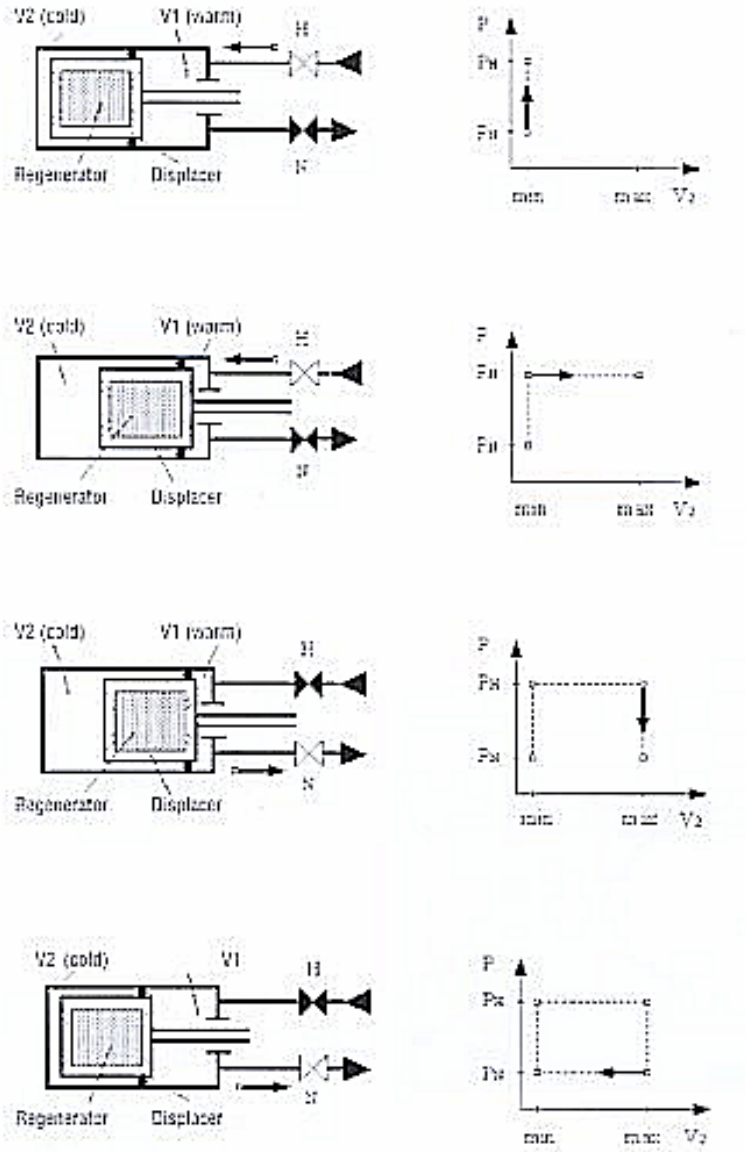
le cryopompage : sources froides

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 regénérateur (stockage et restitution de la chaleur)

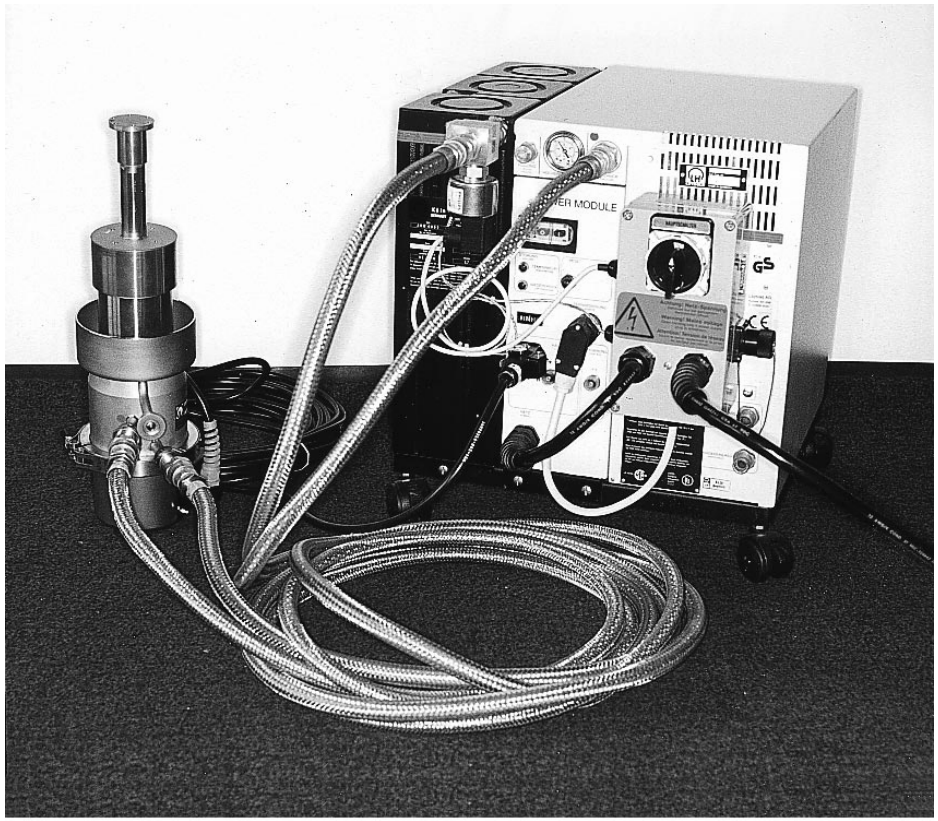


3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

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 regénérateurs

+ autonomie

- vibrations

- puissance limitée*

{ ~12W @ 20K
  65W @ 80K

⇨ qq W @ 4K

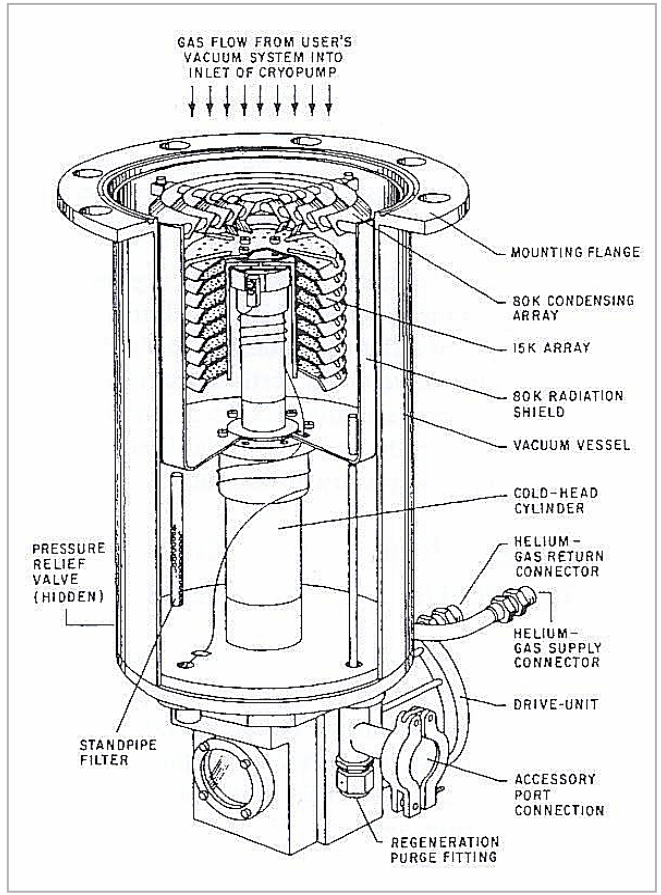
3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

Cryopompe à cryogénérateur

2 étages froids

- ✓ 80 K ⇨ écrans T° H_2O , CO_2
- ✓ 15 K ⇨ N_2 , O_2 , Ar , CO

  CA sur 20 K ⇨ H_2



- ➢ P_{max}* ~10^{-4} hPa P_l -> UHV

☺ q_v élevé

☹ regénération, vibrations, q_v He

Φ 200 mm
4 $m^3.s^{-1}$ (H_2O)
1,5 $m^3.s^{-1}$ (N_2)
2 $m^3.s^{-1}$ (H_2)

5W @ 20K
20W @ 77K

3/ La mesure du vide

- **Mesure de la pression totale : les manomètres**
  - mécaniques
  - hydrostatiques

  } ➡ P = F/S (indép. du gaz)

  - thermiques ➡ I = f(P)
  - à viscosité friction avec le gaz = f(P)
  - à ionisation $i_c \propto P$

- **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 hPa

manomètres de Bourdon

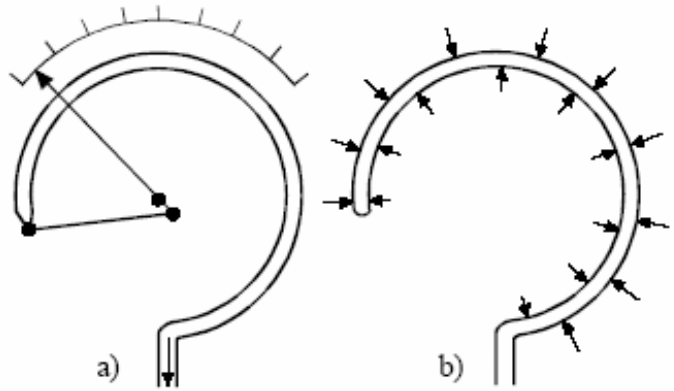
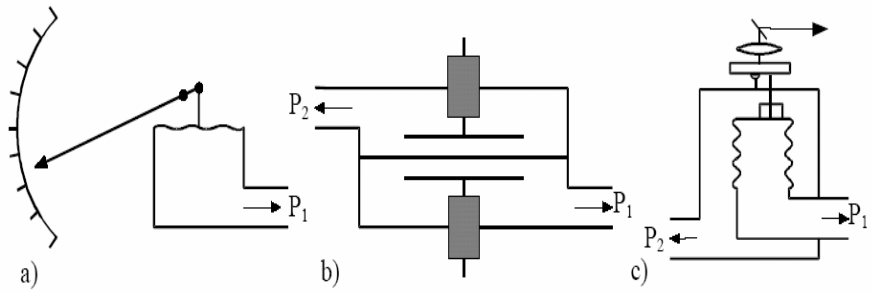


Fig. 2 Bourdon gauge, a) principle, b) distribution of forces

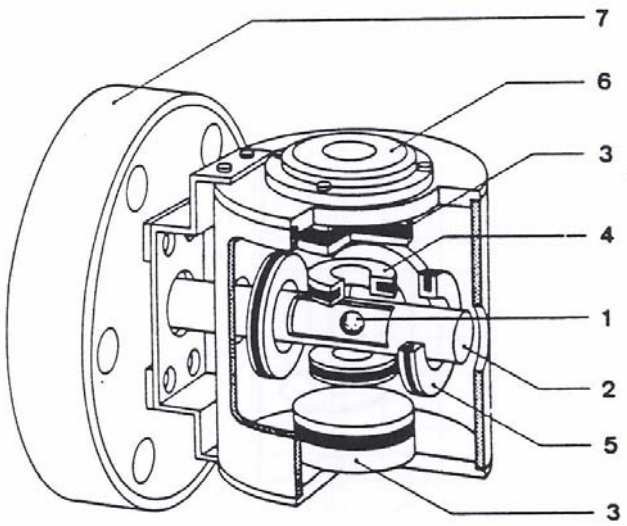
à membrane
piézorésistif (dépôt Si)
capacitif



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

Ionisation du gaz résiduel

⇩

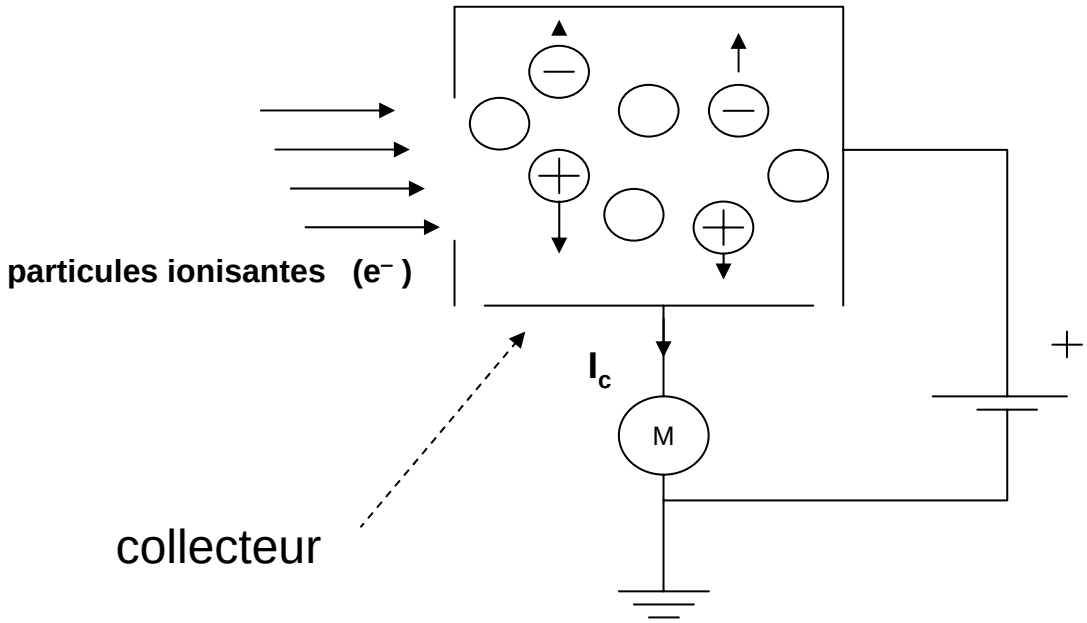
collecte et mesure du courant ionique

⇩

n_v

⇩

P



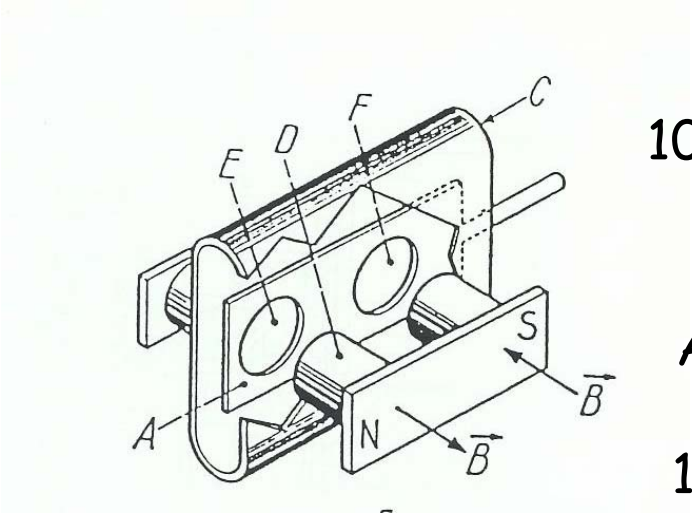
- $l_m > d_{enceinte}$ 1 Pa - 10^{-10} Pa
- pour une géométrie donnée, la sensibilité dépend de la nature du gaz

$s = (I_c / I_{e^-}) \cdot 1/P$ (10 – 40 mb^{-1})

3/ La mesure du vide

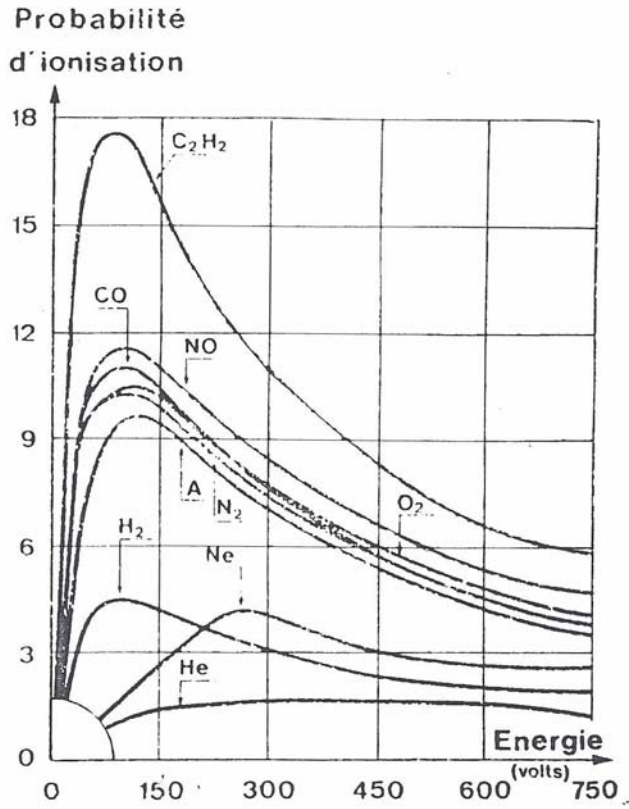
- manomètre de Penning (cathode froide)

Ionisation du gaz par les électrons libres accélérés sous HT



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

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



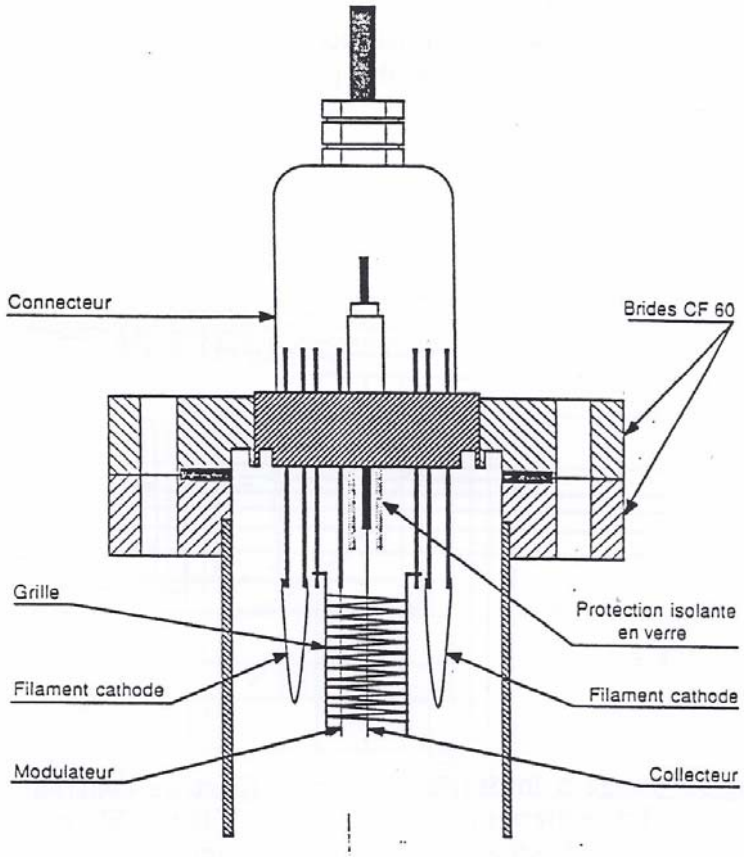
3/ La mesure du vide

- 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

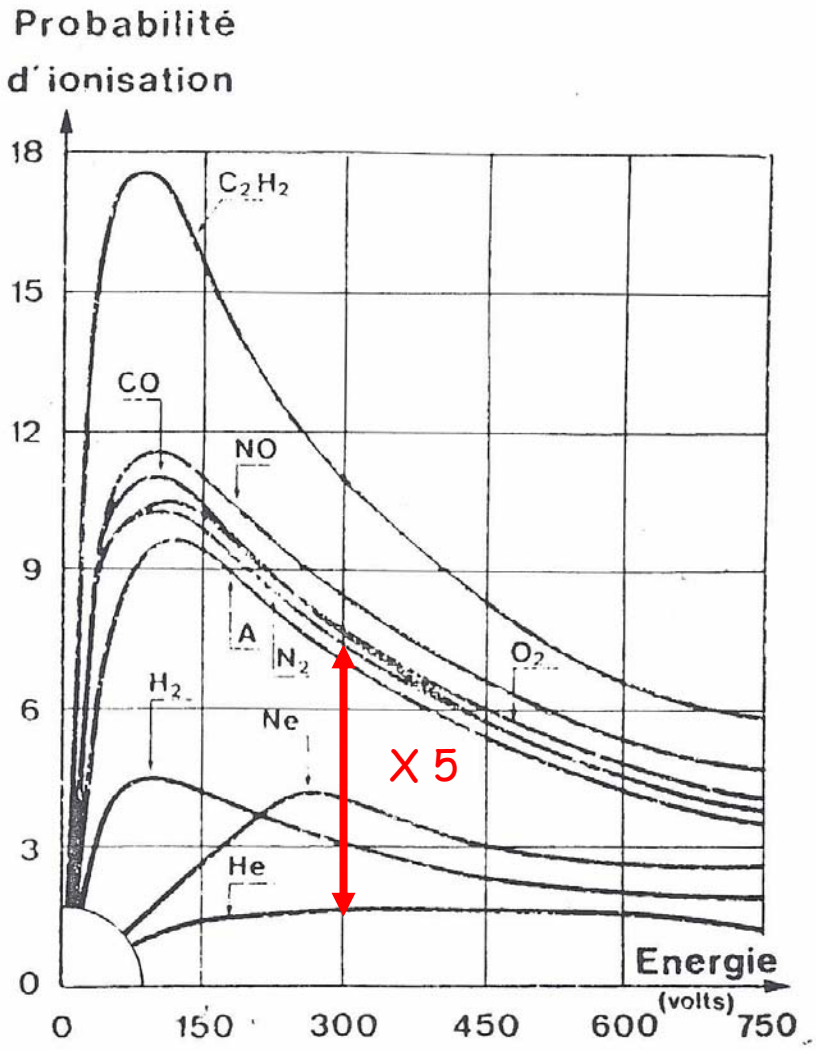


3/ La mesure du vide

Sensibilité des manomètres à ionisation suivant la nature du gaz

Si gaz résiduel 100% He

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



- 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

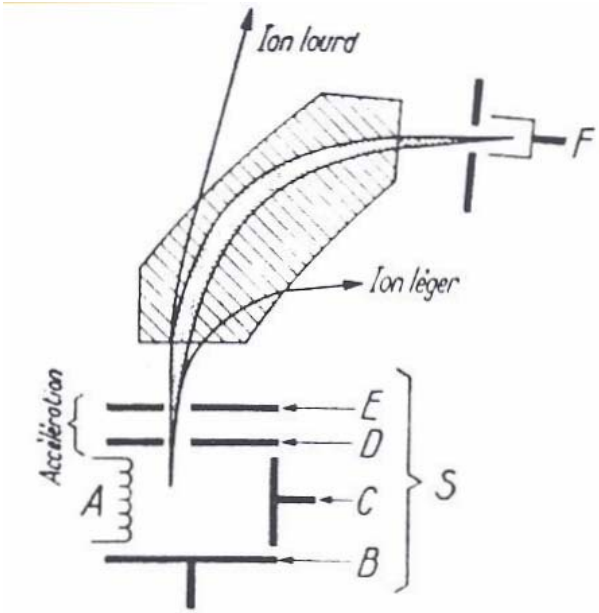
Principe des analyseurs de gaz

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

3/ La mesure du vide

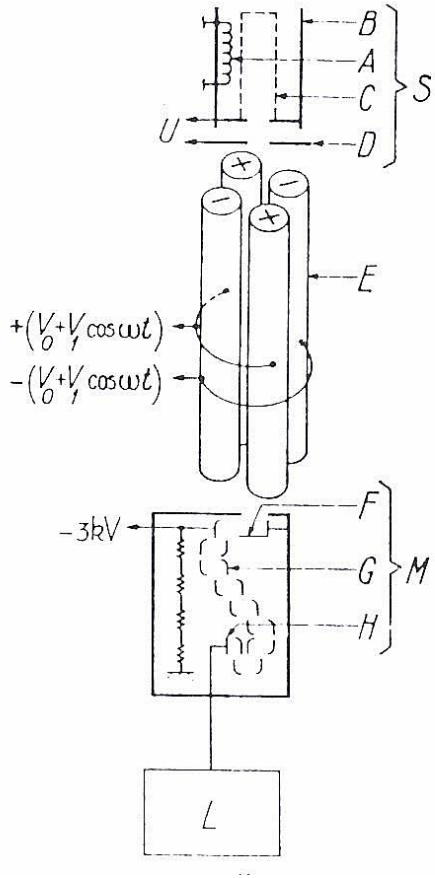
- les analyseurs de gaz en technique du vide

séparation magnétique



P_{max}* 10^{-4} hPa
P_l -> UHV
Pp_{mini}* ~10^{-14} hPa
gamme de masses :
0-100
0-200

séparation quadripolaire



Détection de fuite (traceur He)

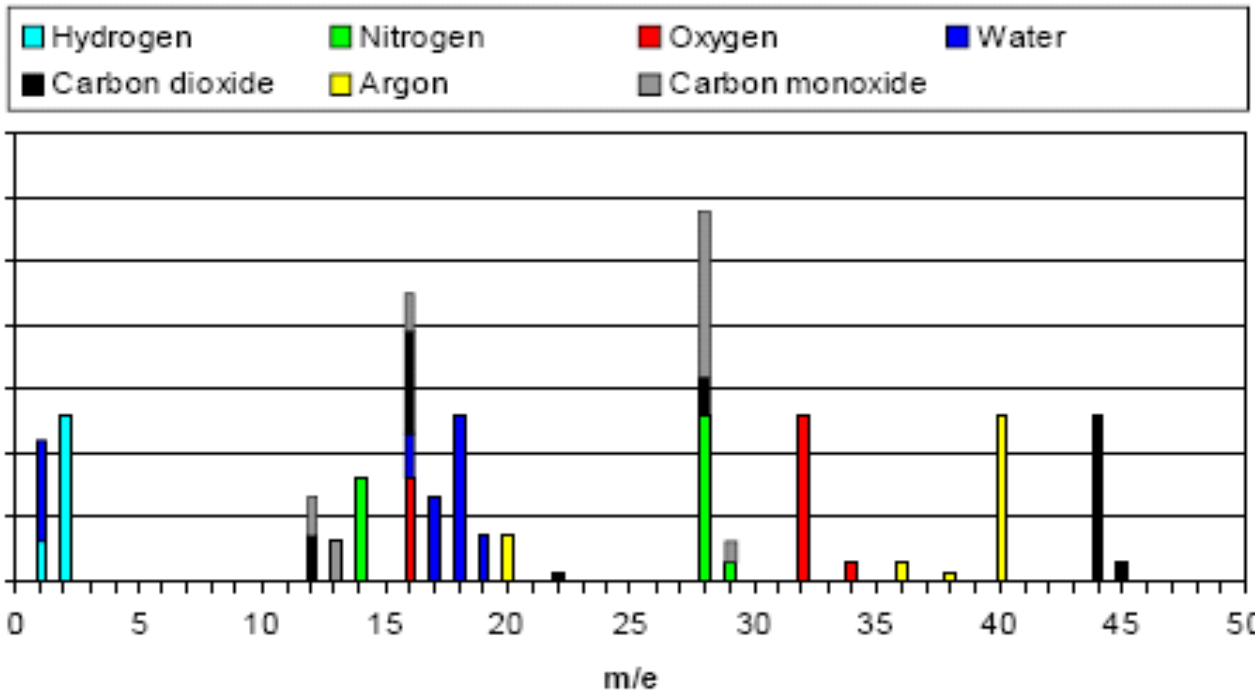
3/ La mesure du vide – analyse des pressions partielles

Interprétation des spectres

Pour un même corps :

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

⇒ analyse délicate



Pic 100 %
N2 et CO même 100%

H_2O : 18 H_2O+/
17 OH+/ 16 O+
/19 H3O+

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

3/ La mesure du vide – analyse des pressions partielles

Pression partielle du composant n

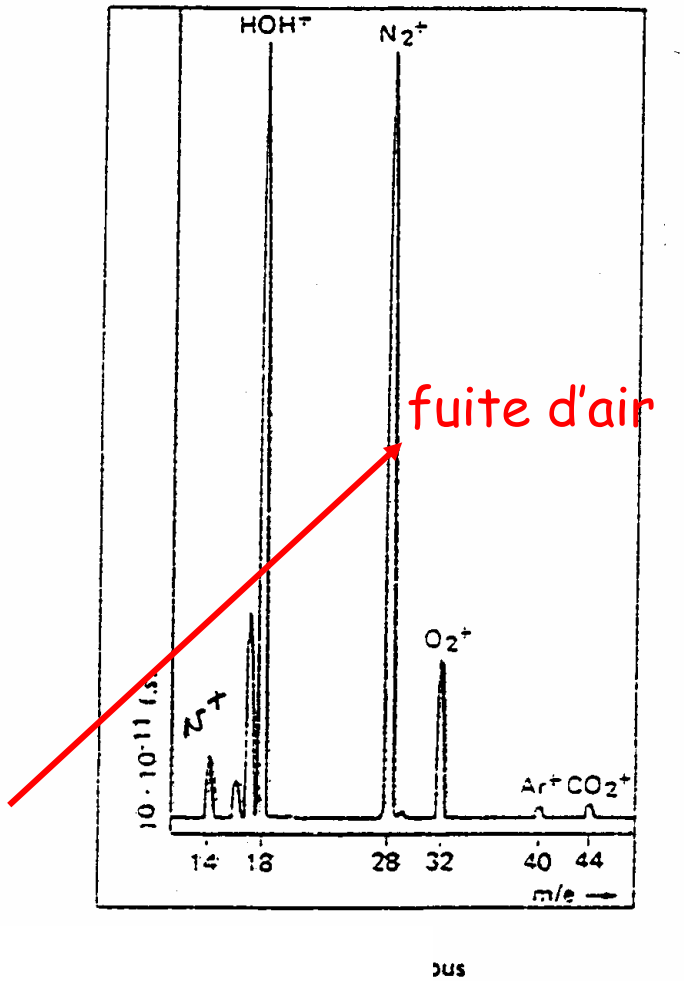
$$P_n = \frac{I_n^+}{S_n}$$

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

H2O	2.10^{-4} A.mb^{-1}
N2	2.10^{-4} A.mb^{-1}
O2	$1{,}4.10^{-4}$ A.mb^{-1}

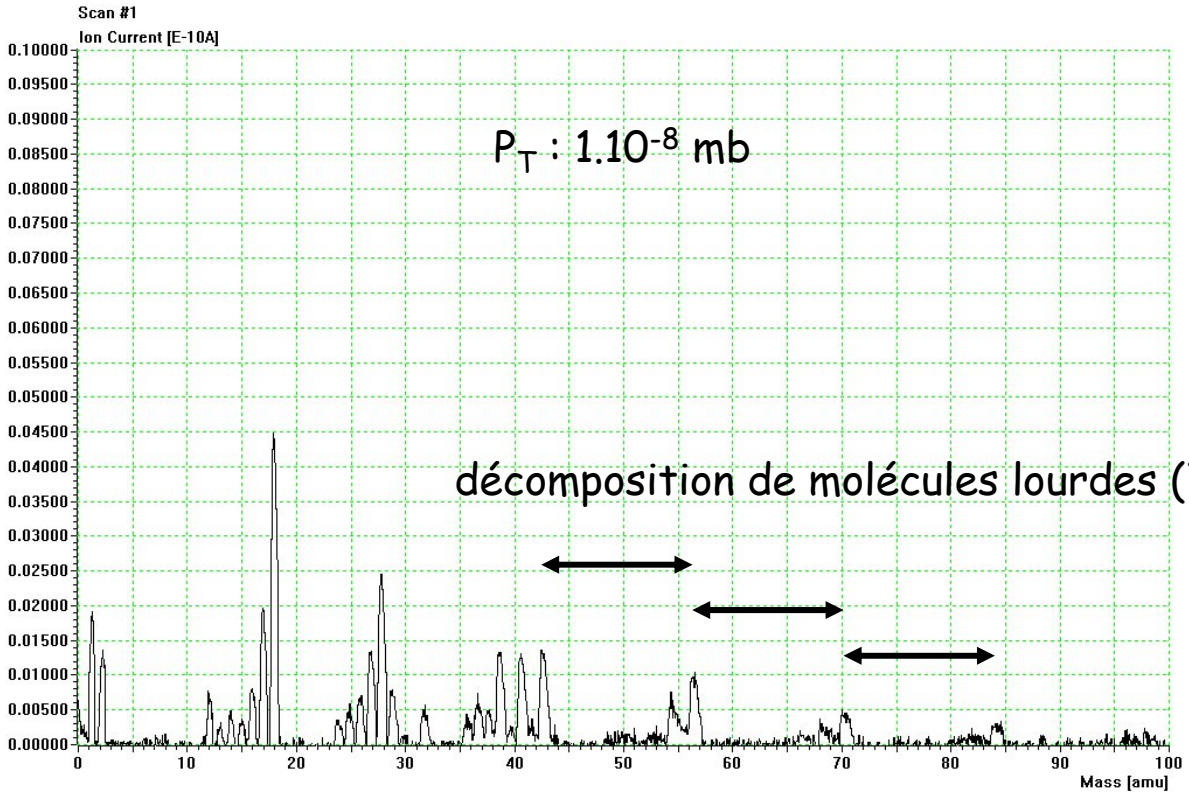
P_{18} : 5.10^{-7} mb
P_{28} : 5.10^{-7} mb ⇨
P_{32} : 1,4 10^{-7} mb

$$P_{N2} / P_{N2} + P_{O2} = 78\%$$
$$P_{O2} / P_{N2} + P_{O2} = 21\%$$



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, H2 > 70%,** H20 <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

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

Unités :

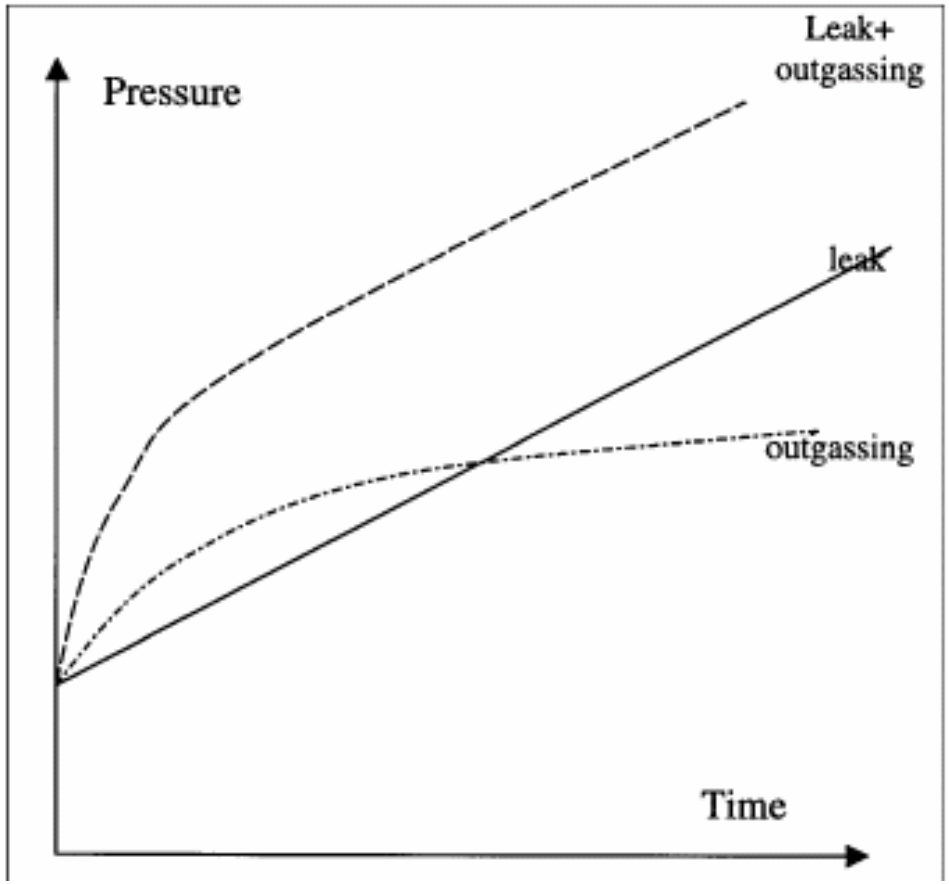
- $Pa.m^3.s^{-1}$
- $mb.l.s^{-1}$
- $atm.cm^3.s^{-1}$ (std. cc. s^{-1})

1 Pa. $m^3.s^{-1}$ = 10 $mb.l.s^{-1}$ ~ 10 $atm.cc.s^{-1}$

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 — $Qf > 10^{-2}$ Pa.m^3.s^{-1}
- formation de bulles — $Qf > 10^{-5}$ Pa.m^3.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

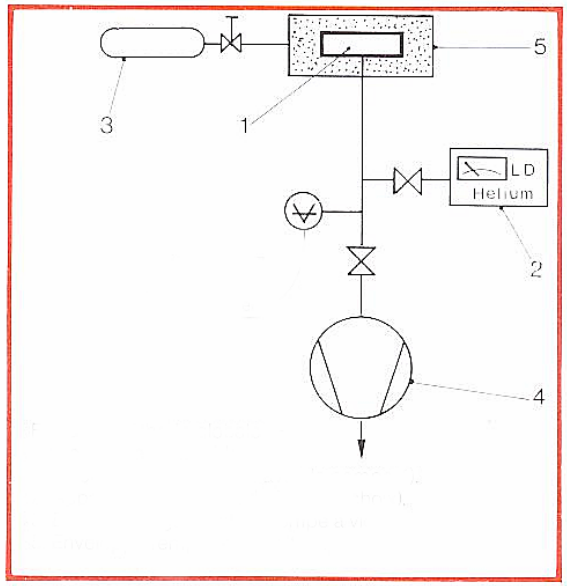
La détection de fuite par spectromètre de masse

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

➡ *hélium (5ppm dans l'air, gaz inerte)*

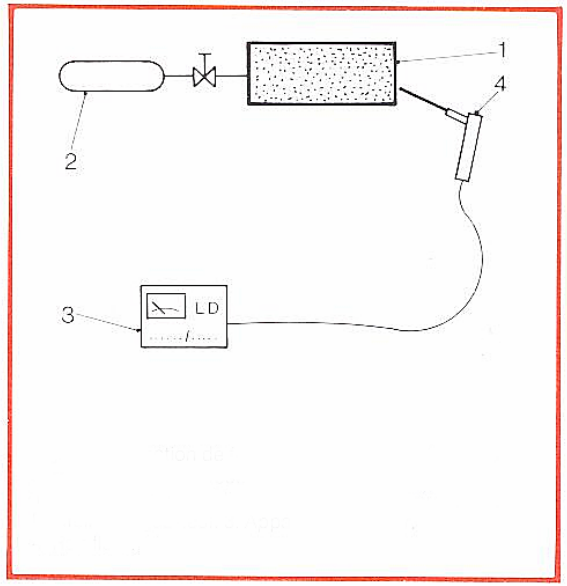
Contrôle global ou par aspersion

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



Contrôle par reniflage

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



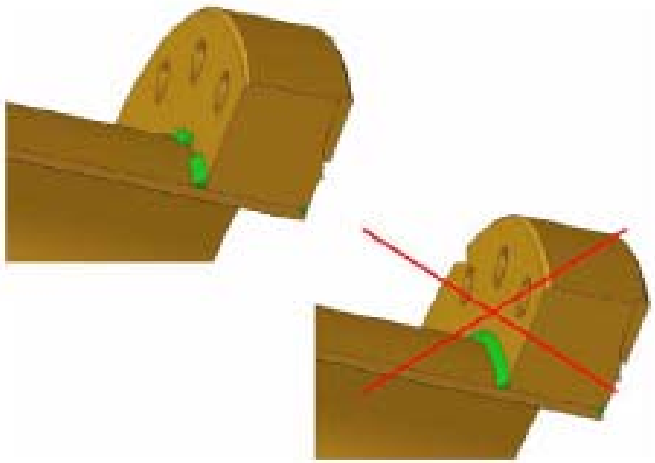
! *temps de réponse*

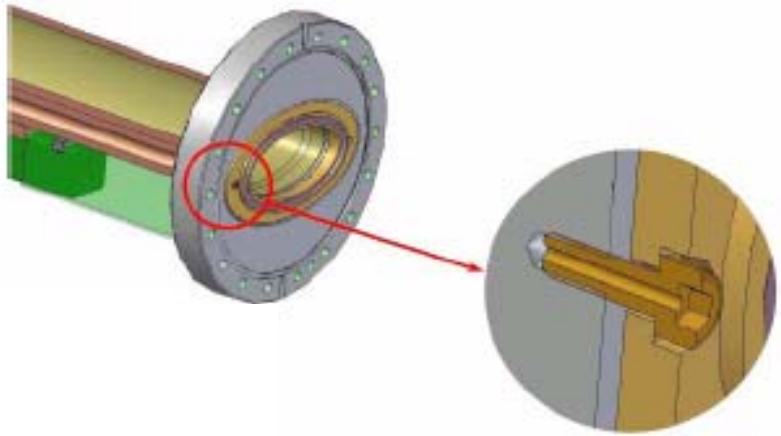
$$\theta_{63\%} = \frac{V}{S_{He}}$$

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**



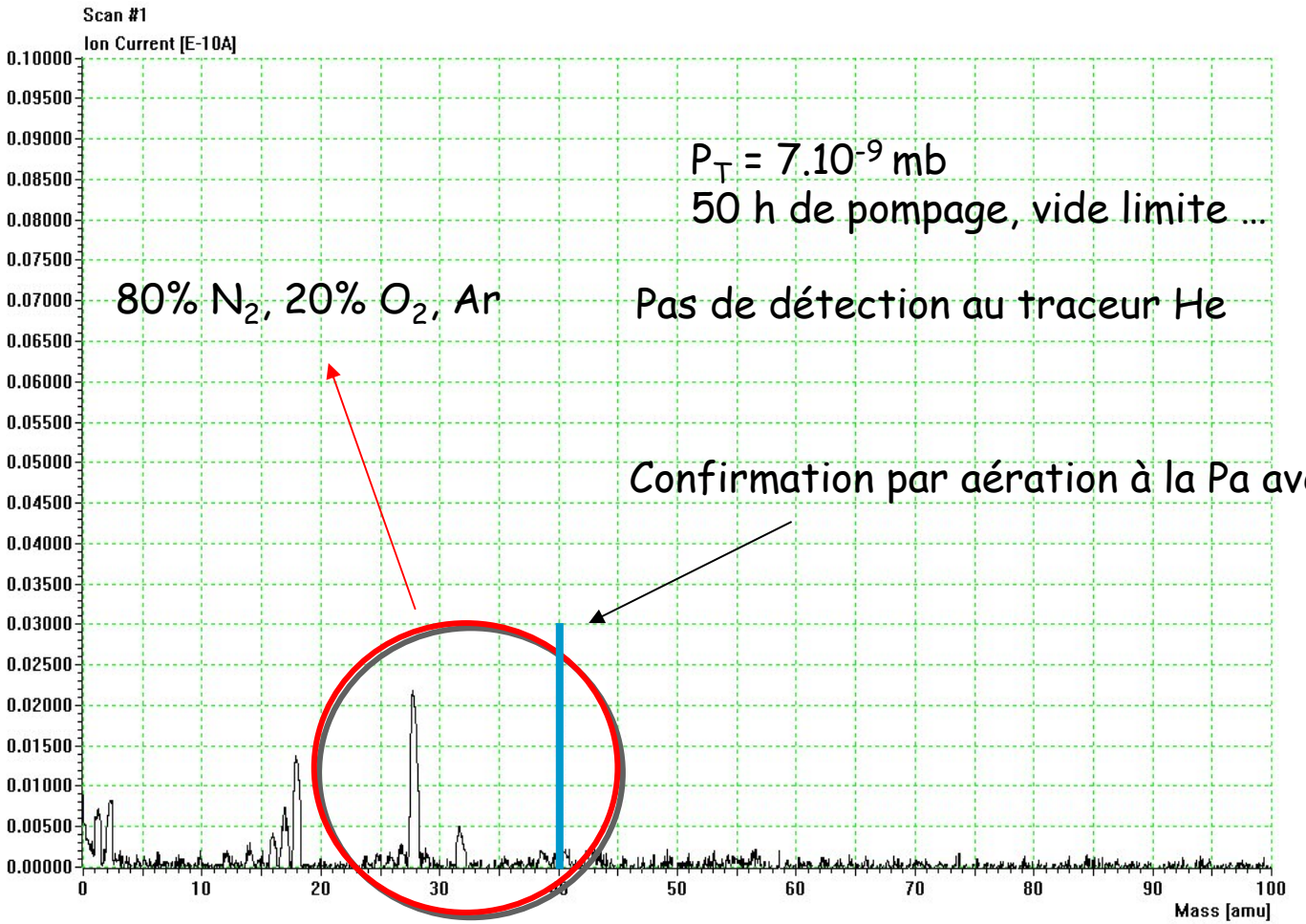


nb de molécules dans 1 mm^3 à la Pa ?

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

3/ La mesure du vide : l'étanchéité

Les fuites virtuelles : identification



$P_T = 7.10^{-9}$ mb
50 h de pompage, vide limite …

80% N_2, 20% O_2, Ar

Pas de détection au traceur He

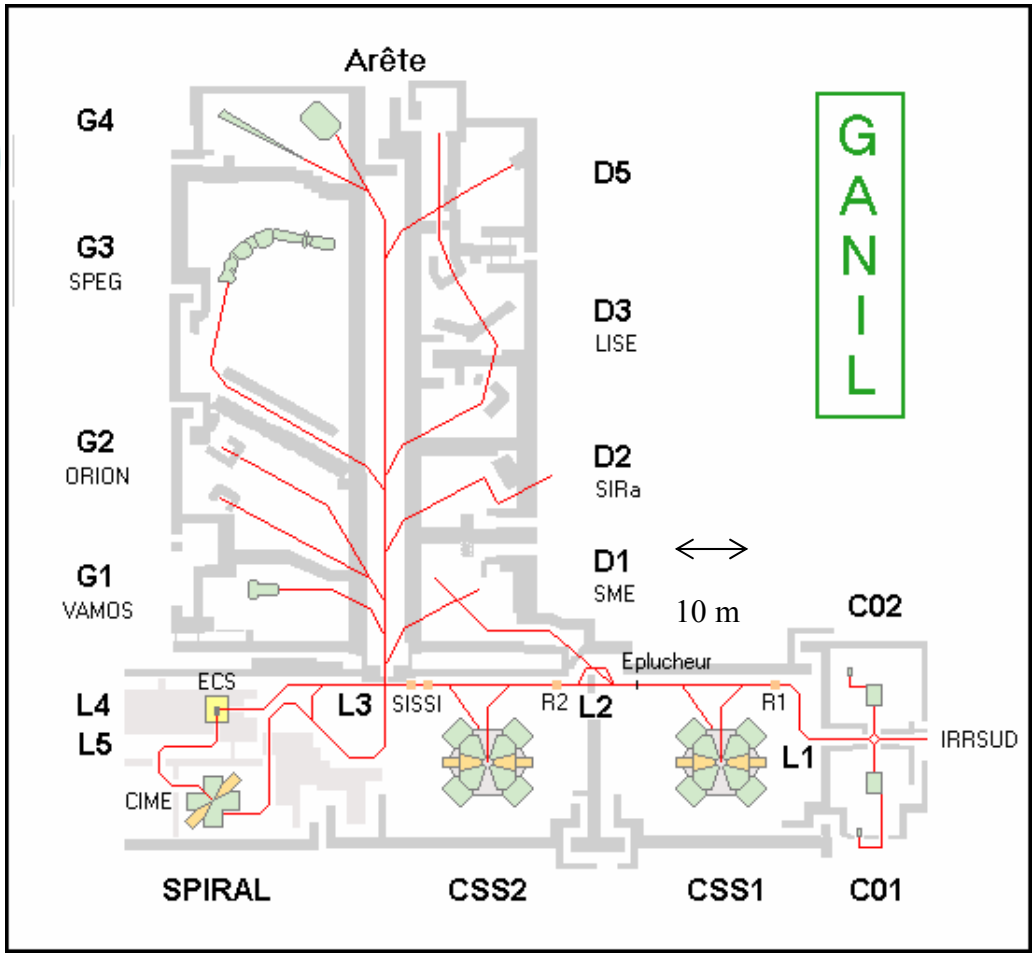
Confirmation par aération à la Pa avec Ar

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

4/ Le système de vide du Ganil



Faisceaux accélérés :

~ 30 diff. /an

- **faisceaux stables**

Carbone -> Uranium

0,5 –95 MeV/u

- **faisceaux exotics (RA)**

(produits par fragmentation)

✓SISSI (thin targ.)

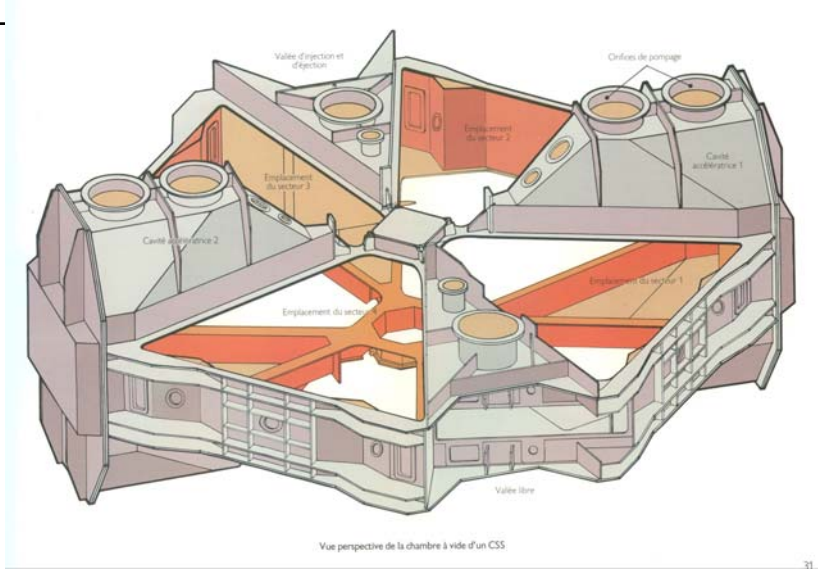
✓Spiral (thick targ.)

A<80

1,7 – 25 MeV/u

4/ Le système de vide du Ganil

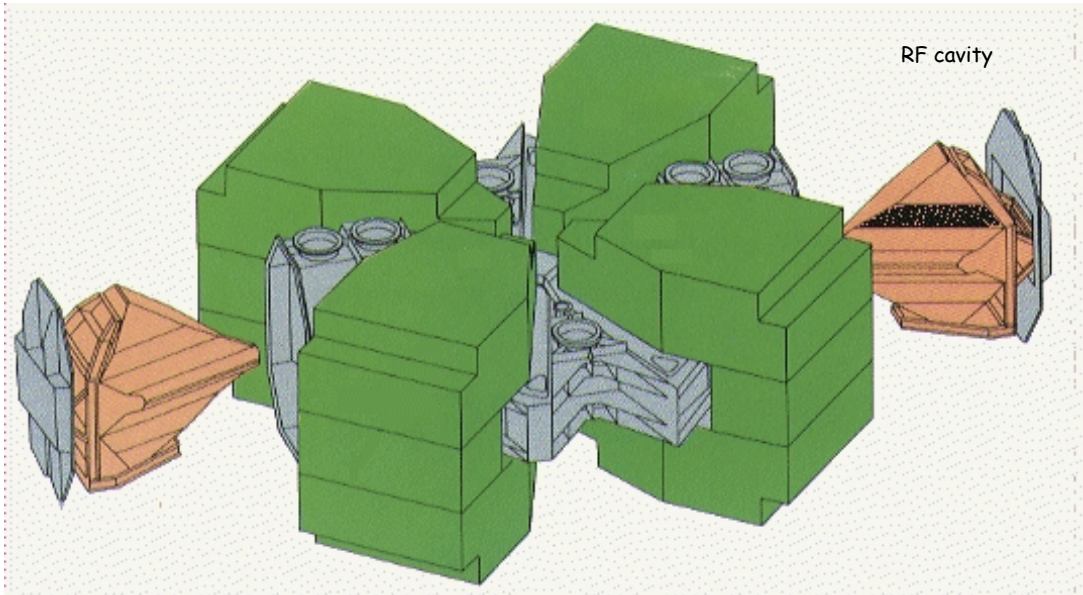
Le système de vide des cyclotrons à secteurs séparés CSS



Caractéristiques de la chambre à vide

Diam.	9 m
Weight	57 t
Volume	46 m^3

Stainless steel	730 m^2
Mild iron	160m^2
Copper	240 m^2
Elastomère seal	0,5 m^2
Slippering mat.	2,2 m^2

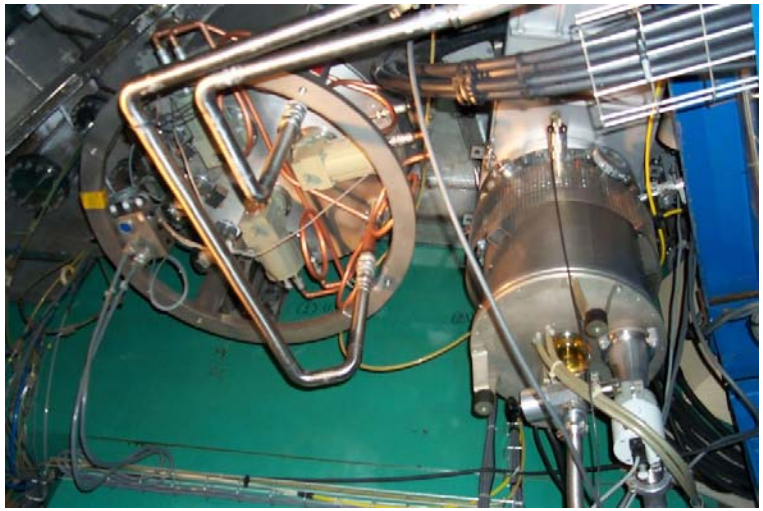


4/ Le système de vide du Ganil : les CSS

7 cryopompes (800 mm)	20m^3.s-1 (N2)
	10 m^3.s-1 (H2)
1 cryopompe (400 mm) (montée avec vanne)	5 m^3.s-1 (N2)
4 turbopompes (400mm) (montées avec vanne)	3,5 m^3.s-1 (N2)
Système de prévidage	2 x 2000 m^3.h-1

(système commun aux 4 cyclotrons)

Cryopompe spécifique (800mm)



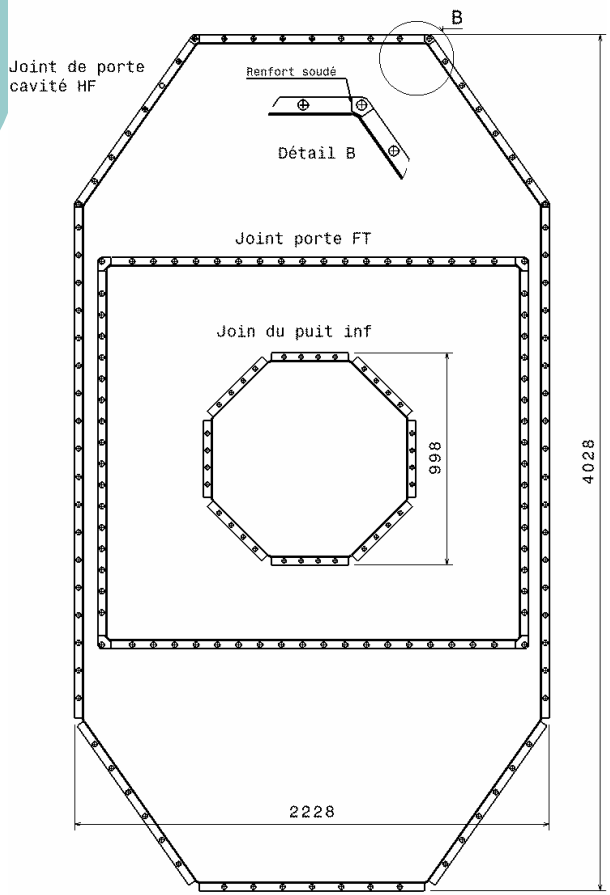
Source froide 3x 12W @ 20K
35W @ 77K

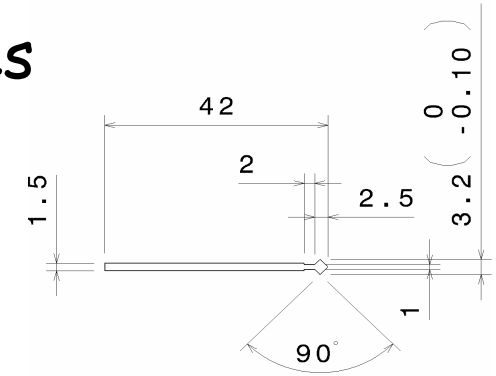
Pour optimiser le pompage de l' H_2 : l'étage 20K est en vue direct de la chambre

$$P_l \sim 2.10^{-8} \text{ hPa}$$

4/ Le système de vide du Ganil : les CSS

Joints métalliques spécifiques



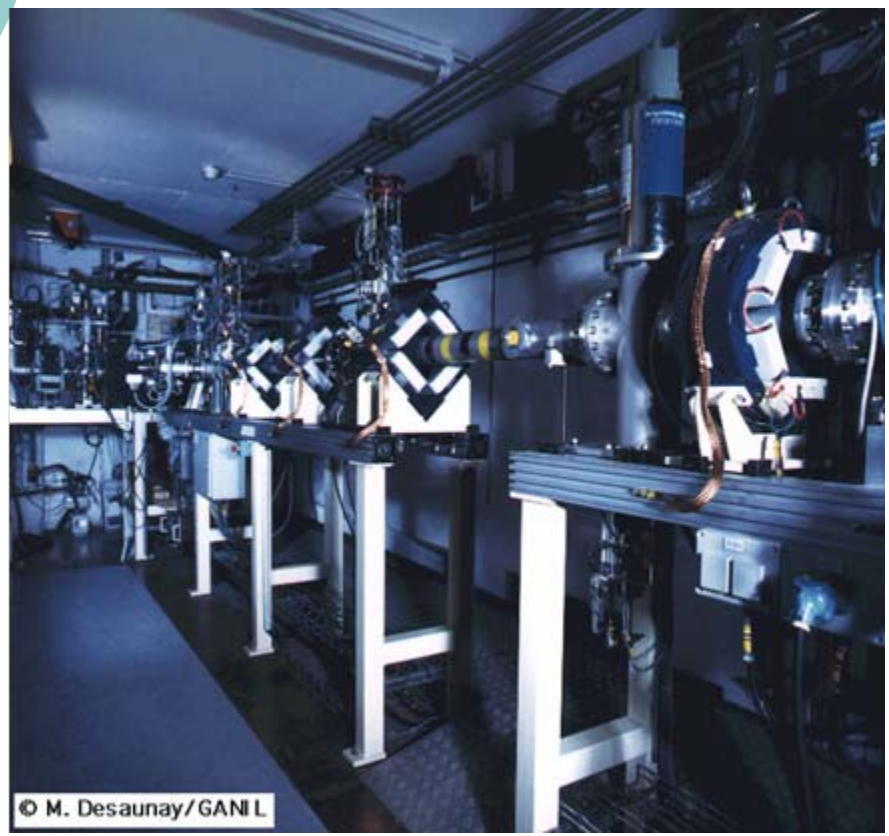


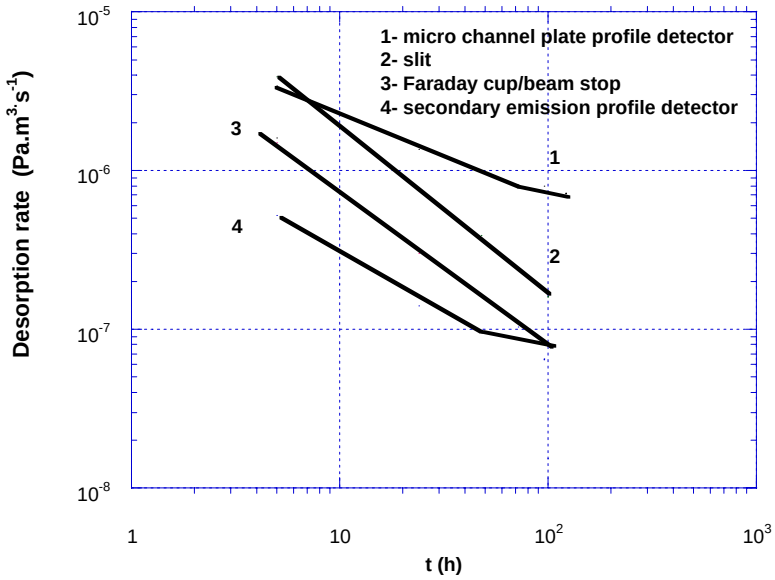
Section : 0.33 cm²
Poids : 0.171 kg/m
Matière : A5 recuit
Dureté : 23 < Hv_{20g} < 26

4/ Le système de vide du Ganil : les lignes de transport

- tubes de transfert inox Φ 50 à 100 mm
- diagnostics, jeux de fentes, arrêt faisceau ..

➡ dégazage localisé : composante majeure





Pompage localisé

- cryopompes à cryogénérateurs
  800 à 1500 $l.s^{-1}$ (N_2)
- groupes turbomoléculaires
  400 à 600 $l.s^{-1}$ (N_2)

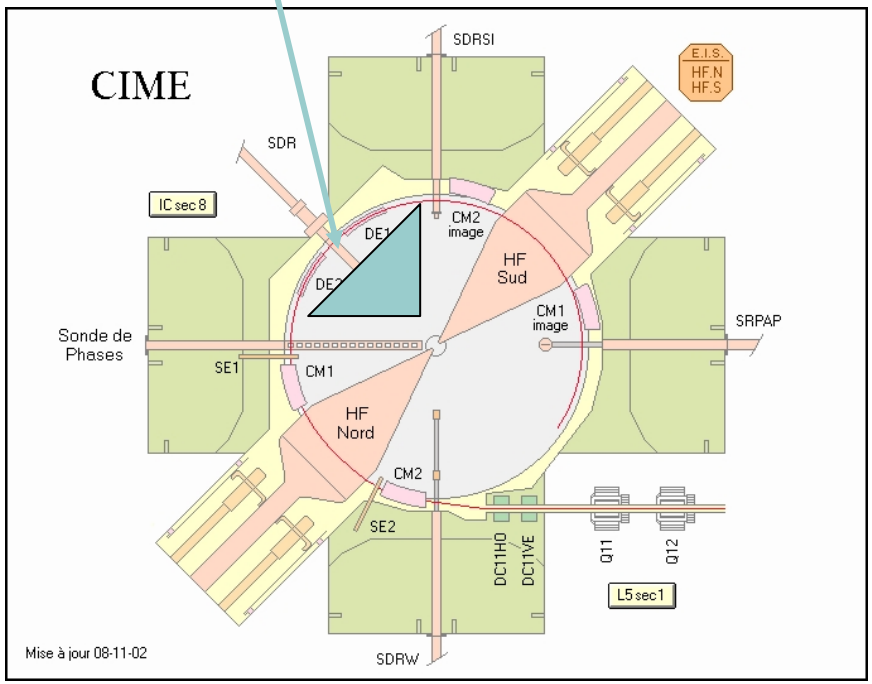
4/ Le système de vide du Ganil : le cyclotron Cime (Spiral)

Cyclotron compact

Cryopanneaux intégrés pour obtenir les spécifications :

30 $m^3.s^{-1}$ (N_2)

40 $m^3.s^{-1}$ (H_2)

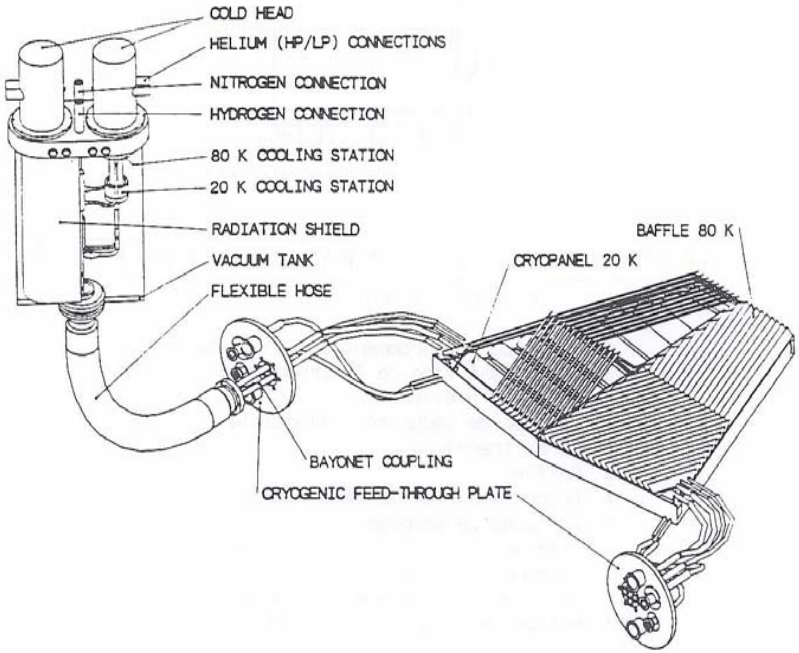


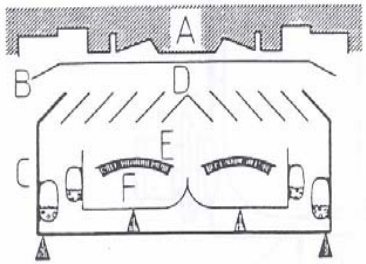
- cryopanneaux refroidis par des fluides cryogéniques (LN_2 , LH_2)

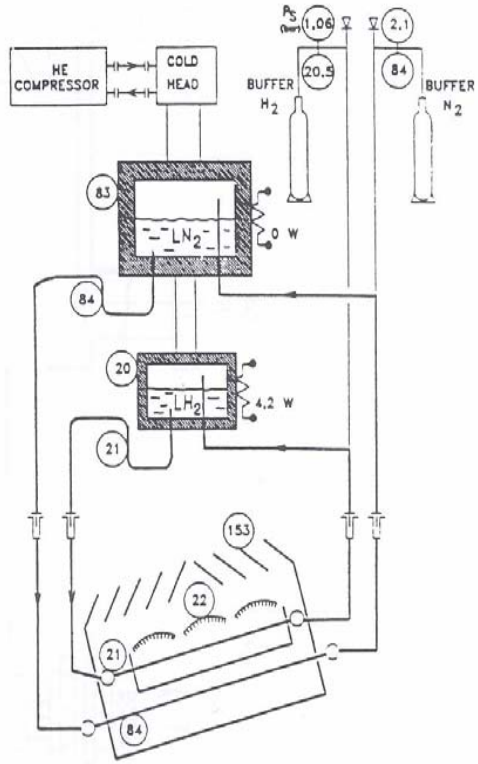
- les fluides cryogéniques sont produits par des cryogénérateurs

4/ Le système de vide du Ganil : le cyclotron Cime (Spiral)

Système de cryopompage du cyclotron Cime







2 cryopanneaux (indépendants)

Pour chaque panneaux :

- 2x36W pour circuit N2 -> 12Kg Cu @ 80K
- 2x10W pour circuit H2 -> 6.5Kg Cu @ 20K

350g CA @ 20K

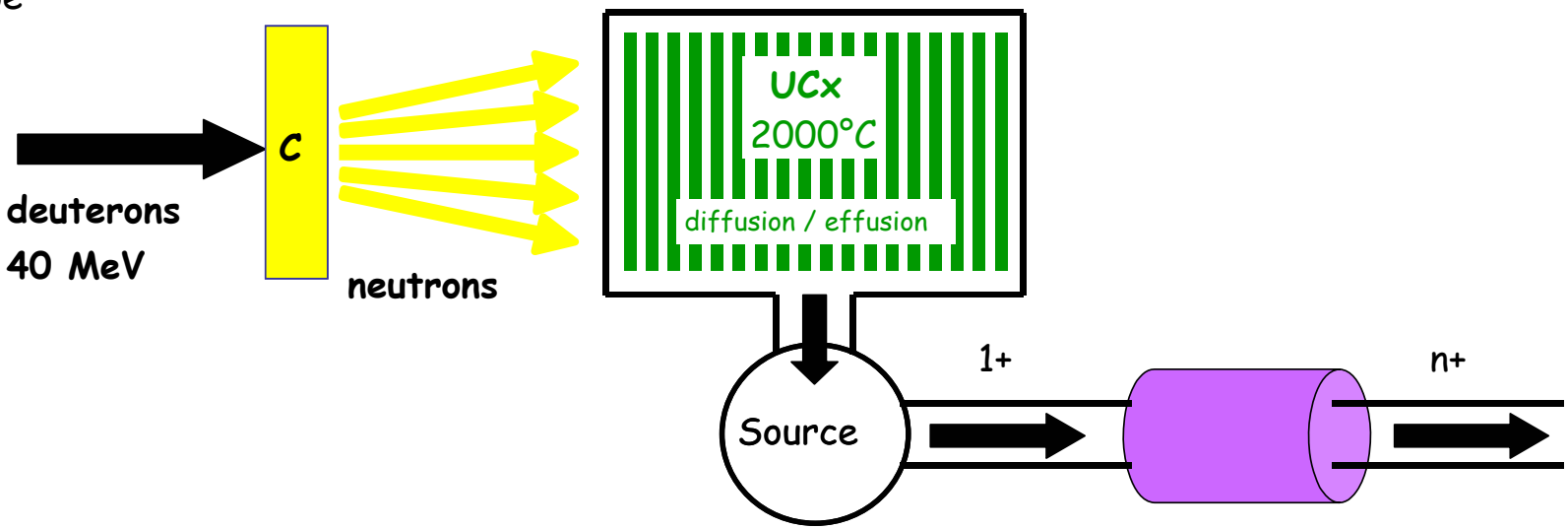
4/ le projet Spiral 2 : contraintes particulières pour le système de vide

Le projet

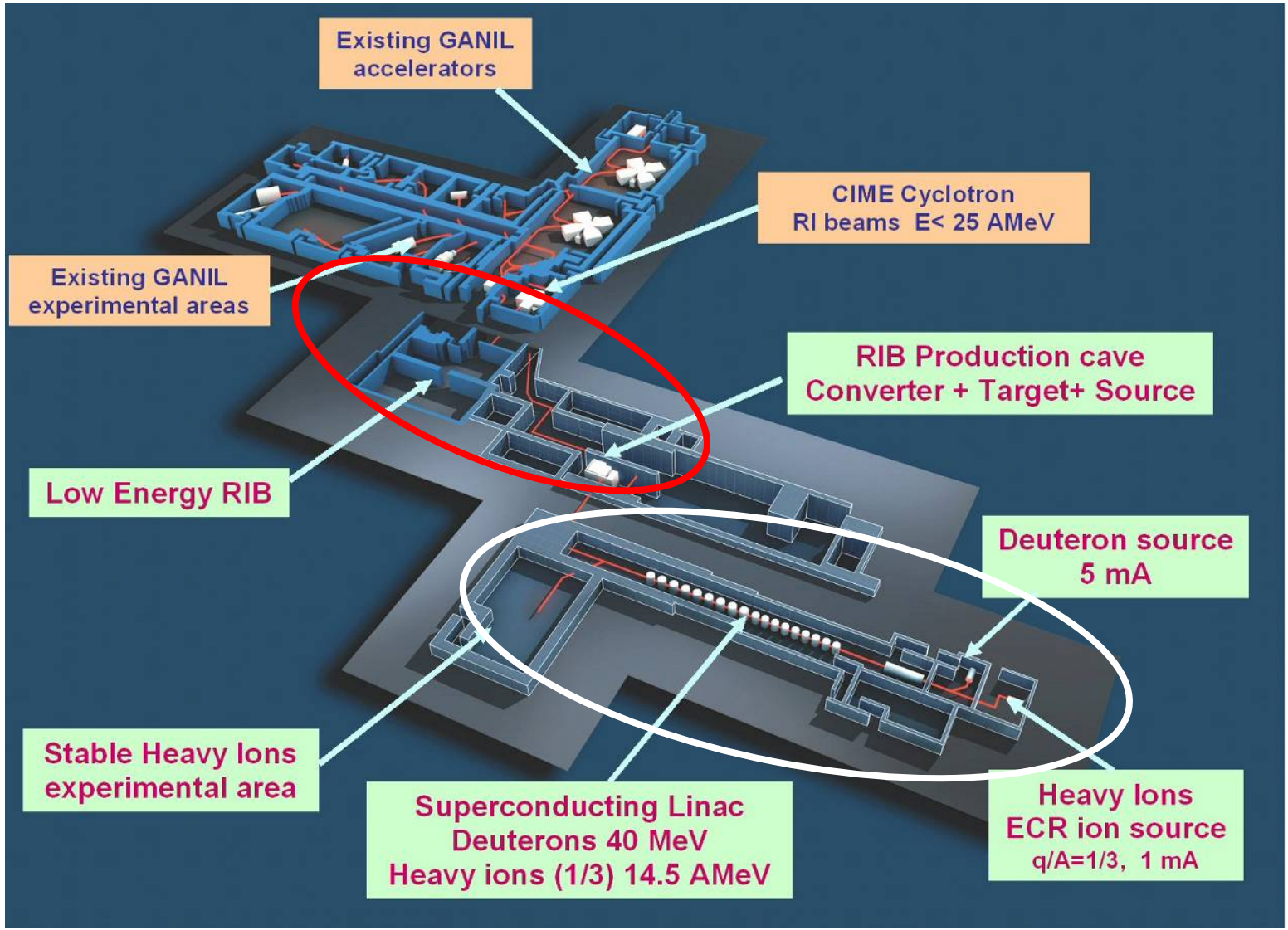
but : produire par réactions de fission, des faisceaux d'ions radioactifs

technique : utiliser un faisceau primaire de forte intensité pour produire un flux important de neutrons vers une cible fissile

principe



4/ le projet Spiral 2 : contraintes particulières pour le système de vide



4/ le projet Spiral 2 : contraintes particulières pour le système de vide

Zone de production : critique en terme de sûreté

A~ 7.10^{14} Bq dans la cible d'U
avec ~ 65% transmis par les gaz

Le système de vide doit assurer :

- ✓ *la transmission des faisceaux secondaires*
- ✓ *la barrière de confinement statique*
- ✓ *une barrière de confinement dynamique*

✓ *le système de vide doit limiter le transfert des gaz radioactifs dans les lignes de faisceaux (**réduction des zones à fortes contraintes radiologique**)*

4/ le projet Spiral 2 : contraintes particulières pour le système de vide

étude d'un système spécifique pour limiter le transfert des gaz radioactifs dans les lignes de faisceau

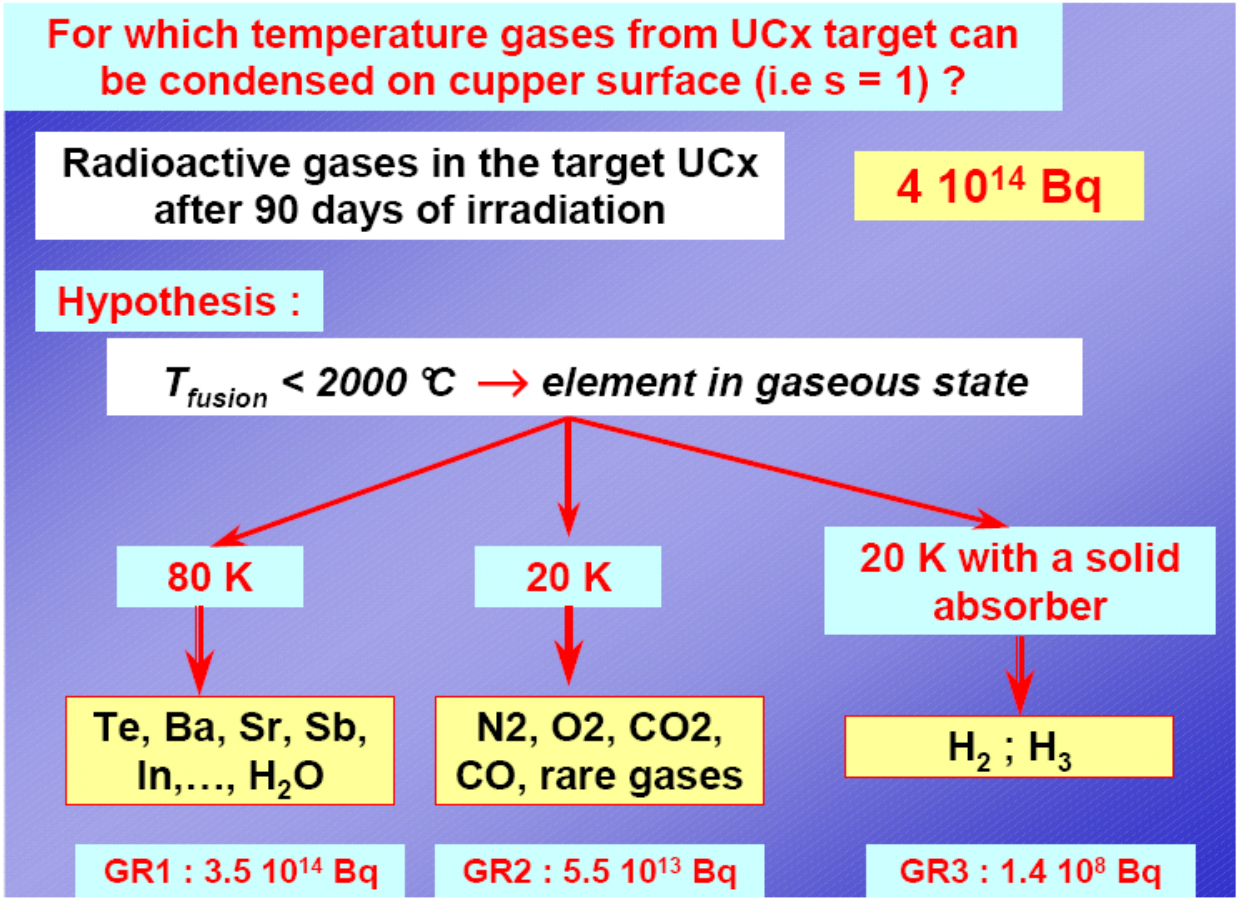
Exigences du système :

- *haute efficacité de piègeage sur les gaz RA produits (Ba, Te,.., -> H_3)*
- *efficacité pour les 3 mois d'opération*
- *fiabilité du système*
- *maintenance intégrant les contraintes de sûreté (zone rouge)*

→ *piège cryogénique en ligne(cryotrap)*

4/ le projet Spiral 2 : contraintes particulières pour le système de vide

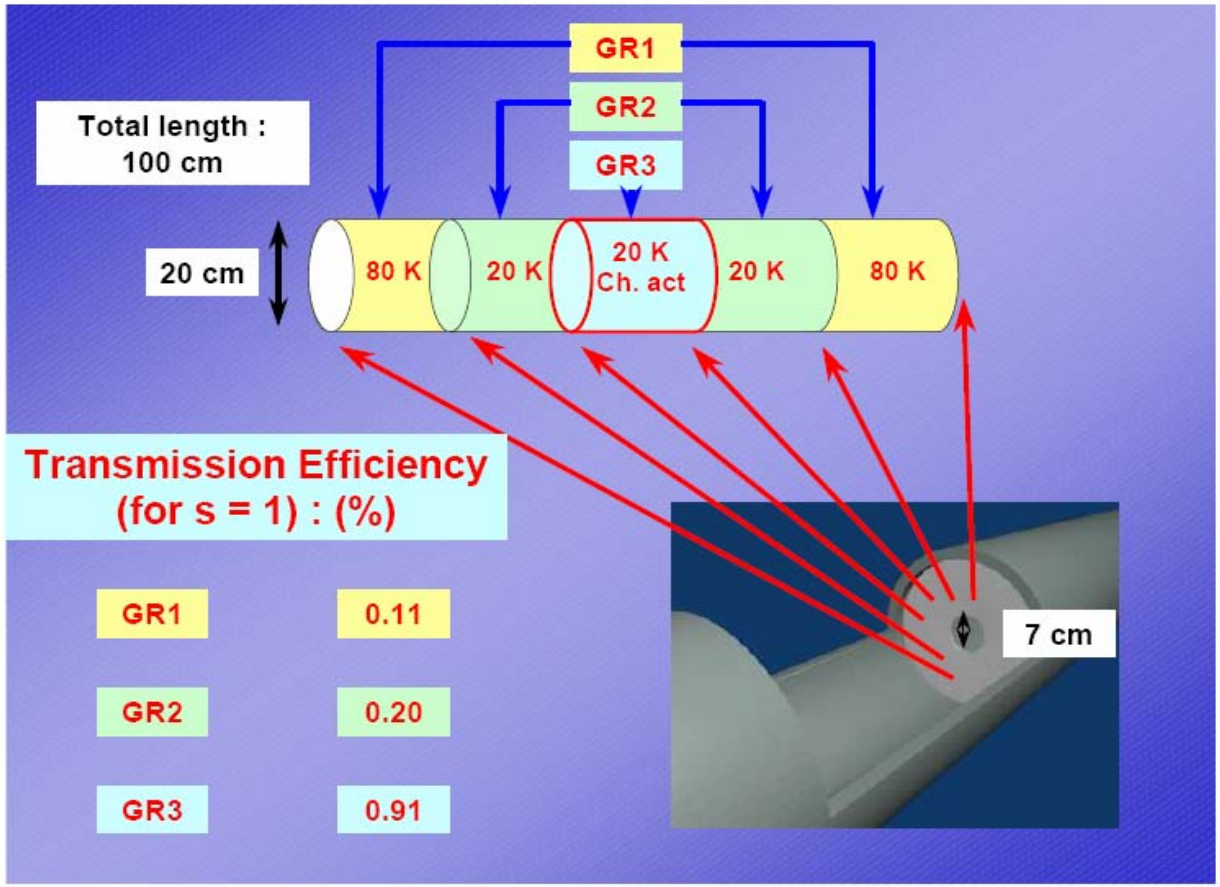
Bilan des radio éléments volatils



(M. Fadil – GANIL)

4/ le projet Spiral 2 : contraintes particulières pour le système de vide

Etude du piège cryogénique (simulation du transfert gazeux en régime moléculaire - MOVAK3D)



(M. Fadil – GANIL)

4/ le projet Spiral 2 : contraintes particulières pour le système de vide

2 phénomènes utilisés pour piéger les gaz RA

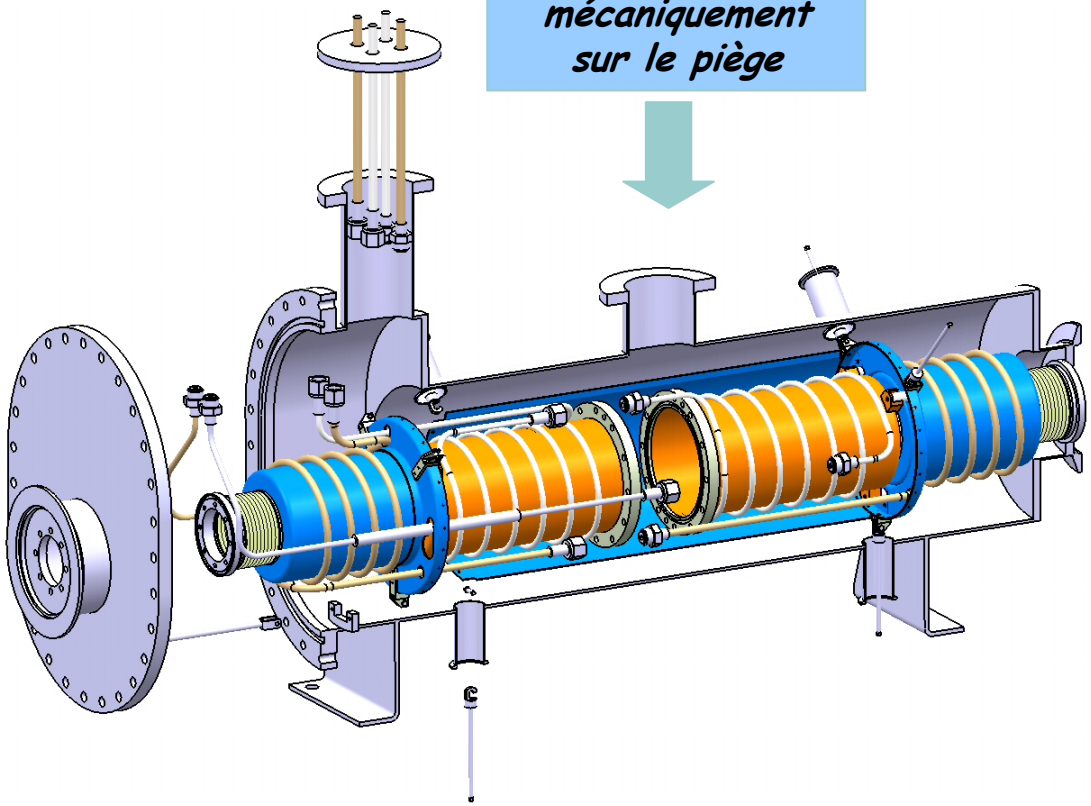
- *condensation sur les étages 80 – 20 K*
- *cryosorption sur charbon actif @ 20K*

Source froide : 2 solutions à l'étude

Cryogénérateurs éloignés de la zone

Le piège est refroidi par 2 circuits He (10bar – 15K et 70K)

Cryogénérateur couplé mécaniquement sur le piège



faisceau + gaz RA

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