



Le vide

Ludovic Salvagnac



Plan

I – Qu' est-ce que le vide

II – Vide est ultra vide

III – Calcul d' installation

- Libre parcours moyen
- Régime d'écoulement
- Flux gazeux
- Temps de pompage en primaire
- Vide limite

IV – Contrôle du vide

- Manomètres mécanique
- Manomètres thermiques
- Manomètres à ionisation

V – Différents types de pompages

- Pompes à fixation
- Pompes volumétriques
- Pompes à entraînement



Qu' est-ce que le vide

		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	5,4.10 ⁻⁴
Xénon	Xe	0.000006	6.10 ⁻⁵

Un gaz est constitué par une collection de molécules dont le volume varie en fonction de la pression

1 cm³ d'air contient 27.10¹⁸ molécules



Qu' est-ce que le vide

Faire le vide :

- obtenir des atmosphères contenant beaucoup moins de molécules que dans l'air ambiant,
- enlever le gaz contenu dans un réservoir fermé.

	Pascal	bar	Kg/cm ²	Atmos	g/cm ²	Torr *	mbar	Inch.hg	psi
1 Pascal	1	10 ⁻⁵	1,02.10 ⁻⁵	0,986.10 ⁻⁵	1,02.10 ⁻²	0,75.10 ⁻²	10 ⁻²	0,2953.10 ⁻³	0,1451.10 ⁻³
1 bar	10 ⁵	1	1,02	0,9869	1020	750	1000	29,53	314,51
1 Kg/cm ²	0,980.10 ⁵	0,980	1	0,968	1000	735	980	28,96	14,22
1 Atmos	1,013.10 ⁵	1,013	1,03	1	1033	760	1013	29,95	14,70
1 g/cm ²	98	0,098.10 ²	10 ⁻³	0,968.10 ⁻³	1	0,735	0,98	0,02896	0,01422
1 Torr	133,3	0,1333.10 ⁻²	1,36.10 ⁻³	1,315.10 ⁻³	1,36	1	1,333	0,03937	0,01934
1 mbar	100	1.10 ⁻²	1,02.10 ⁻³	0,9869.10 ⁻³	1,02	0,750	1	0,02953	0,01451
1 Inch.hg	3386	3,386.10 ⁻²	0,03453	0,03345	34,53	25,4	33,86	1	0,4910
1 psi	6890	6,89.10 ⁻²	0,0703	0,008	70,3	51,75	68,947	2,041	1

* 1 Torr = 1 mm hg

Vide et ultravide: bases physiques fondamentales

Pression / densité de particules / libre parcours moyen / formation d'une monocouche

Pression Torr	760	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}
Densité Particule/cm ³	$2,4 \cdot 10^{19}$	$3,2 \cdot 10^{16}$	$3,2 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^{10}$	$3,2 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^7$	$3,2 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^1$
Libre parcours Moyen (cm)	$7 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^0$	$5,3 \cdot 10^3$	$5,3 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^6$	$5,3 \cdot 10^9$	$5,3 \cdot 10^{12}$
Formation d'une monocouche(s)	$2 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^0$	$1,5 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^9$

A 10⁻⁹ torr → 20 mn pour saturer une surface
 10⁻¹² torr → 18 jours !

Conditions d'obtention du vide et de l'ultravide

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

Flux gazeux
Vitesse de pompage

$$Q = Q_{\text{fuite}} + Q_{\text{dégazage}} + Q_{\text{perméation}} + Q_{\text{rétrodiffusion}} \quad Q_f \approx 0$$

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

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

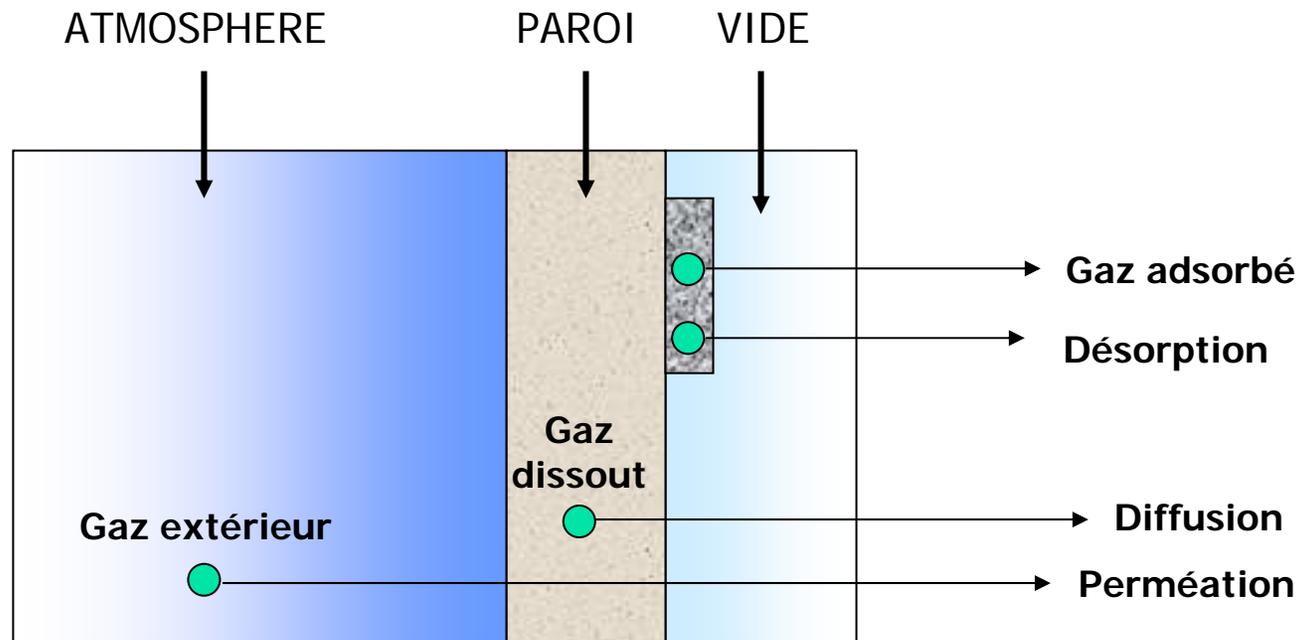
Q_{dc} : Désorption à partir des gaz absorbés chimiquement (chauffage à 300, 400° C)

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

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

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

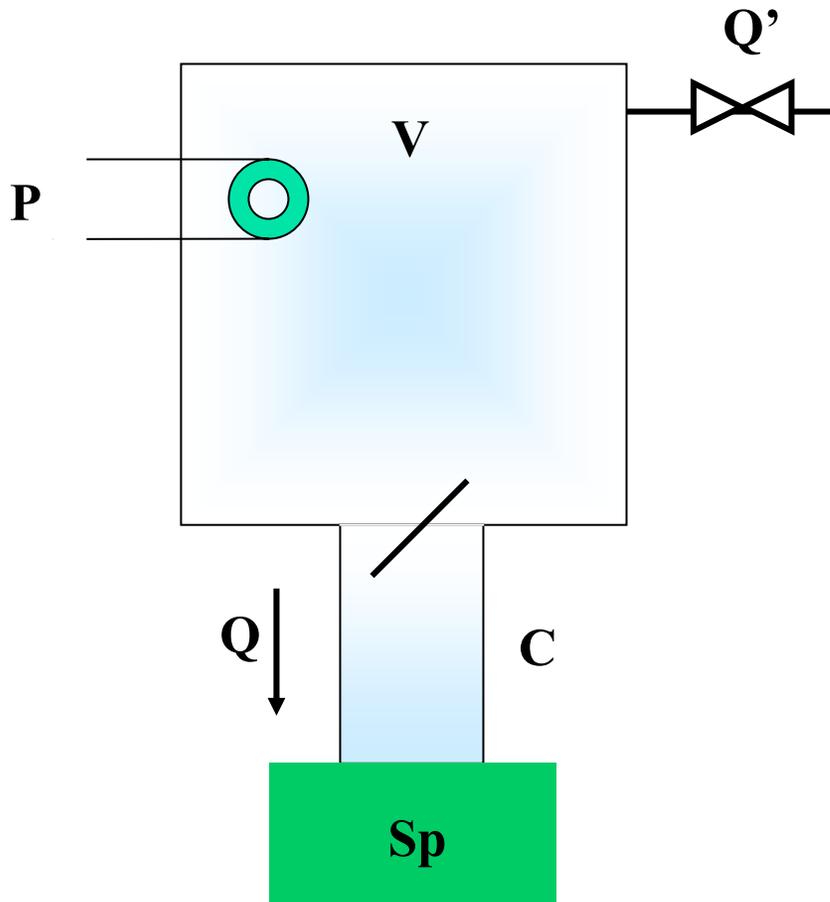
Origine et mécanisme de pénétration des gaz dans une enceinte



En l'absence de fuite, ces processus associés à la rétrodiffusion des gaz dus aux pompes déterminent la pression limite et la composition de l'atmosphère résiduelle.

Les propriétés des matériaux vont contribuer à l'interaction entre les films déposés et les gaz résiduels.

Calcul des installations



V : Volume de l'enceinte

S : Surface

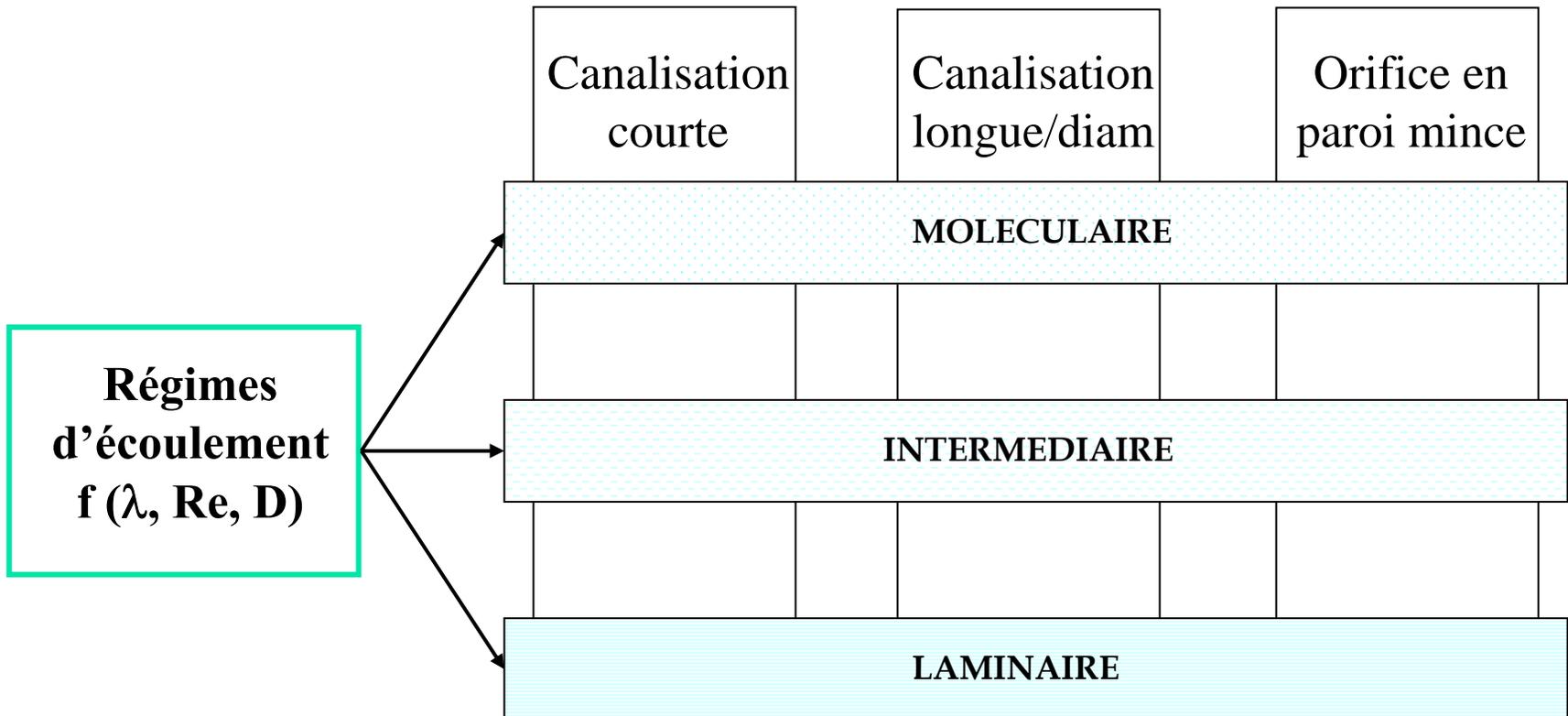
P : Pression dans l'enceinte

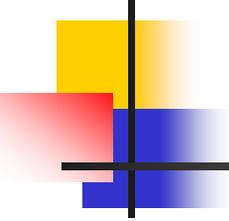
Sp : Vitesse de pompage de la pompe

C : Conductance totale de la canalisation

Q, Q' : Flux gazeux

Principe de calcul d'une conductance





Libre parcours moyen

Définition

La distance moyenne parcourue par une molécule entre deux chocs successifs est appelée "Libre parcours moyen".

Pour tous les gaz

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi P \tau^2}$$

k : constante de Boltzmann

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$$

T : température absolue en °Kelvin

P : Pression en Pa

t : diamètre de la molécule

Libre parcours moyen

Pour $P = 10^{-3}$ mbar et $T = 15^\circ\text{C}$

Gaz	N ₂	O ₂	Air	H ₂ O vapeur	H ₂	He	Ne	Ar	CO ₂	Hg
λ (cm)	6.2	6.7	6.3	4.13	11.7	18.3	13.3	6.5	4.13	2.6

Pour l'air

$$\lambda = 6.2 \frac{10^{-3}}{P}$$

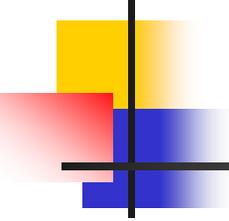
P en mbar
 λ en cm

$$\lambda = 5 \frac{10^{-3}}{P}$$

P en torr
 λ en cm

Pour l'électron dans un gaz

$$\lambda_{\text{électron}} = 4 \sqrt{2} \cdot \lambda_{\text{gaz}}$$



Régimes d'écoulement

Nombre de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{D\rho v}{\eta}$$

D : diamètre de la canalisation

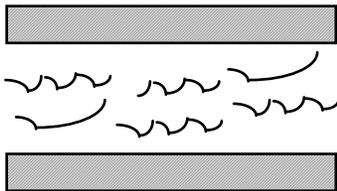
r : masse volumique

v : vitesse moyenne du gaz

h : viscosité

Régimes d'écoulement

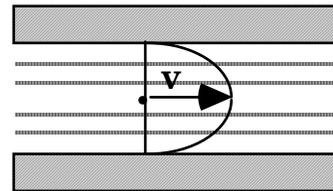
Régime turbulent



$$Re > 2200$$

$$Q > 200 D$$

Régime laminaire



$$PD \geq 0,66 \text{ mb.cm}$$

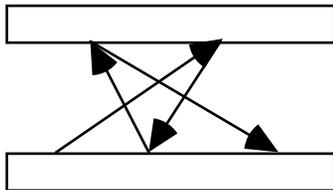
$$Q < 100 D$$

$$\lambda \leq \frac{D}{100}$$

$$Re < 1200$$

Les molécules sont très près les unes des autres.
Elles s'entraînent par frottement et s'écoulent en filets parallèles => coefficient de viscosité

Régime moléculaire



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

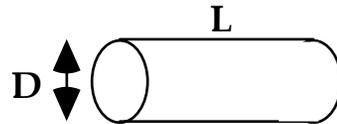
$$PD \leq 2.10^{-2} \text{ mb.cm}$$

Régime intermédiaire

$$\frac{D}{100} < \lambda < \frac{D}{3}$$

$$2.10^{-2} < PD < 0.66 \text{ mb.cm}$$

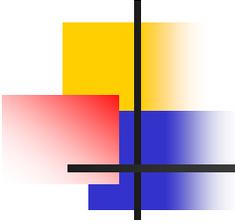
Conductance



Définition

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

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



Conductance

Conductances d'un orifice en paroi mince

- Régime moléculaire

$$C = \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} \cdot A$$

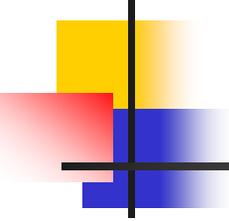
$$C = 11,6 A \text{ (pour l'air à } 20^\circ\text{C) [l}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$$

A : surface de l'orifice en cm²

- Régime visqueux

$$C = \frac{20A}{1-r} \text{ (pour l'air à } 20^\circ\text{C)}$$

r : rayon en cm



Conductance

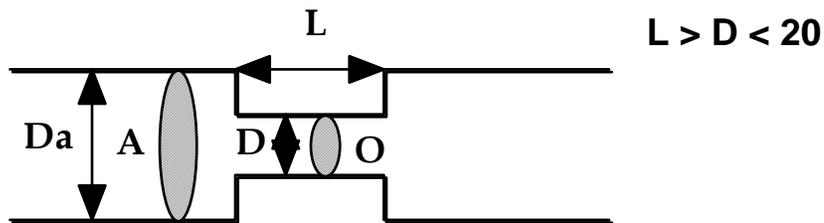
Conductances d'un orifice en paroi mince

- Régime haute pression

$$C = \frac{20A}{1 - r} \quad (\text{pour l'air à } 20^{\circ}\text{C})$$

Conductance

Conductance d'une canalisation courte, rectiligne, à section circulaire



$$\alpha = \frac{1}{1 + 1,33 \frac{D}{L}}$$

- Régime laminaire

Pour l'air à 20°C

$$C = 140 \cdot \frac{D^4}{L} \cdot \bar{P}$$

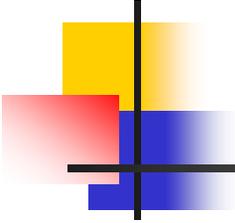
D : diamètre de la canalisation (cm)

L : longueur (cm)

P : mbar moyenne

Pour d'autres gaz que l'air : $C_{\text{gaz}} = x \cdot C_{\text{air}}$

Gaz	H ₂	He	H ₂ O	Ne	N ₂	Ar
x	2.1	0.93	1.9	0.58	1.04	0.82



Conductance

- Régime moléculaire

Pour l'air à 20°C

$$C = 12,1 \cdot \frac{D^3}{L} \alpha$$

-> Facteur de Clausing

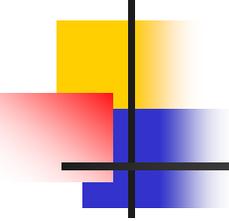
$$\alpha = \frac{1}{1 + 1,33 \frac{D}{L}}$$

si L grand $\alpha = 1$
 $L > 20 D$ $\alpha = 1$

si $D > 0,2 \text{ Da}$ α il faut calculer α
 $D < 0,2 \text{ Da}$

Pour d'autres gaz que l'air : $C_{\text{gaz}} = x \cdot C_{\text{air}}$

Gaz	H ₂	He	H ₂ O	Ar	CO ₂	Hg
x	3.78	2.67	1.26	0.85	0.81	0.38



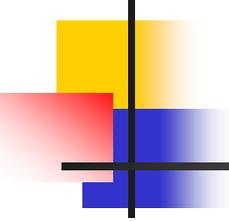
Conductance

Conductance d'une canalisation rectiligne, longue par rapport à son diamètre

$$L/D > 20$$

Régime laminaire

$$C = \frac{\pi r^4}{16 \eta L} (P_1 + P_2)$$
$$C = 140 \frac{D^4}{L} \cdot \bar{P} \text{ pour l'air à } 20^\circ\text{C}$$



Conductance

Régime moléculaire

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

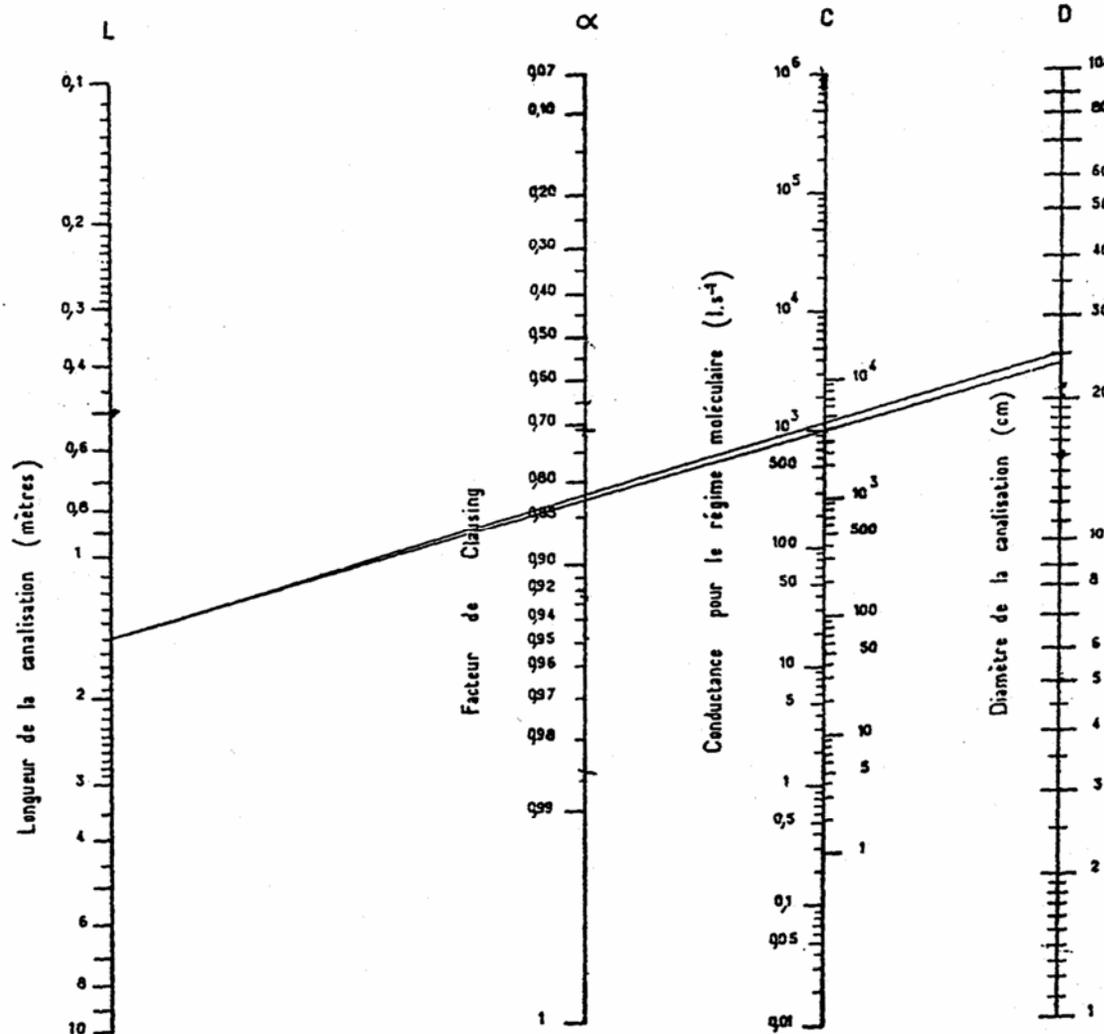
$$C = \frac{16}{3} \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} \cdot \frac{s^2}{UL}$$

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

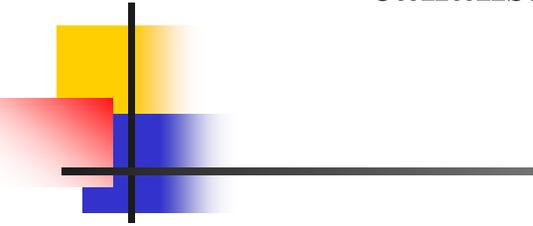
Régime intermédiaire

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

Abaques pour le calcul de la conductance de canalisations circulaires, régime moléculaire avec détermination du facteur de clausius

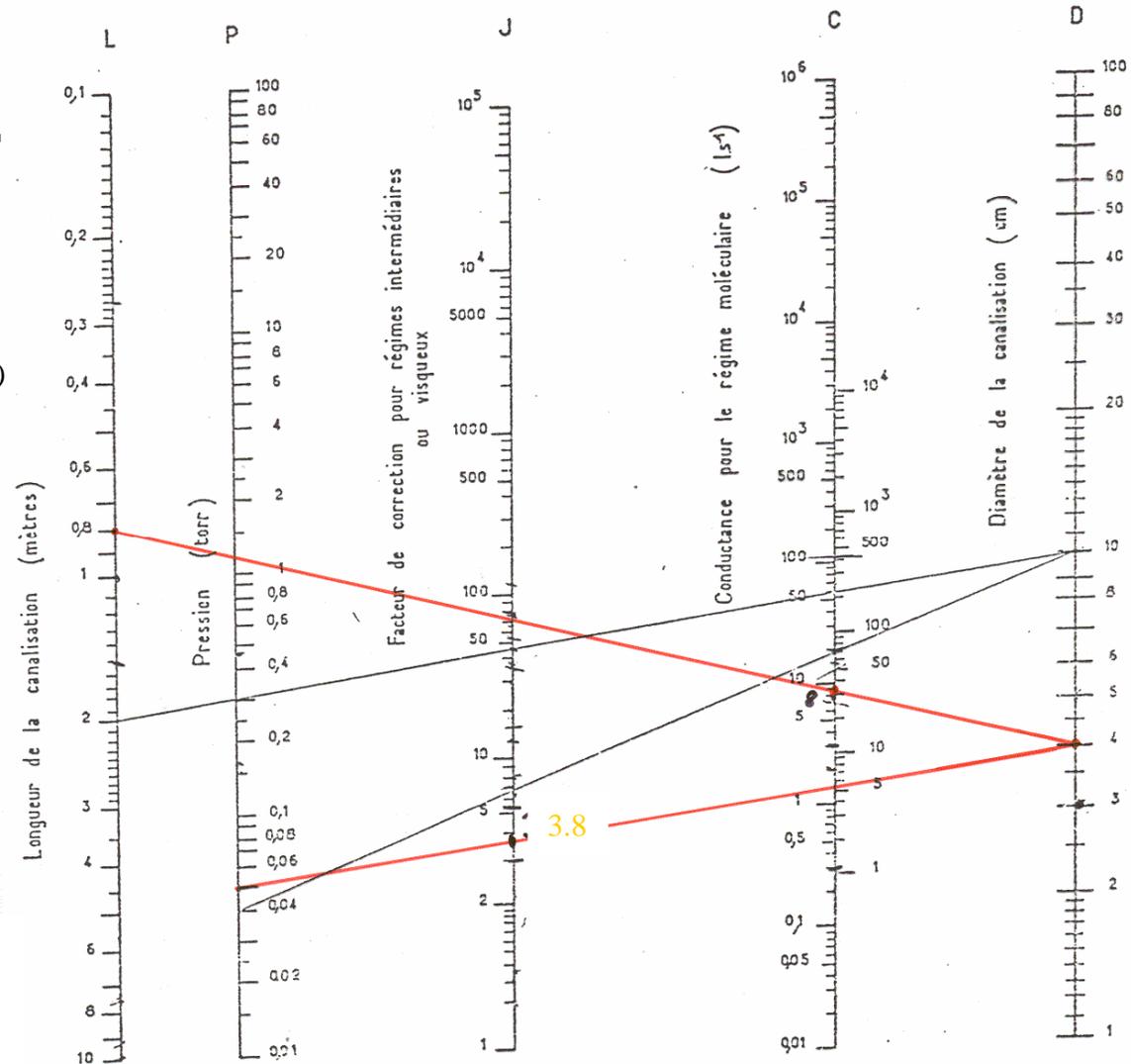


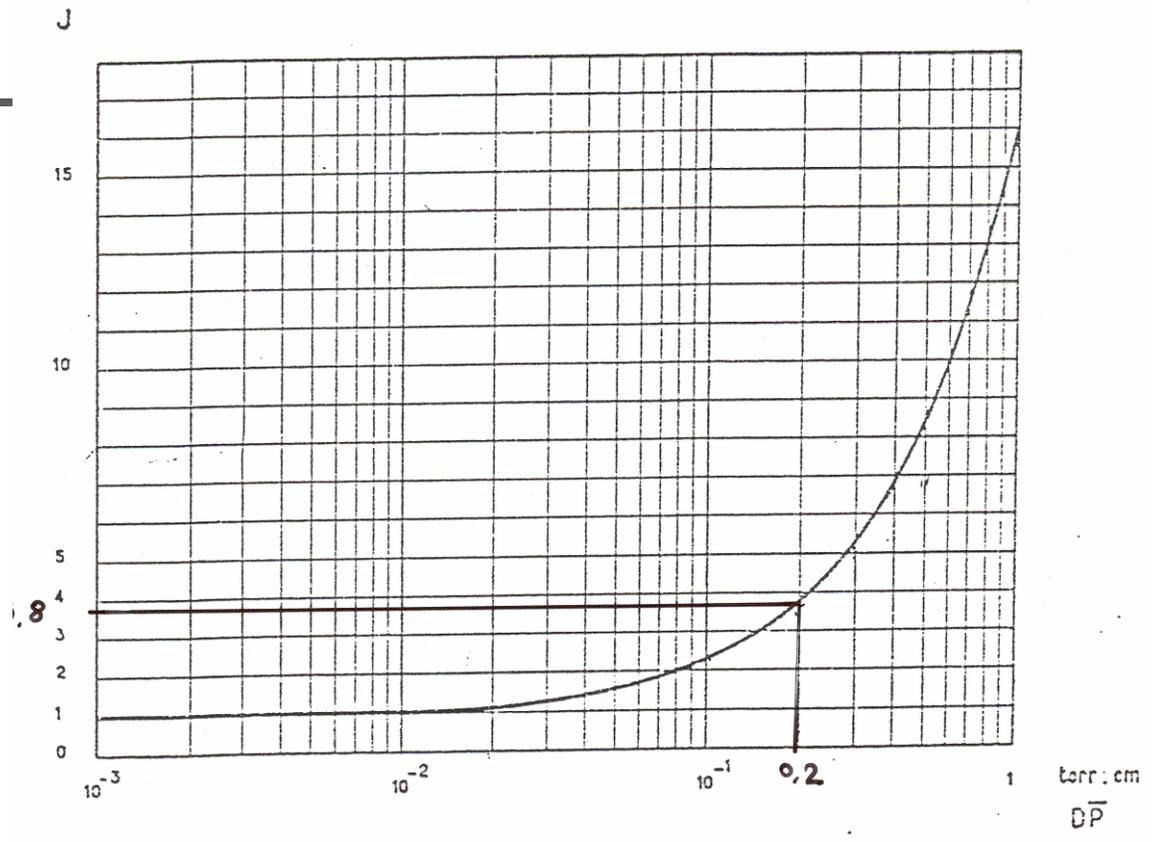
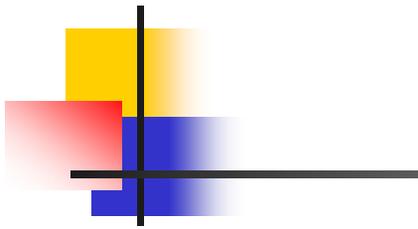
Abaque pour le calcul de conductance canalisation circulaire en tous régimes air à 20°C

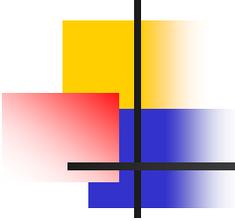


$L = 80 \text{ cm}$, $D = 4 \text{ cm}$ \Rightarrow C

$D = 4 \text{ cm}$, $P = 5 \cdot 10^{-2} \text{ t}$ \Rightarrow J = f (PD)





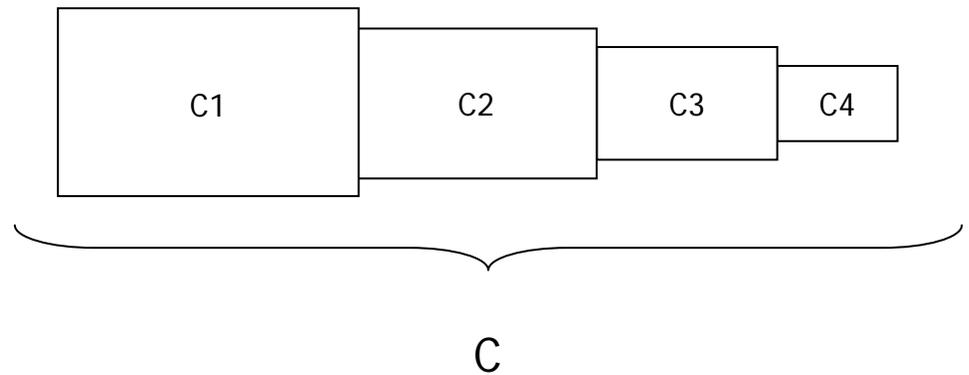


Conductance

Association de conductance

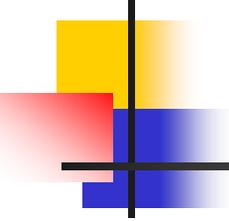
En série

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}$$



En parallèle

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$



Flux gazeux

Définition

Dans un circuit de vide, toutes les sections sont traversées dans l'unité de temps par la même quantité de matière appelée débit massique m .

En vide poussé, on parle de débit volume S , volume de gaz traversant une section par unité de temps.

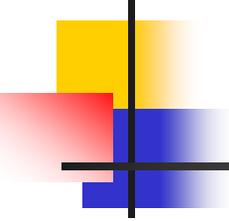
Flux gazeux : $Q = p \cdot S \text{ mbar.l.s}^{-1}$

Propriété

Le flux gazeux est conservatif.

En régime turbulent : $Q > 200 D$

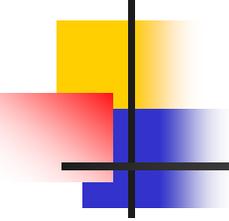
En régime laminaire : $Q < 100 D$



Flux gazeux

TABLEAU DE CONVERSION DES FLUX GAZEUX

	<i>Pa.m³.s⁻¹ (W)</i>	<i>mbar.L.s⁻¹</i>	<i>Torr.L.s⁻¹</i>	<i>Atm.cm³.s⁻¹</i>	<i>Lusec</i>	<i>Scem</i>	<i>Sim</i>	<i>Mol.s⁻¹</i>
<i>Pa.m³.s⁻¹</i>	1	<i>10</i>	<i>7,5</i>	<i>9,87</i>	<i>7,5 x 10³</i>	<i>592</i>	<i>0,592</i>	<i>4,41 x 10⁻⁴</i>
<i>mbar.L.s⁻¹</i>	<i>0,1</i>	1	<i>0,75</i>	<i>0,987</i>	<i>750</i>	<i>59,2</i>	<i>5,92 x 10⁻²</i>	<i>4,41 x 10⁻⁵</i>
<i>Torr.L.s⁻¹</i>	<i>0,133</i>	<i>1,33</i>	1	<i>1,32</i>	<i>1000</i>	<i>78,9</i>	<i>7,89 x 10⁻²</i>	<i>5,85 x 10⁻⁵</i>
<i>Atm.cm³.s⁻¹</i>	<i>0,101</i>	<i>1,01</i>	<i>0,76</i>	1	<i>760</i>	<i>59,8</i>	<i>5,98 x 10⁻²</i>	<i>4,45 x 10⁻⁵</i>
<i>Lusec</i>	<i>1,33 x 10⁻⁴</i>	<i>1,33 x 10⁻³</i>	<i>10⁻³</i>	<i>1,32 x 10⁻³</i>	1	<i>7,89 x 10⁻²</i>	<i>7,89 x 10⁻⁵</i>	<i>5,86 x 10⁻⁸</i>
<i>Scem</i>	<i>1,69 x 10⁻³</i>	<i>1,69 x 10⁻²</i>	<i>1,27 x 10⁻²</i>	<i>1,67 x 10⁻²</i>	<i>12,7</i>	1	<i>10⁻³</i>	<i>7,45 x 10⁻⁷</i>
<i>Sim</i>	<i>1,69</i>	<i>16,9</i>	<i>12,7</i>	<i>16,7</i>	<i>1,27 x 10⁴</i>	<i>1000</i>	1	<i>7,45 x 10⁻⁴</i>
<i>Mol.s⁻¹</i>	<i>2,27 x 10³</i>	<i>2,27 x 10⁴</i>	<i>1,7 x 10⁴</i>	<i>2,24 x 10⁴</i>	<i>1,7 x 10⁷</i>	<i>1,34 x 10⁶</i>	<i>1,34 x 10³</i>	1



Temps de pompage primaire

$$t = 2.3 \frac{V}{S} \log \frac{P_i}{P_f}$$

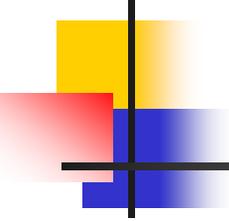
t : temps en seconde

V : volume

S : vitesse de pompage effective (pompe + conductance)

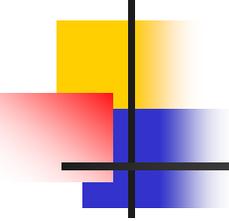
P_i : pression initiale

P_f : pression finale



Vide secondaire en statique

- Les molécules contenues dans le volume étant évacuées, il est nécessaire de pomper celles qui sont fixées sur les surfaces par adsorption.
- Le dégazage dépend de la nature du matériau adsorbant, de son état de surface. Il est plus grand pour les matériaux organiques (plastiques, caoutchouc) que pour les métaux.
- Le dégazage est affecté par la température, la désorption est d'autant plus grande que la température est élevée.
 - Le flux unitaire de dégazage s'exprime en $\text{mbar.l.s}^{-1}\text{.cm}^{-2}$
 - Il diminue avec le temps (ex : un facteur 100 en 4 h pour les aciers)



Vide secondaire en statique

Calcul du flux de dégazage total

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

Vitesse effective de pompage

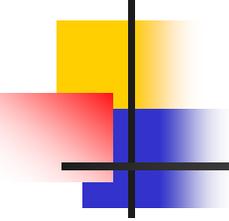
$$\frac{1}{S_{\text{eff}}} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C}$$

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

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

C : conductance totale de la canalisation

➡ **Avantage à déterminer la valeur de la conductance des canalisations pour obtenir une optimisation des caractéristiques de pompage.**



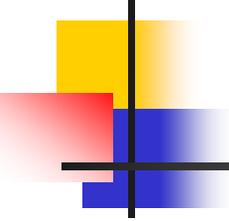
Vide secondaire en statique

Vide limite

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

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

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



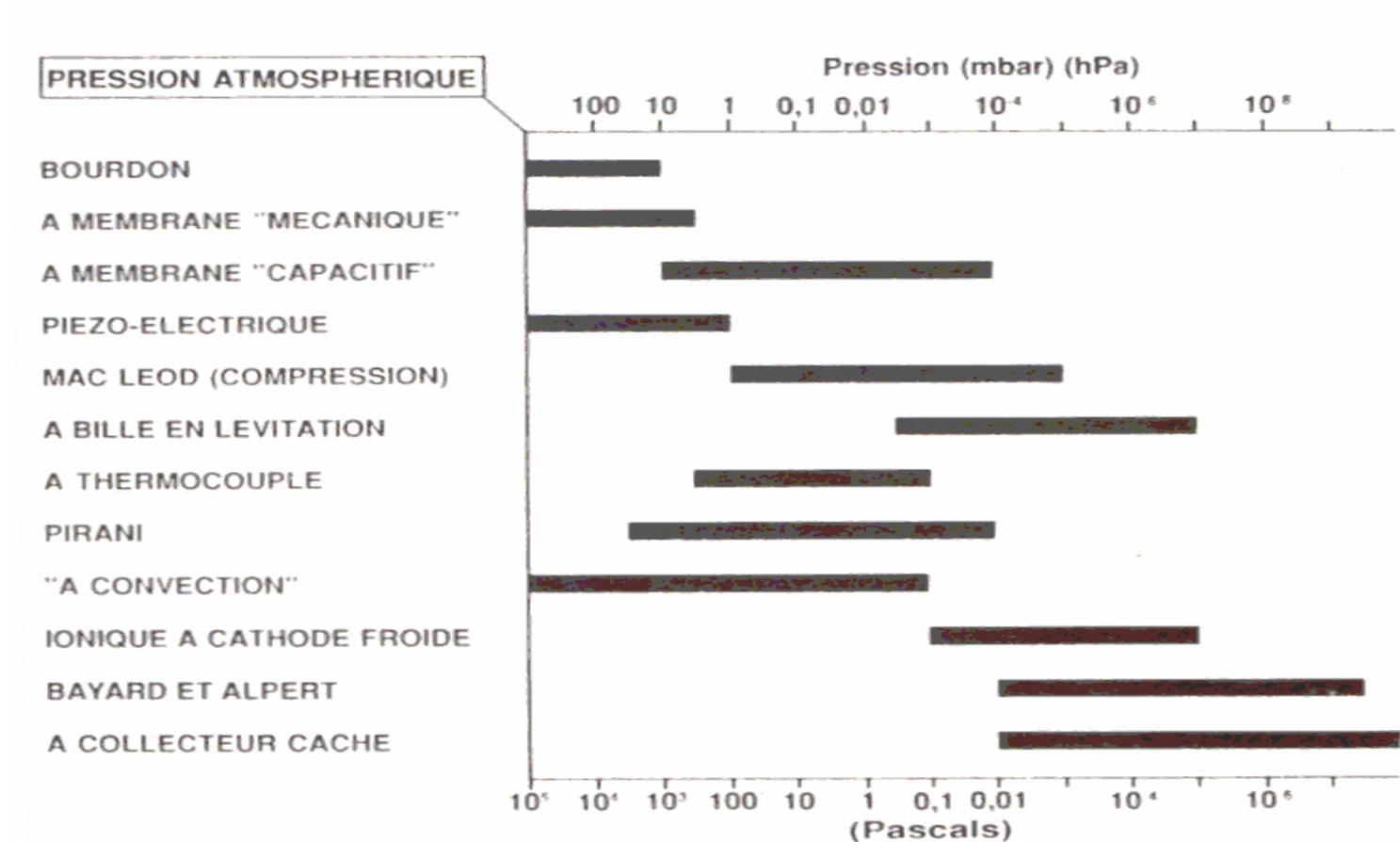
Vide secondaire en dynamique

$$Q_T = Q_{\text{Statique}} + Q_{\text{Dynamique}}$$

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

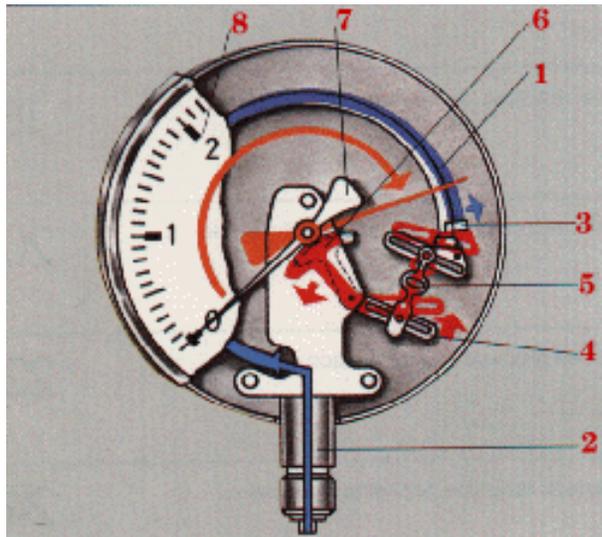
Contrôle du vide

Type de manomètres



Manomètre mécanique

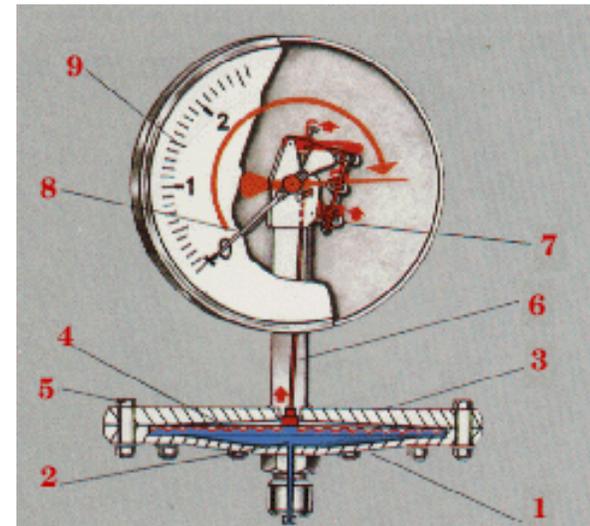
Manomètre de Bourdon



1. Organe moteur, tube de Bourdon
2. Support de tube
3. Capuchon du tube
4. Secteur denté
5. Bielle
6. Engrenage
7. Aiguille
8. Cadran

Pression mesurée 1000 à 10 mbar

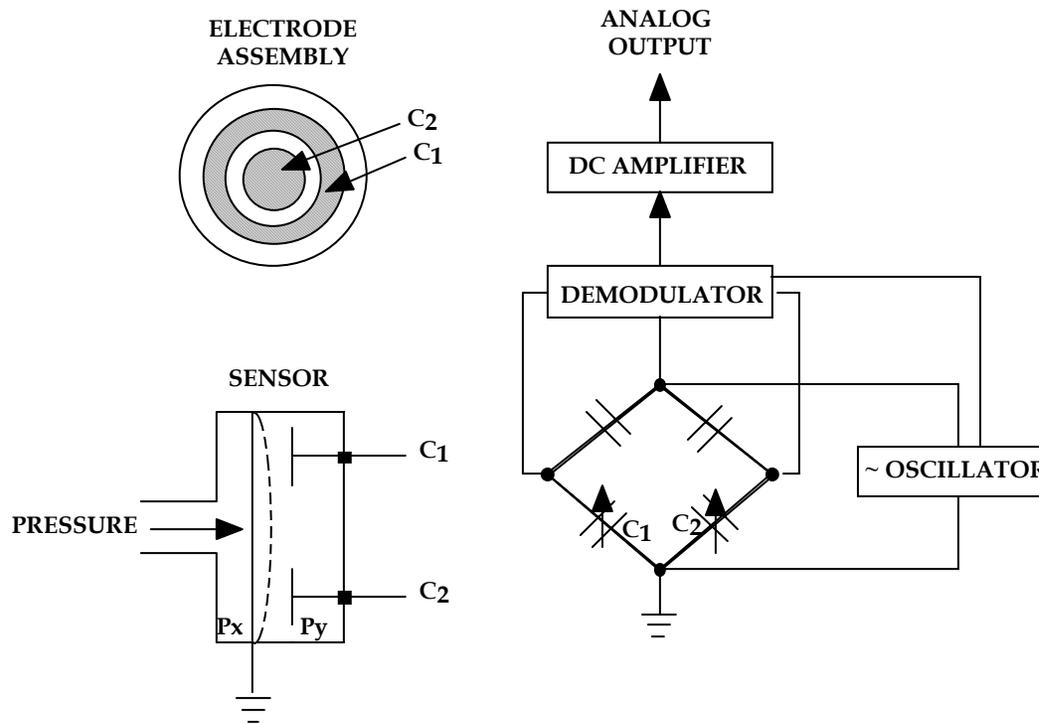
Manomètre à membrane



1. Bride inférieure
2. Chambre de pression
3. Bride supérieure
4. Organe moteur, la membrane
5. Vis
6. Bielle
7. Engrenage
8. Aiguille
9. Cadran

La mesure du vide est indépendante de la nature du gaz et ne nécessite pas de facteur de correction

Manomètre capacitif



La membrane déformable constitue l'armature mobile d'un condensateur variable dont on mesure les variations de capacité en courant haute fréquence avec une très grande précision.

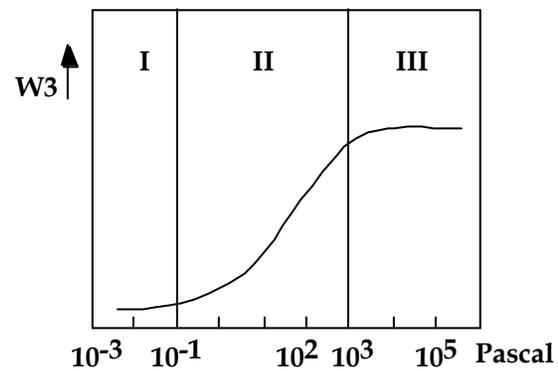
Ces manomètres servent d'étalons secondaires

Manomètre thermique

Le principe de base repose sur le transfert de chaleur d'une surface chaude vers une surface froide par un gaz ou une vapeur.

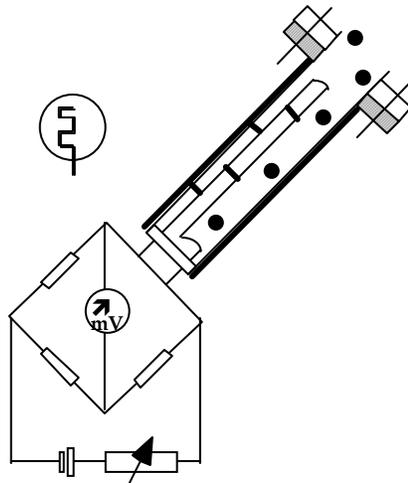


Manomètre thermique - Conduction thermique
Transfert d'énergie W_3 en fonction de la pression P



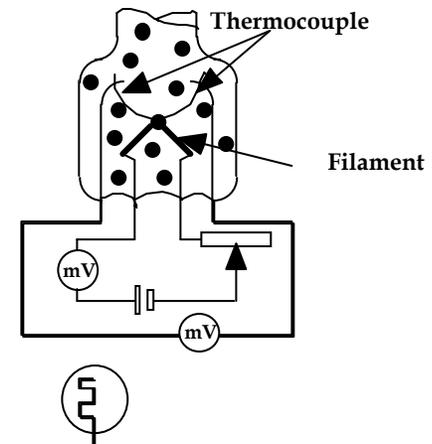
Manomètre thermique

Manomètre Pirani

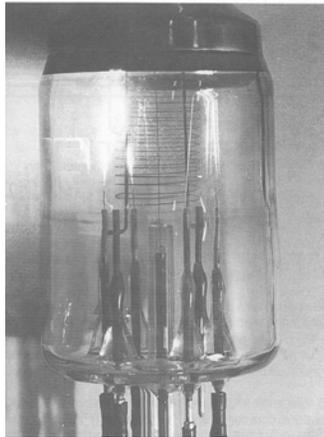


Manomètre thermocouple

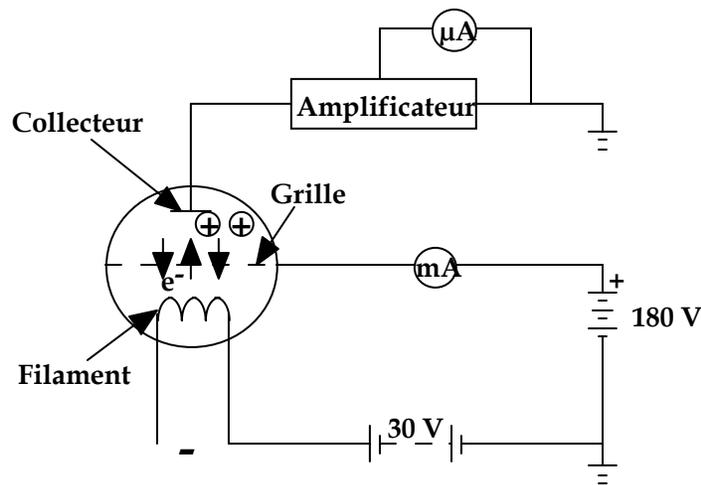
Thermocouple manometer
basic electrical network



Manomètre à ionisation



Jauge Bayard Alpert

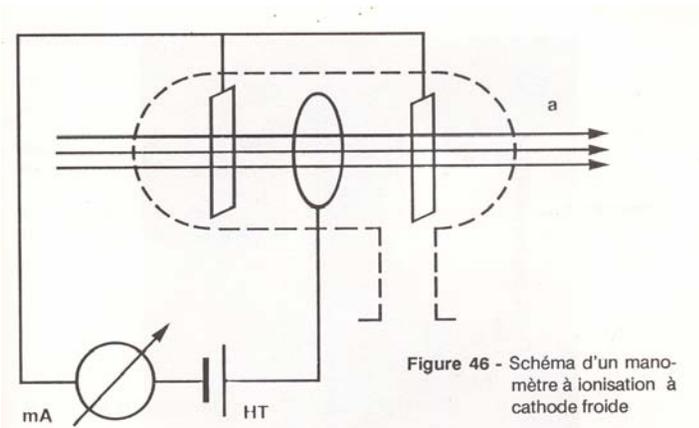


- gamme de mesure : 10^{-5} torr à 10^{-11} torr
- sensibles à la nature du gaz

La jauge Bayard-Alpert (JBA) est un modèle amélioré de la jauge à ionisation à cathode chaude conventionnelle. Ici le collecteur d'ions, un très fin fil, est monté dans l'axe de la grille et deux filaments que l'on peut utiliser alternativement sont montés hors de la grille.

Le principal avantage de cette géométrie est que l'effet secondaire des rayons X est très réduit à cause du petit angle solide sous lequel le collecteur d'ions voit n'importe quelle partie de la grille.

Manomètre à ionisation



-gamme de mesure : 10^{-3} torr à 10^{-9} torr

-- sensibles à la nature du gaz

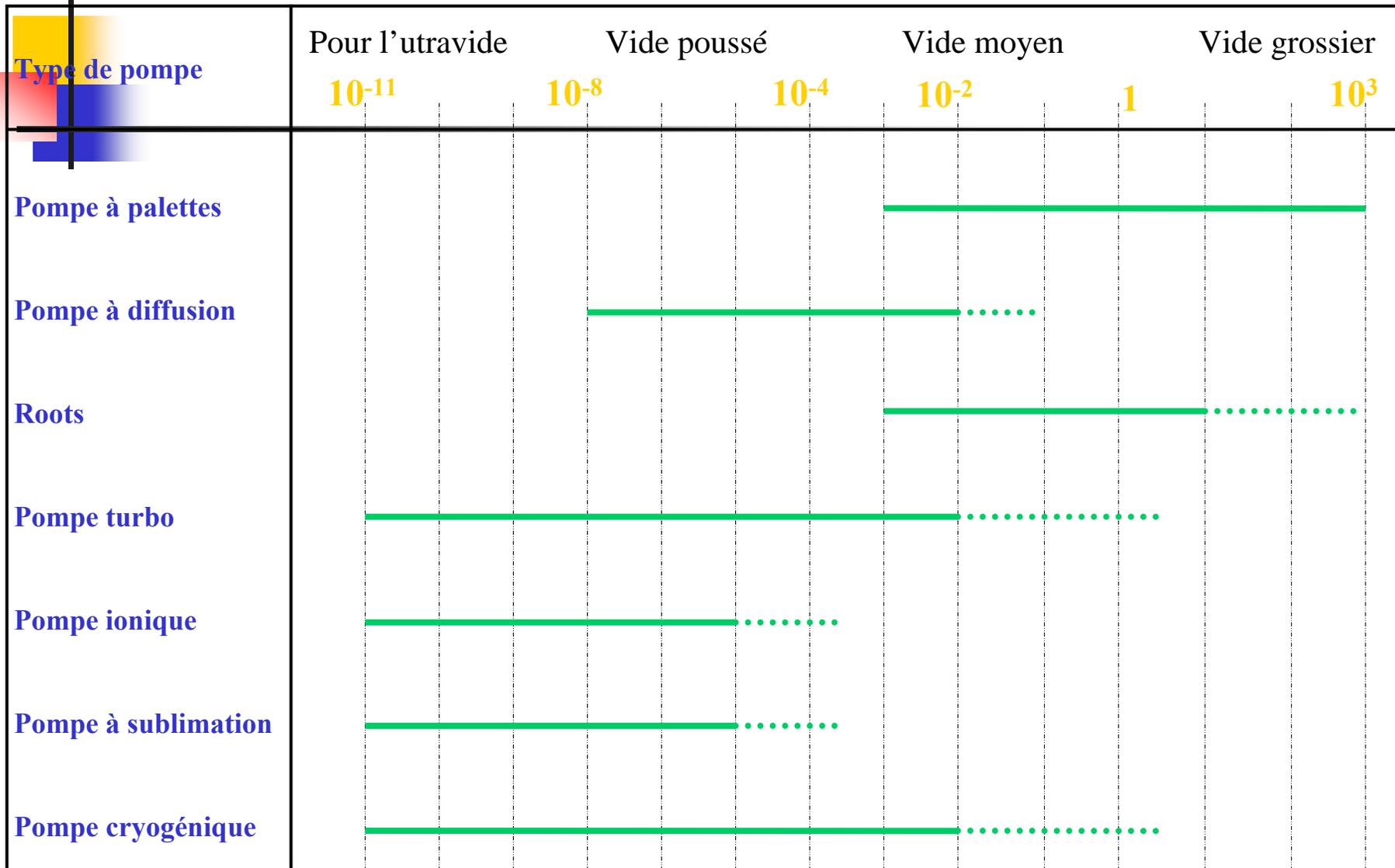
Principe

Les deux cathodes sont reliées entre elles électriquement et une différence de potentiel de 1500 à 2000 V est créée entre elles et l'anode tubulaire centrale.

Cette disposition des électrodes provoque des oscillations des particules chargées électriquement, ce qui augmente ainsi leur parcours.

La superposition du champ magnétique, en spiralant les trajectoires, augmente encore ce parcours.

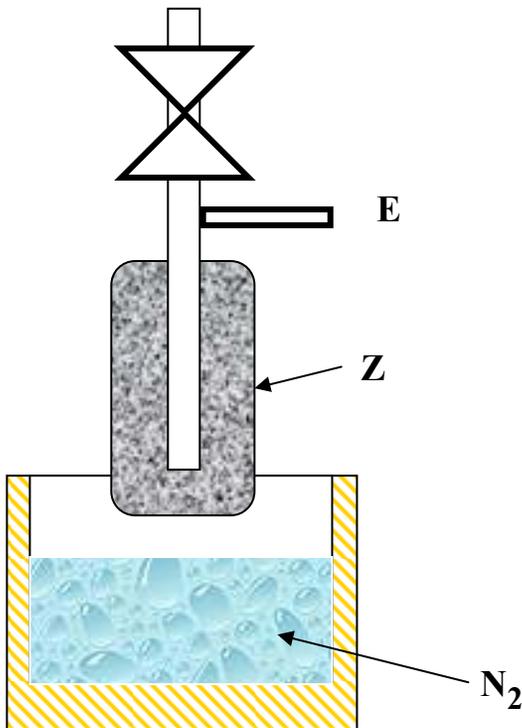
Le nombre de ionisation par cm de trajectoire et donc le courant de ionisation, est une fonction de la pression.



..... Zones de démarrage

Pompe à fixation

Pompes à zéolites



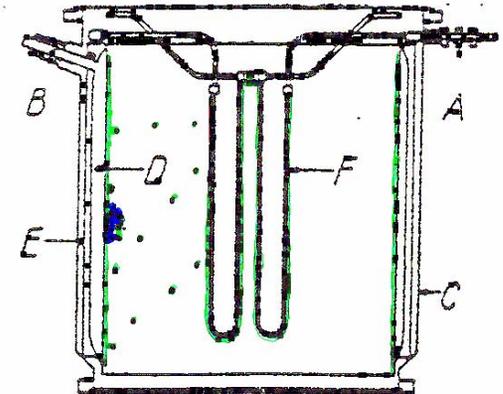
- Piège les gaz en les bloquant
- Ne sont pas contaminantes
- Ne communiquent pas avec l'atmosphère
- Ont une capacité d'adsorption limitée à une certaine quantité de gaz
- Débit volume est très sélectif en fonction du gaz pompé
- Sont des machines statiques

E : échappement
Z : zéolithe
N₂ : azote liquide

-Alumino silicates
- Vide ~ 10⁻³ torr

Pompe à sublimation de titane

Débit de pompage en $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$		
Gaz	Film à 20 °C	Film à -196 °C
H ₂	3	10
N ₂	4.5	10
O ₂	1.5	6
CO	9	11



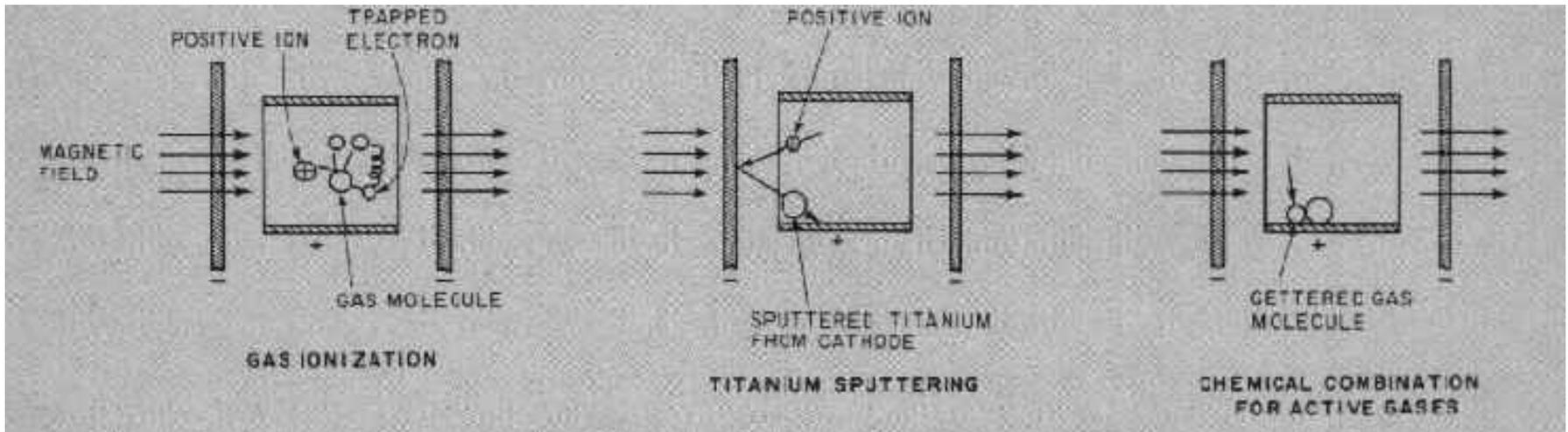
A passage de évacuation
 B tubulure de remplissage
 C corps
 D réservoir source liquide
 E écran thermique
 F filaments évaporateurs

— Pompe à sublimation de titane.

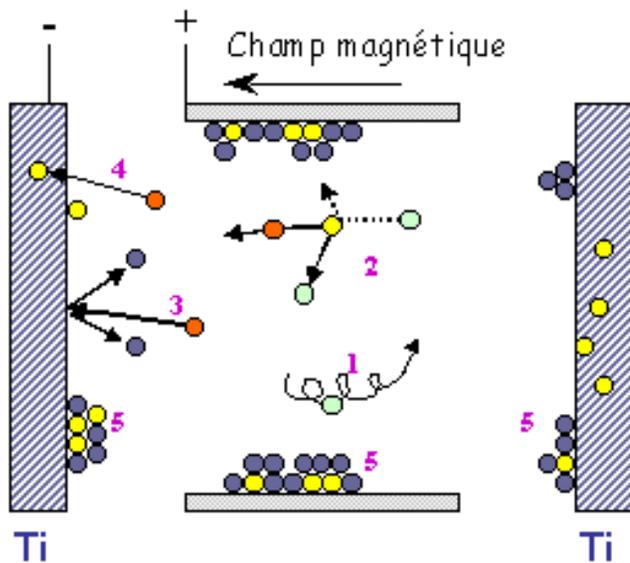
- Evaporation sous vide du titane phénomène de chimie-sorption
- Ne pompent pas les gaz rares sauf par enfouissement
- Exemptes d'hydrocarbure
- Statiques (pas de vibration)
- Grande vitesse de pompage avec panneau cryogénique
- Vide $< 10^{-10}$ torr

Pompe ionique à pulvérisation

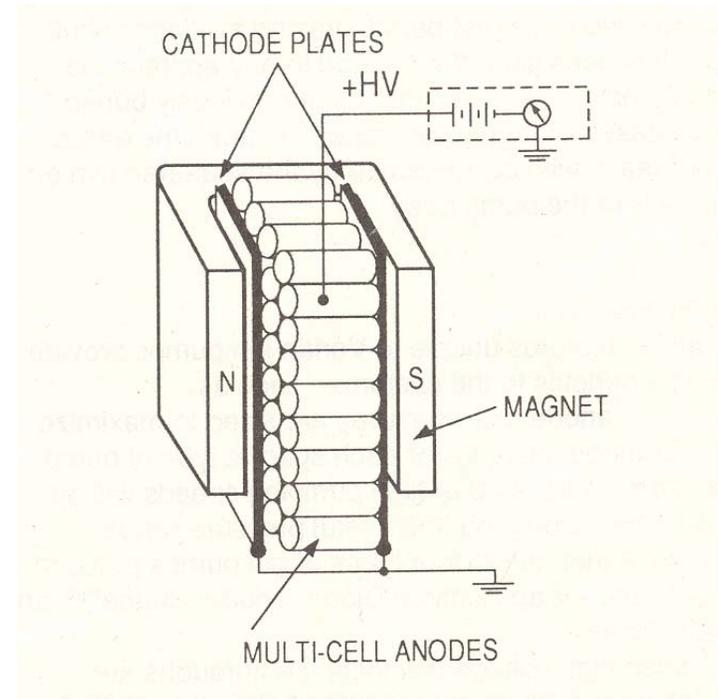
- Utilisent l'effet getter et l'ionisation pour piéger de façon permanente les molécules de gaz
- Exemptes d'hydrocarbures
- Statiques (pas de vibration)
- Vide $< 10^{-10}$ torr



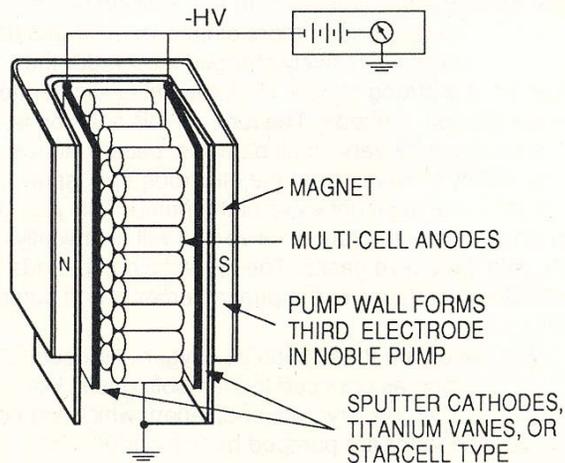
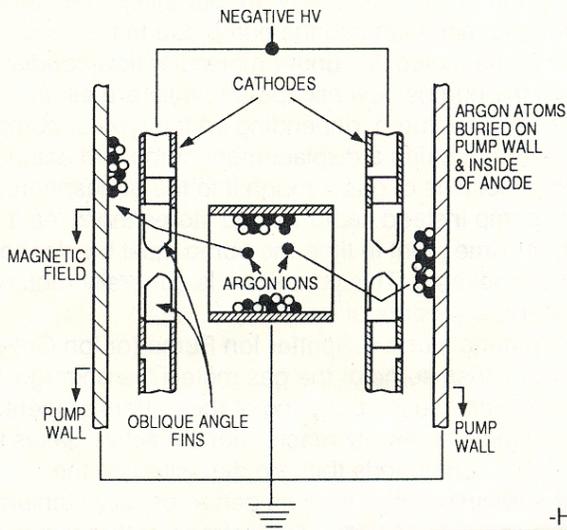
Pompe ionique diode



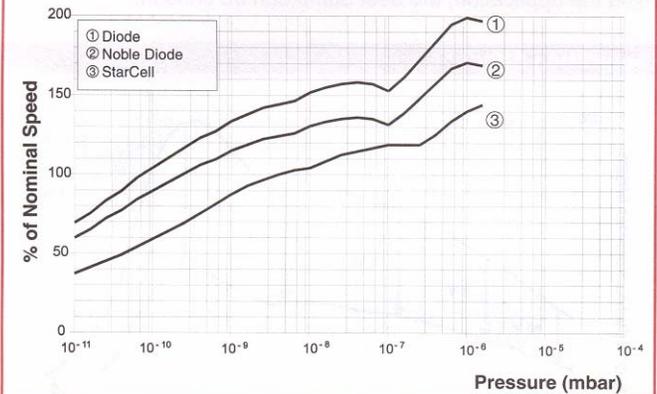
- atome de titane
- particule de gaz
- ion du gaz
- électron



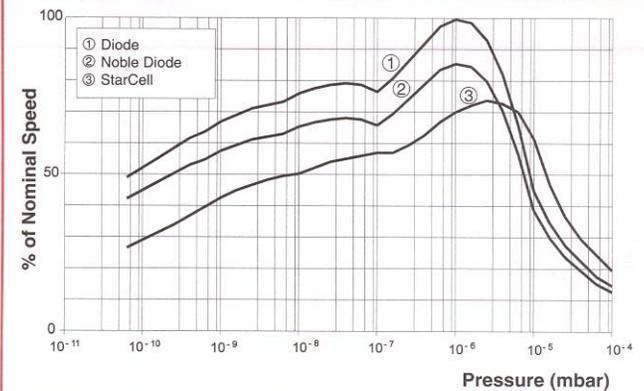
Pompe ionique triodes



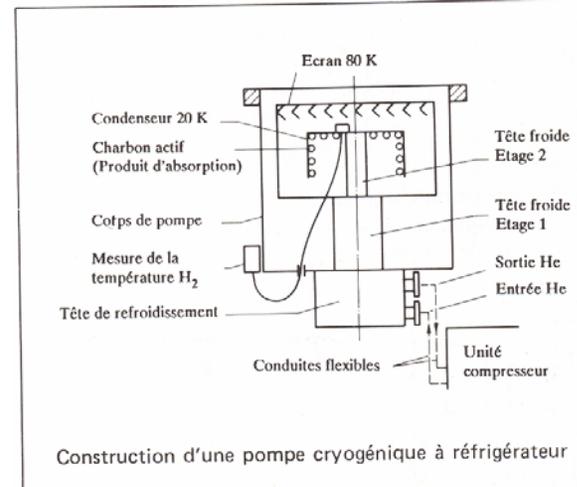
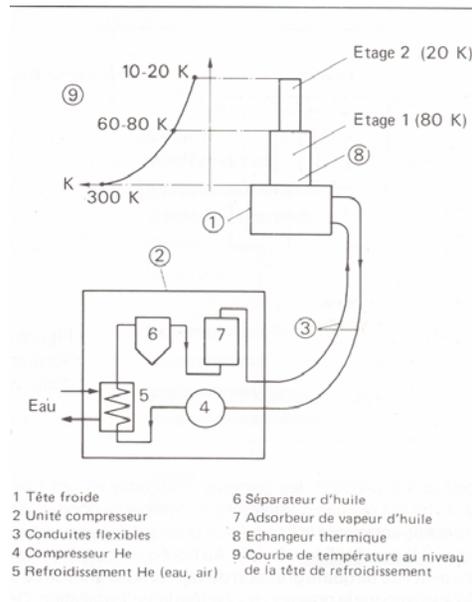
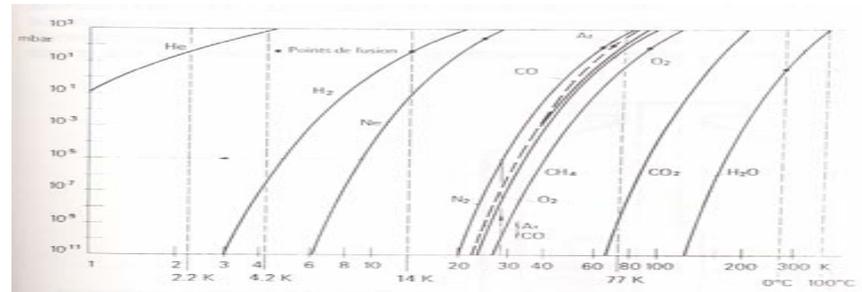
Nitrogen Pumping Speed before Saturation



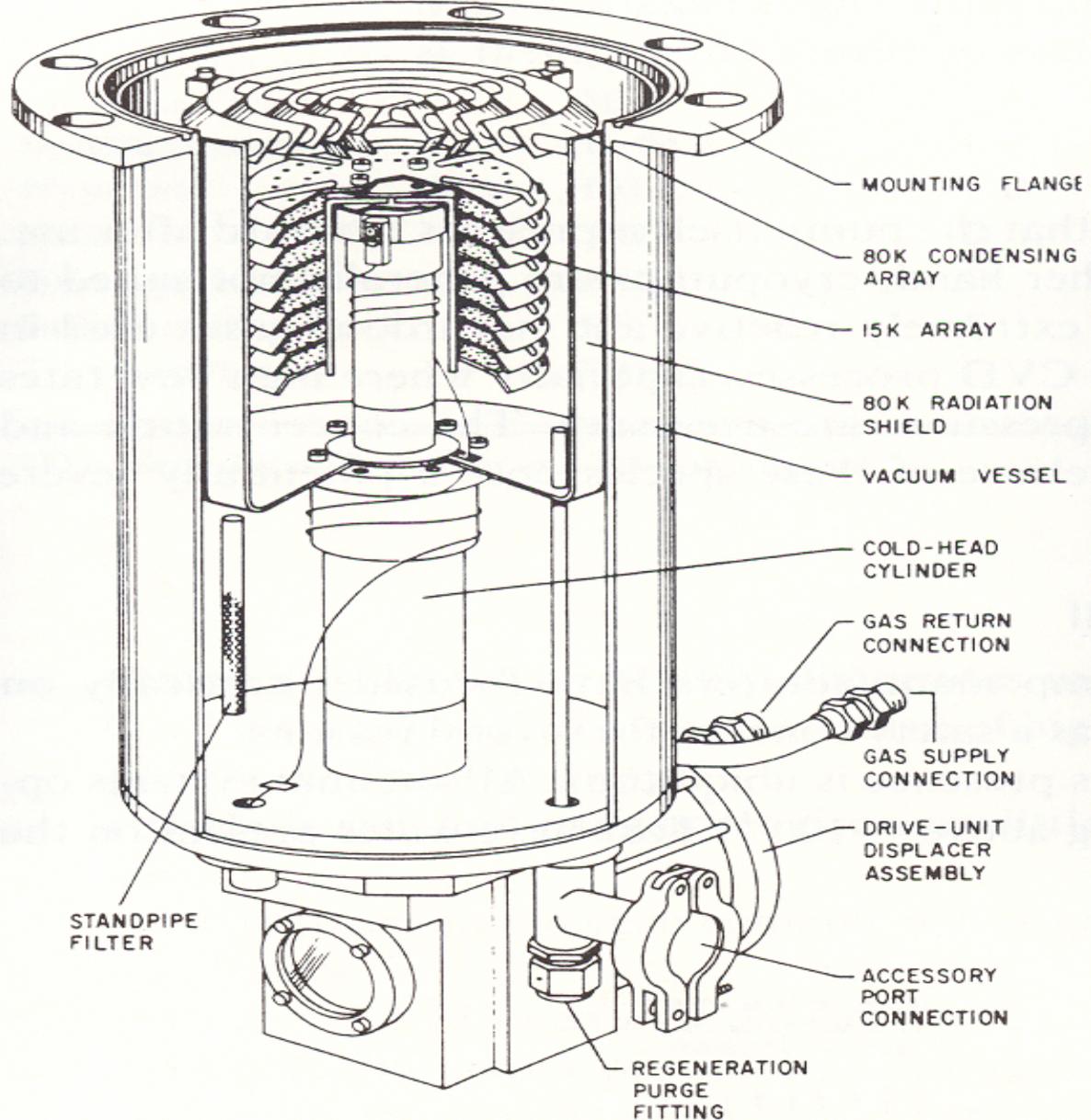
Nitrogen Pumping Speed after Saturation



Pompe cryogénique

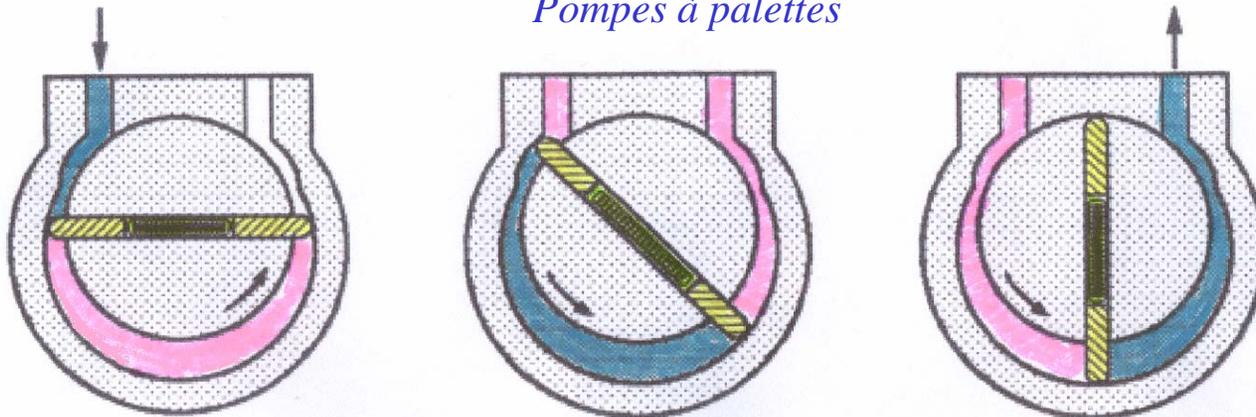


GAS FLOW FROM USER'S
VACUUM SYSTEM INTO
INLET OF CRYOPUMP

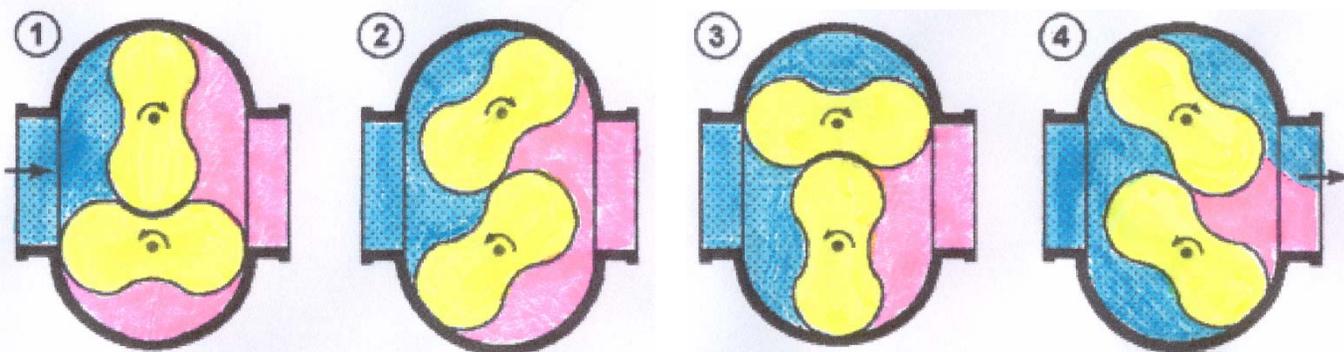


Pompes mécaniques

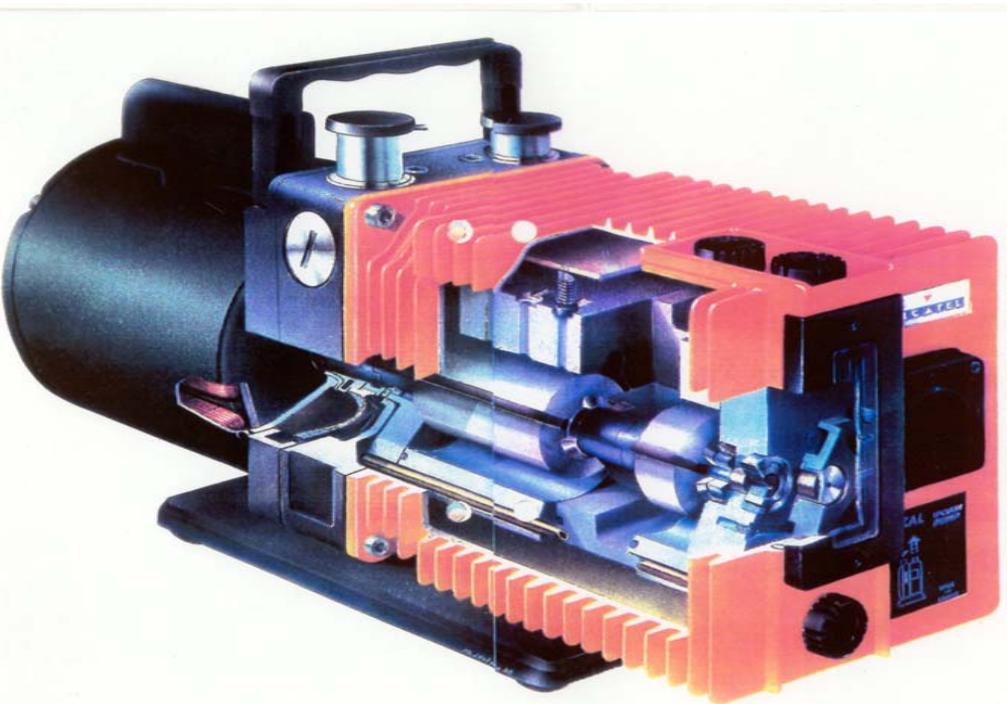
Pompes à palettes



Roots

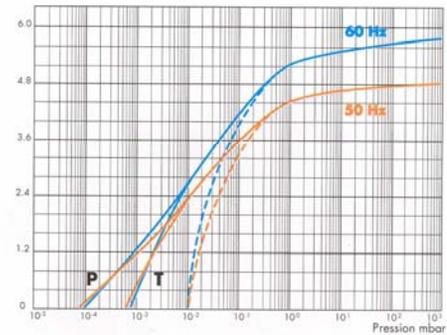


Pompe primaire à palettes



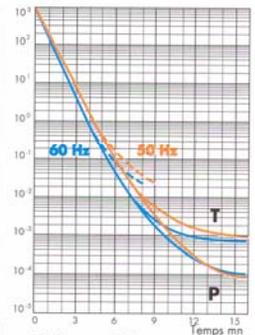
Courbe débit pression

Débit $m^3 \cdot h^{-1}$



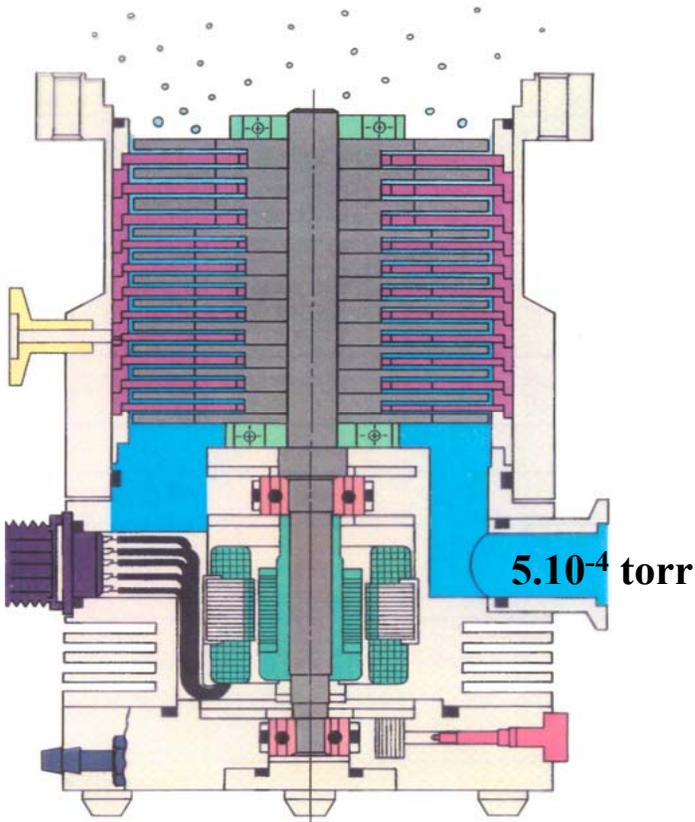
Courbe de descente en pression

Pression mbar

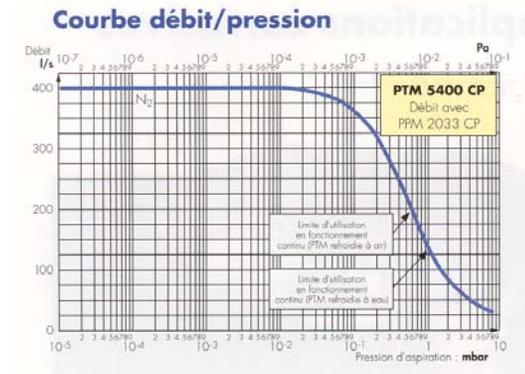
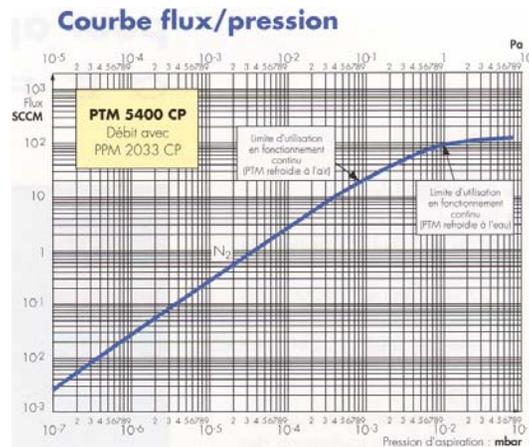
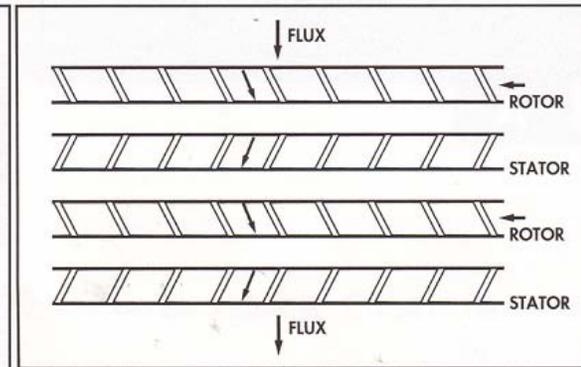
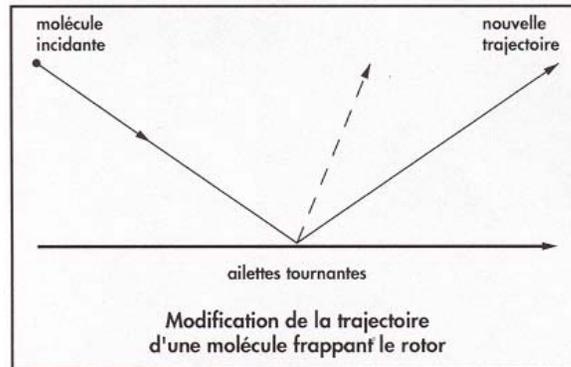


Volume : 50 litres

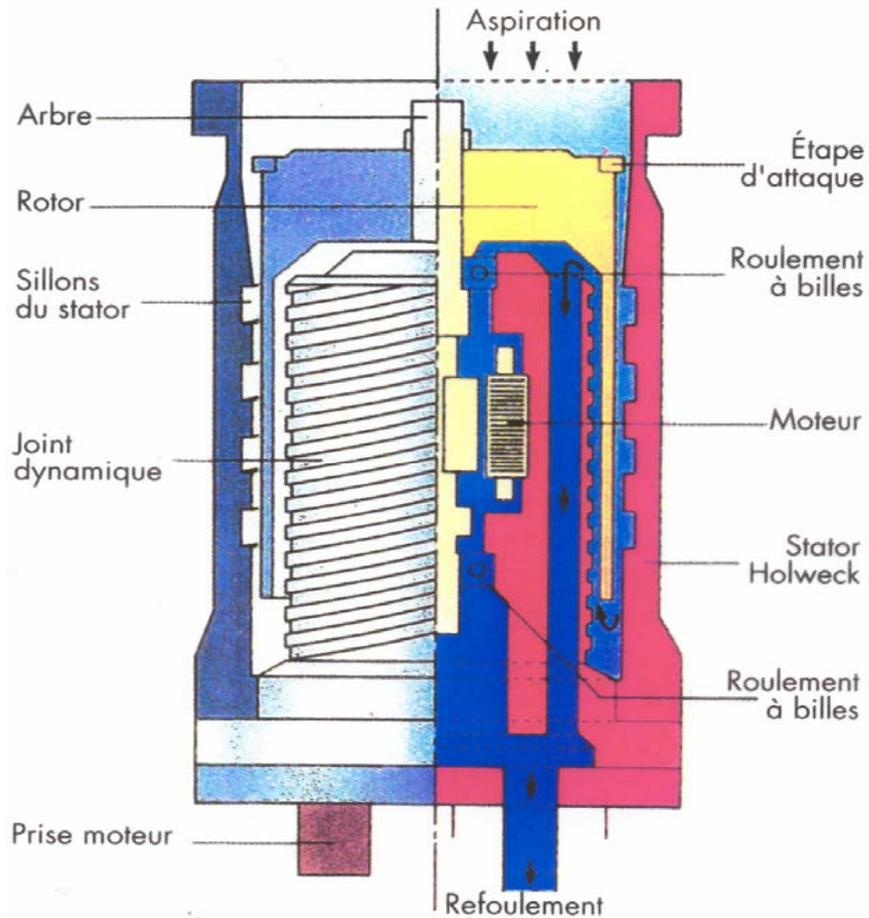
Pompe turbomoléculaire



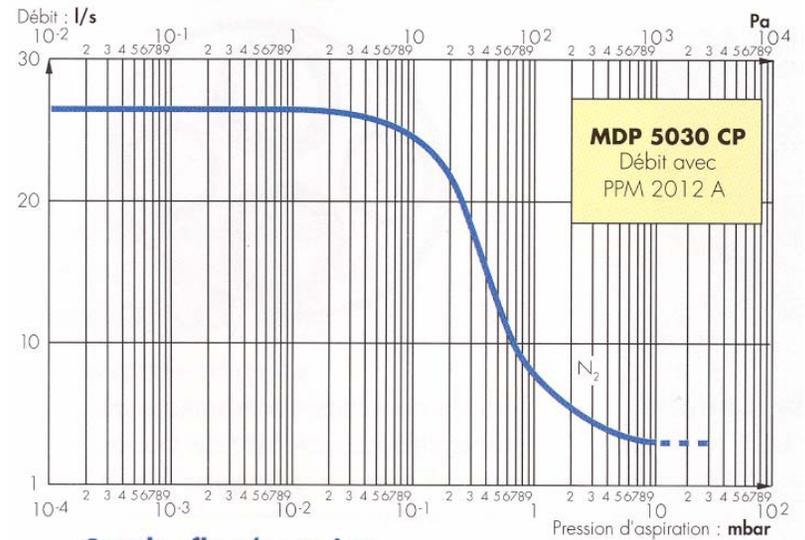
- pumped gas flow
- electrical connector
- interstage vent
- relubrication port
- water connection
- rotor
- bearings
- balancing device
- stator
- motor



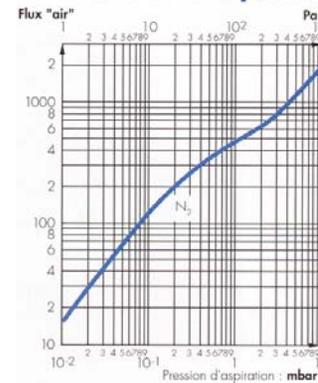
Pompe moléculaire



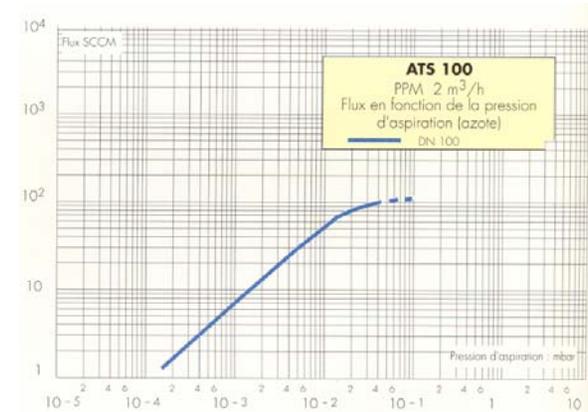
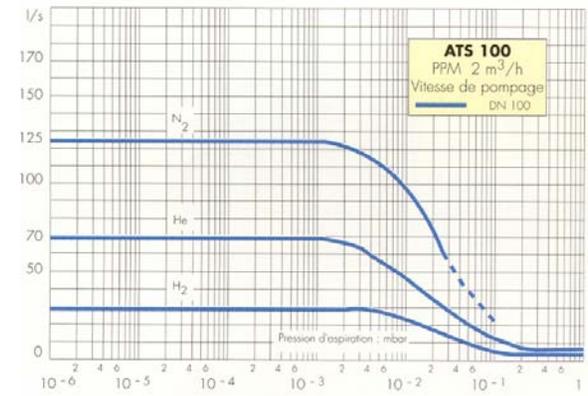
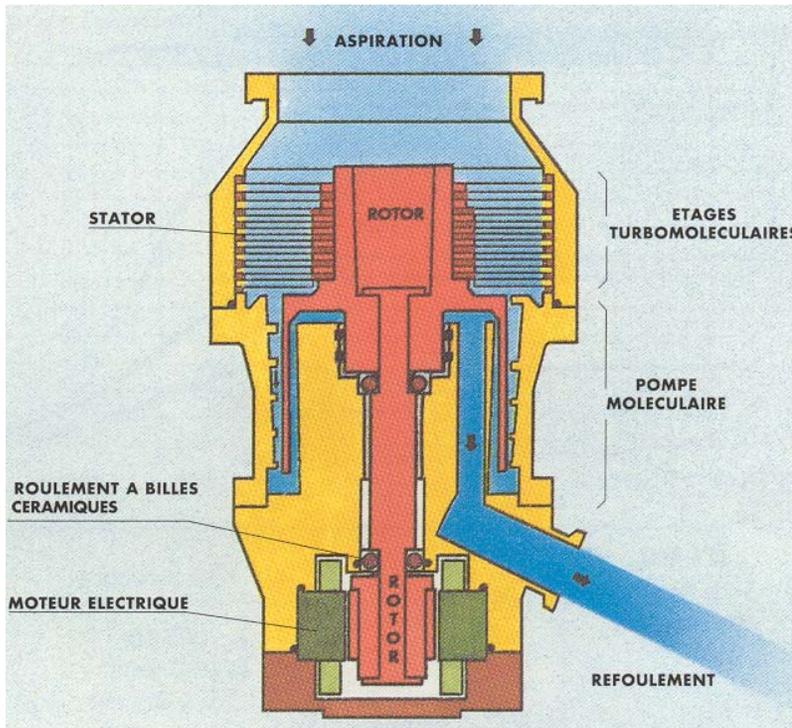
Courbe débit/pression



Courbe flux/pression

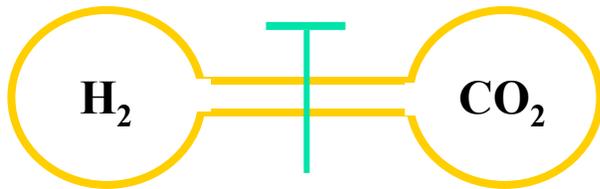


Pompe hybride



Pompe à diffusion

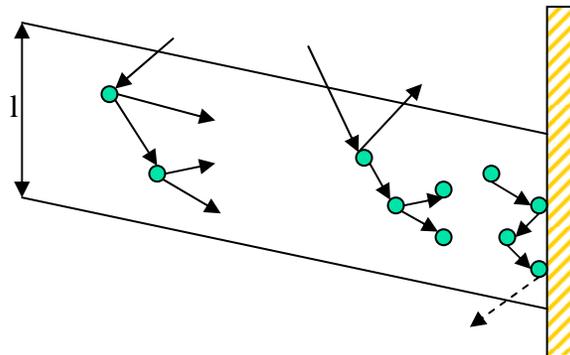
- Expérience de Berthollet



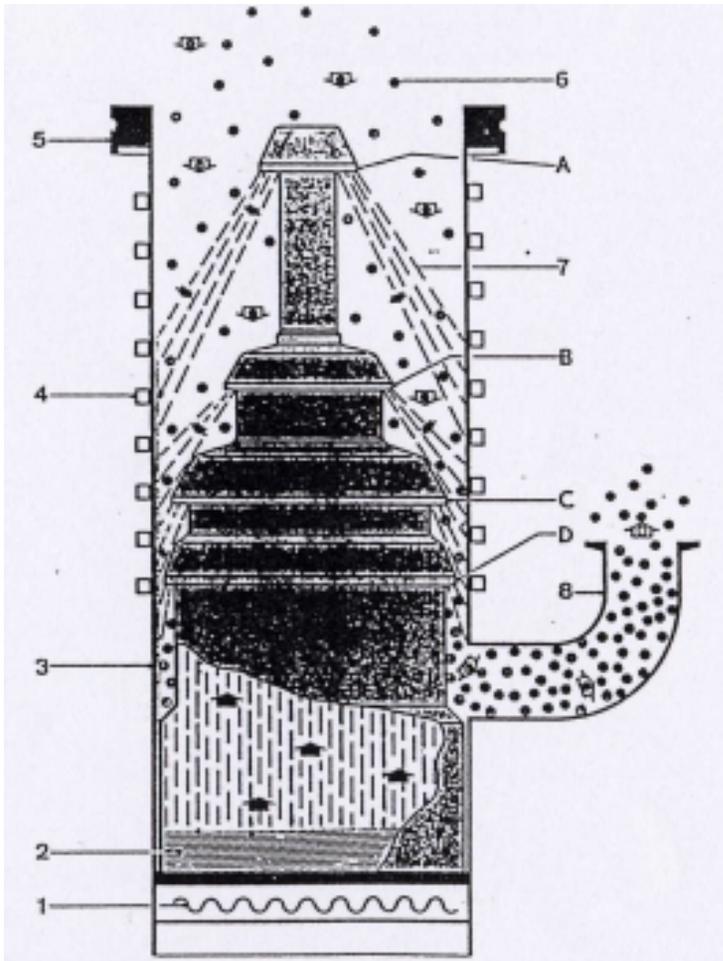
2 gaz de densité différente, mis en communication se mélange l'un à l'autre de façon isotrope.

- Hypothèse de jeans

- la direction et la vitesse moyenne des molécules d'huile de masse 17 fois plus élevée que celle de l'air ne sont pas modifiées par collision avec le gaz pompé;
- que celles du gaz pompé après collision ne dépendent pas beaucoup de leurs valeurs initiales;
- les molécules d'air sont forcées selon la direction du jet de vapeur.



Pompe à diffusion



- 1 : chauffage
- 2 : chambre d'ébullition
- 3 : corps de pompe
- 4 : serpentin de refroidissement
- 5 : bride à vide poussé
- 6 : particules de gaz
- 7 : jet de vapeur
- 8 : tubulure de vide primaire
- A, B, C, D : buses