



Le vide dans les accélérateurs

P. Dolégiéviez

patrick.dolegieviev@ganil.fr

Ecole des Accélérateurs - IN2P3
Bénodet 3 - 7 Février 2014

sommaire

1. Généralités
2. Eléments de théorie
3. Technologie du vide
4. Exemples de systèmes de vide pour accélérateurs :
 - 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 ²)
le mbar (UE)	
le Torr (US)	
le mmHg ..	(=1Torr)
	1 Torr = 133,3 Pa

$$1 \text{ Pa} = 10^{-2} \text{ mb}$$
$$1 \text{ hPa} = 1 \text{ mb}$$

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

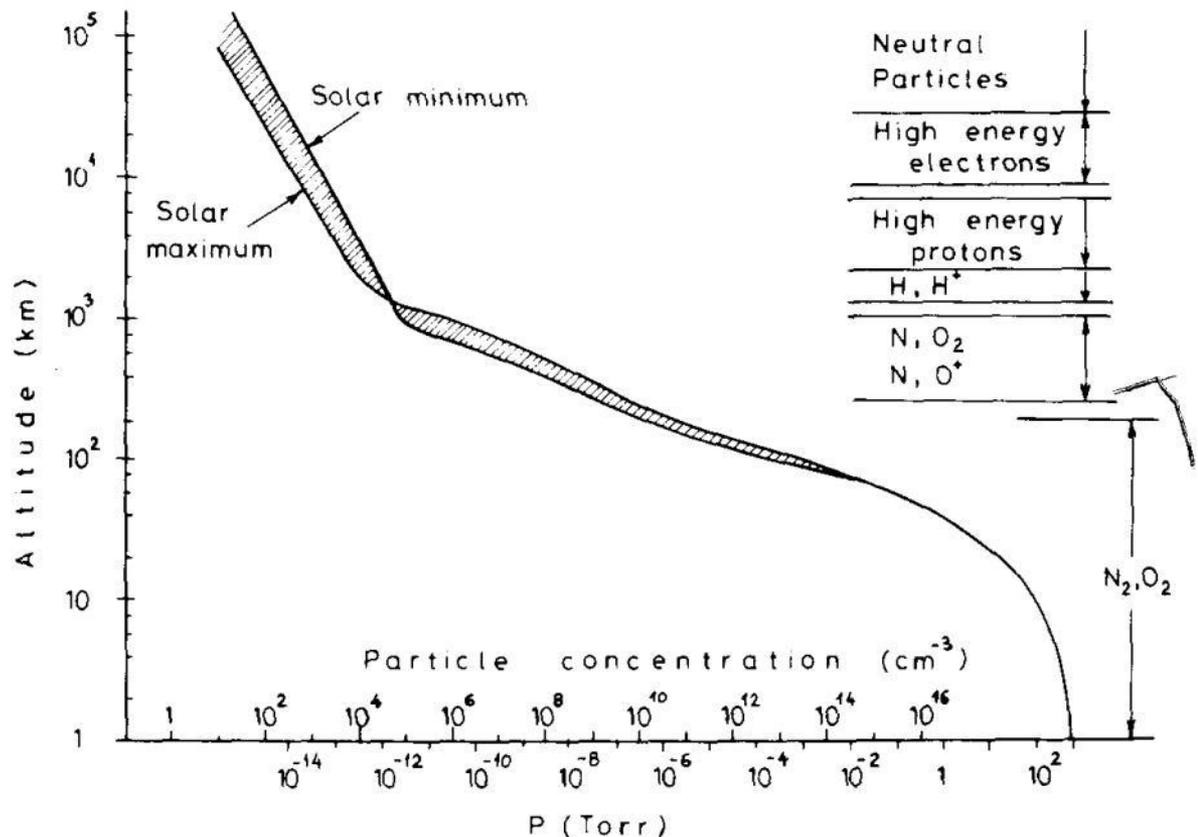


Fig. 1.2 Characteristics of the high altitude atmosphere surrounding the earth. Plotted after data from Nicolet (1960), Dushman and Lafferty (1962), Holkeboer *et al.* (1967), Rittehouse and Singletary (1968), Champion (1969).

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

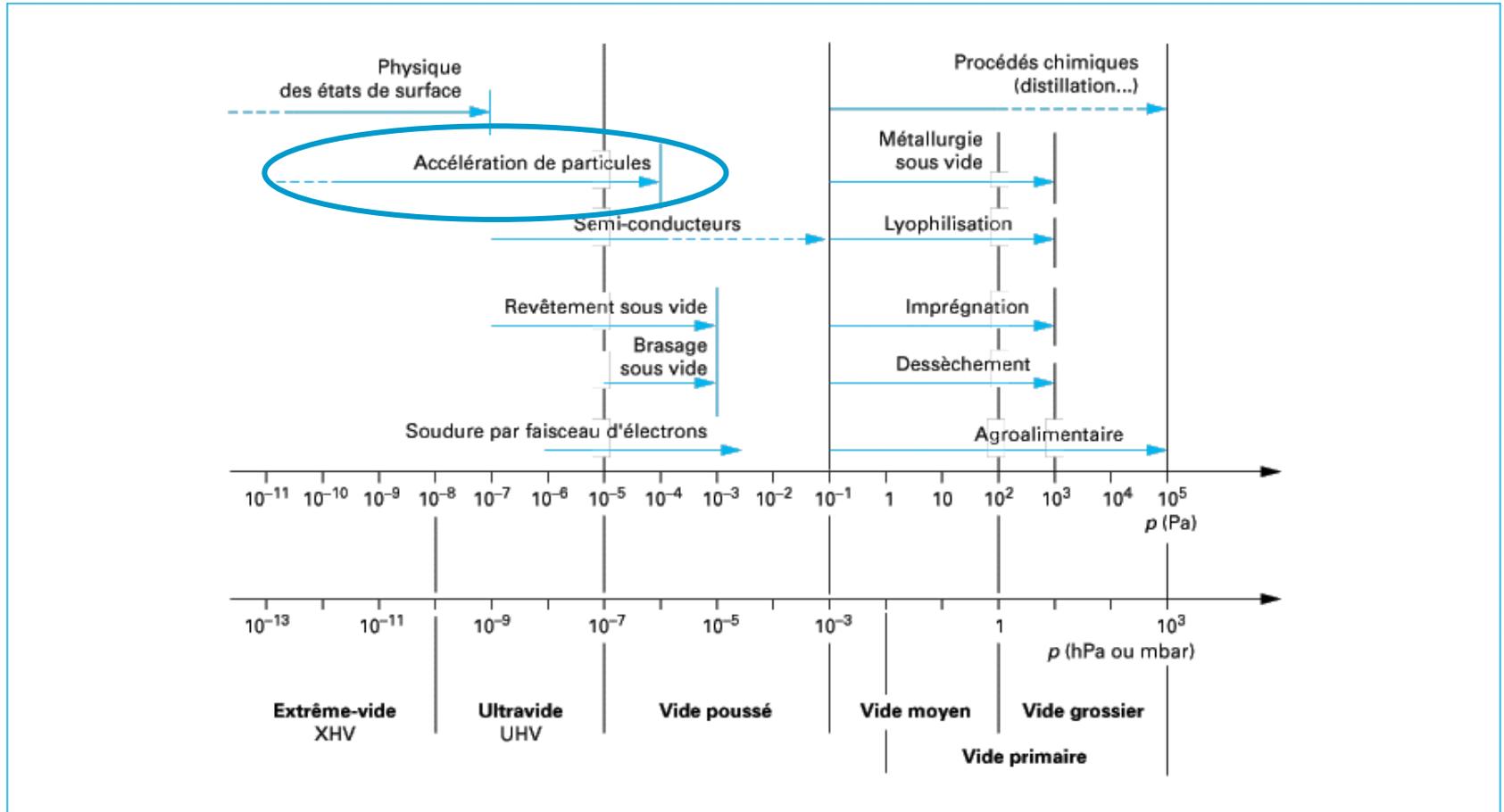
		Concentration (%)	Pression partielle (mbar)
Azote	N ₂	78	780
Oxygène	O ₂	21	210
Argon	Ar	0.93	9.3
Gaz carbonique	CO ₂	0.03	0.3
Néon	Ne	0.0018	1.8 10 ⁻²
Hélium	He	0.0005	5 10 ⁻³
Krypton	Kr	0.0001	1 10 ⁻³
Hydrogène	H ₂	0.00005	5 10 ⁻⁴
Xénon	Xe	0.000006	6 10 ⁻⁵

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



$$P_T = \sum P_P$$

1/ Le vide : pourquoi faire ?



Domaine d'application étendu \Rightarrow choix d'une technologie adaptée

1/ Le vide : pourquoi faire ?

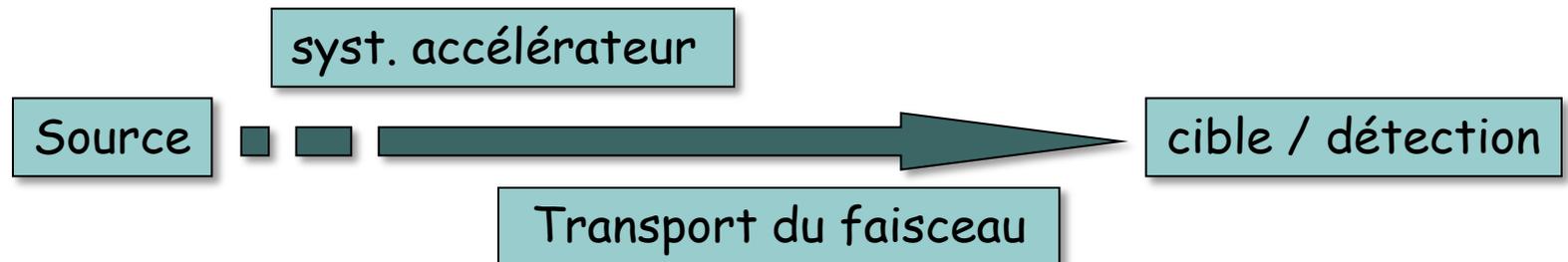
dans les accélérateurs de particules :

➤ 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 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 μg/cm ²	2,47.10 ¹⁰	100 m	2,9.10 ¹⁴	3,4 s
10 ⁻⁹	10 μg/m ²	2,47.10 ⁷	100 km	2,9.10 ¹¹	1 heure
10 ⁻¹²	10 ⁻² μg/m ²	2,47.10 ⁴	10 ⁵ km	2,9.10 ⁸	40 jours
10 ⁻²³	10 ⁻⁷ μg/km ²	2,47.10 ⁻⁷	10 ¹⁶ km	2,9.10 ⁻³	10 ¹⁰ ans

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

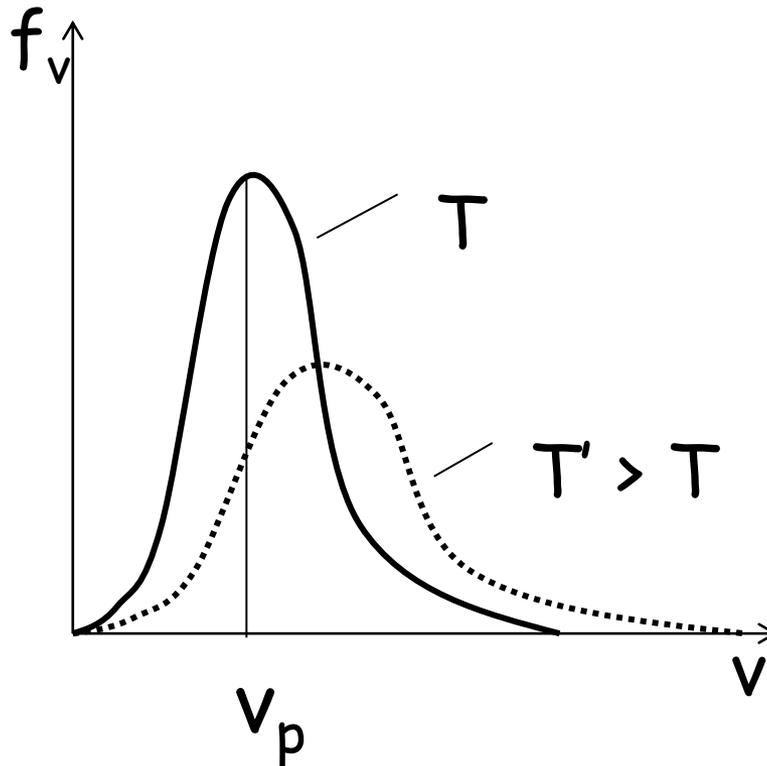
- la pression résulte de l'ensemble des chocs des molécules sur les parois ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$)
- notion de pressions partielles
- diminuer la pression revient à réduire le nombre de molécules ou leur vitesse (T)

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)



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 (v_c)

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

à 20°C , $v_p \sim 400 \text{ m/s}$ (N_2)
 $v_p \sim 1500 \text{ m/s}$ (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 $T^\circ \Rightarrow$ 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. $s^{-1} \cdot m^{-2}$

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

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

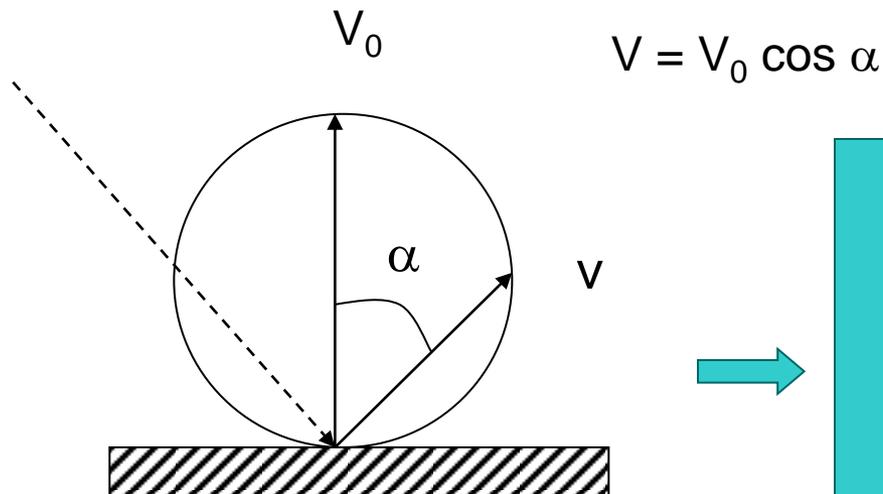
Pour $P = 10^{-11} \text{ Pa}$ technologie XHV (\sim limite exp.)

à 293 K, il reste 2500 molécules/cm³ ...

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** τ_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)

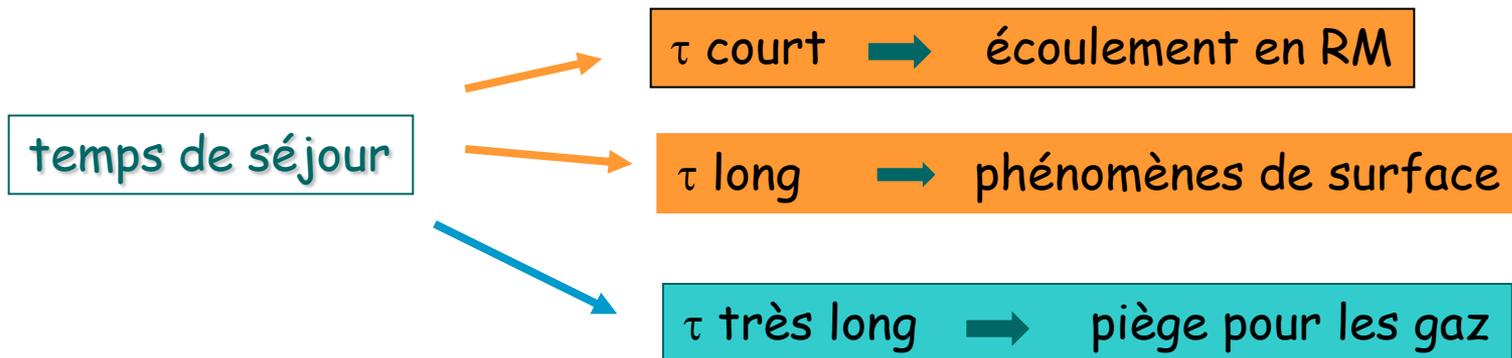
2.3/ temps de séjour sur la parois

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

avec E : chaleur d'adsorption
 τ_0 : période d'oscillation de la molécule adsorbée ($\sim 10^{-13}$ s à 20°C)

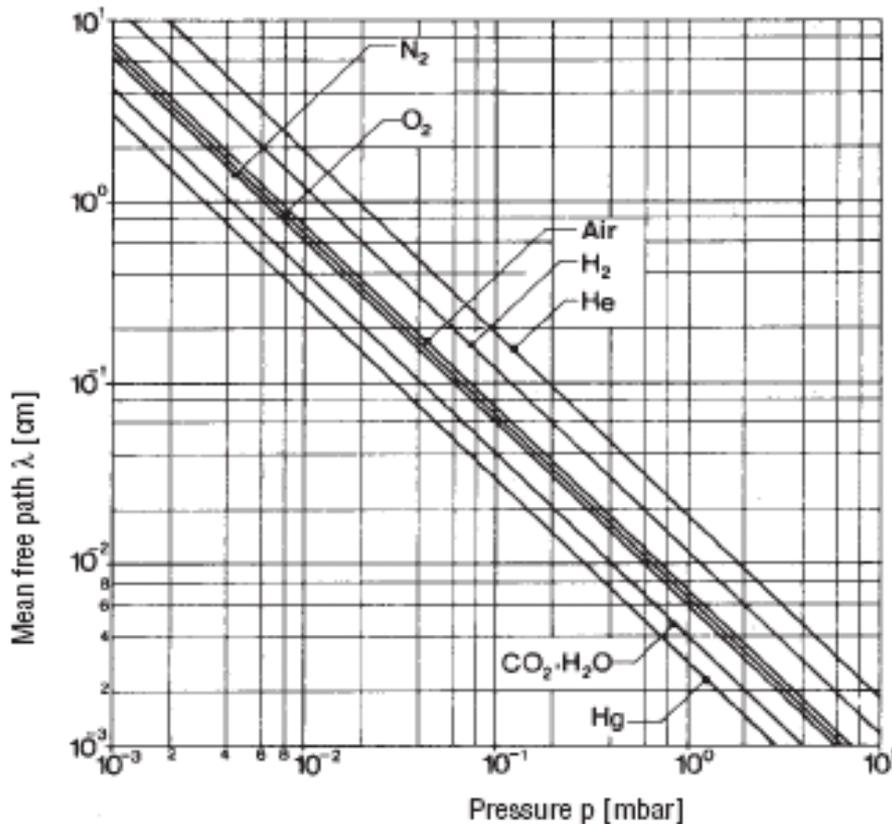
E dépend de la nature du gaz et de la parois

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	



2.3/ libre parcours moyen

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



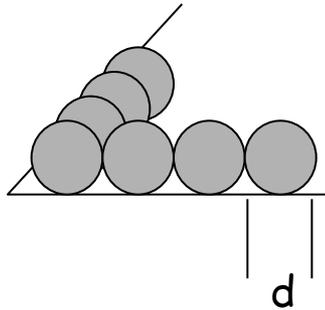
L_m → définition du vide poussé
(interaction des molécules de gaz avec les parois, régime d'écoulement)

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 :

$$n = \frac{1}{4} \cdot n_V \cdot V_m \quad (\text{théorie cinétique})$$



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 : $\mu_s = 7 \cdot 10^{18} / m^2$)*

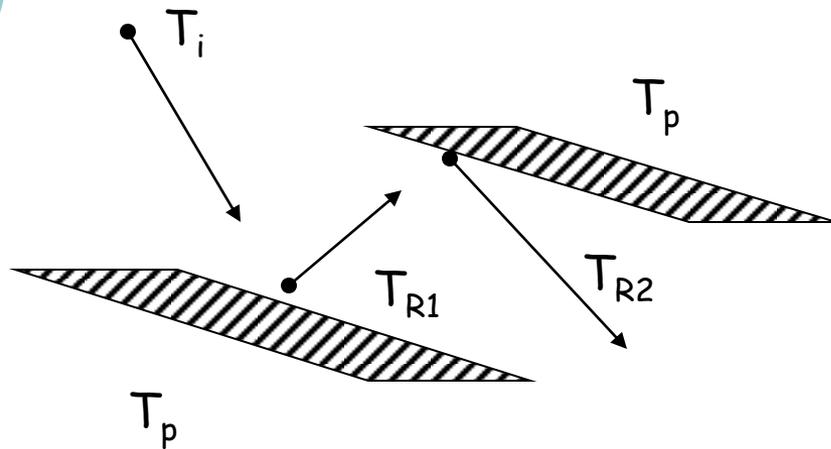
pour N_2 à 300K

$$\tau = 2,5s \text{ à } 10^{-4} Pa$$

$$\sim 7h \text{ à } 10^{-8} Pa$$

2.3/ accomodation

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



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

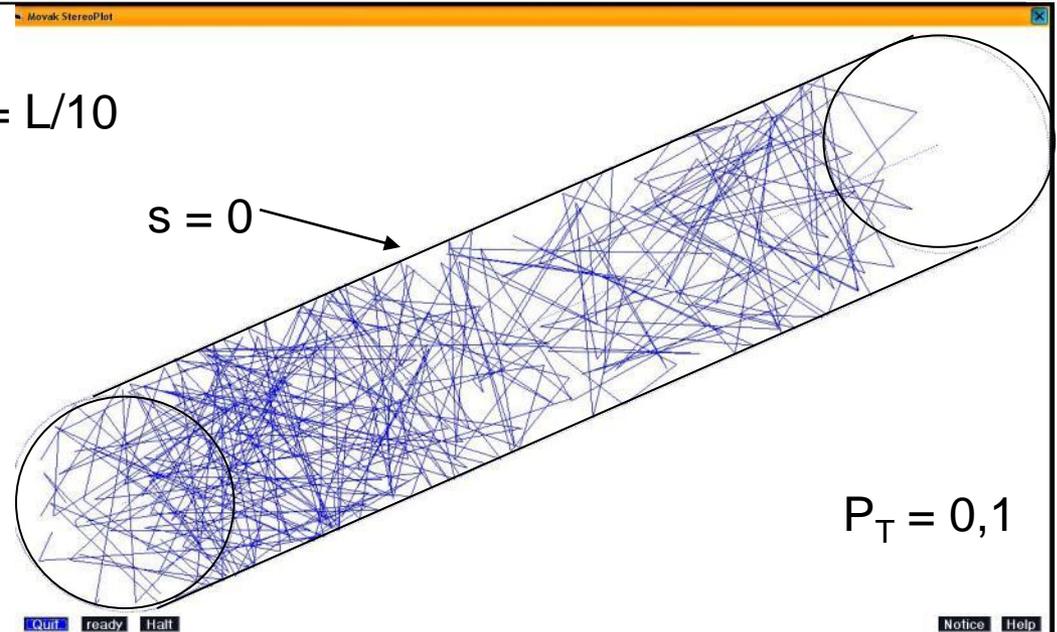
Le coefficient d'accommodation définit la capacité d'une paroi à échanger de l'énergie avec une molécule de gaz (modifier sa T°).

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

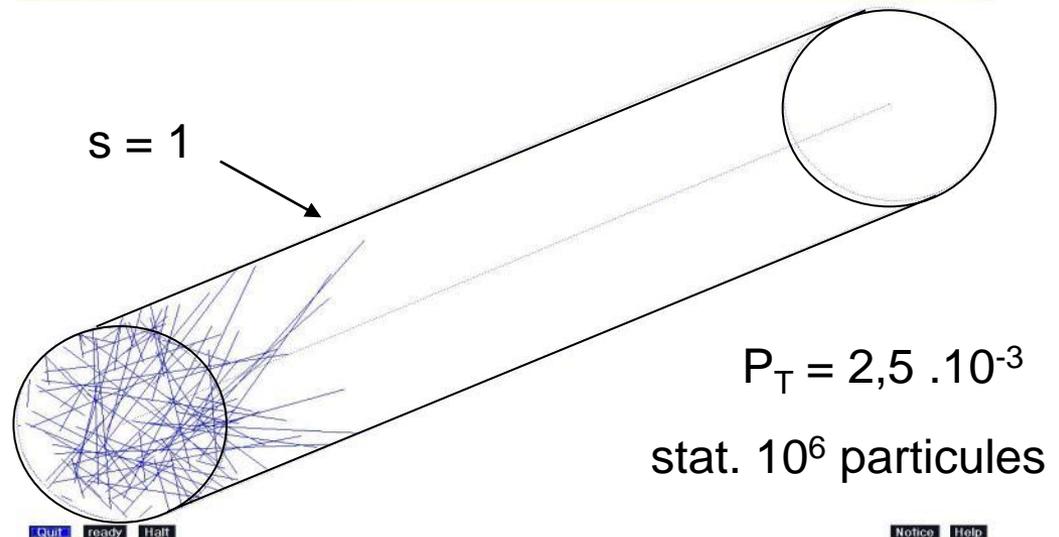
2/3 probabilité de transfert (régime moléculaire)

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

$$\Phi = L/10$$

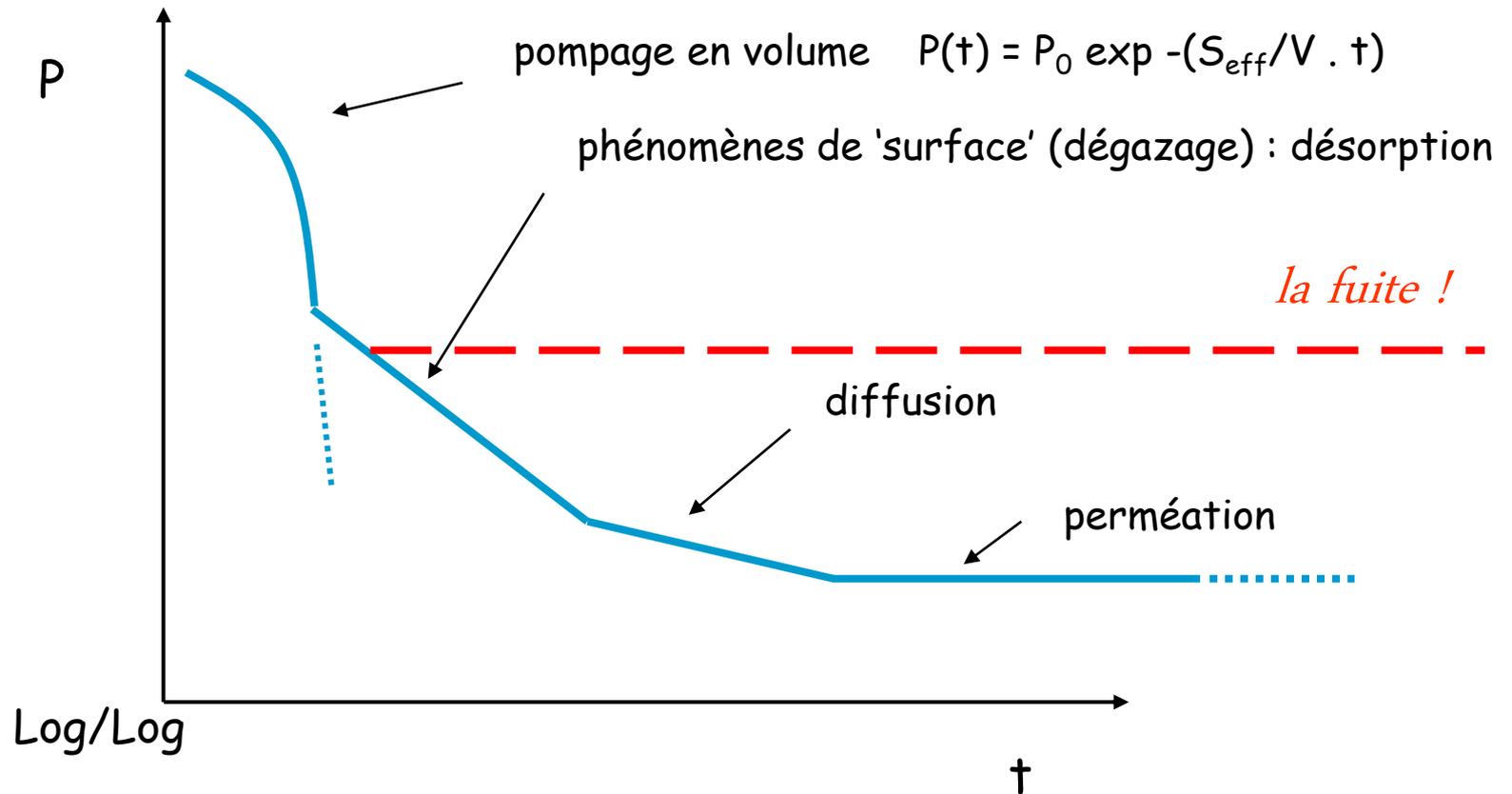


Prise en compte du coefficient de collage s



2.4/ Bilan des flux gazeux

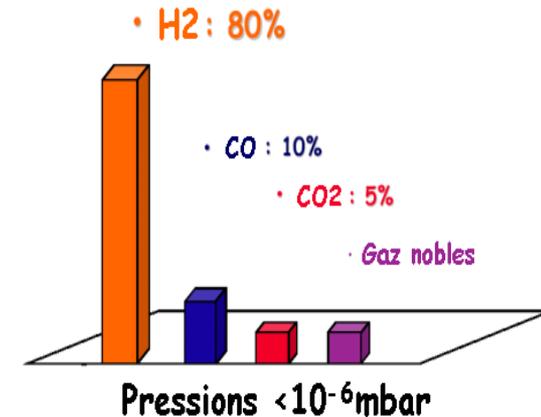
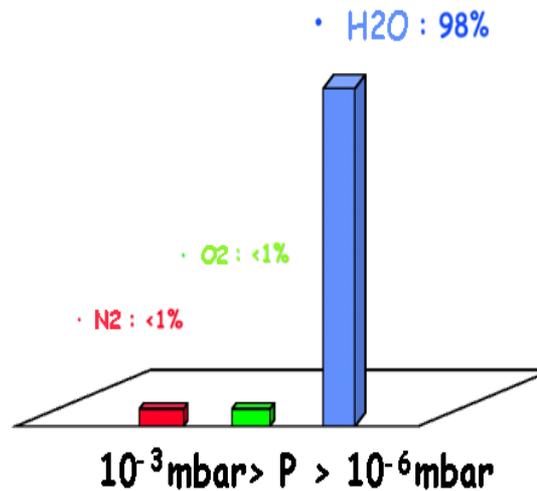
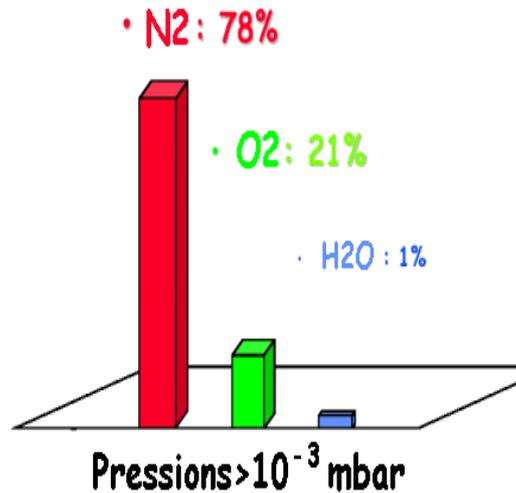
Analyse de la descente en pression : approche quantitative



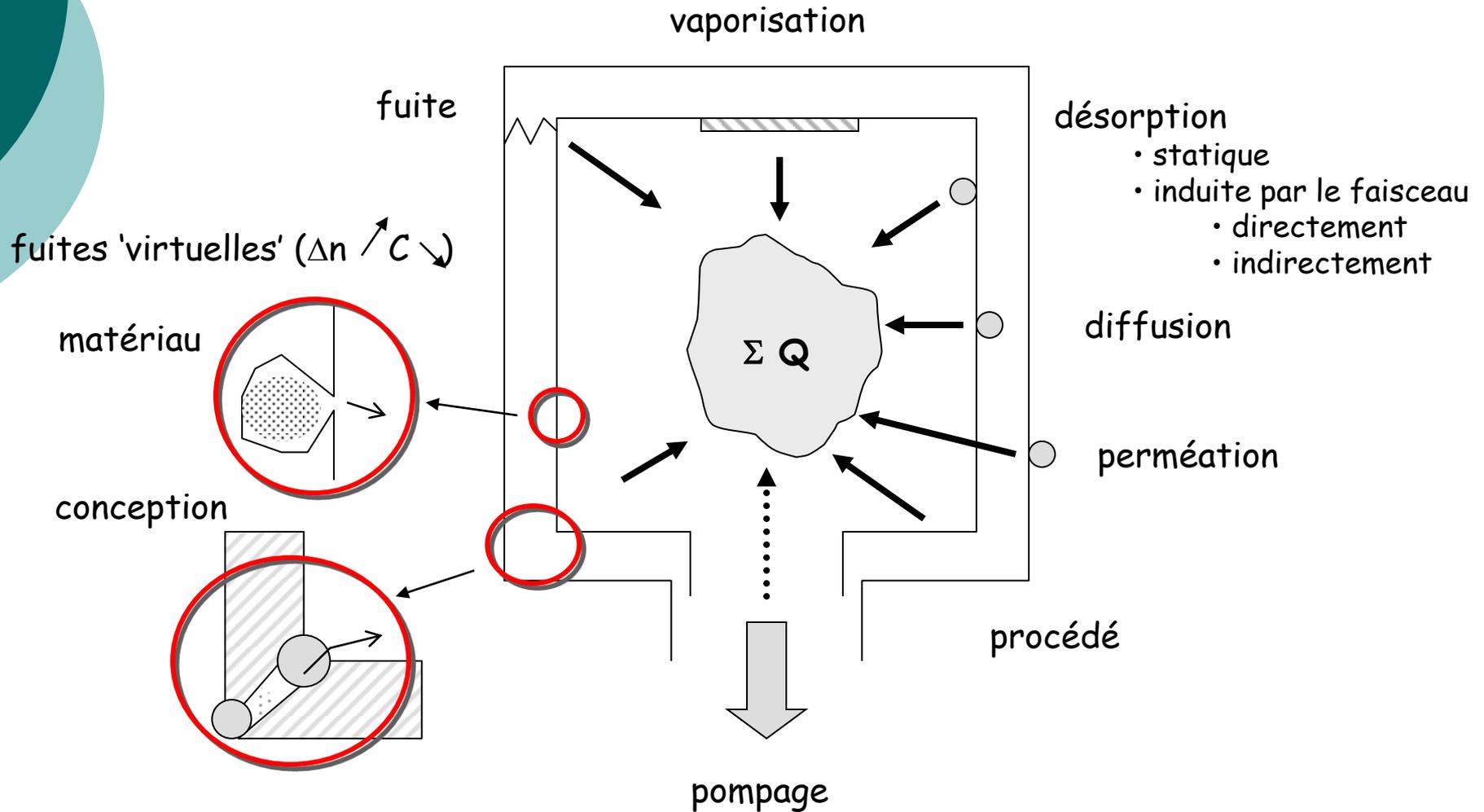
2.4/ Bilan des flux gazeux

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



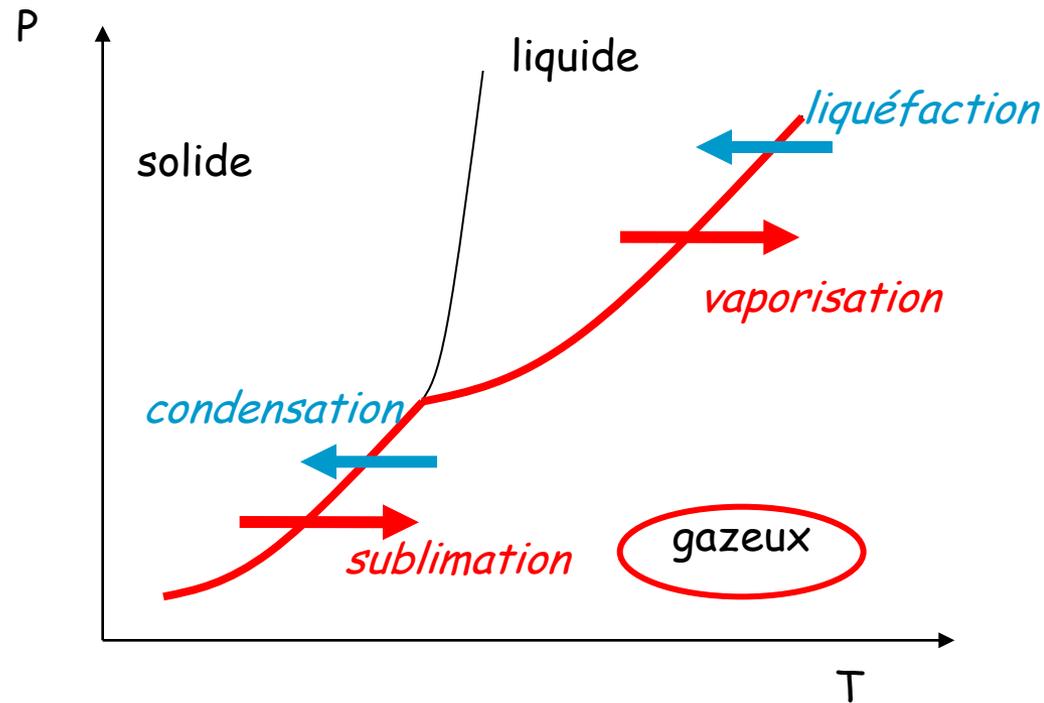
2.5/ Phénomènes de surface

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

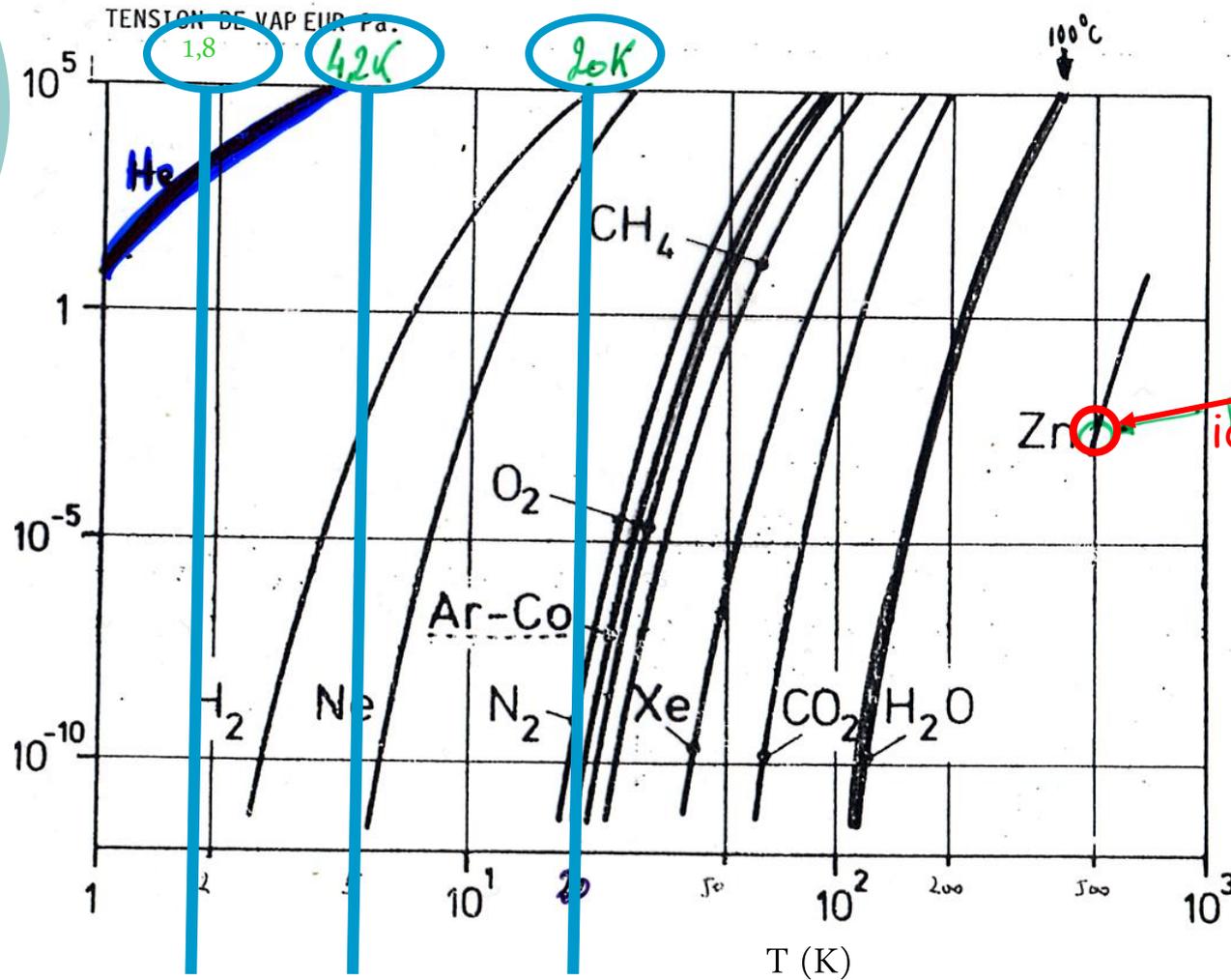
Diagramme de phases

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

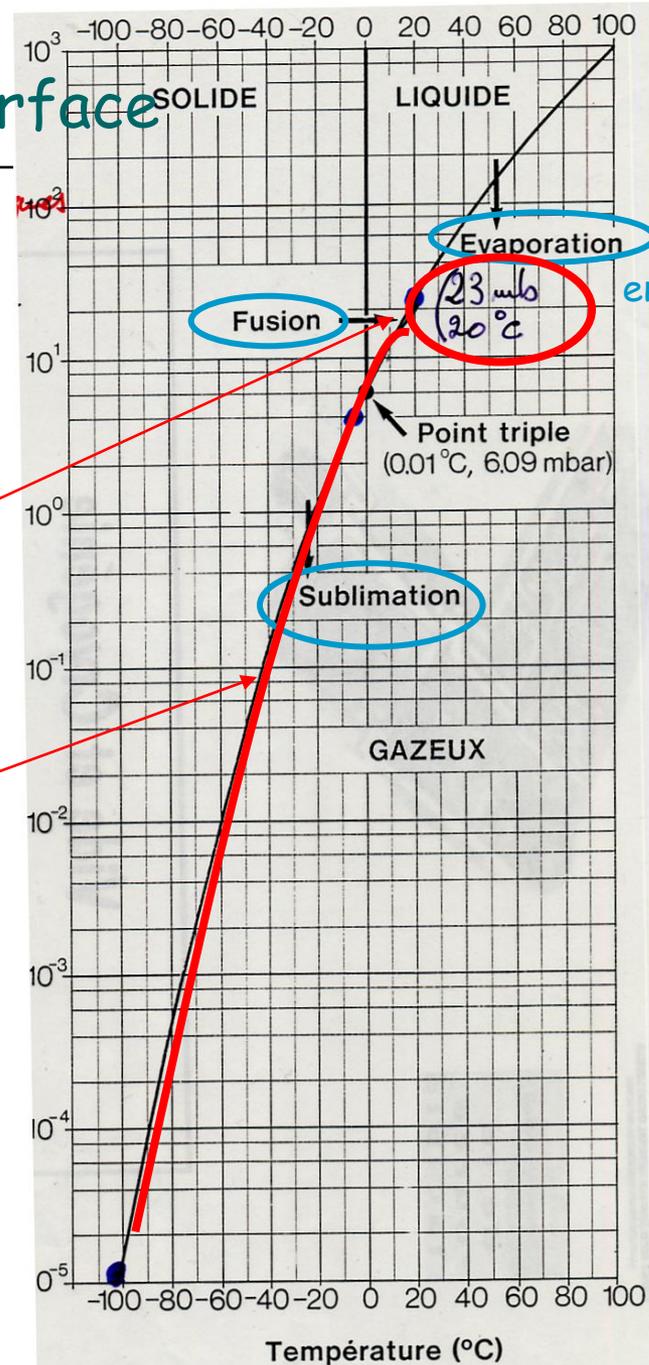
2.5/ Phénomènes de surface

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



phénomènes endothermiques

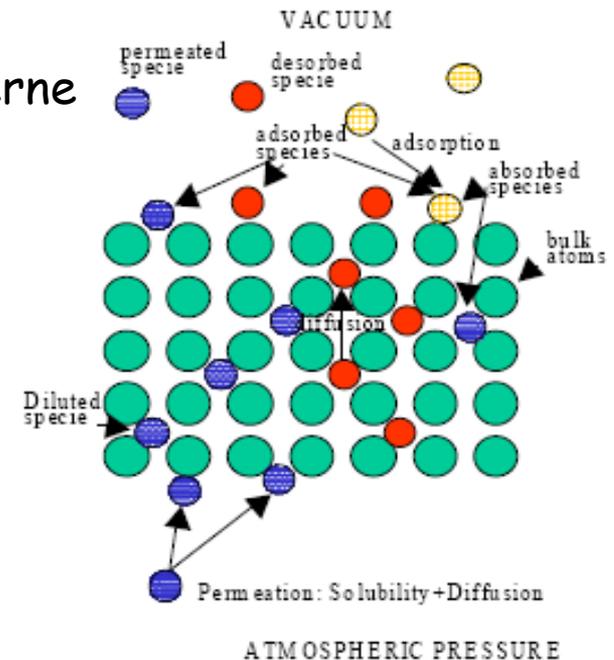
2.5/ Phénomènes de surface

La perméation

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

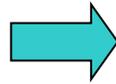
- Adsorption de la molécule sur la parois externe
- Dissociation de la molécule
- Dissolution dans le réseau
- Diffusion
- Recombinaison sur la parois interne
- Désorption sous vide

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



2.5/ Phénomènes de surface

Absorption des gaz par physisorption



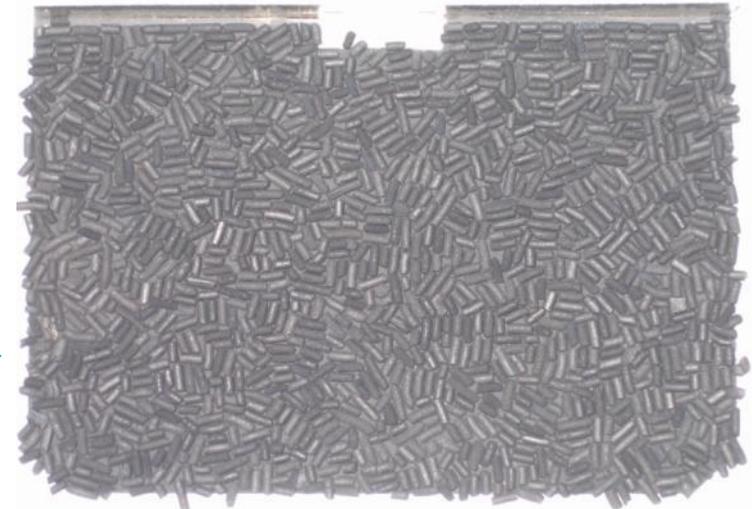
largement utilisé en technique du vide pour piéger les molécules de gaz résiduel

Principaux absorbants utilisés :

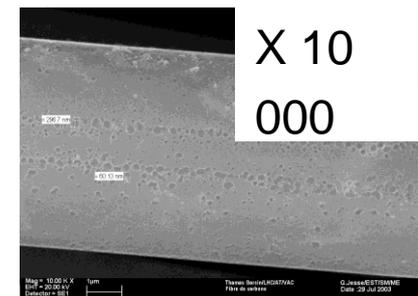
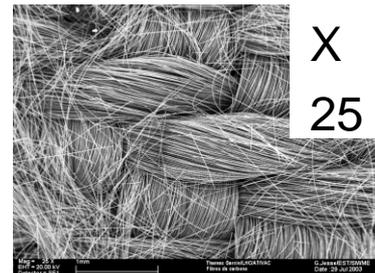
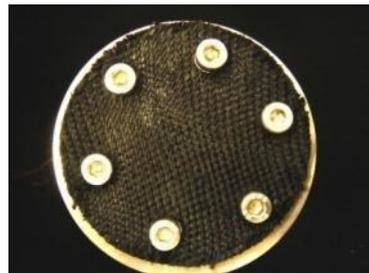
- Zéolites
- Silica-gel
- Charbon actif

Charbon actif : le meilleur absorbant

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



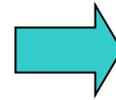
sous forme de fibres
(V. Baglin CERN)



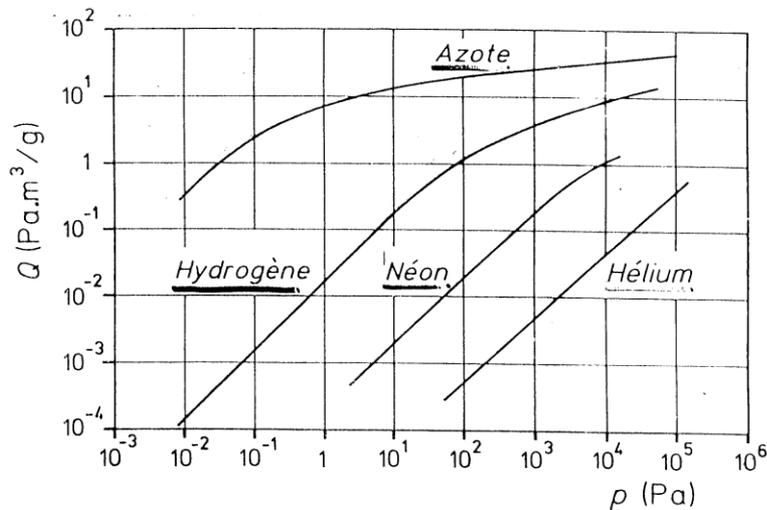
V. Anashin *et al.* Vacuum 75 (2004) 293-299

2.5/ Phénomènes de surface

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

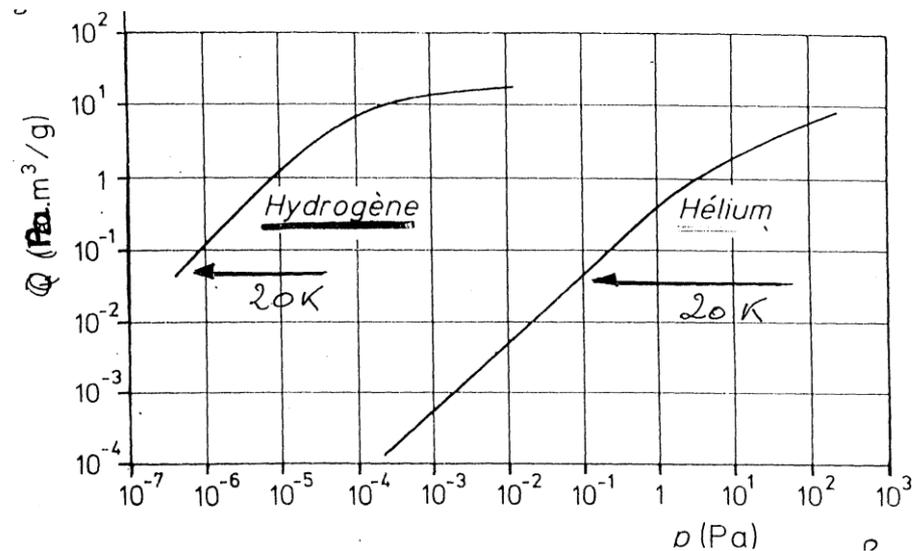


Utilisation d'isothermes d'absorption



$T = 77\text{ K}$

à basses P $Q = k P$ (loi de Henry)



$T = 20\text{ K}$

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

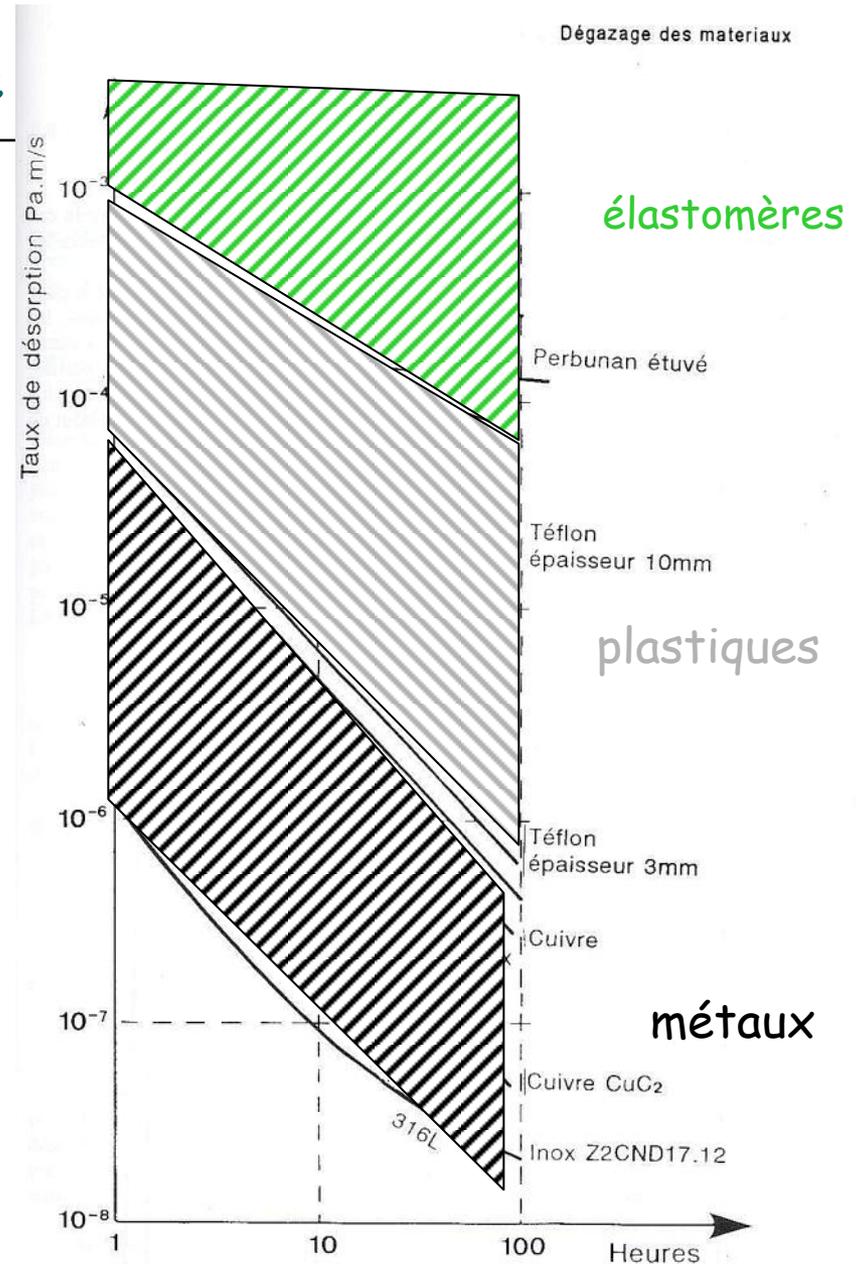
Élastomères et plastiques :

$$Q_g(t=0) \text{ et}$$

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

Métaux : $Q_g(t=0)$
et

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



2.6/ flux gazeux : ordres de grandeur

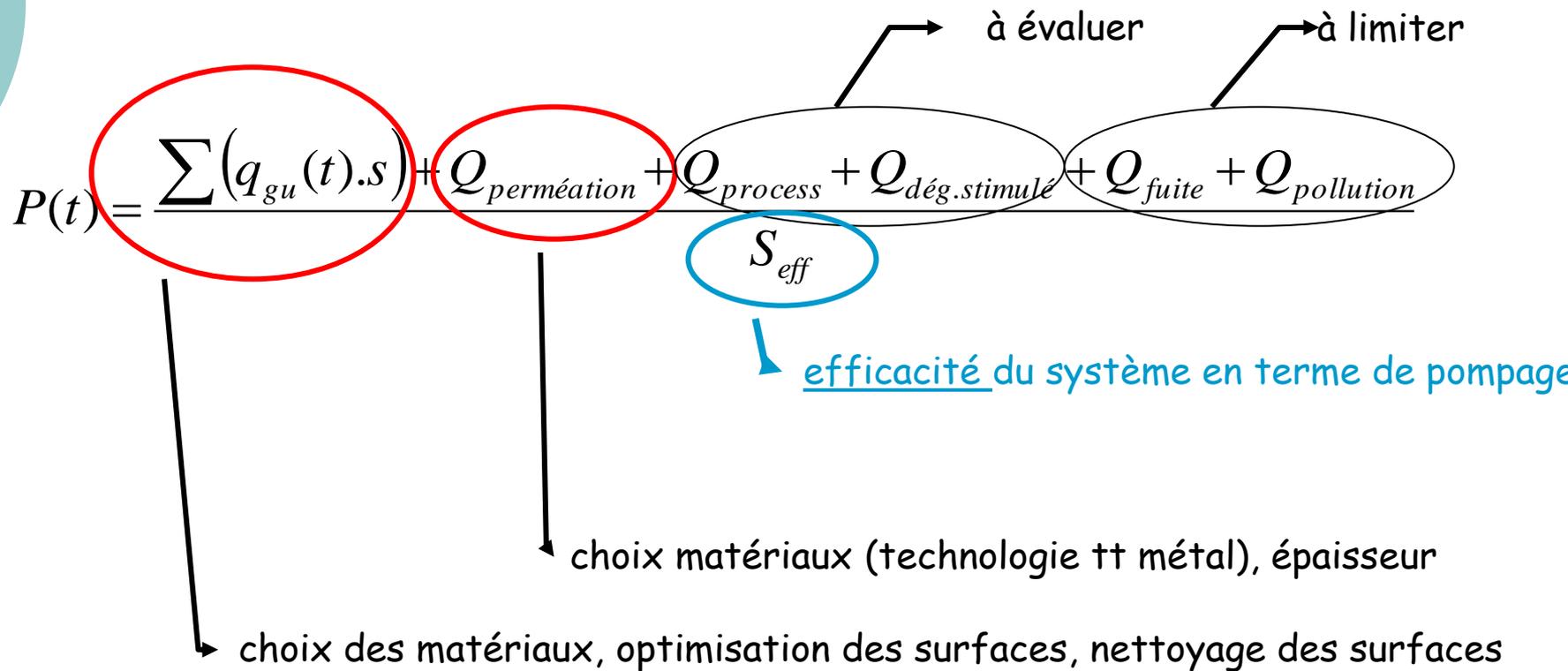
Taux de désorption

- après nettoyage et 100h de mise sous vide
 - Métaux (inox) $qq. 10^{-8} \text{ Pa.m.s}^{-1}$ ($qq. 10^{-11} \text{ mb.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$)
 - élastomères $qq.10^{-4} \text{ Pa.m.s}^{-1}$

- + traitement thermique (étuvage 120°C)
 - Métaux (inox) $qq. 10^{-9} \text{ Pa.m.s}^{-1}$
 - élastomères (viton) $qq.10^{-6} \text{ Pa.m.s}^{-1}$

- étuvage 300°C in-situ
 - Métaux (inox) $qq. 10^{-11} \text{ Pa.m.s}^{-1}$

2.6/ flux gazeux : conséquences sur la conception



2.7/ Ecoulement des gaz

Détermination des régimes d'écoulement gazeux

nb. de Reynolds

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

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

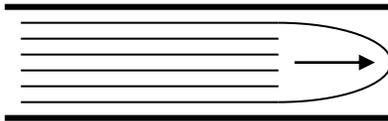
$$Q = P \cdot q_v$$



Turbulent

$$\text{Re} > 2200$$

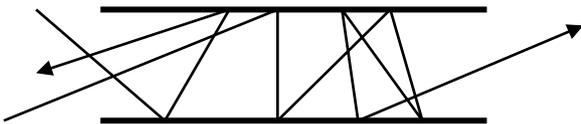
$$Q > 2,6 \cdot 10^3 d \quad (\text{air } 20^\circ\text{C})$$



Laminaire

$$\text{Re} < 1200$$

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



Moléculaire

$$d/l_m < 3$$

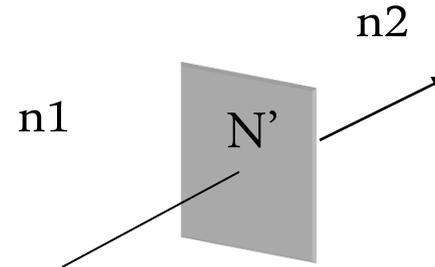
2.7/ écoulement des gaz : notion de conductance

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 $N' = n q_v$

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

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

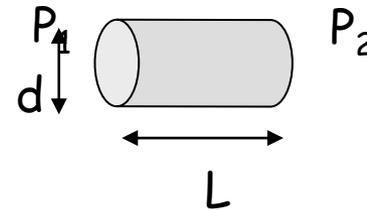
$$C = 1/Z = Q / \Delta P$$

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 :

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

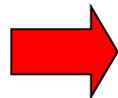
RL : $\Delta P = 10^4 \text{ Pa} \Rightarrow c = 2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

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

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



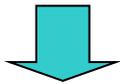
En régime d'écoulement moléculaire
utiliser des canalisations courtes et de
grands diamètres pour *optimiser* les
conductances

2.7/ écoulement des gaz

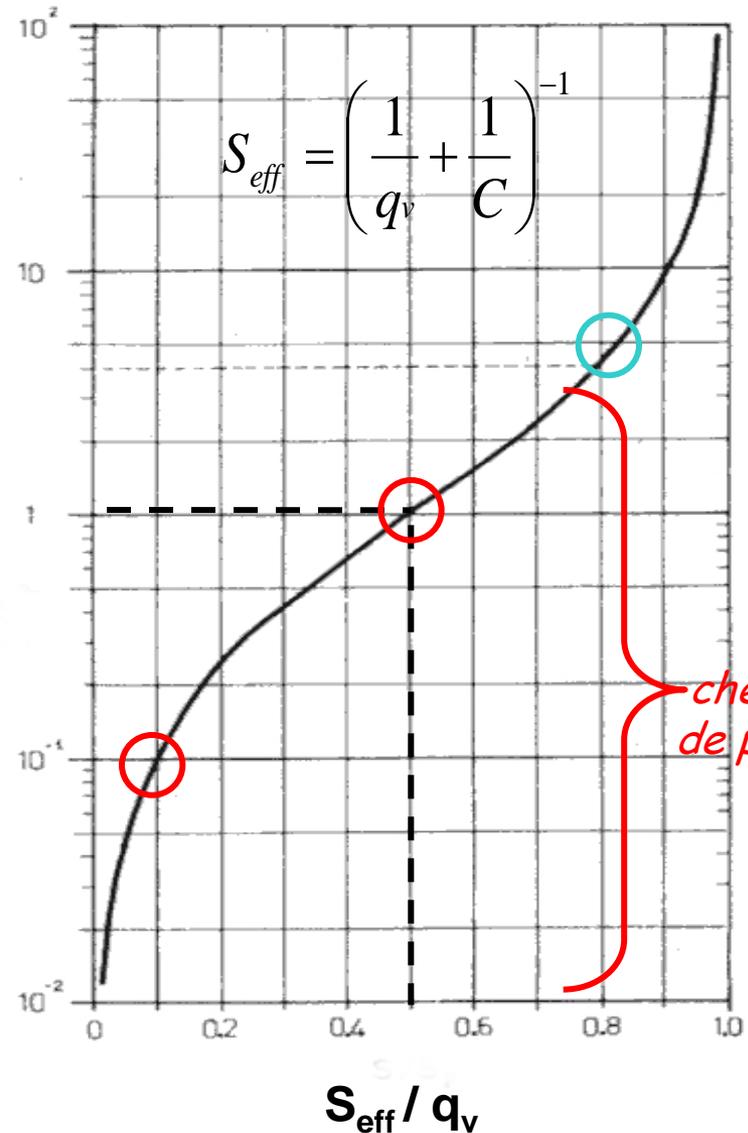
Conductance et débit volume effectif

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



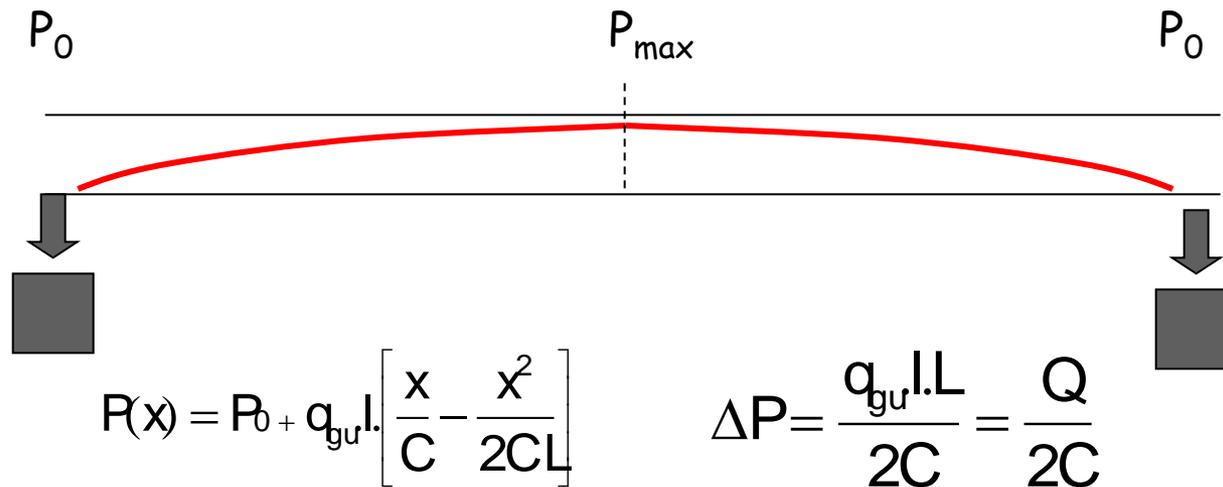
conductance : facteur limitant la vitesse de pompage effective



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, 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

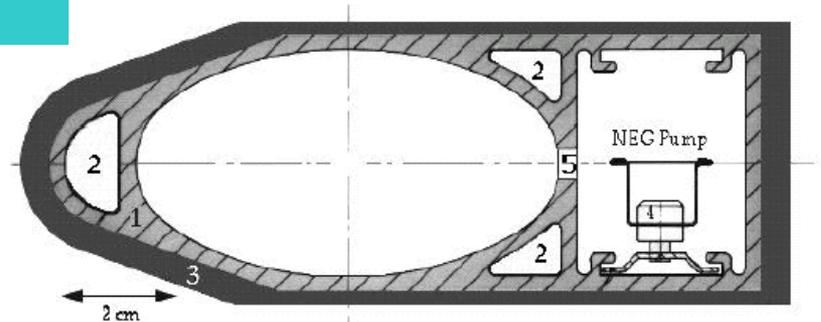
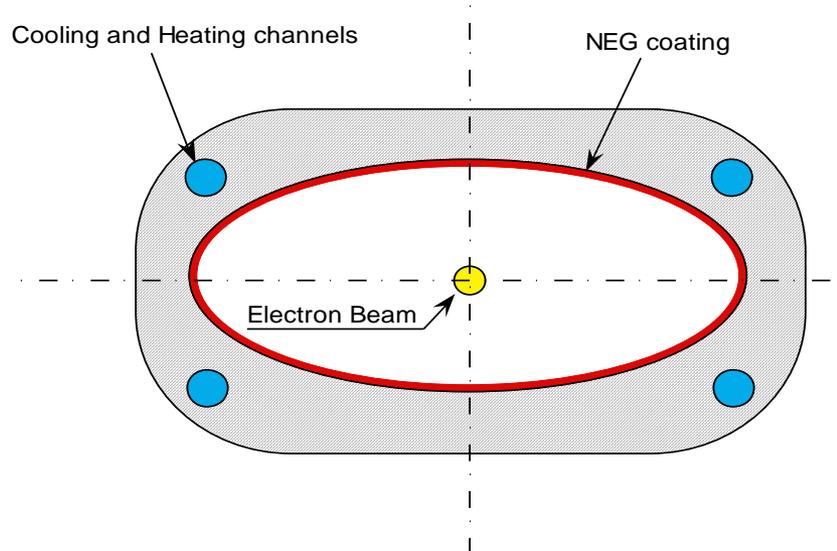


Fig. 2 : Vacuum chamber section made of (1) extruded aluminium profile with the elliptic beam channel, three cooling water ducts (2) and surrounded by 3 to 8 mm thick lead shield (3). The NEG pump (4) is housed in a separate pump channel connected to the beam channel by a row of longitudinal slots (5).



dépôt NEG

LHC vacuum chamber section

3/ Technologie : outils de modélisation des systèmes

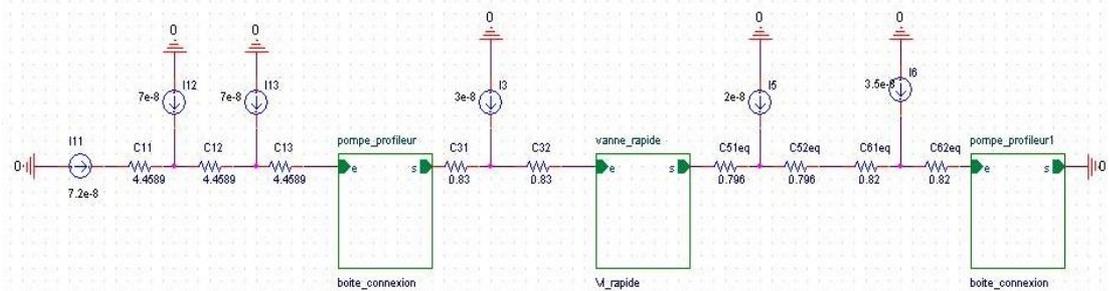
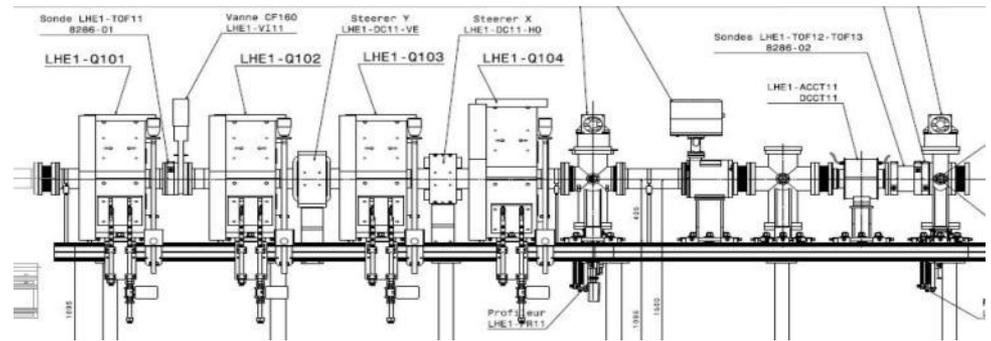
Simulation du transfert des flux gazeux

➤ Analogie courant électrique - flux gazeux

$(I \Leftrightarrow Q_g, R \Leftrightarrow 1/C, V \Leftrightarrow P)$

ORCAD / PSPICE

modélisation du système sous vide



3/ Technologie : outils de modélisation des systèmes

ORCAD / PSPICE

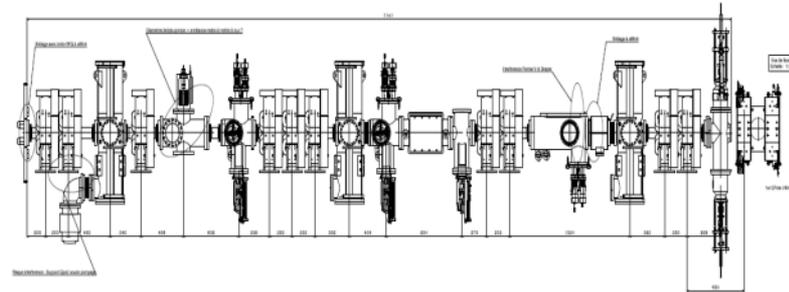


profil de pression dans les lignes de faisceau)

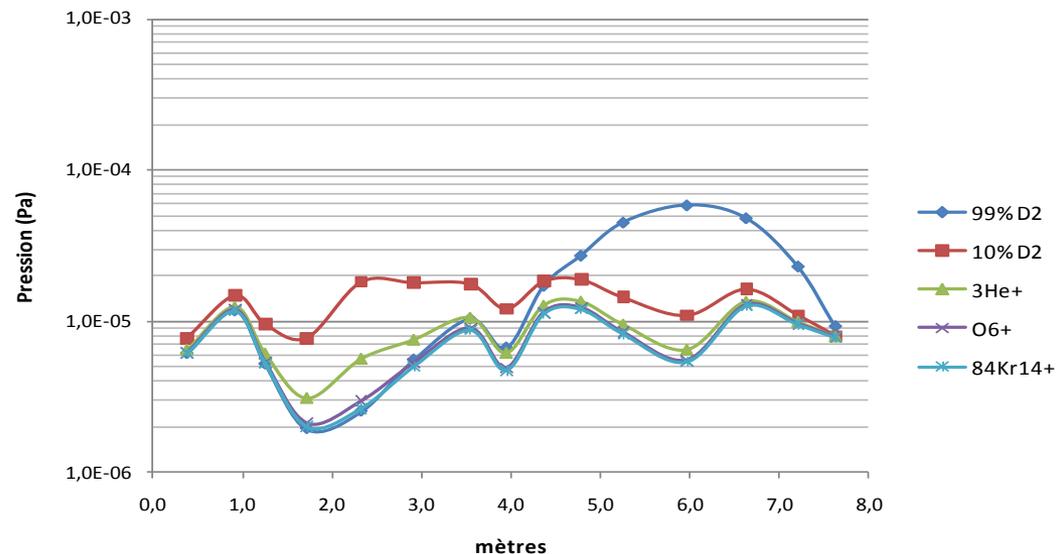


Optimisation de la configuration de pompage

- implantation des unités de pompage
- type de pompes (nature du gaz résiduel)



Configuration finale 4 GC + 2 GT (Résiduel)



3/ Technologie : outils de modélisation des systèmes

calcul de la probabilité
de transfert
des éléments volatils en
régime moléculaire

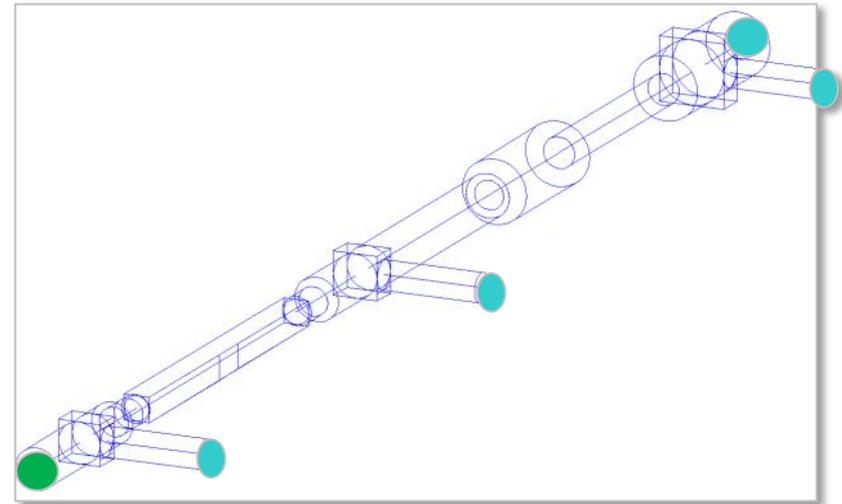
- Méthode MC
 - déf de la géométrie
 - déf des propriétés (interactions au parois)

(MOVAK3D, MOLFLOW)

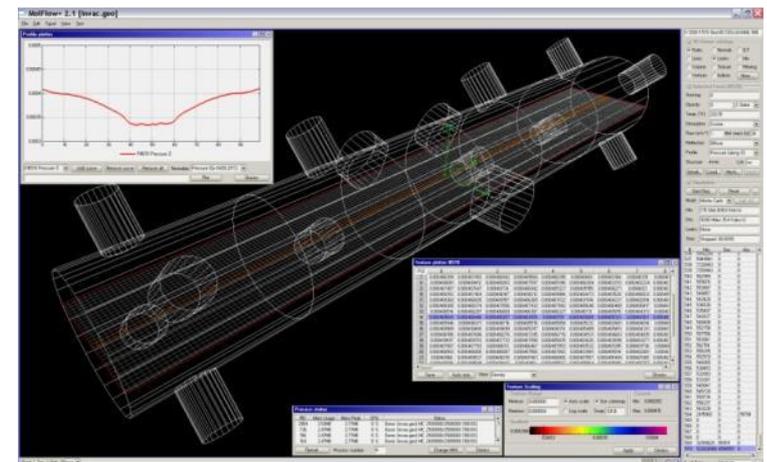


domaines d'utilisation :

- design en UHV
- transfert des gaz radioactifs dans les lignes de faisceau (RM)



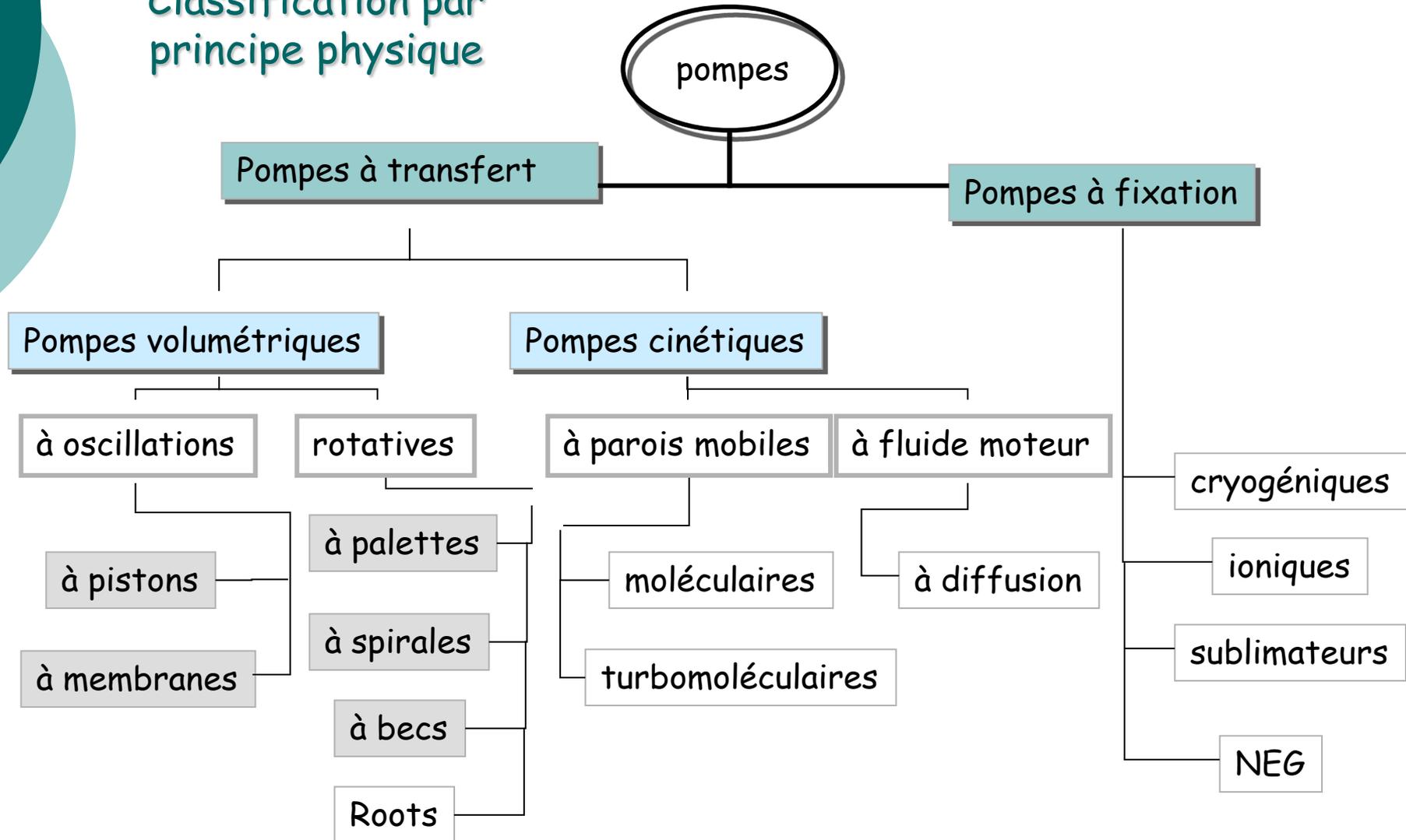
MOVAK3D



MOLFLOW+ 2.1 (R. Kersevan)

3/ Technologie : les moyens de pompage

Classification par principe physique



3/ Les moyens de pompage

Caractéristiques principales des pompes à vide, critères de choix

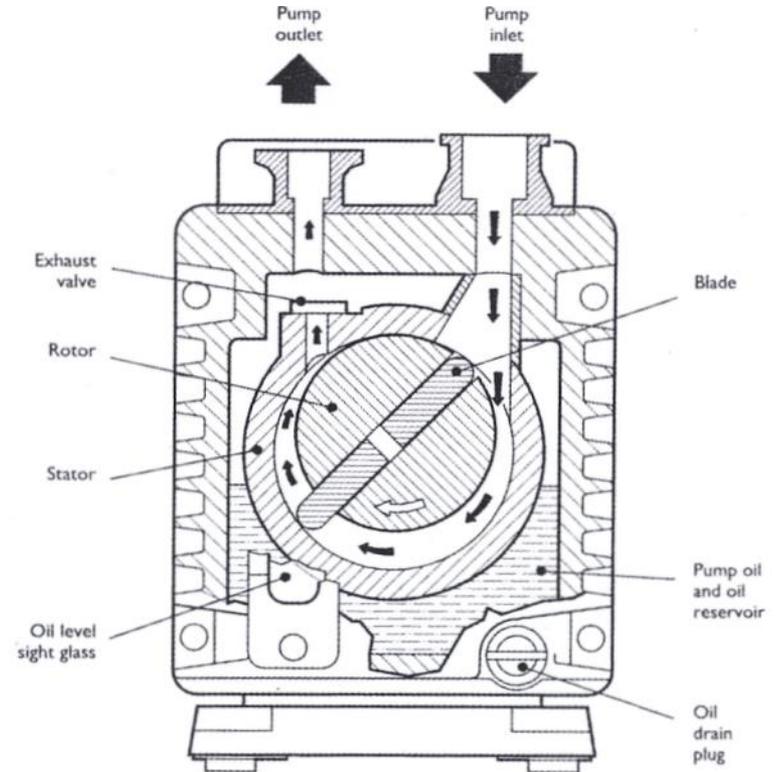
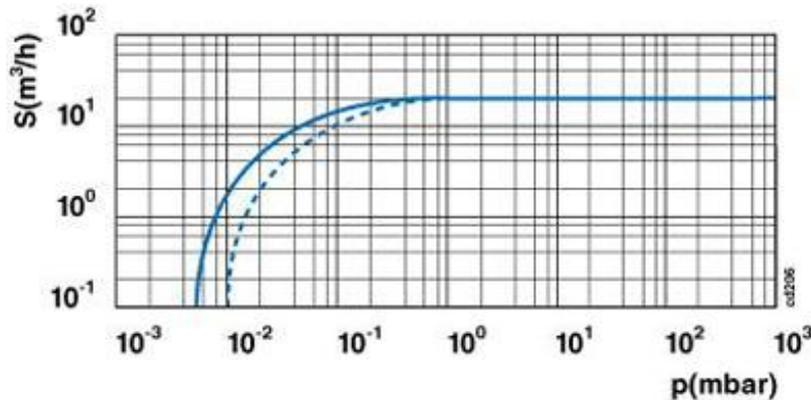
- ✓ Le débit-volume $q_v = f(P, \text{gaz})$
- ✓ La pression limite
- ✓ La pression d'amorçage
- ✓ Le taux de compression
pompes à transfert de flux
 $k = P_{\text{ref}} / P_{\text{asp}} = f(P, \text{gaz})$
- ✓ Critères spécifiques au process
 - peu contaminante (technologie sèche)
 - pompage sélectif 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 $Q_{dég. Huile}$ (T !!)



-fiable, faible coût



- présence d'huile



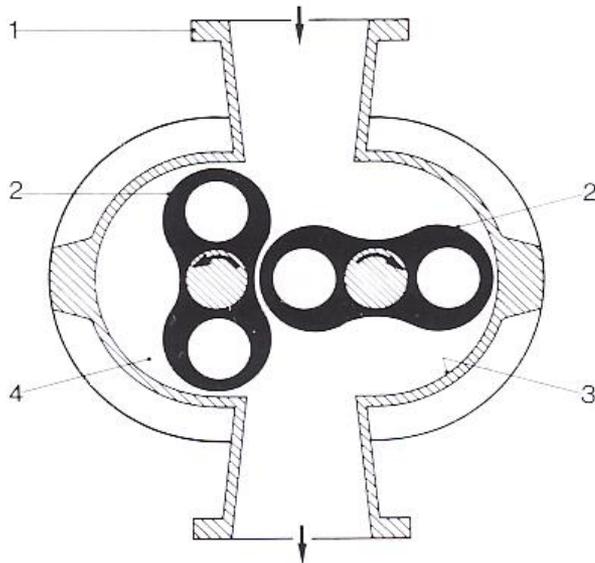
évolution vers des pompes 'sèches'

3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

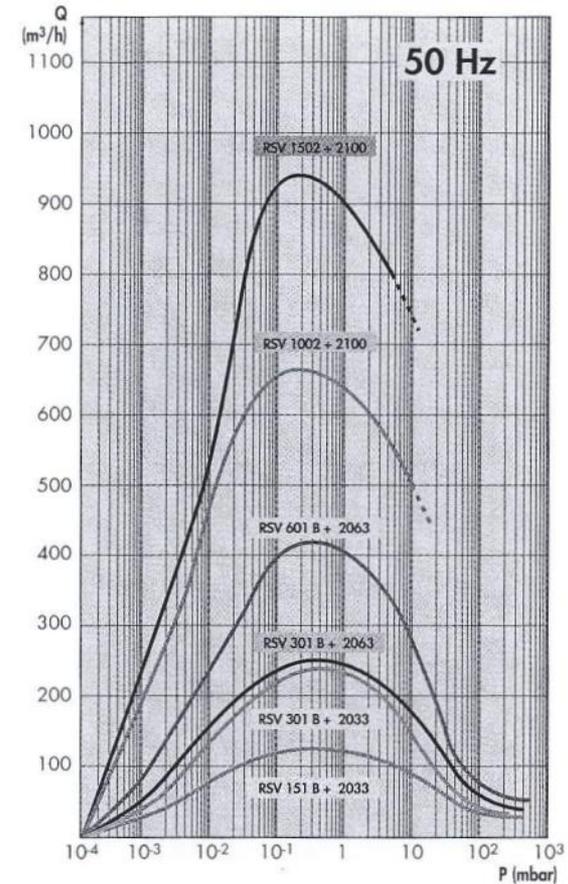
Pompe Roots

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

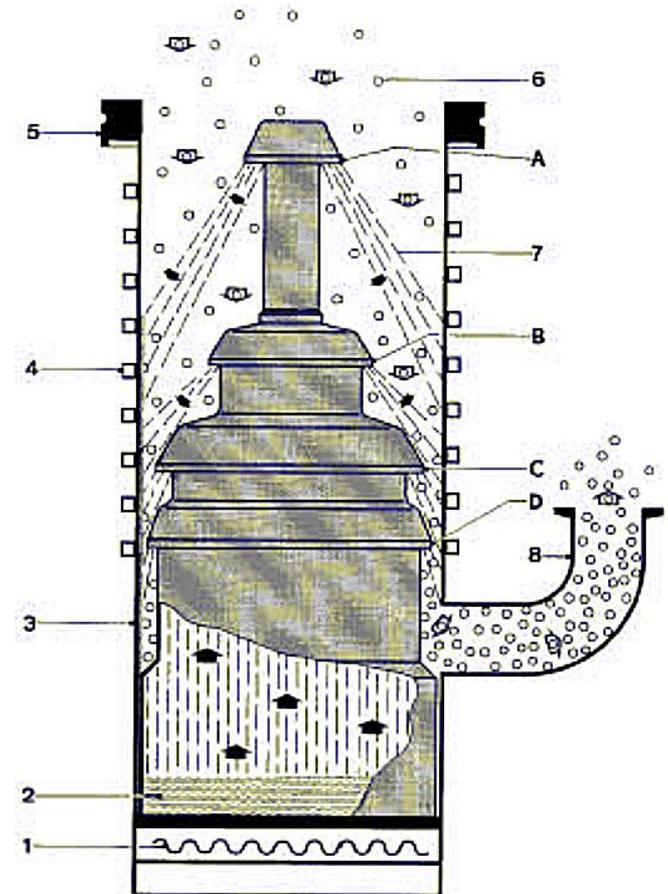
Jet supersonique de molécules lourdes

- 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

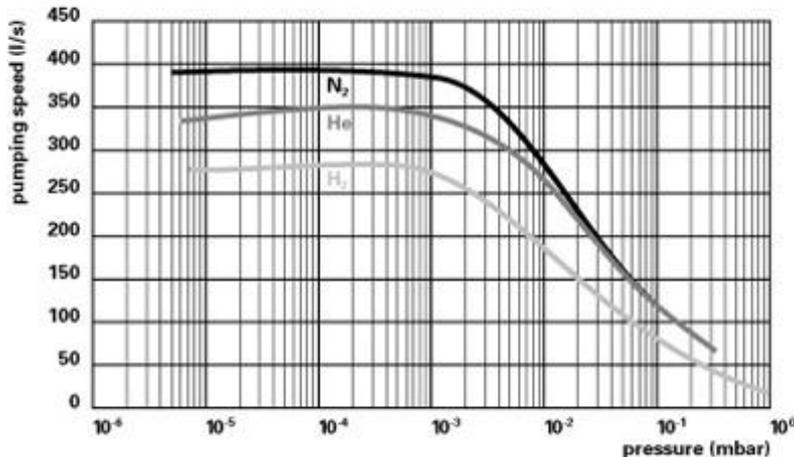
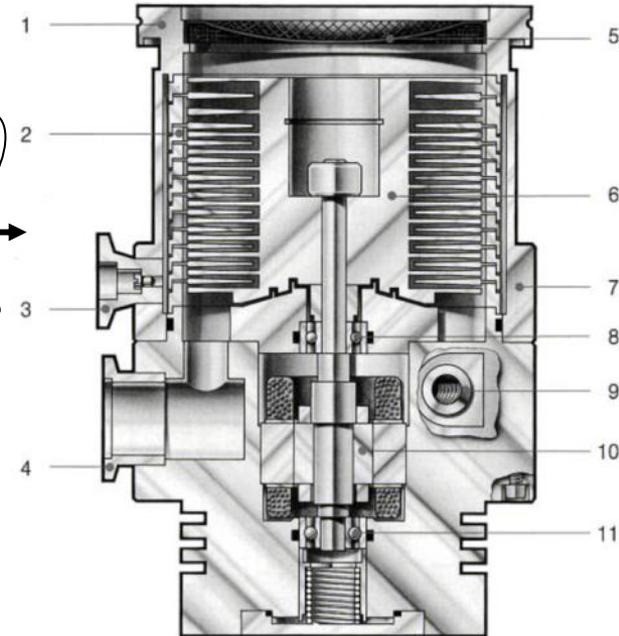
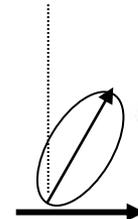
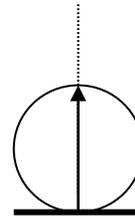
Pompes turbomoléculaires

Pompes cinétiques à parois mobiles

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

➢ K dépend de \sqrt{M} de v_{rotor}

➢ Couplage à une pompe primaire

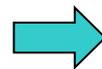
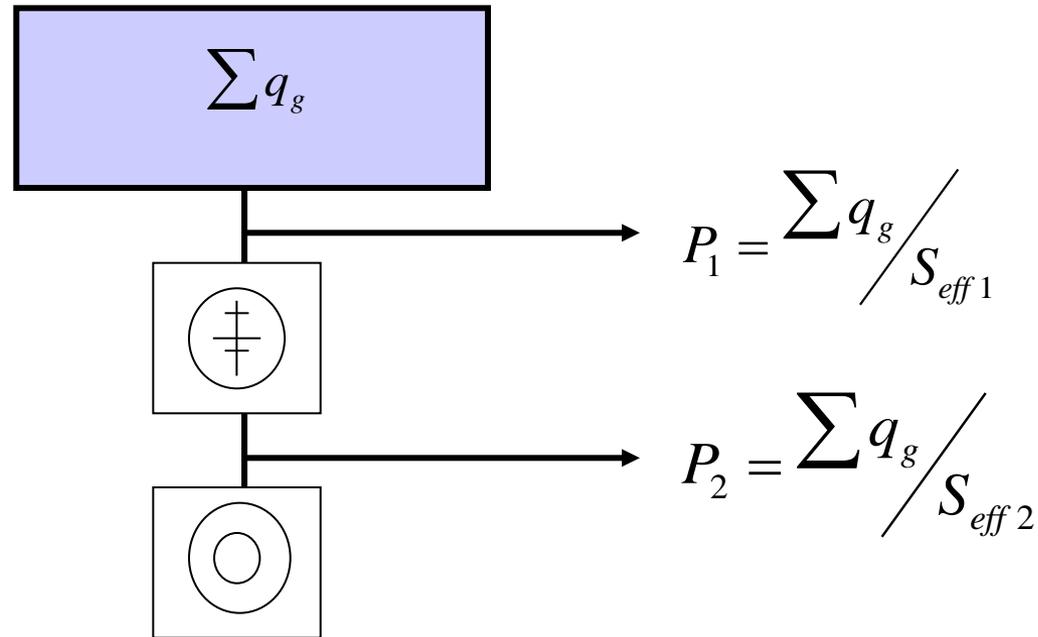


- pompage propre (magnétique)
- pompage à transfert de flux
- évolution vers des pompes moins sélectives (H_2) et a taux de compression plus élevés

3/ Les moyens de pompage : les pompes à transfert

Couplage des pompes à transfert de flux (secondaires / primaires)

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

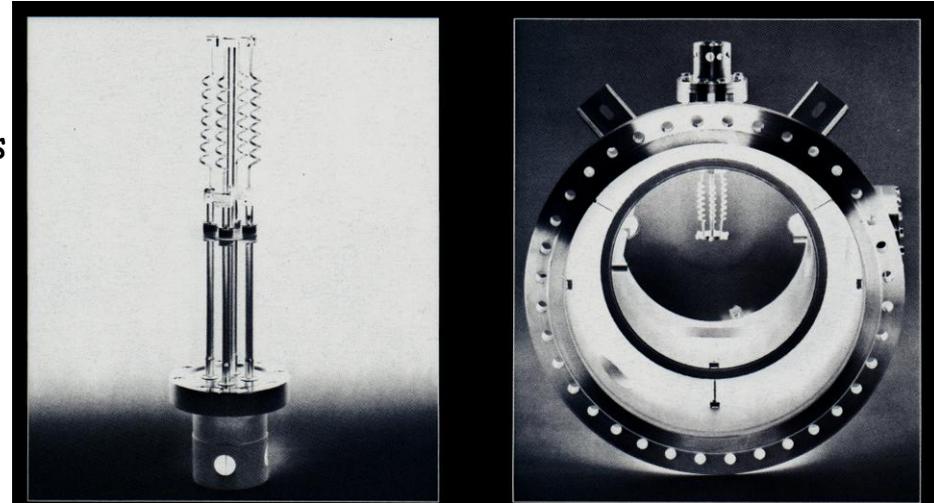
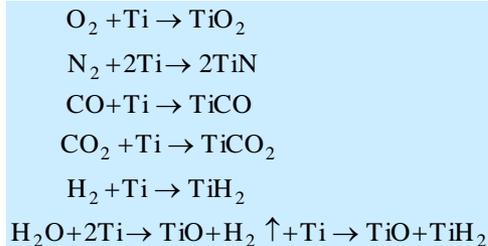


importance du couplage des pompes
(process, obtention de l' UHV)

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- α_m		Max. Speed ^a (liters/sec-cm ²)		Max. Capacity of Film- $\times 10^{15}$ (molecules/cm ²) ^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 ₂ O	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 variations due to film roughness

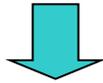
c) Wide variations due to bulk diffusion into film

(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)

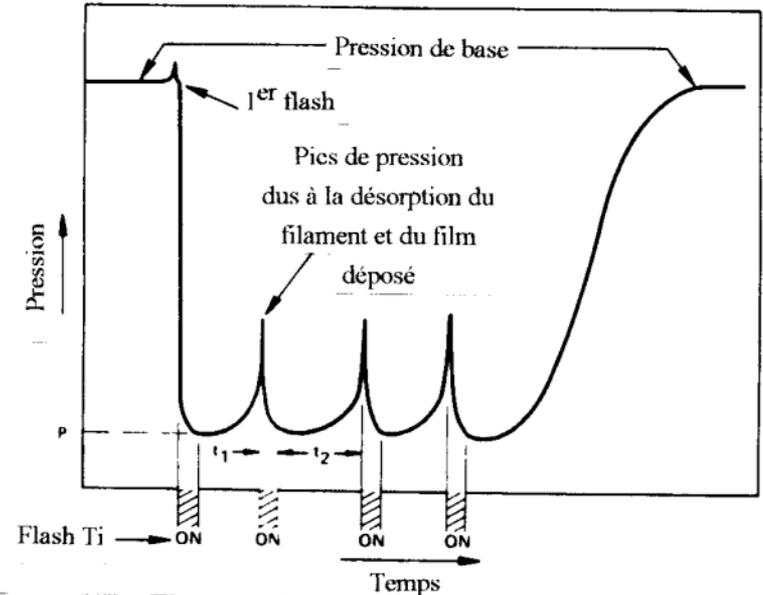
~1flash/h@10⁻⁸ hPa



pompe sèche
débits volumes importants
simple



très sélective
filament chauffé
remontée de pression au flash



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

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 CH₄ ne sont pas pompés



LEP vacuum chamber section

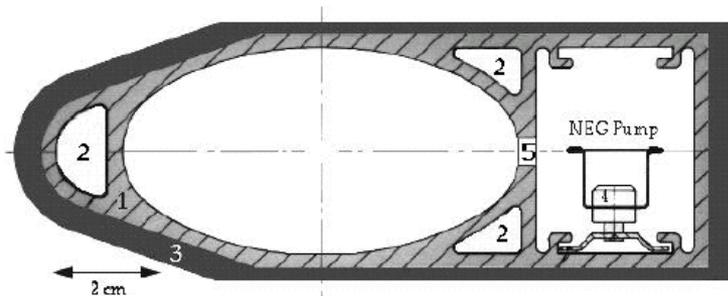


Fig. 2 : Vacuum chamber section made of (1) extruded aluminium profile with the elliptic beam channel, three cooling water ducts (2) and surrounded by 3 to 8 mm thick lead shield (3). The NEG pump (4) is housed in a separate pump channel connected to the beam channel by a row of longitudinal slots (5).



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



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

H₂ 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 ($\sim 1,5 \mu\text{m}$)
- ✓ dépôt par pulvérisation cathodique magnétron
- ✓ $T^\circ_{\text{act}} 200^\circ\text{C}$

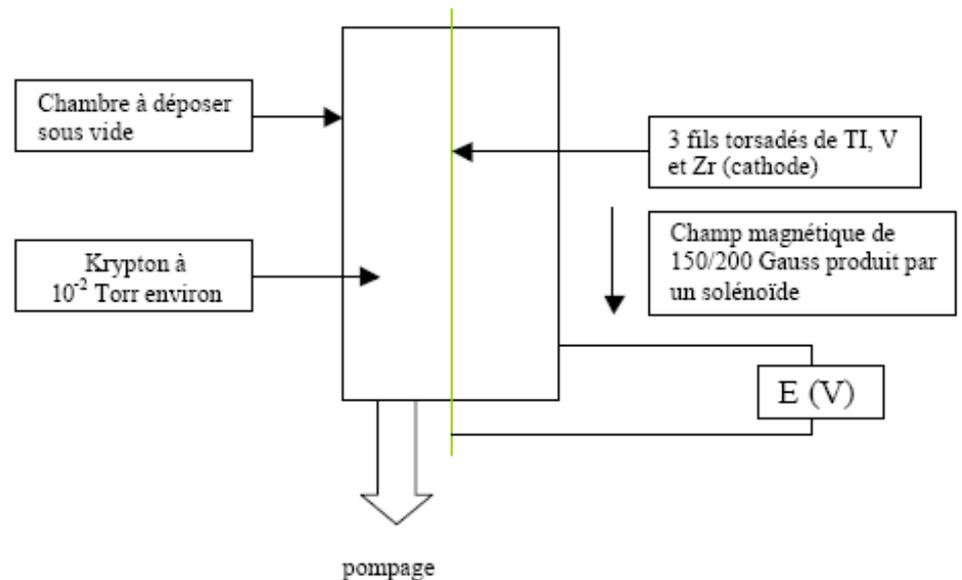


Schéma 1 : Dispositif de pulvérisation magnétron pour le dépôt d'une couche NEG

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°C -24h) :

q_v ($\text{l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$) : 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)

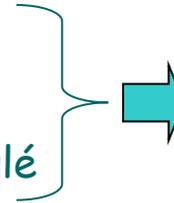
3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

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)

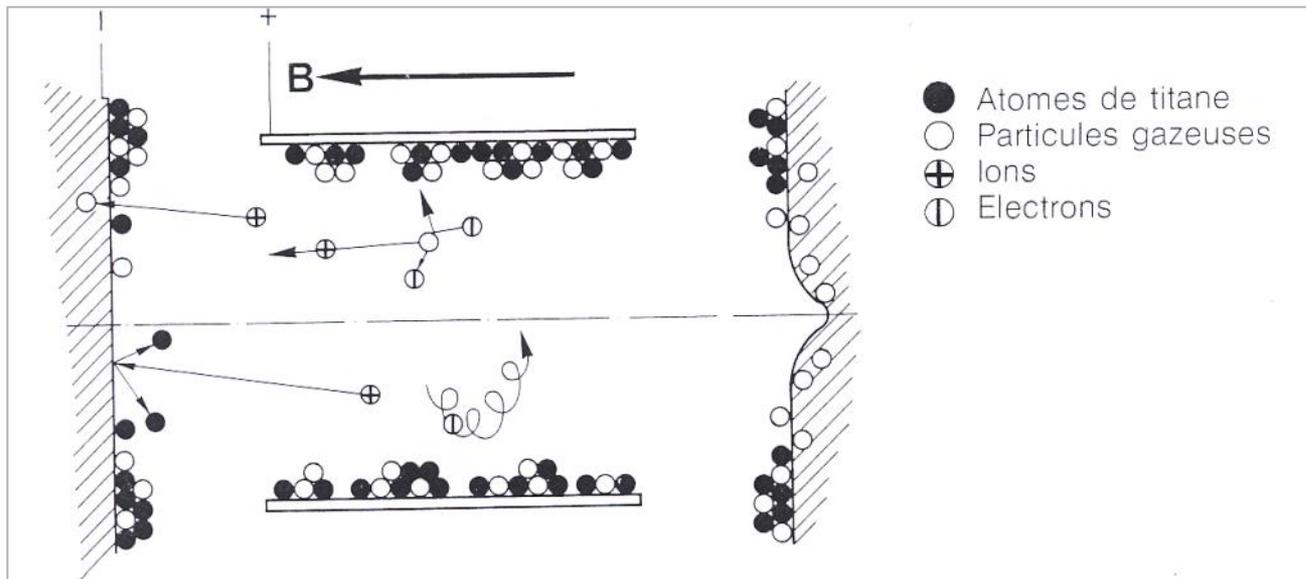
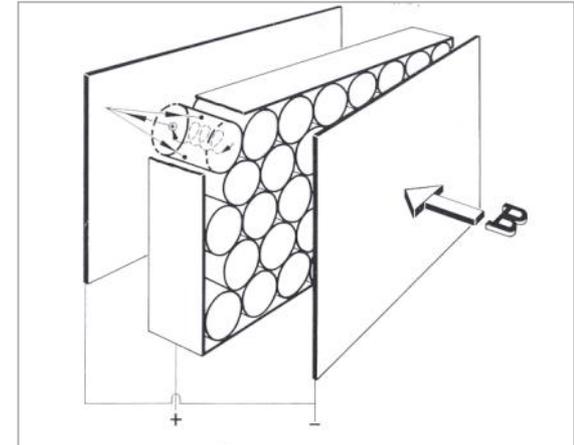
Utilisation UHV (synchrotrons , LHC)

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 \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 $P_s = f(T_f)$

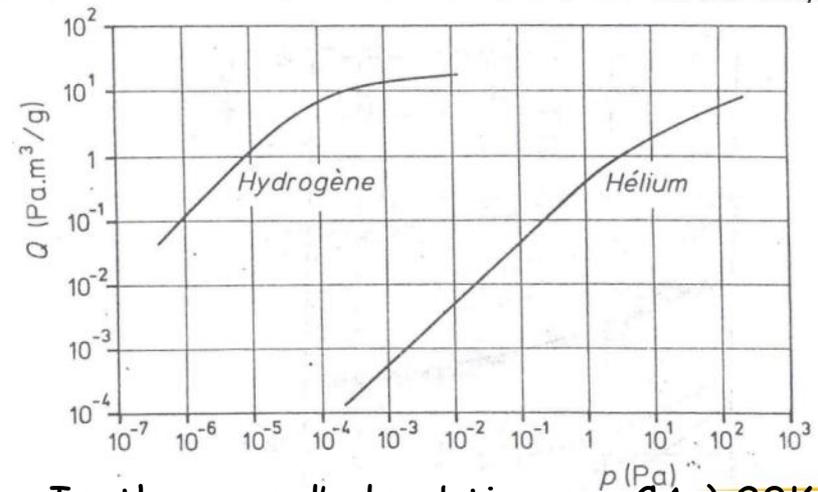
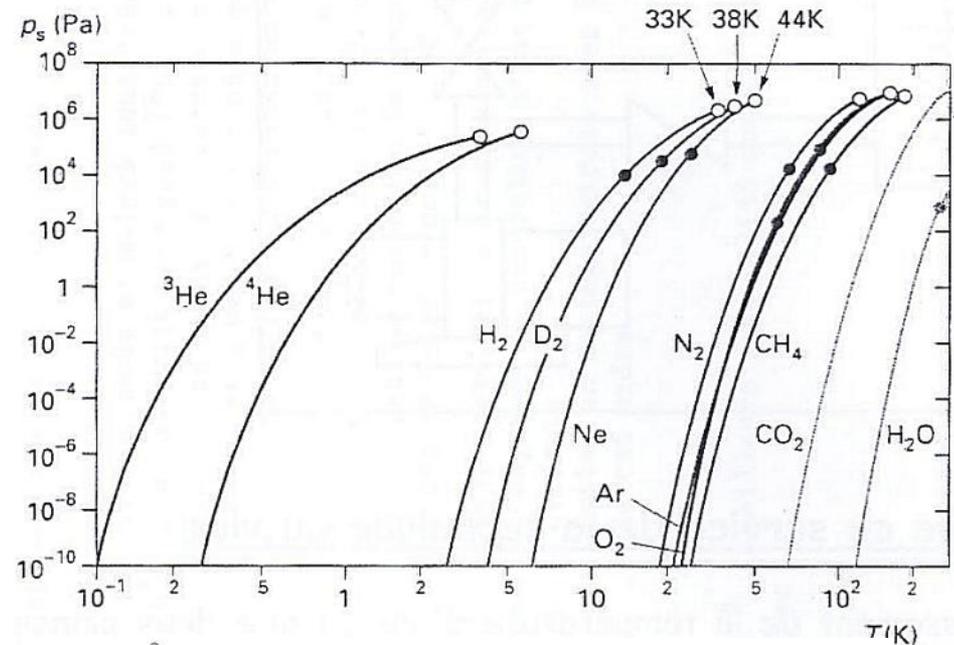
$$q_v(\text{max}) = 1,15 \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot S$$

'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 N_2
 148 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ pour H_2O

- cryosorption sur adsorbants solides refroidis (physisorption)
- cryotrapping



Isothermes d'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 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

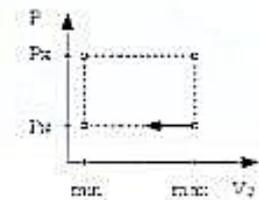
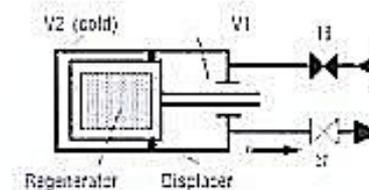
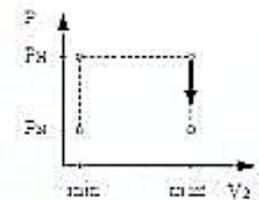
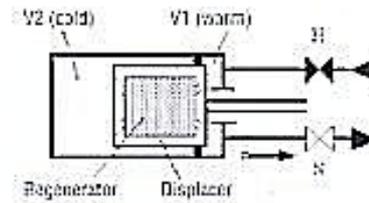
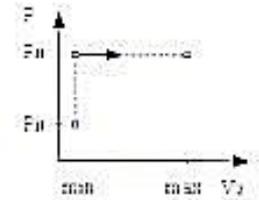
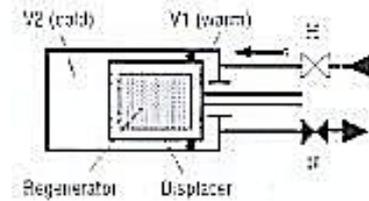
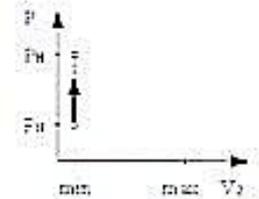
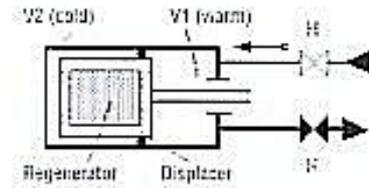
le cryopompage : sources froides

machines cryogéniques :
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)

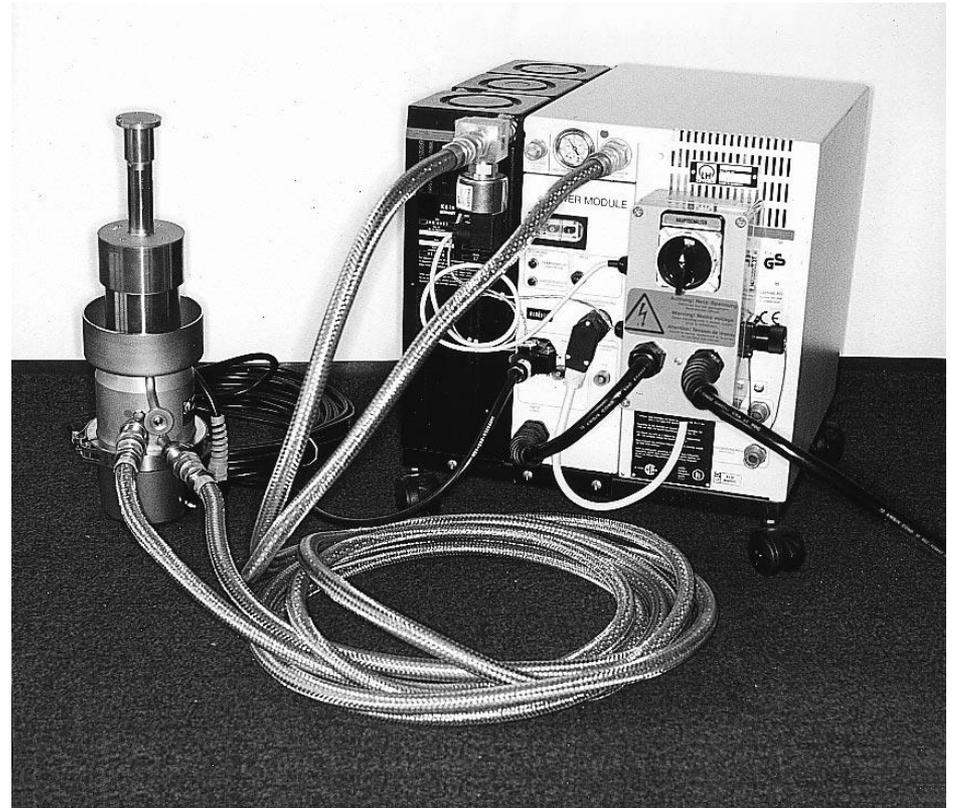


3/ Les moyens de pompage : les pompes à fixation

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°
H₂O, CO₂
- ✓ 15 K → N₂, O₂, Ar, CO
- CA sur 20 K → H₂

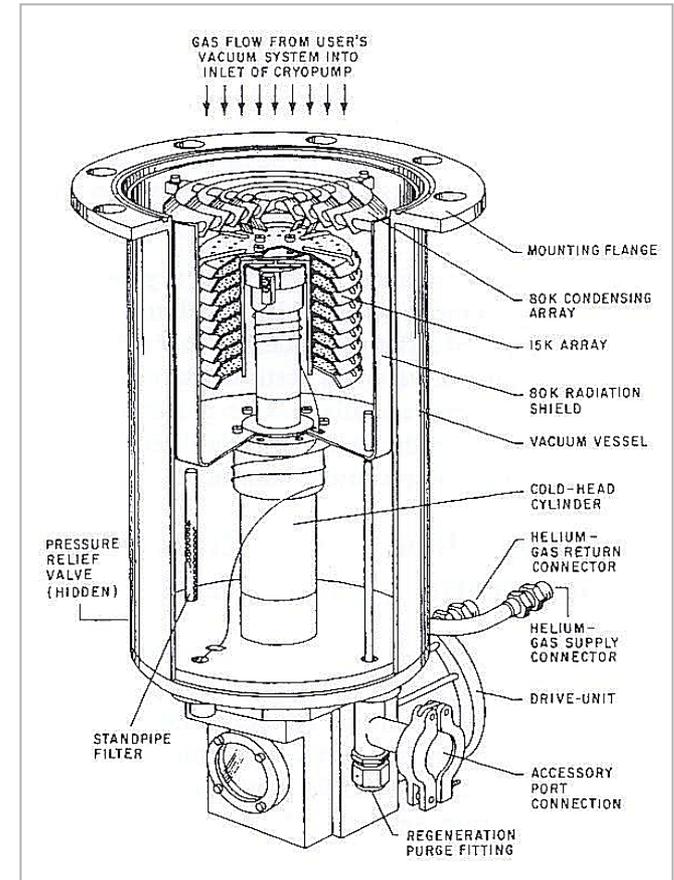
➤ $P_{\max}^* \sim 10^{-4}$ hPa $P_1 \rightarrow$ UHV



q_v élevé



régénération, vibrations, q_v He



Φ 200 mm

4 m³.s-1 (H₂O)

1,5 m³.s-1 (N₂)

2 m³.s-1 (H₂)

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

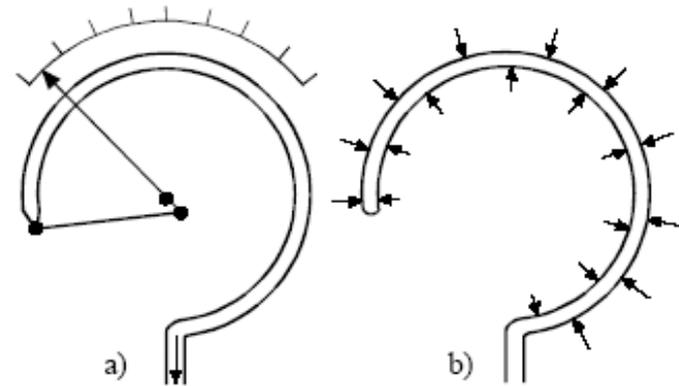
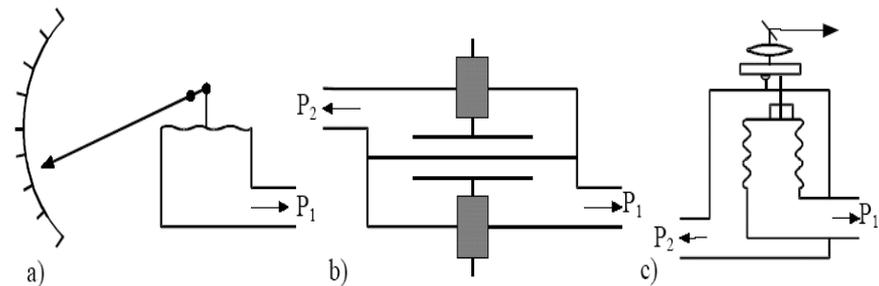


Fig. 2 Bourdon gauge, a) principle, b) distribution of forces

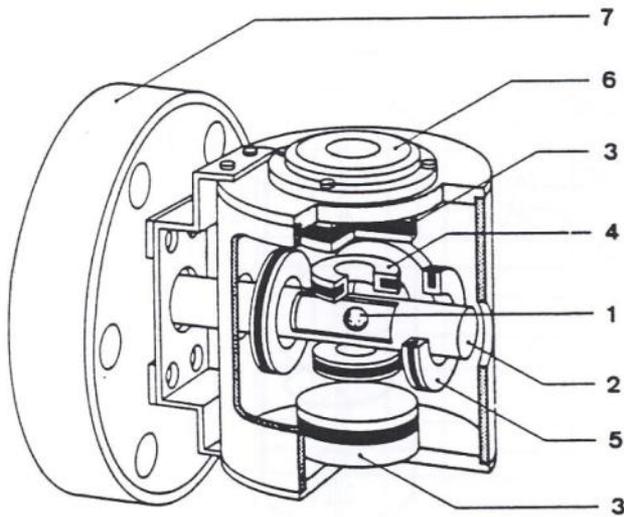
à membrane
piézorésistif (dépôt Si)
capacitif



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

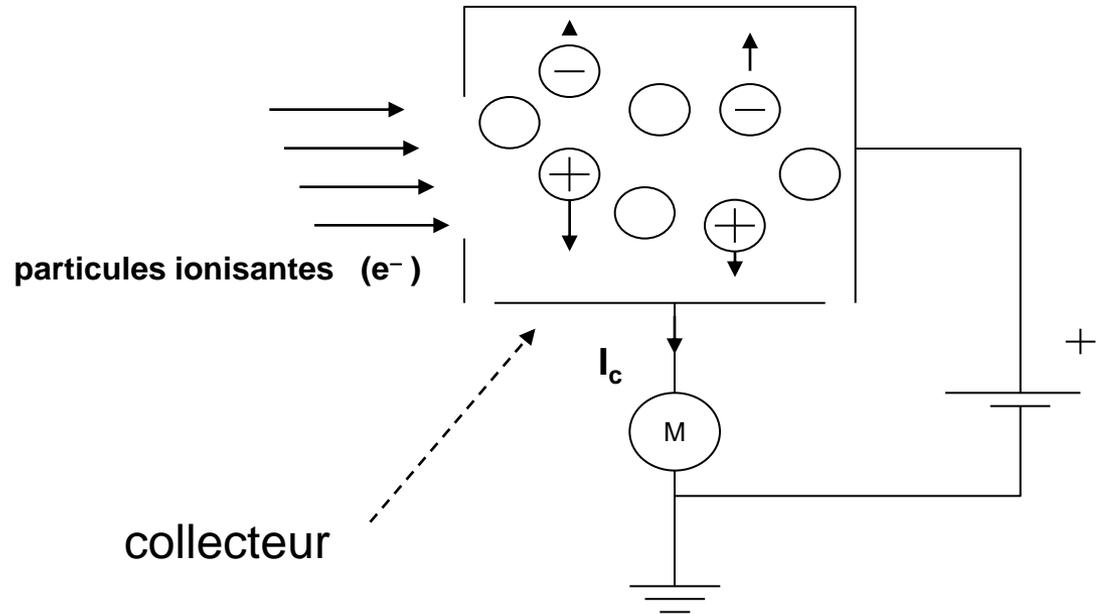
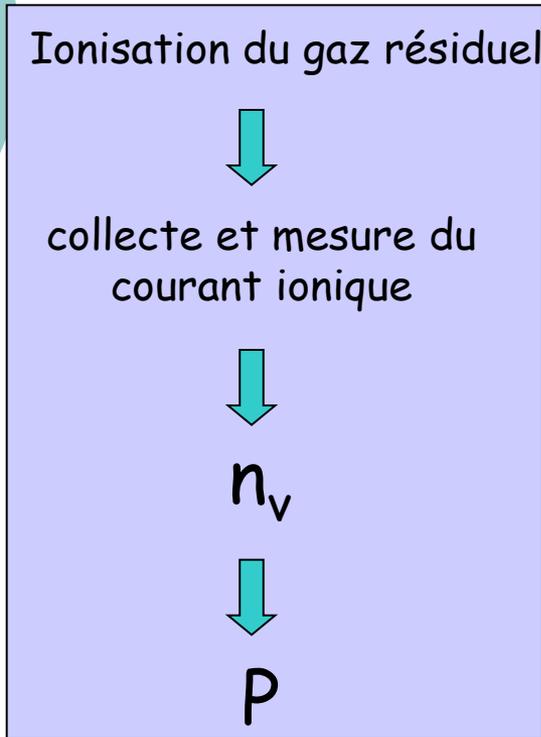
Mesure de la décélération d'une bille, maintenue en lévitation magnétique, par friction sur le gaz résiduel. gamme : $10^{-2} - 10^{-6}$ hPa



étalon secondaire

3/ La mesure du vide

- manomètres à ionisation

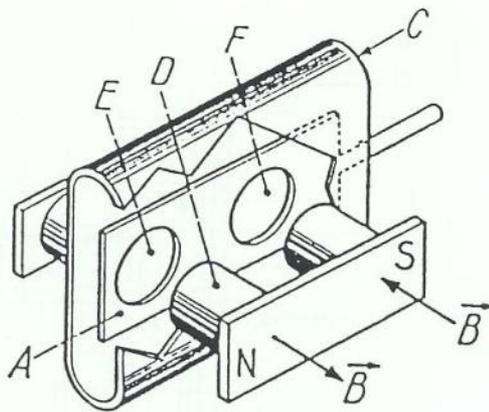


- $I_m > d_{enceinte} \quad 1 \text{ Pa} - 10^{-10} \text{ Pa}$
- pour une géométrie donnée, la sensibilité dépend de la nature du gaz
 $s = (I_c / I_{e^-}) \cdot 1/P \quad (10 - 40 \text{ mb}^{-1})$

3/ La mesure du vide

- manomètre de Penning (cathode froide)

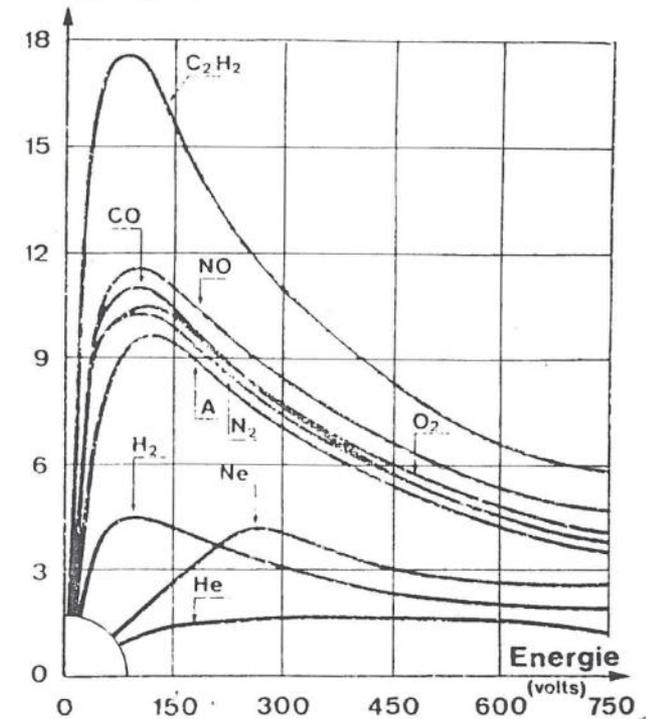
Ionisation du gaz par les électrons libres accélérés sous HT



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

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

Probabilité
d'ionisation



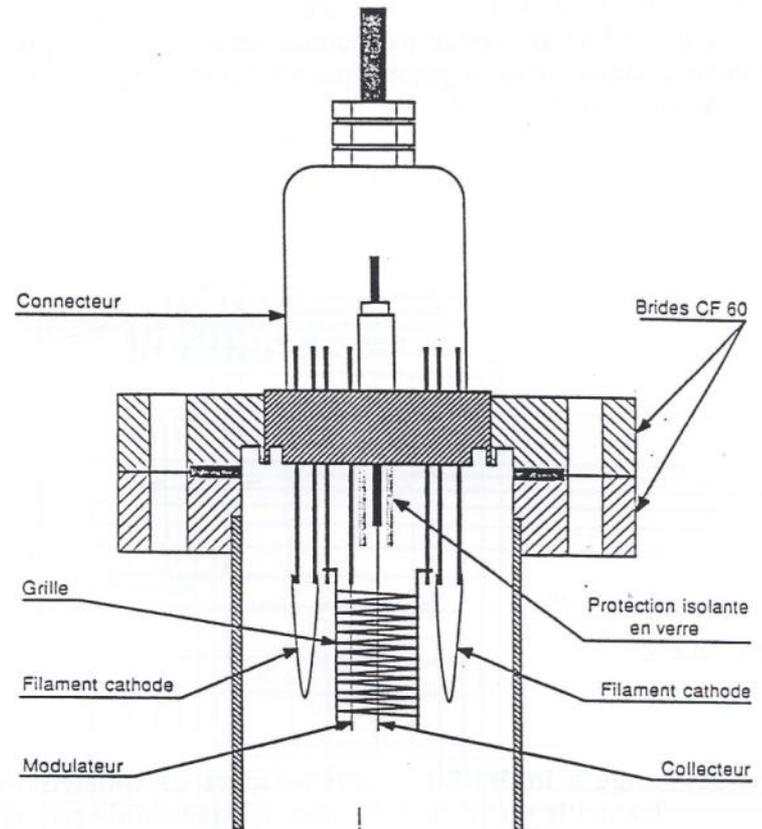
3/ La mesure du vide

- 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



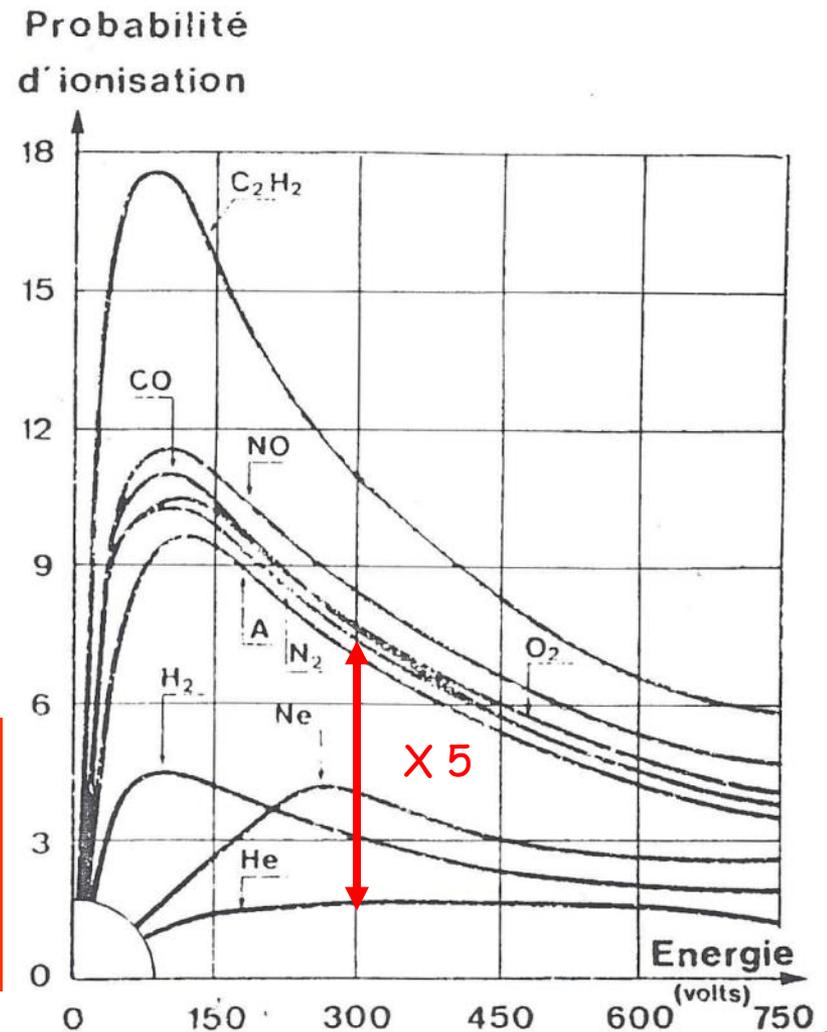
3/ La mesure du vide

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

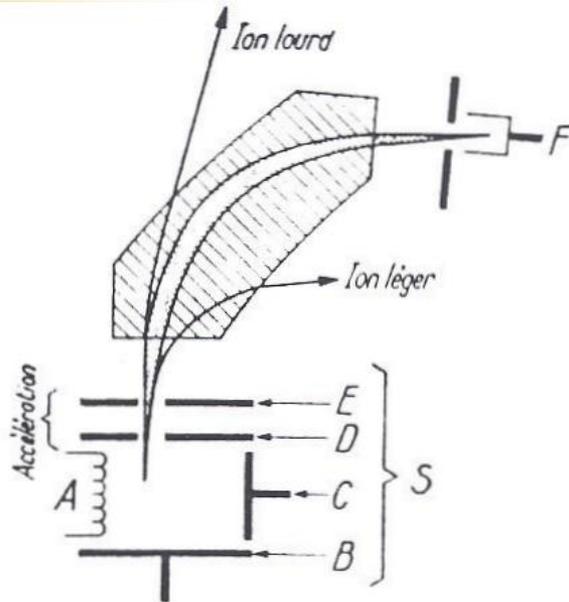
Principe des analyseurs de gaz

- 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

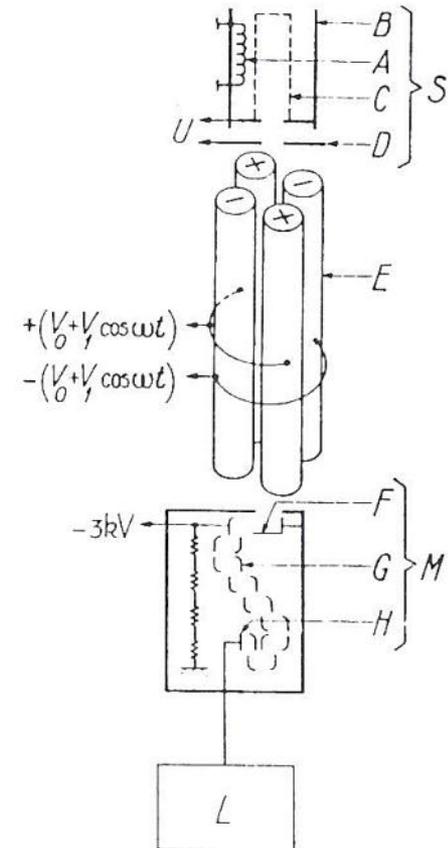
séparation magnétique



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

Détection de fuite (traceur He)

séparation quadripolaire



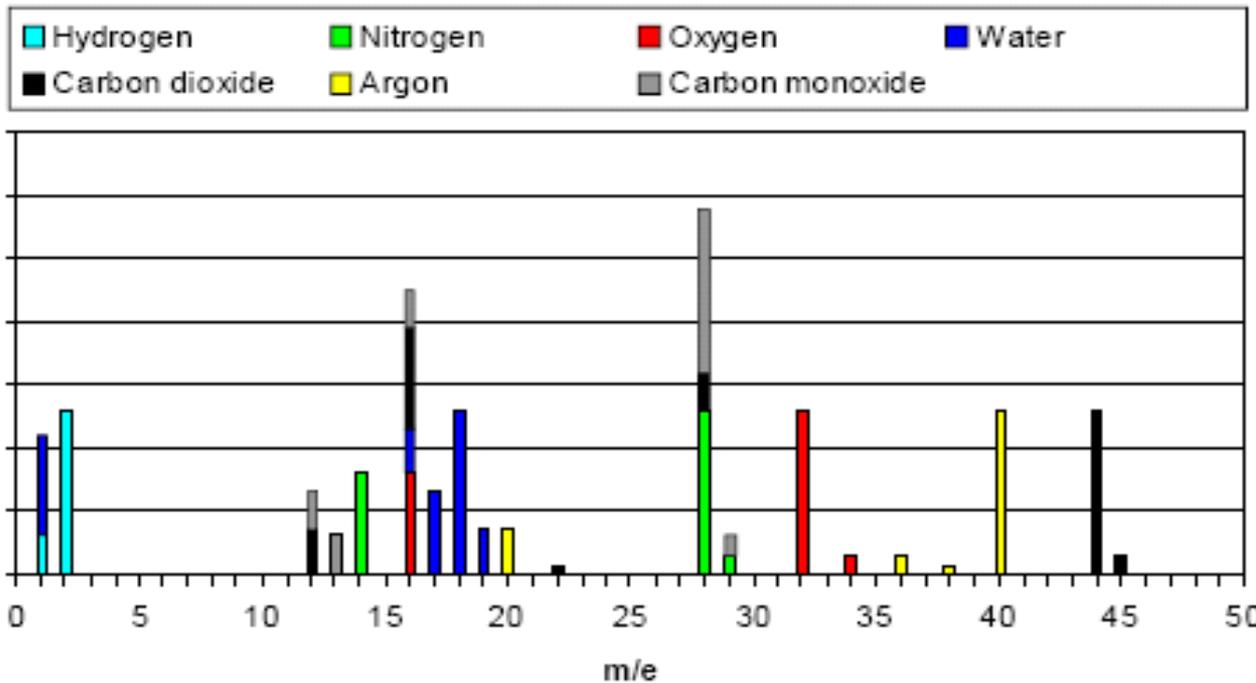
3/ La mesure du vide - analyse des pressions partielles

Interprétation des spectres

Pour un même corps :

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

→ analyse délicate



Pic 100 %
N2 et CO même 100%

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

Ar : 40 Ar+ / 20 Ar²⁺
/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	$1,4 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{mb}^{-1}$

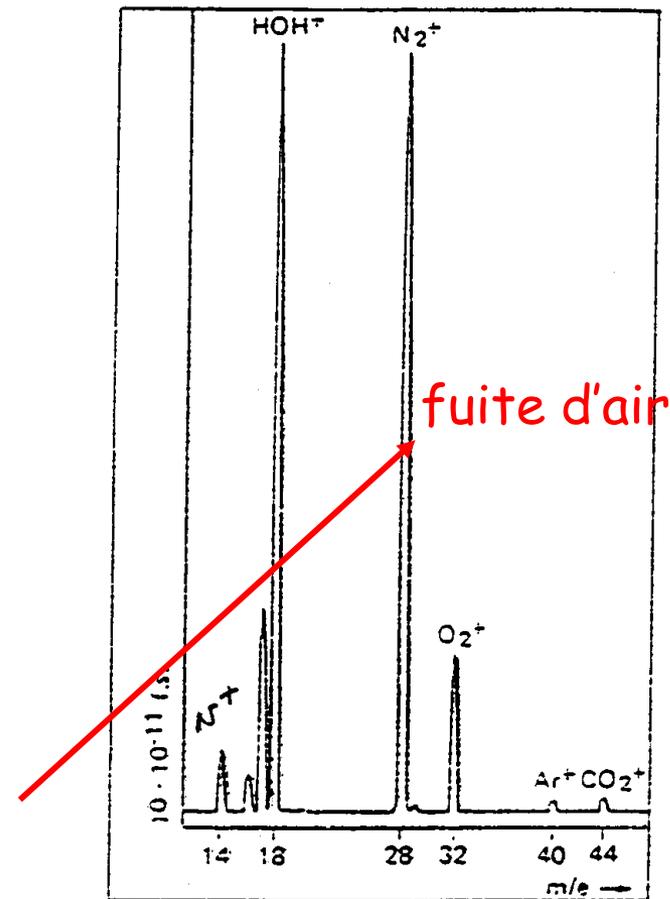
$$P_{18} : 5 \cdot 10^{-7} \text{ mb}$$

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

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

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

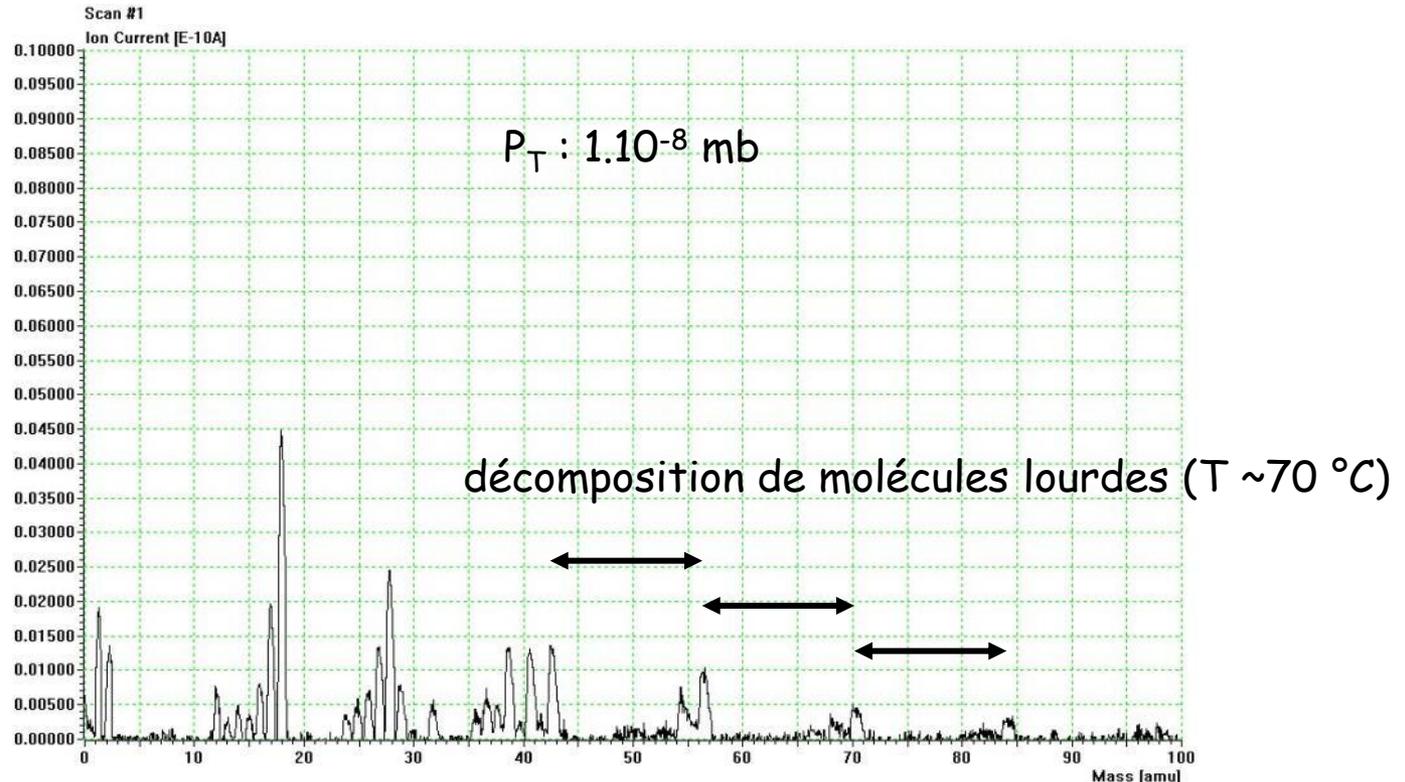
$$P_{O_2} / P_{N_2} + P_{O_2} = 21\%$$



jus

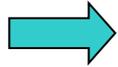
3/ La mesure du vide - analyse des pressions partielles

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

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

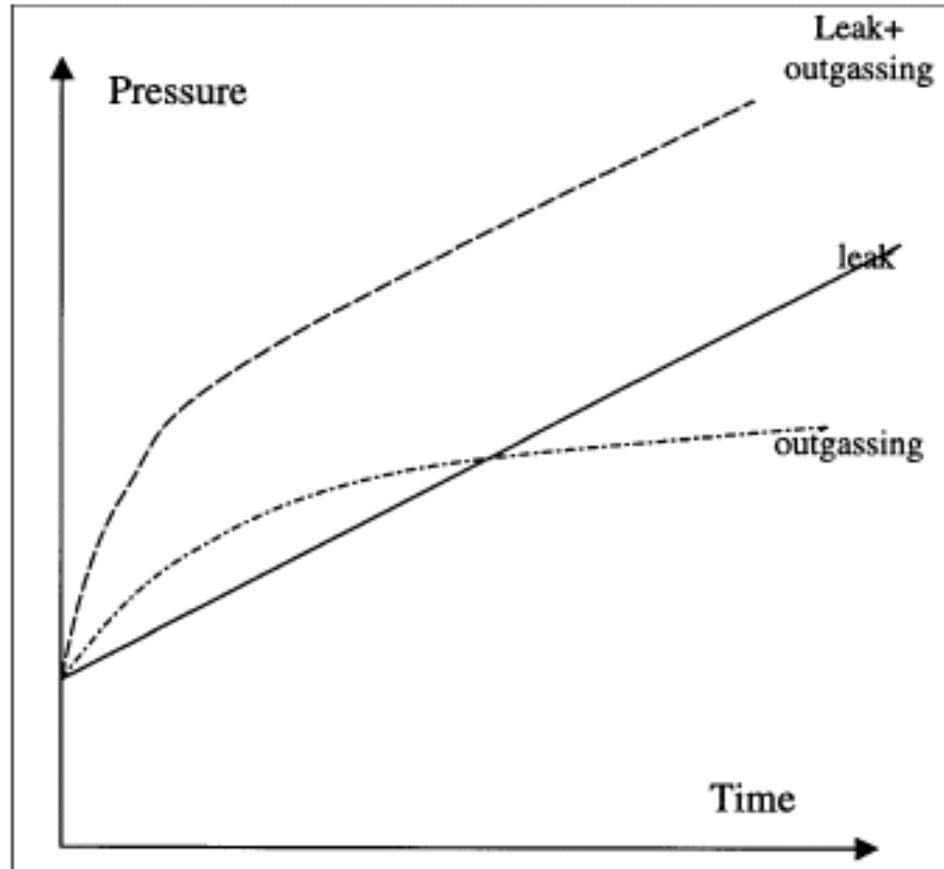
Unités :

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

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

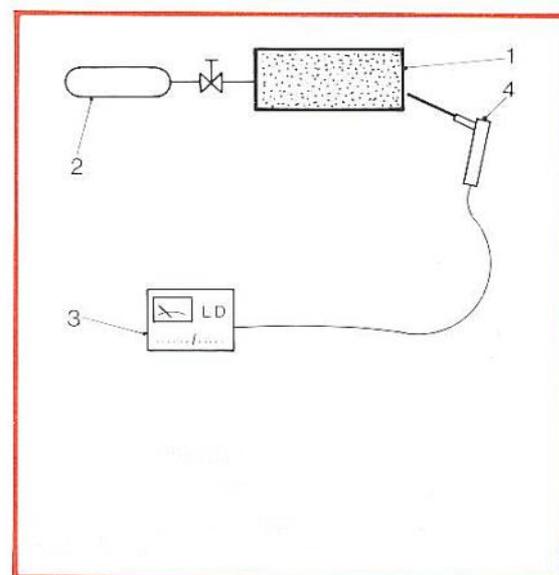
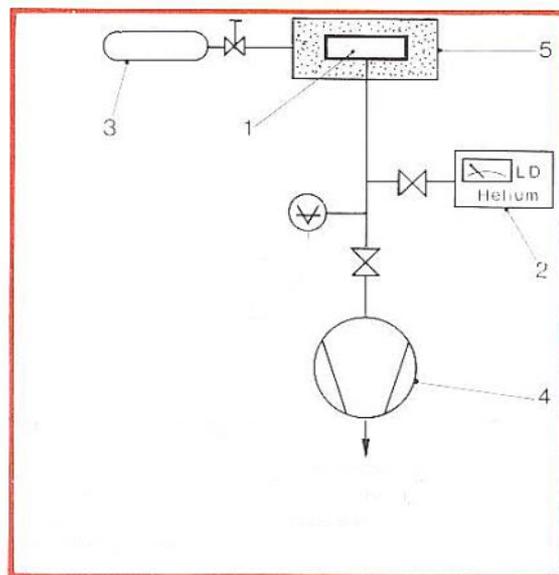
Contrôle par reniflage

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

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

! *temps de réponse*

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

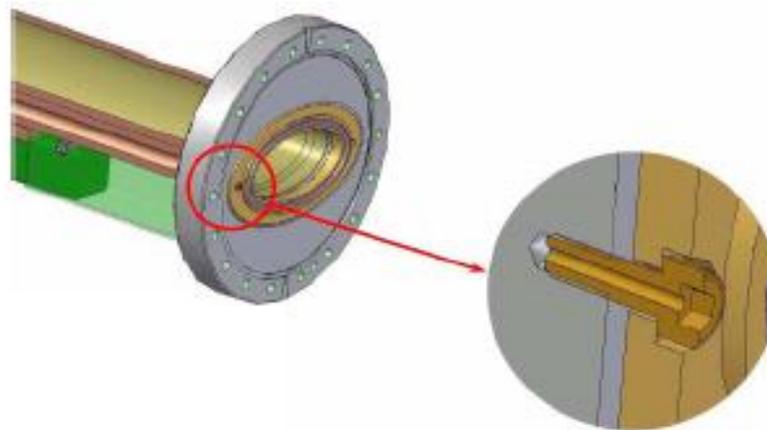
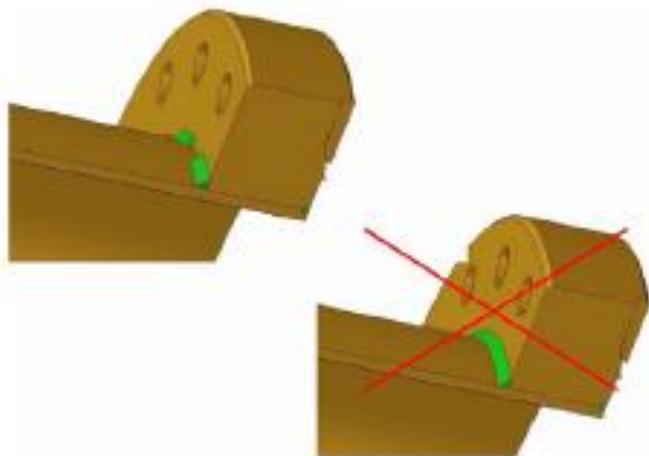


3/ La mesure du vide : l'étanchéité

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



Spécifications pour la conception des ensembles mécaniques sous vide

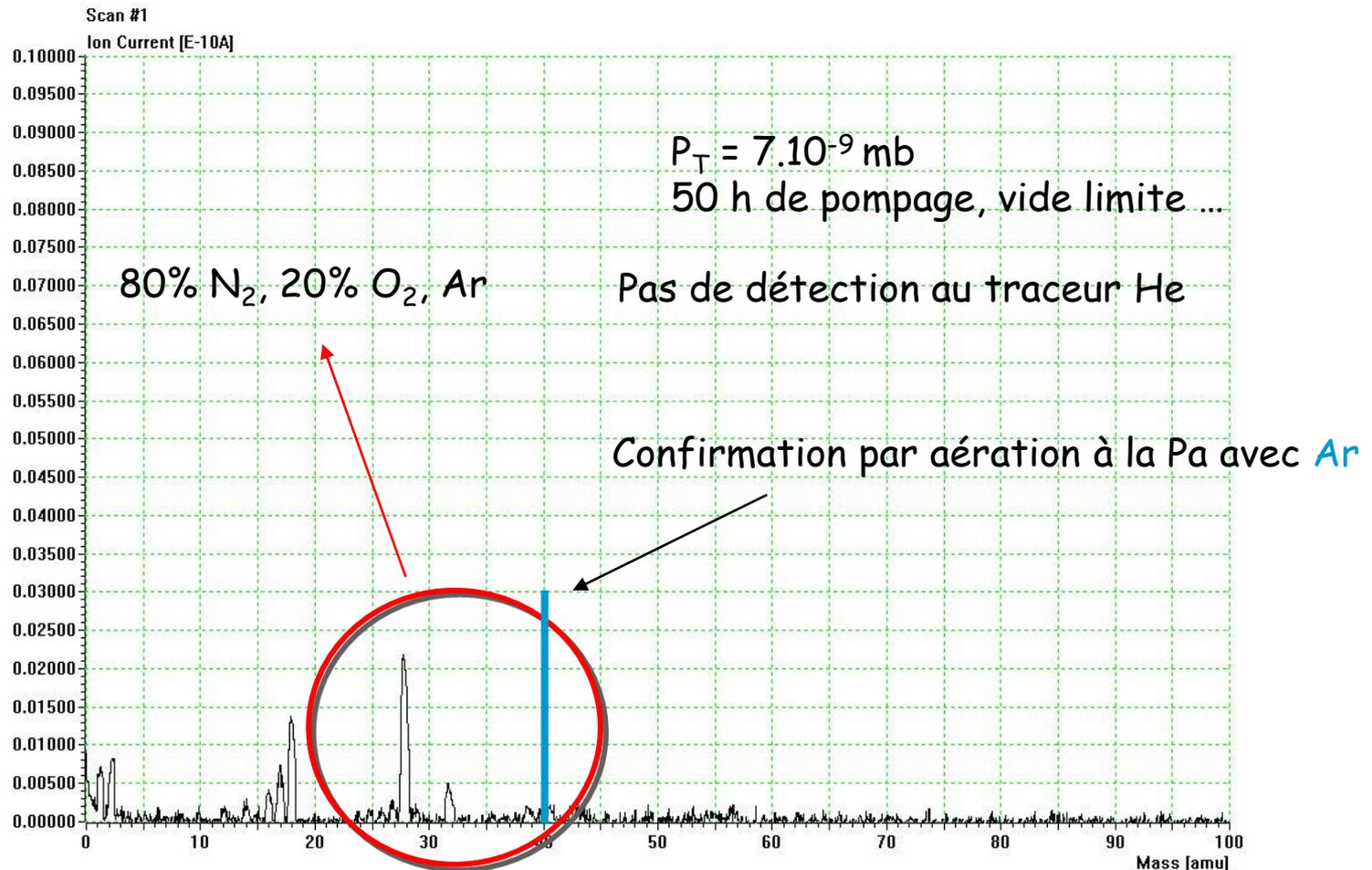


nb de molécules dans 1 mm^3 à la Pa ?

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

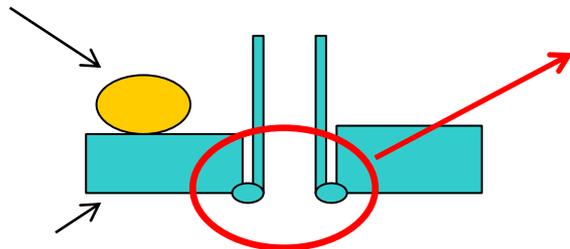
3/ technologie du vide : conception des systèmes

phase de construction :

Importance du suivi des spécifications et procédures liés à la réalisation des ensembles mécaniques

Cas de la corrosion liée à un défaut de nettoyage / protection de la chambre vis-à-vis du flux de brasure

circuit brasé



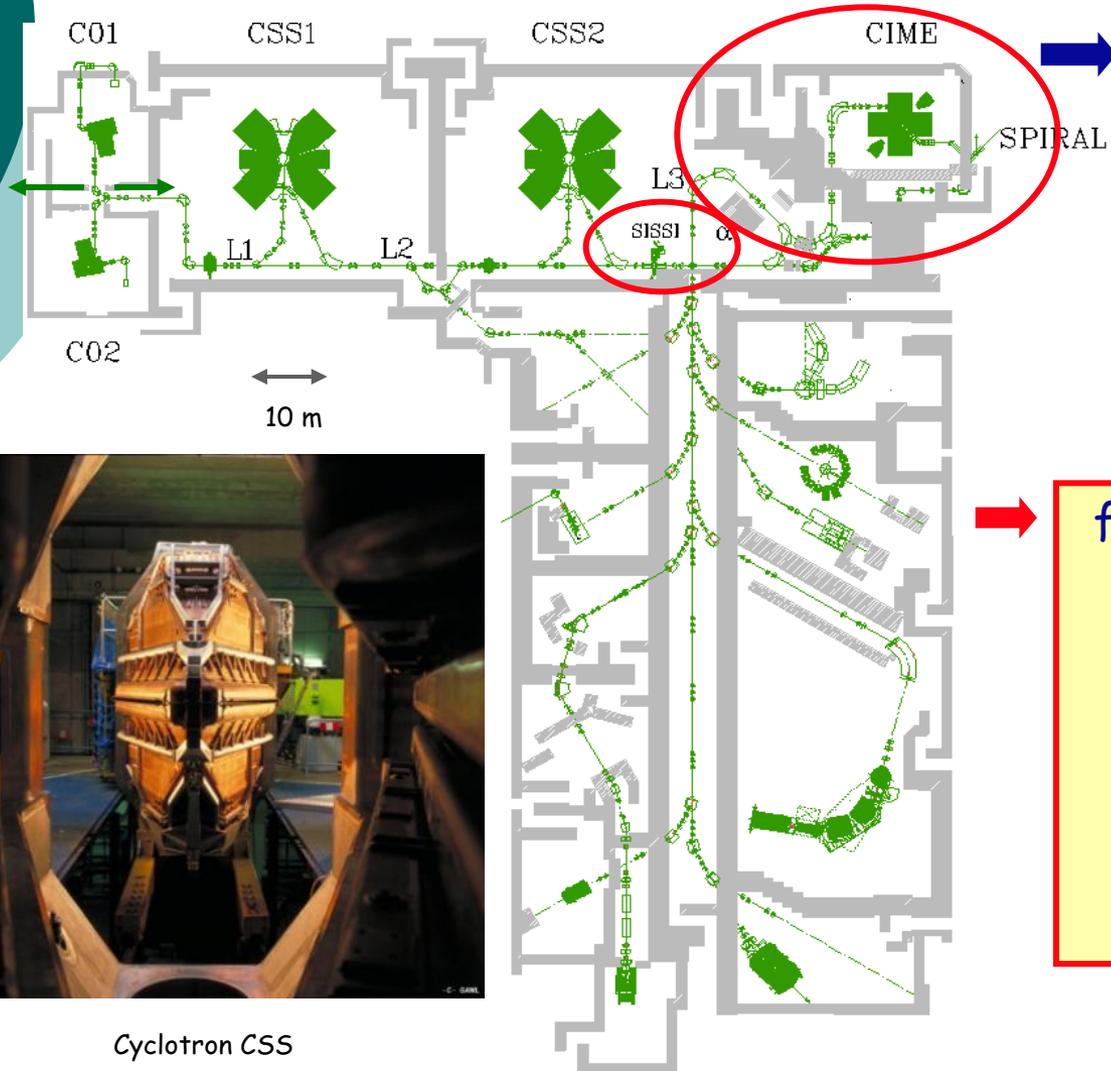
chambre inox

vide



Corrosion de la chambre inox coté vide

4/ Le système de vide du Ganil



faisceaux de noyaux stables
Carbone → Uranium
0,5 - 95 MeV/u

faisceaux accélérés :
~ 35 diff. faisceaux/an

faisceaux de **noyaux exotiques**
(produits par frag.)
✓ SISSI (cible fine)
✓ Spiral 1 (cible épaisse)

$A < 80$

1,7 - 25 MeV/u



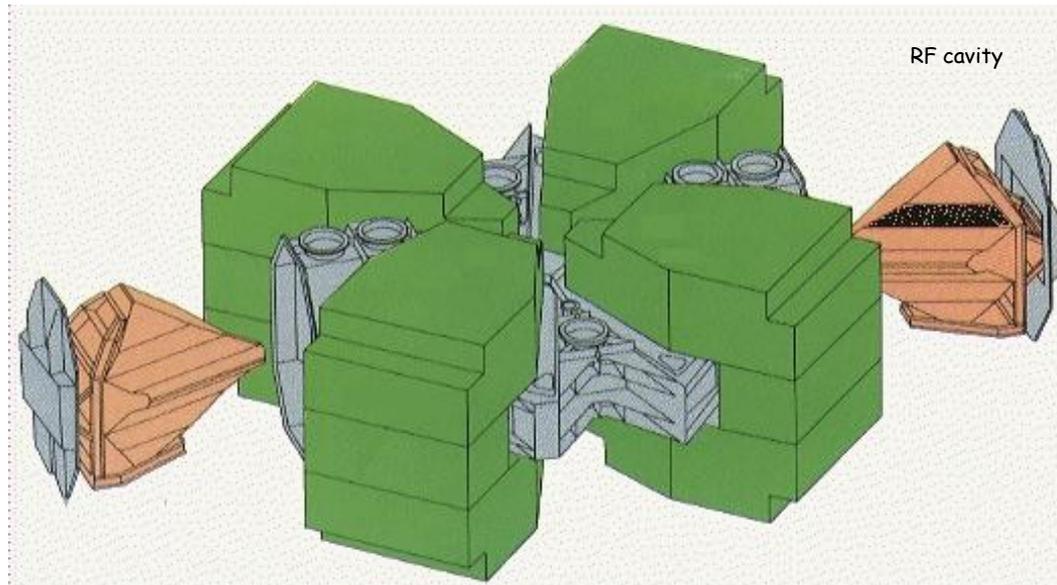
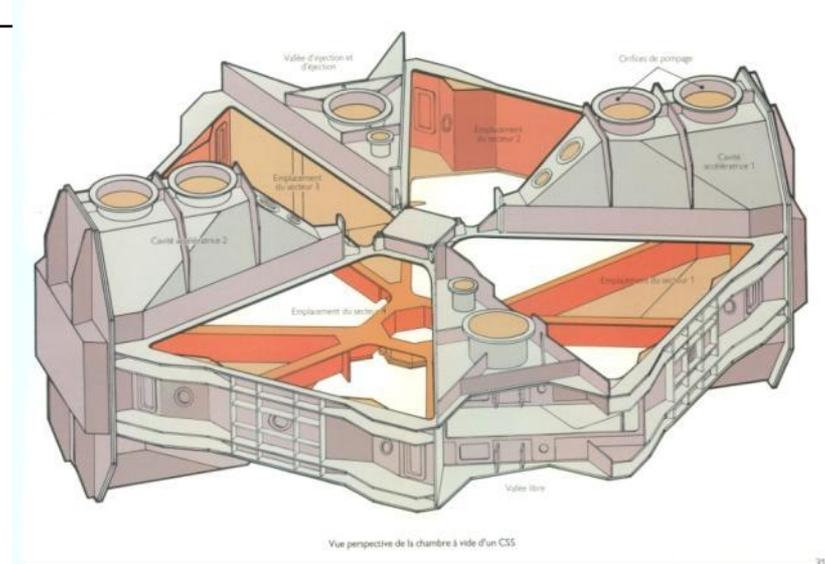
Cyclotron CSS

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)	20 m ³ .s-1 (N2)
	10 m ³ .s-1 (H2)
1 cryopompe (400 mm)	5 m ³ .s-1 (N2)
(montée avec vanne)	
4 turbopompes (400mm)	3,5 m ³ .s-1 (N2)
(Maglev montées avec vanne)	
Système de prévidage	2 x 2000 m ³ .h-1
(système commun aux 4 cyclotrons)	



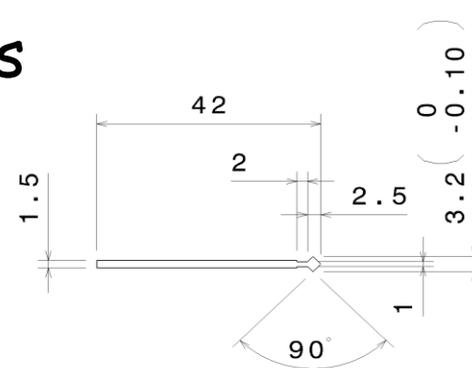
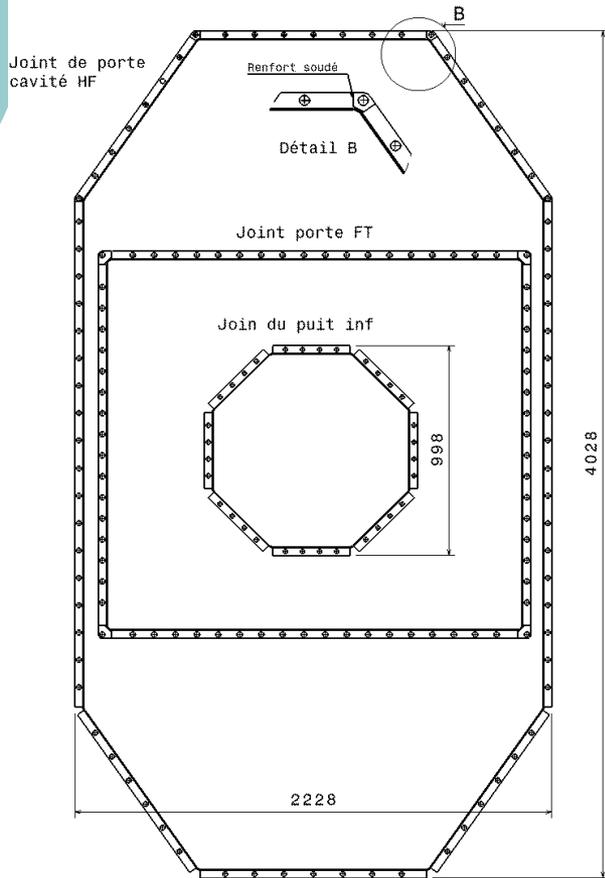
Cryopompe spécifique (800mm)

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

Pour optimiser le pompage de l' H₂ :
l'étage 20K est en vue direct de la
chambre $p_1 \sim 2 \cdot 10^{-8}$ hPa

4/ Le système de vide du Ganil : les CSS

Jointts métalliques spécifiques

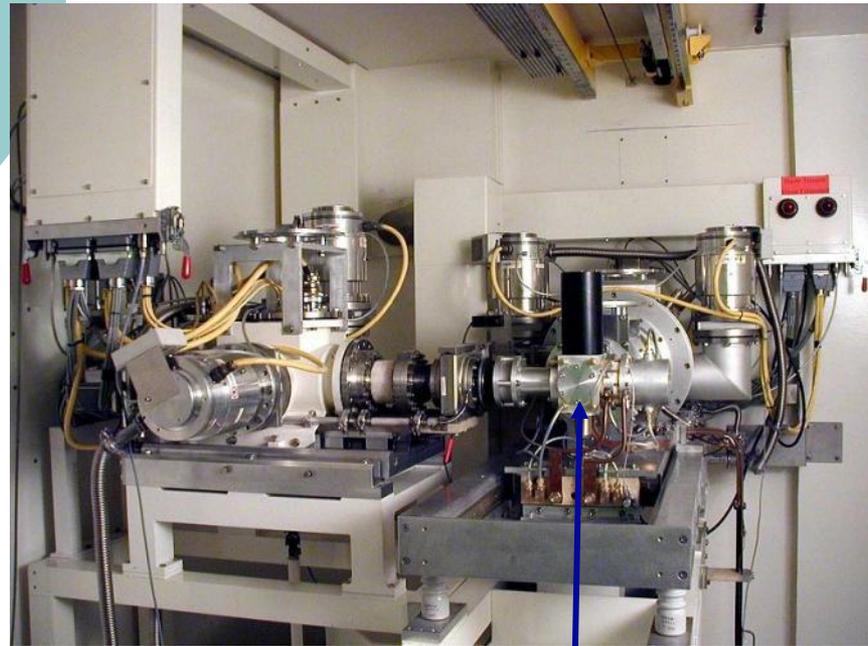


Section : 0.33 cm²
Poids : 0.171 kg/m
Matière : A5 recuit
Dureté : 23 < Hv_{20g} < 26



4/ Le système de vide du Ganil : Spiral

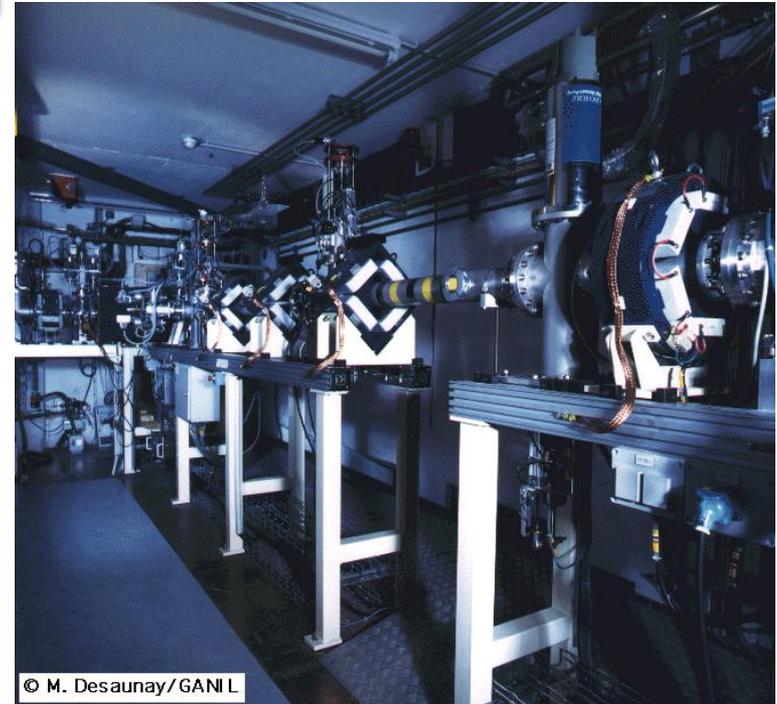
SPIRAL : Système de production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne



ensemble cible/source - Spiral 1

$\sim 8.10^{10}$ Bq dans la cible

ligne transport faisceau TBE



© M. Desaunay/GANIL

- téléopération (cible-source)
- gestion des gaz radioactifs
- contraintes de maintenance (maintenance sur site INB)

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

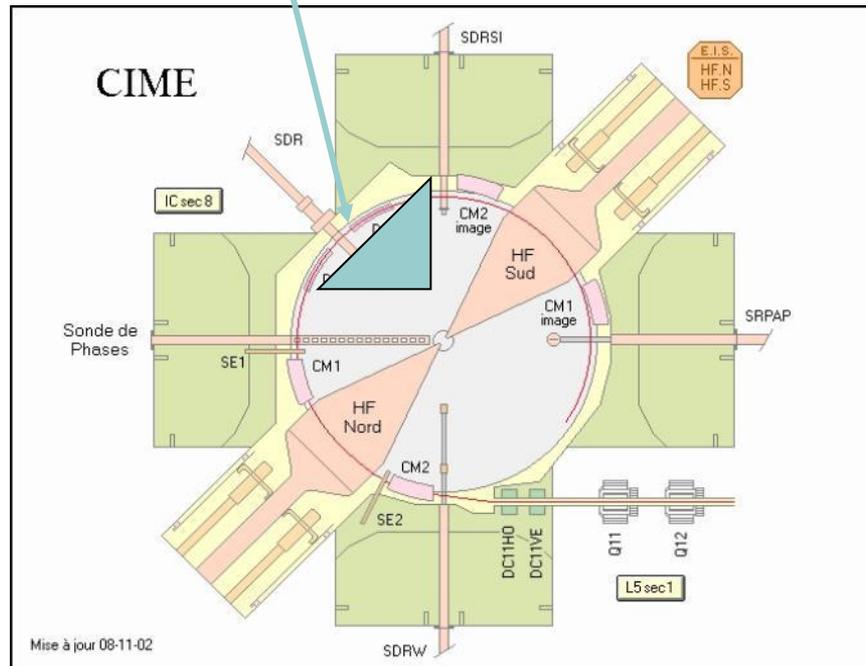
Cyclotron compact



Cryopanneaux intégrés
pour obtenir les
spécifications :

$30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} (\text{N}_2)$

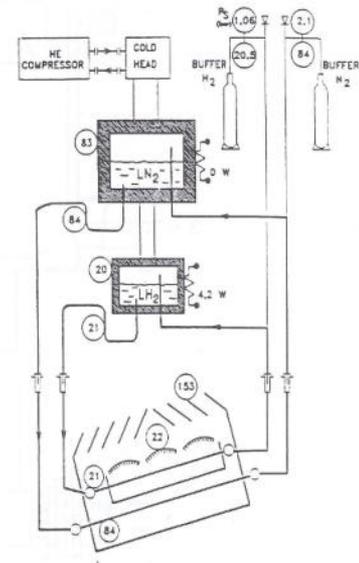
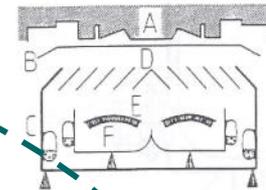
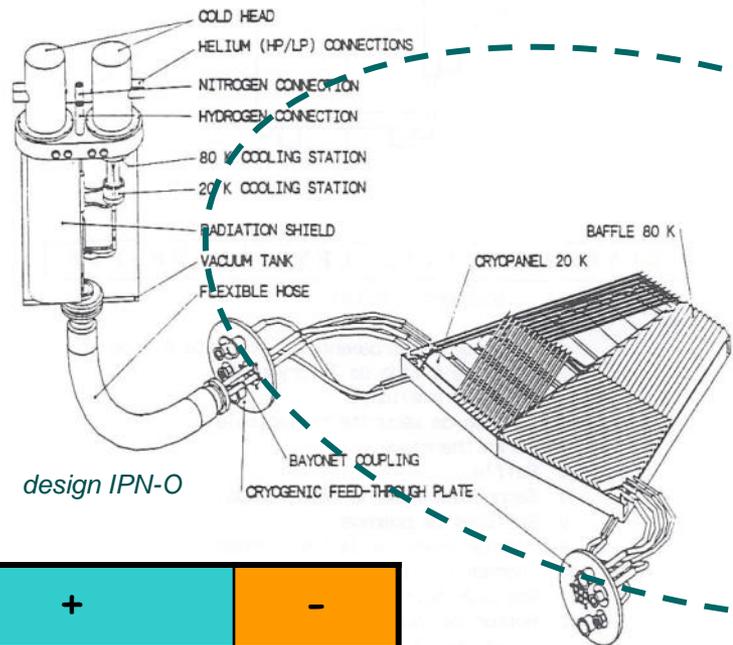
$40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} (\text{H}_2)$



- 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)

Cryopompage cyclotron CIME



+	-
S_{eff}	H_2
exploitation	
déport des systèmes	

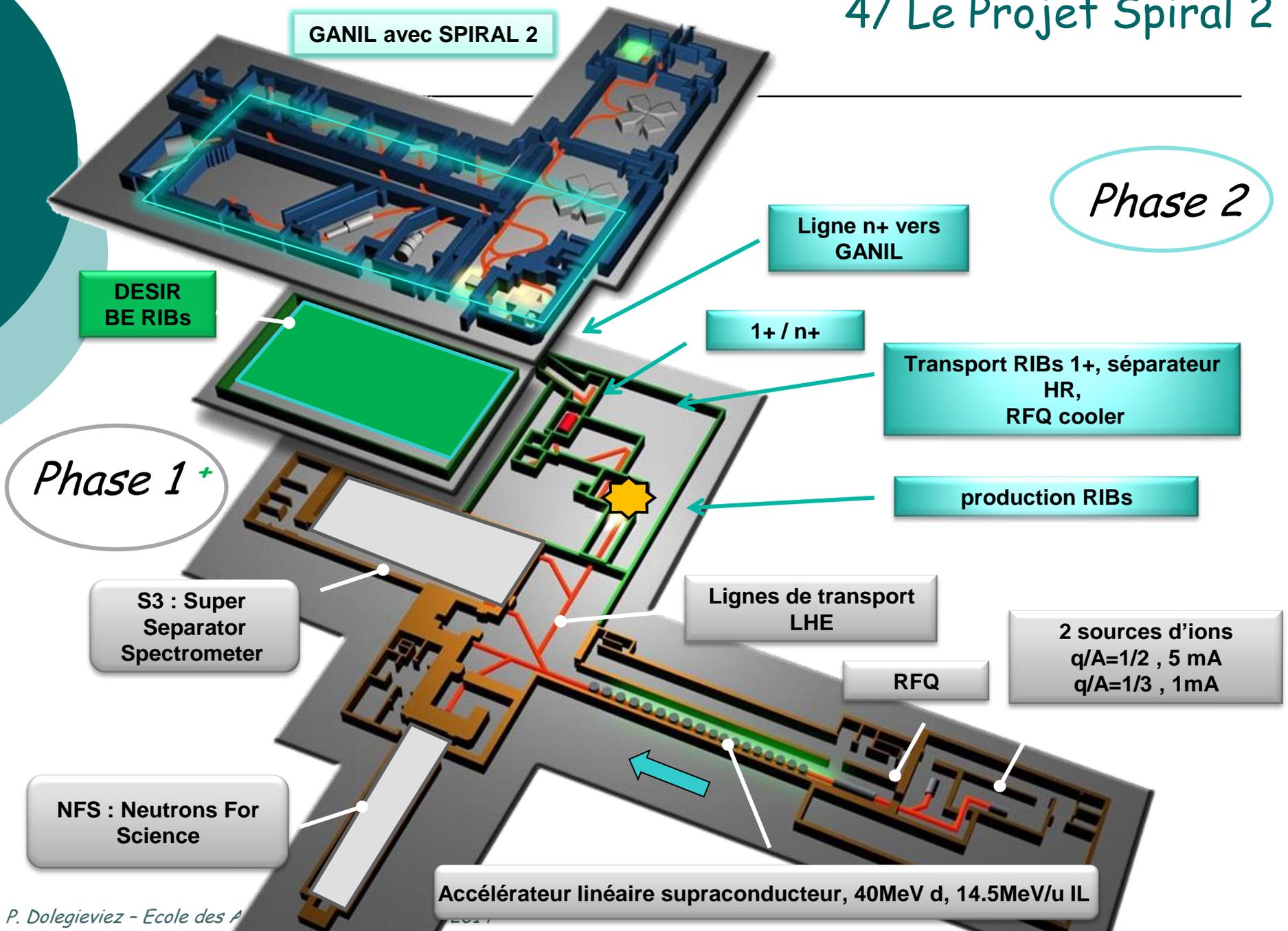
2 cryo-panneaux

Pour chaque module :

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

350g charbon actif @ 20K

4/ Le Projet Spiral 2



GANIL avec SPIRAL 2

Phase 2

DESIR
BE RIBs

Ligne n+ vers
GANIL

1+ / n+

Transport RIBs 1+, séparateur
HR,
RFQ cooler

Phase 1 +

production RIBs

S3 : Super
Separator
Spectrometer

Lignes de transport
LHE

2 sources d'ions
 $q/A=1/2$, 5 mA
 $q/A=1/3$, 1mA

NFS : Neutrons For
Science

RFQ

Accélérateur linéaire supraconducteur, 40MeV d, 14.5MeV/u IL

4/ Le Projet Spiral 2 : contraintes particulières pour les systèmes de vide (aspect sûreté)

Objectifs

Pertes faisceau : linac et LHE < 1W/m



Niveaux de vide adaptés à la transmission des faisceaux

Dosimétrie indiv. Annuelle < 2mSv



Pris en compte dans le design de l'installation et dans les choix technologiques

- évaluation du coût dosimétrique pour le personnel en charge de l'exploitation / maintenance
- spécifications concernant la tenue radiologique des équipements et sur la maintenabilité sur site



Participation des systèmes de vide aux fonctions de sûreté

4/ Le Projet Spiral 2 : contraintes particulières pour les systèmes de vide (aspect sûreté)

	P (hPa)	Vac. systems	Specific requirements	
			SRFC	Safety functions nuclearization
Phase 1	LBE 1	1.10 ⁻⁸	TMP / cryopumps	
	LBE 2	1.10 ⁻⁶	TMP	
	LBE C	1.10 ⁻⁸ / 10 ⁻⁶	TMP / cryopumps	
	RFQ	2.10 ⁻⁸	TMP / cryopumps	
	MEBT	1.10 ⁻⁷	TMP / cryopumps	
	linac	< 5.10 ⁻⁸	TMP	
	HEBT	10 ⁻⁷	TMP	
Phase 2	1+ production	< 5.10 ⁻⁷	TMP	
	1+ beam lines	5.10 ⁻⁸	TMP Maglev (tbc)	
	N+ beam lines	1.10 ⁻⁸	TMP Maglev (tbc)	

Tous les gaz de pompage sont collectés pour contrôle radiologique avant rejet

4/ Le Projet Spiral 2 : contraintes particulières pour les systèmes de vide (aspect sûreté) C

NFS facility

Neutrons For Science
NFS beams : P_{max} 2kW ,
50uA, D,P,He,C

Beam Dump
10 kW \Rightarrow 200 kW

High power
rotating targets
including actinides
($A < 1$ GBq for thin
target)

S3

Super Separator Spectrometer
S3 beams : $q/A : 1/3$, $I_{max} : 1$ mA,
2 à 14,5 MeV/u

Converter for
neutron
production and
actinide targets
($A < 1$ GBq for thin
target
 $A < 10$ Gbq for
sealed targets)

Phase 2

Production RiB Phase 2
Faisceaux $\Rightarrow P_{max}$ 200 kW
(deutons 5 mA,)

Interaction des faisceaux avec des cibles et AF
 \Rightarrow contamination volatile dans les enceintes à vide

Le système de vide contribue aux fonctions de sûreté
(Confinement des matériaux nucléaires)

\Rightarrow conception, AMDEC, tests de réception et procédures
d'exploitation soumis à autorisation (ASN)

linac

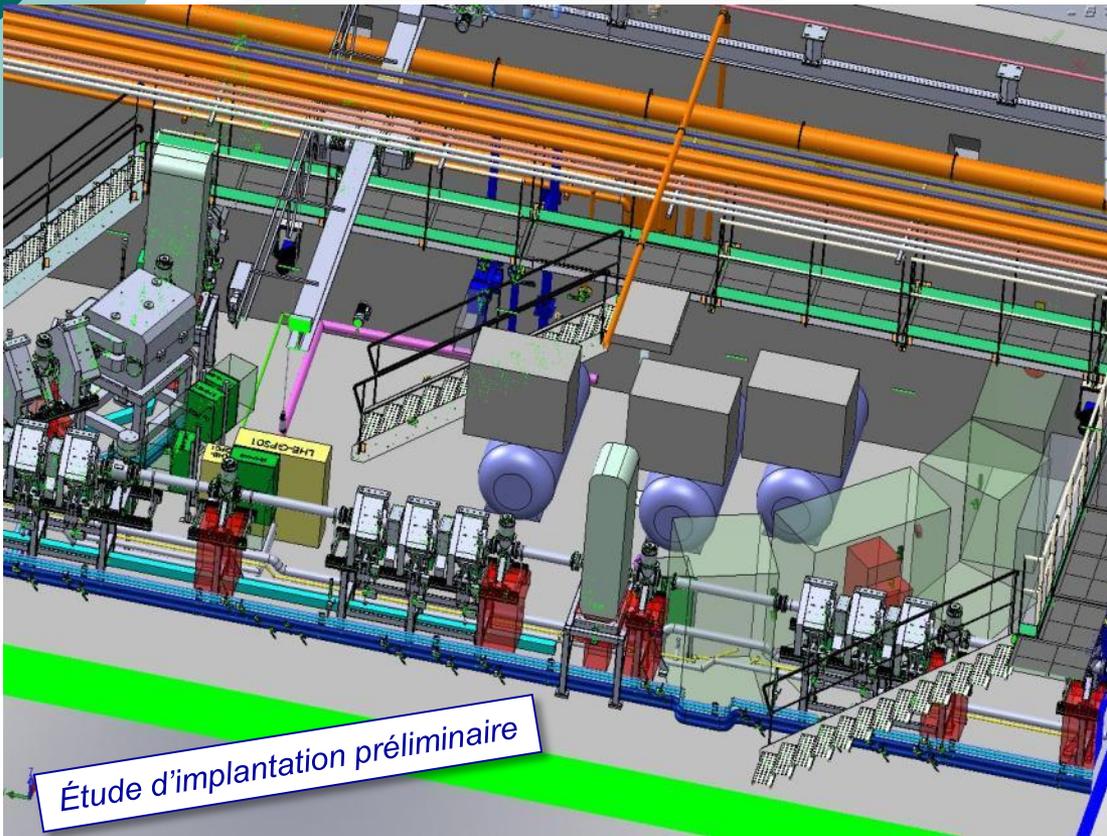
4/ Le Projet Spiral 2 : contraintes particulières pour les systèmes de vide (aspect sûreté)

**système
d'entreposage des
gaz de pompage
(HEBT)
(système classé EIS)**

- SPIRAL 2 : tout les gaz de pompage sont contrôlés avant rejet
- HEBT et Aires d'expériences : les gaz issus du pompage secondaire sont entreposés pour décroissance avant rejet

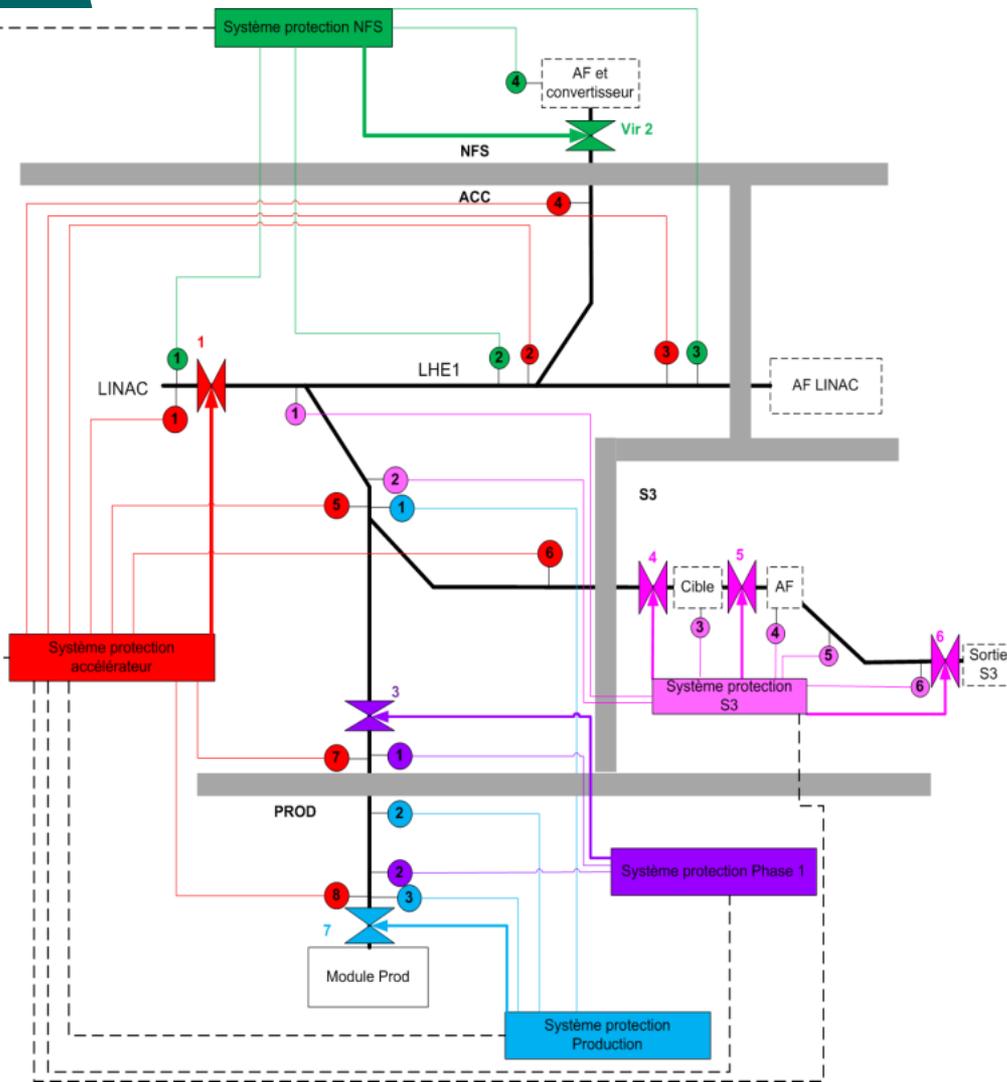
Caractéristiques

- ❑ Contraintes d'étanchéité sur la globalité du système
- ❑ Risque H2 (dilution < 1%)
- ❑ Pression d'entreposage < $P_{atmosph}$
- ❑ Réservoirs 3 * 2 m3 (double parois - $P > 1$ bar)
- ❑ Cycle d'opération / réservoir :
 - ❑ 5 j (remplissage) + 3 j (décroissance) + 2 j (contrôle + rejet) [tbc]
- ❑ Couplage avec le système de vide



Étude d'implantation préliminaire

4/ Le Projet Spiral 2 : contraintes particulières pour les systèmes de vide (aspect sûreté)



HEBT et aires d'expériences

Limitation du transfert de contamination

Système de vannes rapides (système classé EIS)



Caractéristiques

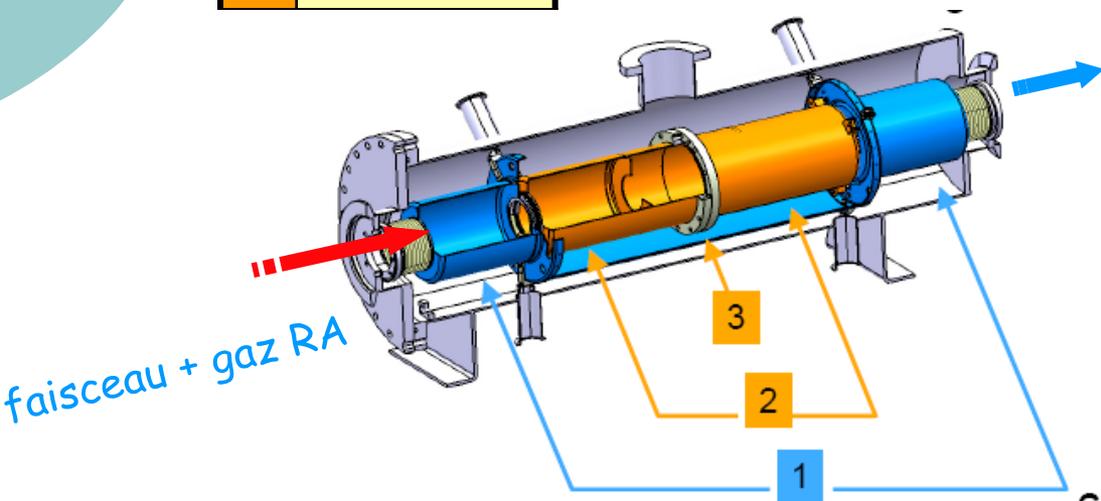
- 5 systèmes (activation du système suivant la configuration faisceau)
- Tps de fermeture : 10 / 25 ms, pression de déclenchement : $P > 10$ mb
- Couplé à une coupure rapide du faisceau (système EIS)

4/ Le Projet Spiral 2 : contraintes particulières pour les systèmes de vide (aspect sûreté)

limitation du transfert des gaz RA : système dédié → cryotrap

	Bq
1	$6,3 \cdot 10^{14}$
2	$7,2 \cdot 10^{13}$
3	$1,6 \cdot 10^8$

activité volatile ZR
zone de production Phase 2
Cible Ucx



		Gaz transmission % (calc.)	
cryocondensation	80 K --	1	Te, Ba, Sr, Sb, In, ..., H ₂ O ⇒ 0,1
	20 K --	2	N ₂ , O ₂ , CO ₂ , CO, rares gases ⇒ 0,2
cryosorption (activated charcoal)	20 K --	3	H ₂ , H ₃ ⇒ 0,9

GANIL / IPN-O

Couplage thermomécanique de la source froide

Système validé, prêt pour études de nucléarisation

merci de votre attention !

Les devises Shadok



IL VAUT MIEUX POMPER MÊME S'IL NE SE PASSE
RIEN QUE RISQUER QU'IL SE PASSE QUELQUE CHOSE
DE PIRE EN NE POMPANT PAS.