

TECHNIQUES DE DESORPTION

introduction

la désorption de la vapeur d'eau

- ⇒ Étuvage in situ
- ⇒ Les techniques d'étuvage
- ⇒ La remise à la P_{ATM}

La désorption de l'hydrogène

- ⇒ Les traitements haute température
- ⇒ Les dépôts

Les désorptions « dynamiques »

conclusion

BRUNO MERCIER
Service Vide L.A.L
mercier@lal.in2p3.fr

La désorption de la vapeur d'eau

► Pourquoi la vapeur d'eau ?

⇒ Fort moment dipolaire,
liaison hydrogène

→ Energie de désorption importante

10 à 30 kcal/mol
15 à 25 kcal/mol (métaux)

$$4,18 \text{ kJ/mol} = 1 \text{ kcal/mol} = 0.01 \text{ ev/at}$$

⇒ Le temps de séjour

Formule de Frenkel

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\frac{E}{RT}}$$

T= température $\tau_0 \sim 10^{-13} \text{ s}$

R= Cste gaz parfait

$$20 < E < 25 \text{ kcal/mol}$$

$$80 \text{ s} < \tau < 5 \text{ jours à } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Augmentation du temps de pompage

$E < 20 \text{ kcal/mol}$ pompage facile

$E > 26 \text{ kcal/mol}$ ($\tau=28 \text{ jours}$) reste sur la surface

La désorption de la vapeur d'eau



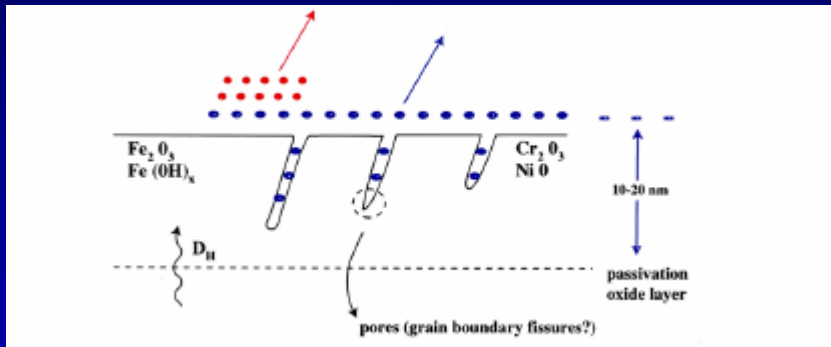
Représentation schématique la vapeur d'eau sur une surface

Molécules physisorbées

Liaisons faibles

(Liaison hydrogène (~7 Kcal/mol))

Facilement pompées



Dylla [REF. 1]

Molécules chimisorbées

Faible chimisorption

23 à 29 kcal/mol Joly et al. [REF. 2]

20 à 21 kcal/mol Chun et al. [REF. 3]

Forte chimisorption

Dissociation de la molécule d'eau

liaison groupe OH 40 à 57 kcal/mol Joly et al. [REF. 2]

Dépendance des sites d'adsorption, donc de l'état et de la nature de la surface

La désorption de la vapeur d'eau: L'étuvage in situ

Comment désorber efficacement la vapeur d'eau

- ➡ Gain d'un facteur 10 à 100 voir 1000 sur le taux de dégazage
- ➡ Gain de temps et d'argent

L'étuvage in situ des installations

L'enceinte sous vide est portée à une température de 100°C à 350 °c

Le choix de la température

En prenant $E = 25 \text{ kcal/mol}$, pour $T = 150^\circ\text{C}$ temps de séjour = 0,8 s

pour $T = 100^\circ\text{C}$ temps de séjour = 44 s

Une température de 100°C peut suffire, mais plus la température est importante, plus le temps d'étuvage peut être raccourci et son efficacité amélioré

Le choix de la température



La température max est limitée principalement par la nature des matériaux et de l'instrumentations utilisés sur l'enceinte

Exemple de l'aluminium, du viton, des matériaux à faible tension vapeur saturante, des connecteurs, des translateurs, des hublots...



Les contraintes mécaniques, de positionnement

évaluation de l'efficacité d'un étuvage

Hypothèse

Un étuvage est considéré comme efficace quand 90% de la vapeur d'eau sont éliminés

La désorption de la vapeur d'eau: L'étuvage in situ

évaluation de l'efficacité d'un étuvage

Calcul approximatif du taux de couverture θ de vapeur d'eau sur la surface

Par simplification, nous prenons l'isotherme de Langmuir, avec une énergie de désorption constante de 25 Kcal/mol:

$$\theta = \frac{A \cdot P}{B + A \cdot P} \text{ avec}$$

$$A = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k \cdot T}}$$

$$B = \frac{n_0}{\tau}$$

m = masse d'une molécule k = constante de Boltzmann

n_0 = nombre de molécules par unité de surface pour une monocouche

τ = temps de séjour

Pour une surface parfaite, pour un arrangement optimum des molécules d'eau

$$n_0 \sim 1,3 \cdot 10^{15} \text{ molécules/cm}^2 \text{ à revoir}$$

calcul de la pression à obtenir à une température d'étuvage donnée et pour $\theta=0,1$

$$P = \frac{B \cdot \theta}{A \cdot (1 - \theta)}$$

$E=25 \text{ kcal/mol}$

$T=100^\circ\text{C}$

$P=10^{-9} \text{ mbar}$

$T=120^\circ\text{C}$

$P=6 \cdot 10^{-9} \text{ mbar}$

$T=150^\circ\text{C}$

$P=6 \cdot 10^{-8} \text{ mbar}$

$T=180^\circ\text{C}$

$P=5 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}$

$T=200^\circ\text{C}$

$P=1.5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$

La désorption de la vapeur d'eau: L'étuvage in situ

évaluation de l'efficacité d'un étuvage

L'obtention de ces pressions est fonction du temps d'étuvage et donc de la capacité effective de pompage de votre installation



Difficulté de calculer le temps de dégazage car dépend de nombreux facteurs: les conditions initiales (nettoyage, humidité,..), système de pompage, conductances



Il n'est donc pas suffisant d'indiquer la durée et la température d'étuvage
Il est plus judicieux d'indiquer la température d'étuvage et la pression minimum obtenu à cette température



Difficulté de la mesure de cette pression
Jauge type Penning + cable 250°C max

La technologie d'un étuvage in situ

L'utilisation de cordons chauffants

⇒ Suivant les températures 150 à 300 W.m⁻¹

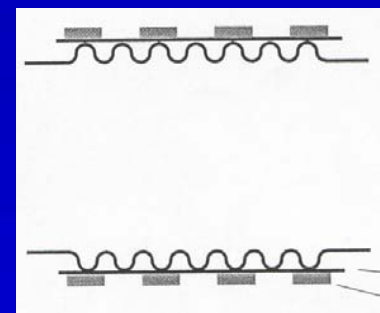
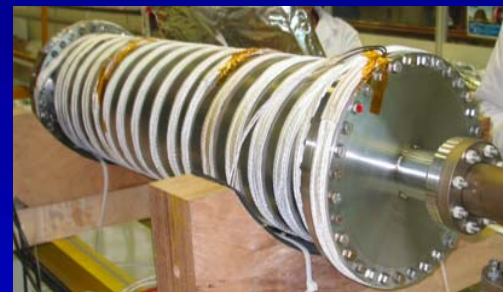
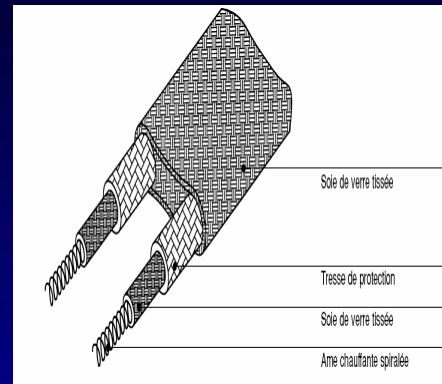
⇒ un bon contact thermique

⇒ Nature de l'isolant Attentions aux poussières (fibres de verre)
Silicone, soie de verre

⇒ Ne pas les croiser (pour éviter les court-circuit)

⇒ Ne pas les enrouler directement sur des soufflets, sur les céramiques

Mauvais transfert thermique , création de points chauds



Cordons chauffants

Feuille métallique mince 0,1 mm

La technologie d'un étuvage in situ

Une bonne isolation extérieur

- ⇒ Réduit la puissance à fournir
- ⇒ Protection de l'instrumentation extérieure
- ⇒ Homogénéisation de la température sur toutes les surfaces de l'enceinte

Utilisation de feuilles d'aluminium, si nécessaire des couvertures ou des rubans isolants + les feuilles alu

La montée en température

- ⇒ Une bonne fixation des thermocouples pour un bon contact (ruban adhésif haute température, bridage mécanique,...) aux endroits les plus sensibles.
- ⇒ La montée en température avec un régulateur doit être de l'ordre 1°C/min

La technologie d'un étuvage in situ

Attention au vide limite du système de pompage

- ⇒ En règle générale, utilisation de pompes turbo moléculaires (PTM)
- ⇒ Connaissance de son vide limite (dépend de nombreux paramètres)
- ⇒ Il peut être nécessaire d'étuver la PTM (< 120°C- voir données du constructeur) + la connectique entre la PTM et l'enceinte

Étuver toutes les surfaces de l'enceinte

- ⇒ Quelque % de surfaces non étuvées ou étuvées à trop basse température limite l'efficacité de l'étuvage

Pompage turbo moléculaire



Étuvage d'un banc d'essai au LAL

La technologie d'un étuvage in situ

Les autres technologies

➔ Jaquettes d'étuvage pour matériels standards (vannes, brides, pompes ioniques, pompes turbo ...)



Jaquettes d'étuvage



➔ Jaquette sur mesure ou étuve
Coût important, valable pour des géométries complexes avec des démontages fréquents

➔ Les lampes d'étuvage UHV

Élégant mais va dépendre de la géométrie de l'installation

Infra-rouge 1200 W halogène 500 W

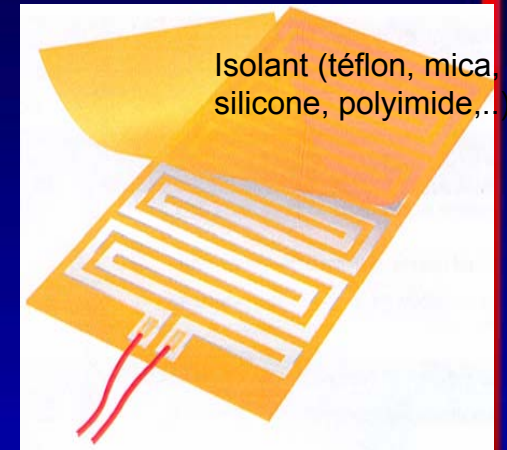


Photos étuve coupleurs LAL

La technologie d'un étuvage in situ

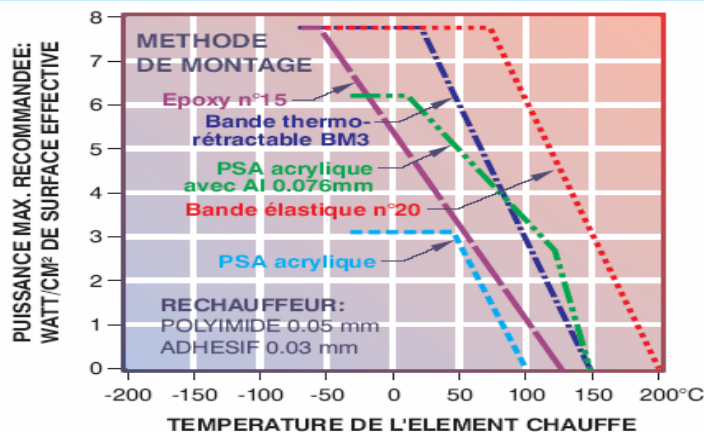
Système d'étuvage de faible épaisseur

- ➔ Application pour les Chambres d'aimant, d'onduleur sur les accélérateurs (faible perméabilité magnétique, résistance aux rayonnement)
- ➔ flexible et fin environ 0.25 mm
- ➔ Nécessité d'avoir un bon contact thermique
Colle acrylique, époxy, laminage, vulcanisation,...



Réchauffeur laminaire

Densité de puissance maximum, réchauffeurs polyimide



Exemple: A 50°C, la puissance maximale pour un réchauffeur monté avec du PSA acrylique est 2.8 W/cm².

Problème de densité de puissance pour des $T > 180^\circ\text{C}$

La technologie d'un étuvage in situ

Système d'étuvage de faible épaisseur

Le système développé par le CERN

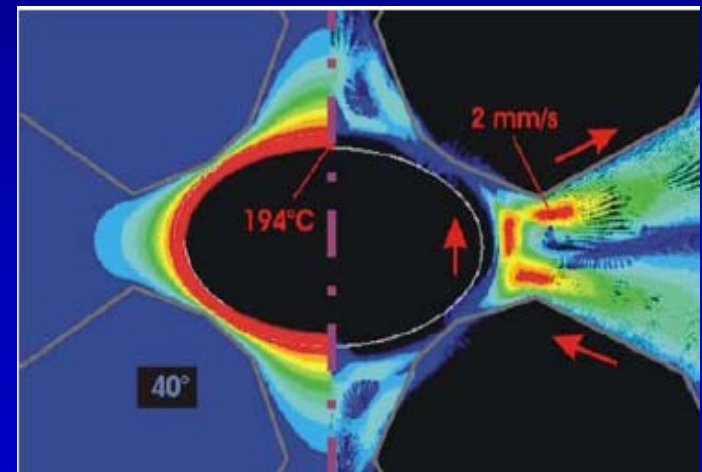
[Ref. 4] C. Rathjen et al

Température > 200°C épaisseur 0.3 mm sur des longueurs de plusieurs mètres

Résistance aux rayonnements (5 Mgray)

[Ref. 5] S. Blanchard et al

- ➡ 2 Bandes de polyimide (Kapton) 60 μm avec à chaque face un dépôt de 5 μm de kapton non polymérisé
- ➡ Éléments chauffants bande d'inox de 50 μm et de 5mm de large
- ➡ Couche d'isolant identique à la première étape
- ➡ 1 Bande Kapton 50 μm dont une face avec un dépôt d'aluminium



Distribution de la température (à droite) et vitesse de convection (à gauche) sur un quadripôle MQW pour 523 W/m

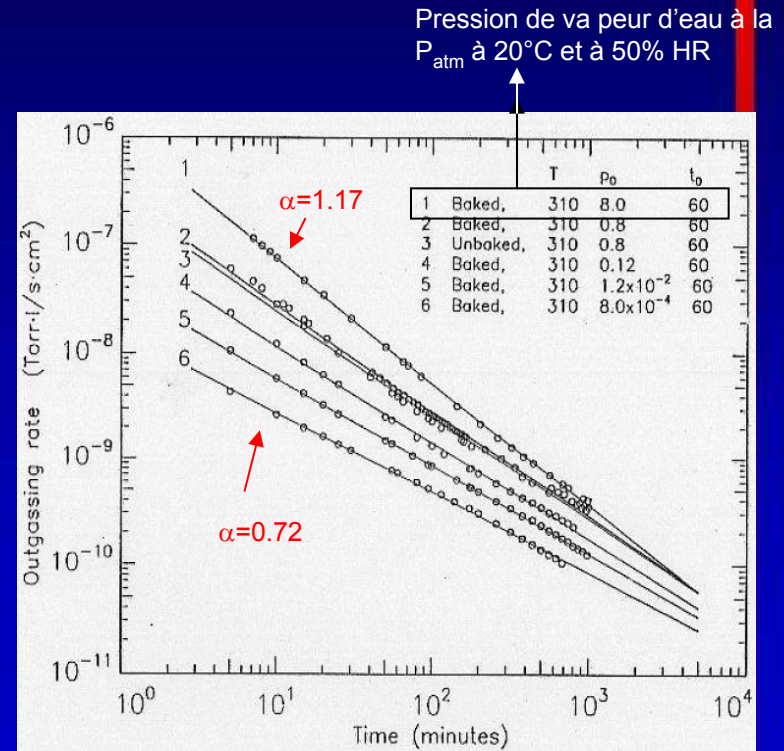
Comment minimiser l'adsorption d'eau après une remise à la PA

Le taux de dégazage et donc le temps de pompage sont fonction du temps et de la pression d'exposition à la vapeur d'eau

Le taux de dégazage $q_d = q_0 \cdot t^{-\alpha}$

⇒ Une remise à l'air équivaut à perdre le bénéfice de son étuvage $\alpha \sim 1$

⇒ Avec $P_0 = 10^{-3}$ mbar H_2O , une partie de l'étuvage est perdue $\alpha \sim 0.72$



Taux de dégazage de l'inox en fonction du temps t₀ (min) et de la pression P₀ (Torr) d'exposition à la vapeur d'eau

Comment minimiser l'adsorption d'eau après une remise à la PA

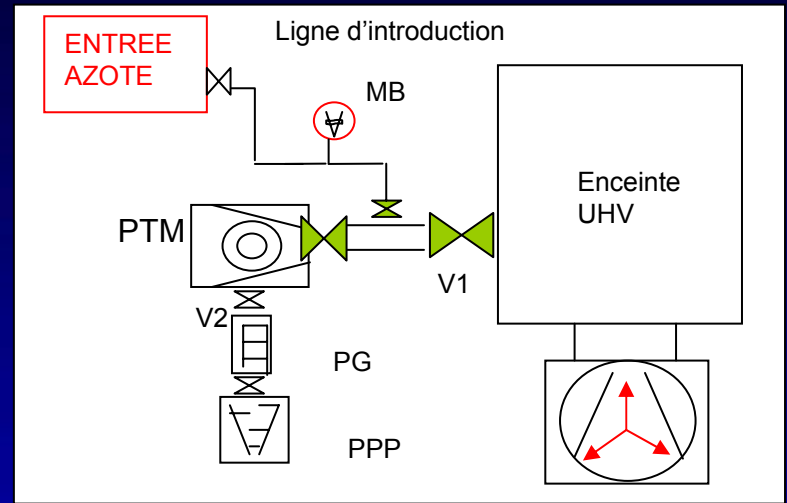
Les entrées d'azote

➡ Bouteille d'azote HP (99,996%)

Pour une P_{atm} d'azote, $P_{H_2O} \sim 10^{-3}$ mbar

➡ Dewar d'azote liquide (< 3 ppm mole H_2O)

Pureté plus importante mais un approvisionnement compliqué et un coût important



Attention à la P_{H_2O} dans la ligne d'introduction, un pompage Turbo moléculaire (PTM) est nécessaire

Chun et al. [REF. 3]

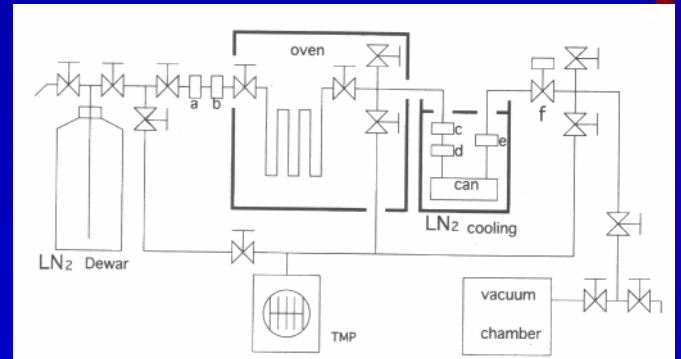


FIG. 2. An extremely dry nitrogen venting system. Two prefilters (a) 90 μm , (b) 60 μm ; three main-filters (c) 7 μm , (d) 2 μm , (e) 0.5 μm ; and (f) a needle valve are involved.

Système de remise à la P_{ATM} complexe

Étuvage de la ligne d'introduction

Filtre à particules

Comment minimiser l'adsorption d'eau après une remise à la PA

Une entrée d'azote est nécessaire mais son efficacité est bien sur fonction du temps d'ouverture à la P_{atm} de l'installation.

L'ordre de grandeur

➡ Application de la 2^{ème} loi de Fick: (approximations: cas du solide semi infini, P_{H_2O} nulle dans l'enceinte, coeff. de diffusion constant,..)

$$P(x,t) = P_0 \cdot \left(1 - \text{ferr}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \right)$$

$$\text{ferr}(y) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^y e^{-t^2} dt$$

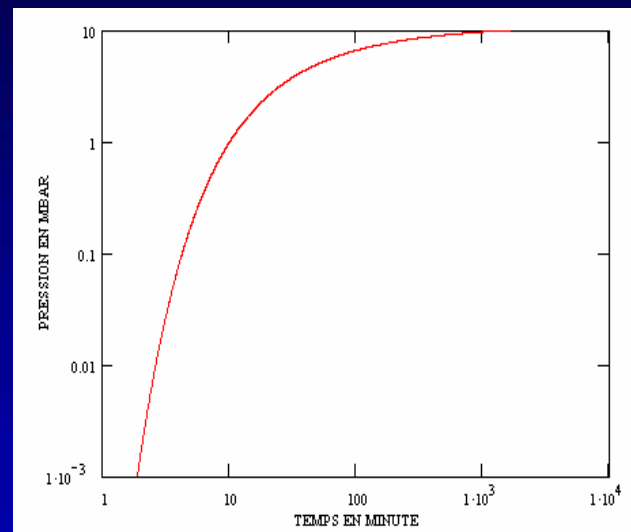
Coeff. de diffusion de H2O dans l'air à 25°C $D = 2,56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Minimiser si possible la durée d'intervention

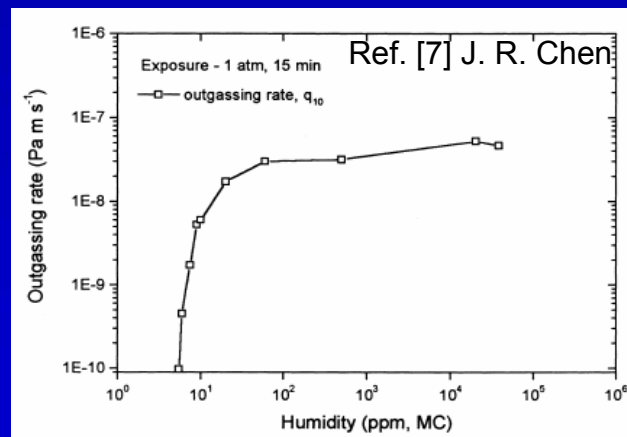
➡ C'est aussi diminuer les poussières, les hydrocarbures,...

➡ Protection des ouvertures avec du papier alu dès que possible.

Diminuer le taux d'humidité



Évolution de la pression H₂O à la distance x=30 cm



La désorption de l'hydrogène

Nécessaire pour obtenir des pressions dans l'UHV XHV

Pourquoi l'hydrogène

- ⇒ Une quantité importante est dissoute dans les matériaux lors de leur élaboration
Concentration comprise pour l'inox $80 < C_0 < 300 \text{ mbar.m}^3 \text{ (gaz)/m}^3 \text{ (matière)}$
- ⇒ Dans l'UHV, la diffusion de cet hydrogène est la seule source de gaz

Principalement deux manières d'y remédier



Créer une barrière de diffusion



Diminution la quantité dissoute dans le matériau

La désorption de l'hydrogène: Diminution de H2

modèle de diffusion H₂

Le coefficient de diffusion de l'hydrogène

$$D(T) = D_0 \cdot e^{-\frac{E_d}{R \cdot T}}$$

Application de la 2^{ème} loi de Fick (cas du solide d'épaisseur L, D constant par rapport à x, Concentration C₀ supposée constante, P_{H2} nulle à l'extérieur)

$$C(x,t) = \frac{4 \cdot C_0}{\pi} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot D(T) \cdot t}{L^2} \cdot \sin(\frac{\pi \cdot x}{L})}$$

Temps nécessaire pour éliminer 98% H₂ pour une épaisseur d'2mm d'inox avec C₀=145 mbar.m³/ m³

E_d=54 kJ/mol

D₀~6.510⁻⁷ m²/s

à 20°C 342 ans à 900°C 11 min

à 400°C 12 heures

Application de la 1^{ère} loi de Fick

$$q(t,x) = -D(T) \cdot \frac{dC(x,t)}{dx}$$

Avec L << (D(T).t)^{1/2} ou F0=D(T).t / L² > 0.05

Taux de dégazage obtenu à la Température T_a après un étuvage à la température T et un temps d'étuvage t

$$q(t) = \frac{4 \cdot D(T_a)}{L} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot D(T) \cdot t}{L^2}}$$

Limite du modèle

Prendre en compte les conditions aux limites, les effets de recombinaison de H P_{H2}(x=0,x=L) ≠ 0

La désorption de l'hydrogène: Diminution de H2

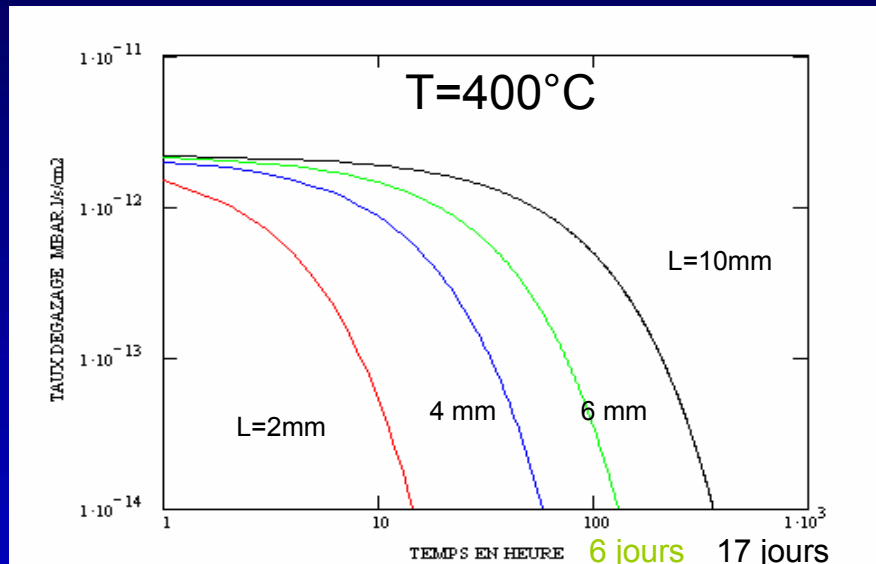
Par un étuvage in situ:

Application (inox): Pour L=2mm T=200°C
 Pour L=4mm T=200°C

$q(\text{H}_2) = 10^{-14} \text{ mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ à 20°C
 $q(\text{H}_2) = 10^{-14} \text{ mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ à 20°C

t = 41 jours

t = 5 mois



Attention à la solubilité de L'hydrogène à haute température

Quantité H_2 ($\text{mbar m}^3/\text{m}^3$) dissoute pour une pression extérieure d'hydrogène P (mbar) pour l'inox

Loi de Sievert

$$C_s = 3000 \cdot \sqrt{P} \cdot e^{-\frac{E_{ds}}{R \cdot T}}$$

$E_{ds} = 11,1 \text{ kJ/mol}$

Difficulté de déterminer cette pression à haute température

Catalyse de l'inox sur l'eau (dissociation)

La désorption de l'hydrogène: Diminution de H₂

Taux de dégazage limite à T_a due à l'hydrogène dissous à T

À l'équilibre

$$q_s = D(T_a) \cdot \frac{C_s}{L}$$

Pour T=400°C P=10⁻³ bar T_a=20°C
,L=2mm

Dégazage limite H₂ $q_s \sim 10^{-13}$ mbar.l/s/cm²

→ Un étuvage in situ pour éliminer l'hydrogène du matériaux est peu efficace, même à des températures de 400°C pour l'inox.

→ pour le cuivre OFE, un étuvage in situ à 200 (20 h) suffit pour diminuer H₂

Car la Concentration C₀ et la température de déoxydation sont faibles

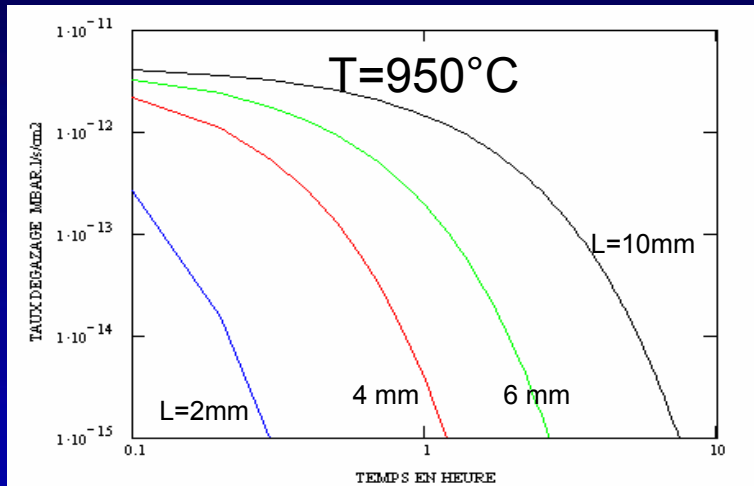
E~9 kcal/mol

Taux de dégazage H₂ $q_s \sim 10^{-14}$ à 10^{-15} mbar.l/s/cm²

La désorption de l'hydrogène: Diminution de H2

Par un étuvage haute température sous four sous vide

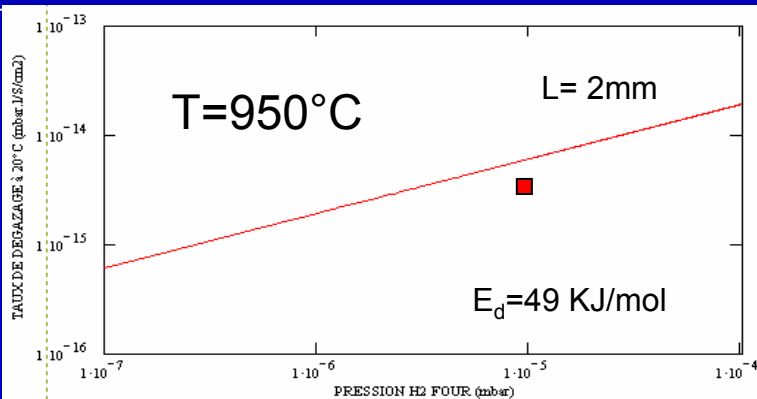
Température de 400°C à 1000°C pour l'inox



Attention à la solubilité de l'hydrogène à haute température



Le taux de dégazage limite va dépendre de la pression du four à la température d'étuvage



En général, traitement Inox à 950°C pendant 2H à P=10⁻⁵ mbar + étuvage in situ

q(H₂)~10⁻¹⁴ à 10⁻¹⁵ mbar.l.s⁻¹.cm⁻² 21

La désorption de l'hydrogène: Diminution de H₂

➔ Attention aux modifications structurales de l'inox

Peu de modification sur la dureté du métal, la surface est enrichie en Fe (évaporation du Cr)

Augmentation de la rugosité R_a d'un facteur 2 pour l'inox 304L



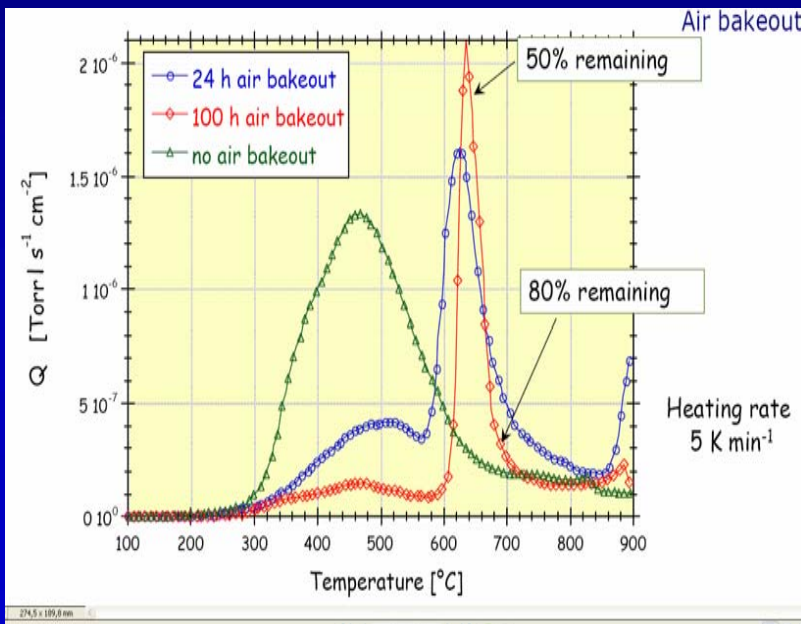
A la remise à la pression atmosphérique, le matériau conserve la « mémoire » de ce traitement haute température car le coefficient de diffusion de l'hydrogène est faible à la T° ambiante.

La désorption de l'hydrogène: barrière de diffusion

Dépôt d'un matériau de faible perméation à l'hydrogène

Étuvage à l'air

Pour l'inox un étuvage à l'air à environ 450°C pendant 48h /100h



Désorption thermique d'inox 316 LN
Ref[8]. P. Chiggiatto

⇒ C'est bien une barrière à la diffusion

- Energie de diffusion plus importante
- Augmentation de l'épaisseur de l'oxyde
~X 10 de l'oxyde

Surface enrichie en fer, Ra identique

La désorption de l'hydrogène: barrière de diffusion

Étuvage à l'air

Taux de dégazage mesuré (identique à l'étuvage au four sous vide)

$$q(\text{H}_2) \sim 10^{-14} \text{ à } 10^{-15} \text{ mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$$

⇒ Exemple de Virgo: Chambre de $L=8\text{m}$ $\Phi=1,2\text{ m}$

Étuvage à l'air 450°C pendant 32h suivie d'un
étuvage in situ à 150°C de 7 jours

$$q(\text{H}_2) \sim 10^{-14} \text{ mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$$

Ref[9] Marin et all

Ref[10] V. Brisson et all

taux très faibles obtenus avec une réduction du coût très importante

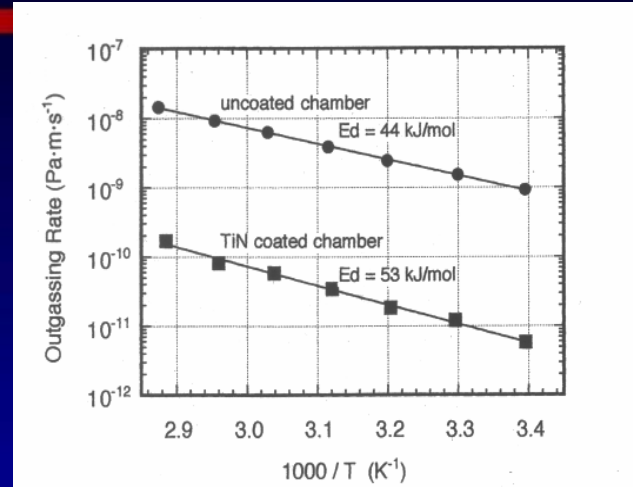
La désorption de l'hydrogène: barrière de diffusion

Dépôt de TiN, Al₂O₃, ZrO₂,...

Exemple du dépôt de TIN > 1 μm

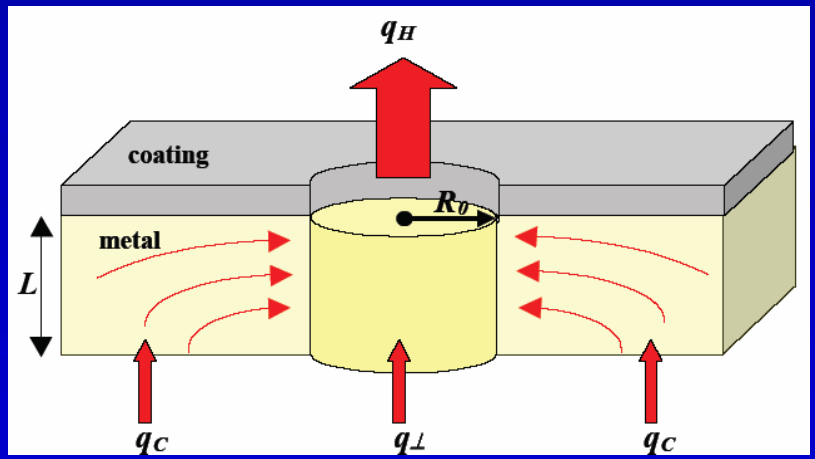
Energie de diffusion plus importante

Ref[11] Saito et al.



1 Pa.m.s⁻¹ = 10⁻³ mbar.l.s⁻¹.cm⁻²

Cependant, généralement, les résultats expérimentaux donnent des taux de dégazage plus important que prévu.



Hypothèse avancée :Défaut dans le dépôt (dépôt non continu dû aux poussières)

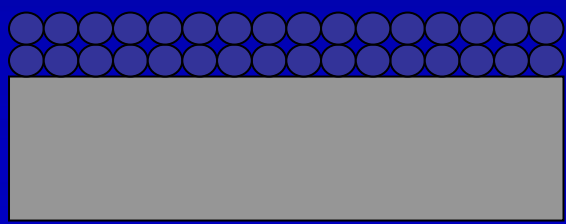
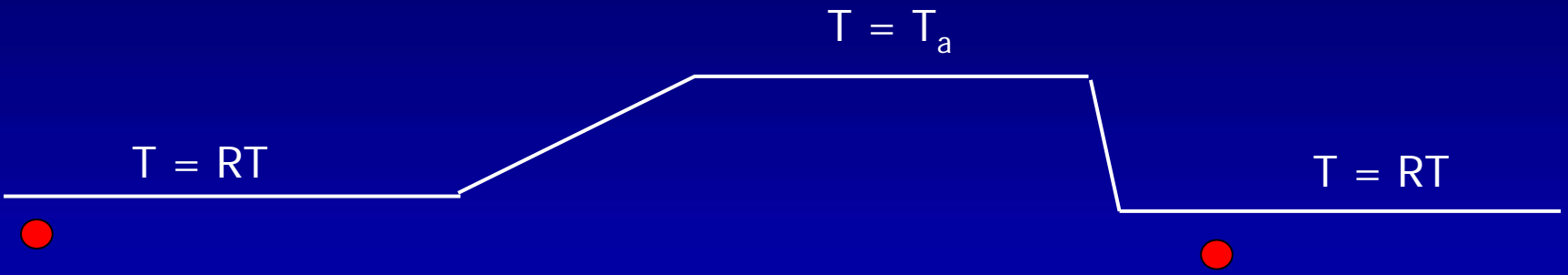
La désorption de l'hydrogène: barrière active

le dépôt NEG (getter non évaporable) Ti-Zr-V

Une barrière active \longrightarrow Action de pompage

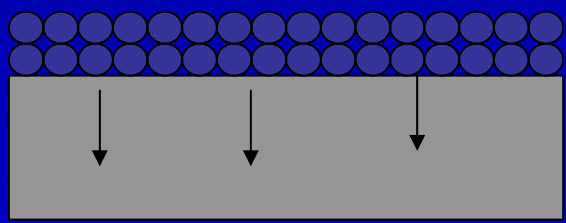
- Température d'activation faible $T_a=180^\circ\text{C}$

Les parois des chambres deviennent des pompes !!!!!!!

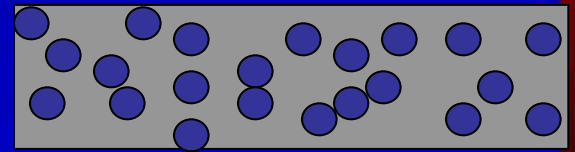


Native oxide layer

No pumping



Heating in vacuum
Oxide dissolution -> activation



Reactive metallic surface

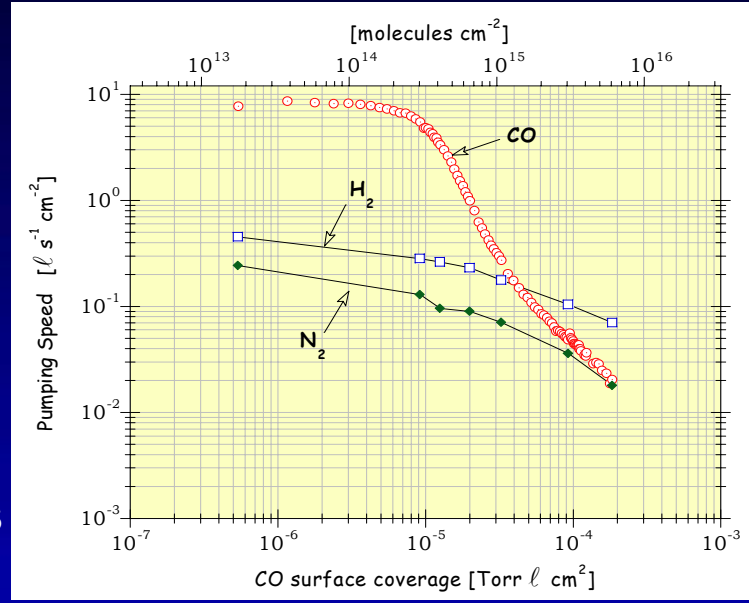
Pumping

La désorption de l'hydrogène: barrière active

le dépôt NEG sur Cu, Inox, Alu, ...

- ⇒ Vitesse sélective
- ⇒ Effet de saturation rapide
De l'ordre de la monocouches
- ⇒ Fonctionnement à des pressions faibles
- ⇒ Une dizaine d'activations est possible
(avant que les vitesses de pompage diminuent)
- ⇒ Cependant même après saturation, le taux de dégazage reste faible

$$q(\text{H}_2) \sim 10^{-15} \text{ mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$$

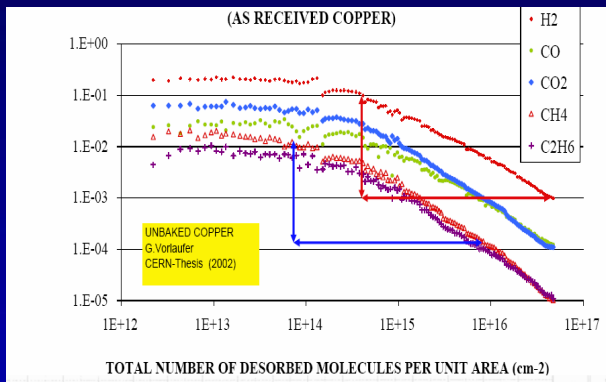


Les désorptions « dynamiques »

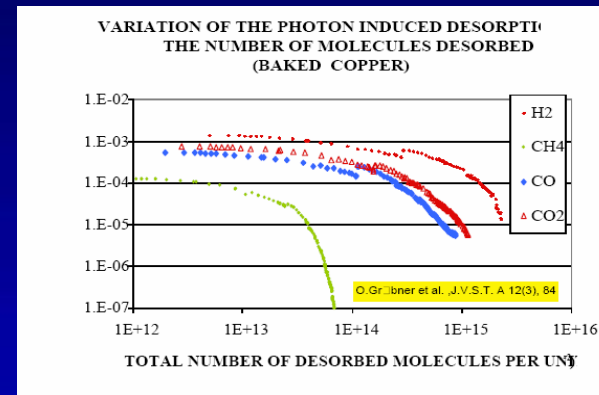
La désorption par bombardement électronique, photonique et ionique

Conditionnement des surfaces en fonction de la dose reçue
Application sur les accélérateurs, les synchrotrons

Désorption par bombardement électronique



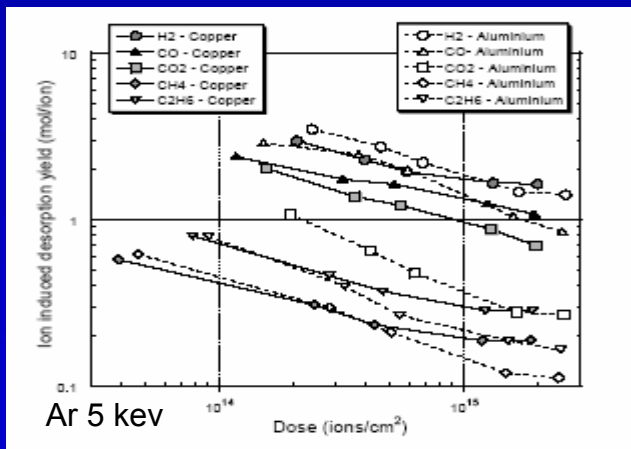
Désorption par bombardement photonique



00 eV

3,75 KeV

Désorption par bombardement ionique



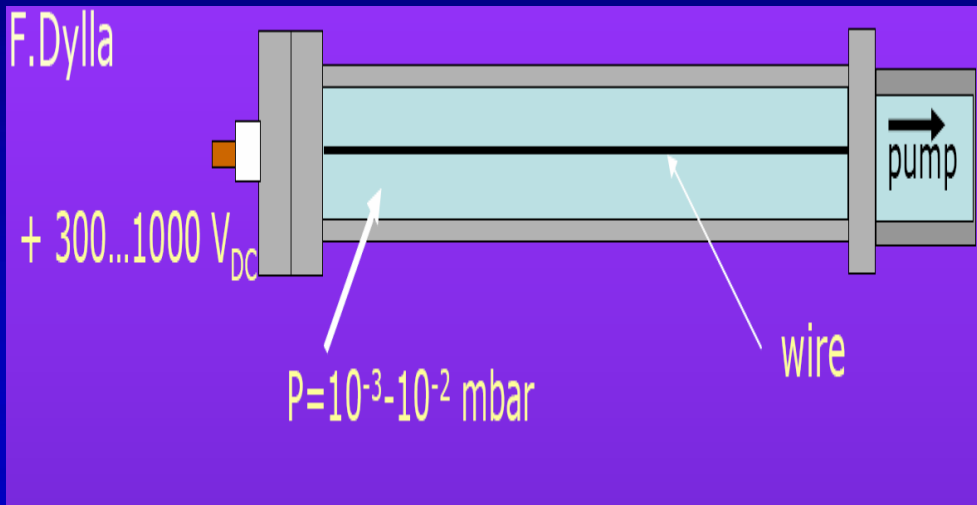
Ref[12] N. Hilleret

ce taux de désorption dépend de la nature du bombardement, de son énergie, de son angle incident, de la nature du matériaux et de ses traitements thermiques

Les désorptions « dynamiques »

- ➔ En général, le taux de désorption est plus élevé par bombardement ionique.
- ➔ les projectiles de masse plus importante vont pouvoir déposer une plus grande énergie sur le matériaux

la désorption ionique par plasma froid (glow discharge)



Injection d'un gaz neutre en flux continu

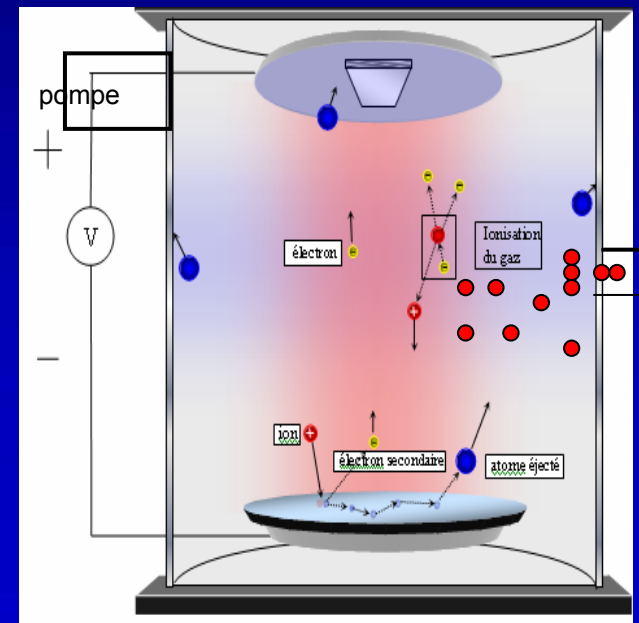


Schéma de principe

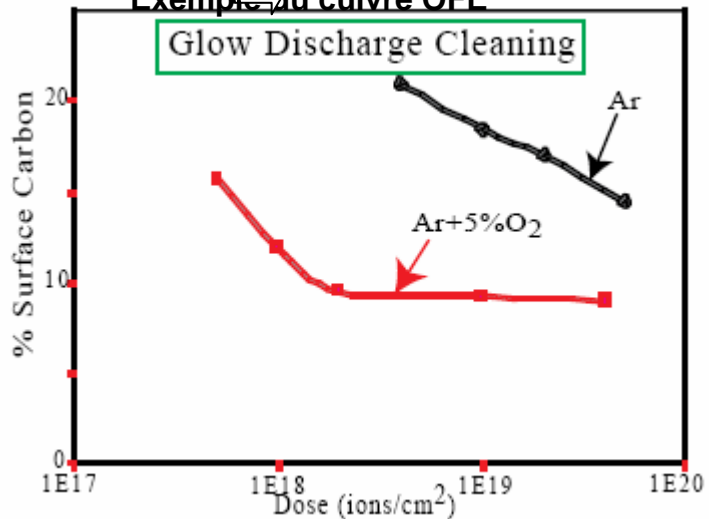
Une simple décharge en continu est en générale utilisée (plus complexe mais possibilité d'une décharge RF)

Les désorptions « dynamiques »

Les gaz utilisés: Ar, O₂, Ne, N₂, He...

Principalement de l'Ar + 5 à 10% O₂

Exemple du cuivre OFE



➔ Plus efficace pour diminuer le carbone de la surface

Réaction de l'oxygène avec le carbone

Donne des composés volatiles CO, CO₂ ..
+ finalement passivation de la surface

➔ Attention à l'implantation des ions

Dégazage important

Diminution de la durée de vie faisceau ~Z²

➔ risque de dépôt sur les matériaux isolants,

Surface Treatment XPS Surface Atom %

Surface Treatment	Cu	O	N	C	Cl	Ar
Chem cleaned (old recipe)	22.4	22.5	11.9	41.6	1.6	-
Chem cleaned (optimized)	43.4	36.8	-	17.9	1.9	-
GDC (2e19 ions/cm ²)	50.6	40.0	-	8.0	-	1.4
5% O ₂ -Ar in beam chamber	48.6	42.0	-	8.0	-	1.4
GDC (2e18 ions/cm ²)	48.6	42.0	-	8.0	-	1.4
5% O ₂ -Ar in beam chamber	64.2	23.6	-	12.2	-	-
GDC (2e18 ions/cm ²)	64.2	23.6	-	12.2	-	-
Pure H ₂ in test chamber	-	-	-	-	-	-

Diminution de ce problème en maintenant à ~200°C l'enceinte ou un étuvage après traitement Ou Plasma avec du gaz plus léger H, He

- ⇒ Ce traitement permet d'abaisser la teneur en carbone de la surface cependant son incidence (impact) sur les taux de dégazage de la vapeur d'eau semble réduit.
Ref.[14, 15] K. Akaishi et all
Ref.[16] H F. Dylla and all
- ⇒ Le taux de dégazage est limité par la désorption du gaz de décharge implanté dans la surface des chambres
- ⇒ Ce traitement est surtout utilisé aussi comme un substitut aux décapages par les acides. Il est efficace, peu polluant, de coût modeste mais limité à des chambres simples.

Conclusion



Un étuvage in situ à 150-200°C permet d'éliminer H₂O et d'obtenir des taux de dégazage de l'ordre de 10⁻¹² mbar.l.s⁻¹.cm⁻² (H₂) et donc ce traitement permet de descendre rapidement dans l'UHV (~10⁻⁹ mbar avec un rapport surface dégazante/ capacité de pompage effective raisonnable A/s=1000)
Chaque remise à la Patm, recontamination des surfaces en vapeur d'eau



Un étuvage Haute température (four sous vide ou air) ou certain dépôt permettent d'éliminer ou de bloquer l'hydrogène absorbé par les matériaux

Ce traitement + un étuvage in situ permet d'obtenir des taux de dégazage très faible de l'ordre de 10⁻¹⁴ mbar.l.s⁻¹.cm⁻² (H₂) voir une décade inférieur.

Cela peut permet de descendre rapidement dans l'UHV-XHV (~10⁻¹¹ mbar avec un rapport A/s = 1000)

A Chaque remise à la Patm, le bénéfice de ce traitement est préservé.



Attention aux dégazages dynamiques :La Désorption stimulée par électrons, ions et photons est un phénomène parasite pour les accélérateurs mais à fort débit de dose, elle conditionne les surfaces

Les références

- Ref.1 « Water outgassing » F. Dylla Cern Accelerator School CAS2006
- Ref.2 « Temperature programmed desorption (TDS) of water from iron, chromium, nickel and 304L stainless steel » J. P. Joly and all, Vacuum 59 854 (2000)
- Ref.3 « Water adsorption-desorption on aluminum surface » J. R. Chen and all, Applied Surface Science 169-170 (2001)
- Ref.4 « Ultraphin polyimide-stainless steel heater for vacuum system bake-out » C. Rathjen et al, PAC2005
- Ref.5 « Thin heaters and thermal insulation for temperatures up to 300°C in a radioactive environment » C. Blanchard et al, AT-VAC/GS Vacuum Technical Note 03-02 CERN
- Ref.6 « model of outgassing from metal surfaces. II » Minxu Li and H. F. Dylla, JVSTA 12(4) 1994
- Ref.7 « Water adsorption-desorption on aluminum surface » J. R. Chen and all, Applied Surface Science 169-170 (2001)
- Ref.8 « Thermal outgassing » P. Chiggiato Cern Accelerator School CAS2006
- Ref.9 « Outgassing performance of an industrial prototype tube for the Virgo antenna » P. Marin and all, Vacuum 49 309 (1998)
- Ref.10 « Ultra-high vacuum qualification of the prototype module for the 2x3 Km arms of the Virgo interferometer » V. Brisson and all, Vacuum 60, 9 (2001)
- Ref.11 « TIN thin film on stainless steel for extremely high vacuum material » K. Saito and all, JVSTA 13(3) (1995)
- Ref.12 «Non- Thermal outgassing » N. Hileret Cern Accelerator School CAS2006
- Ref.13 « Processing of OFE copper beam chamber for PEP-II » E. Hoyt and all, IEEE (1996)
- Ref.14 «Production of UHV by He glow discharge cleaning in an unbaked vacuum chamber » K. Akaishi and all, Vacuum 48, 767 (1997)

Les références

- Ref.15 «reduction of water outgassing and UHV production in an unbaked vacuum chamber bi Neon gas discharge» K. Akaishi and all, Vacuum 53, 285-289 (1999)
- Ref.16 « Correlation of outgassing of stainless steel and aluminum with various surface treatments » H. F. Dylla and all, JVSTA 11(5) (1993)

Merci pour votre attention