
Caractérisations optiques et électriques d'un plasma de chlore haute densité et effets des interactions plasma/surface en gravure silicium

François NEUILLY

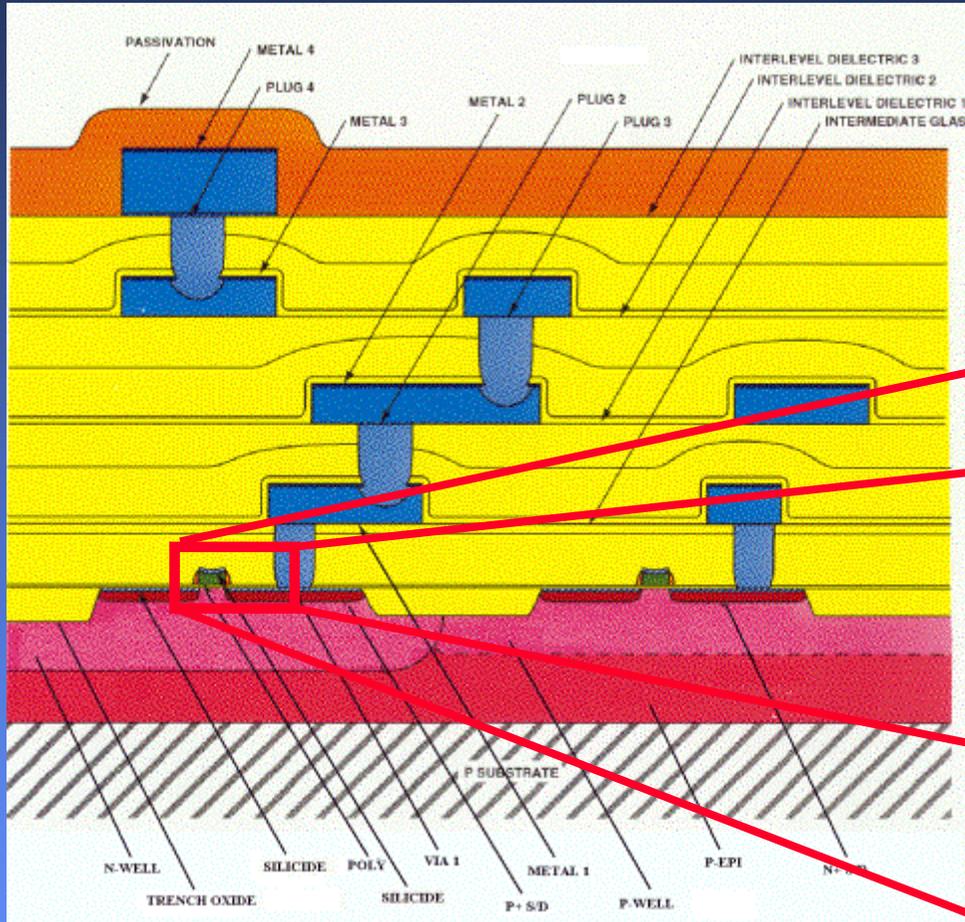
France Télécom R&D, Meylan / STMicroelectronics, Crolles

Directeur universitaire : Jean-Paul BOOTH (LSP)

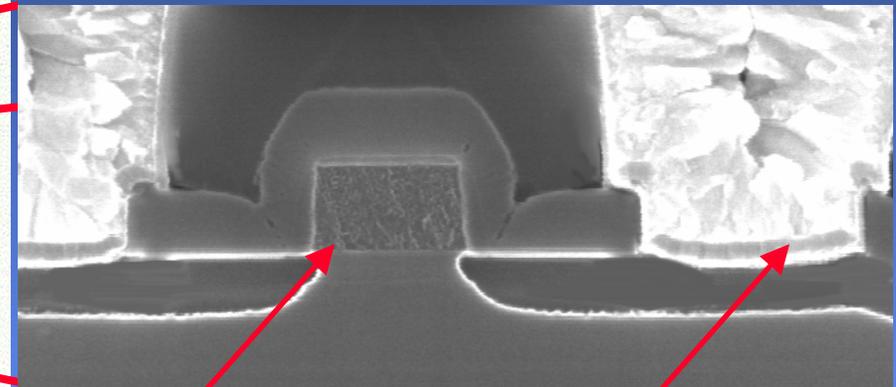
Encadrement CNET : Philippe NORMANDON (FT R&D)

- I- Introduction
 - Contexte
 - La gravure par plasma
 - Les dérives de procédés
- II- Dérives des procédés : réacteur LAM 9408
- III- Résultats avec réacteur de recherche Electrotech
- IV- Conclusion

Contexte de la microélectronique



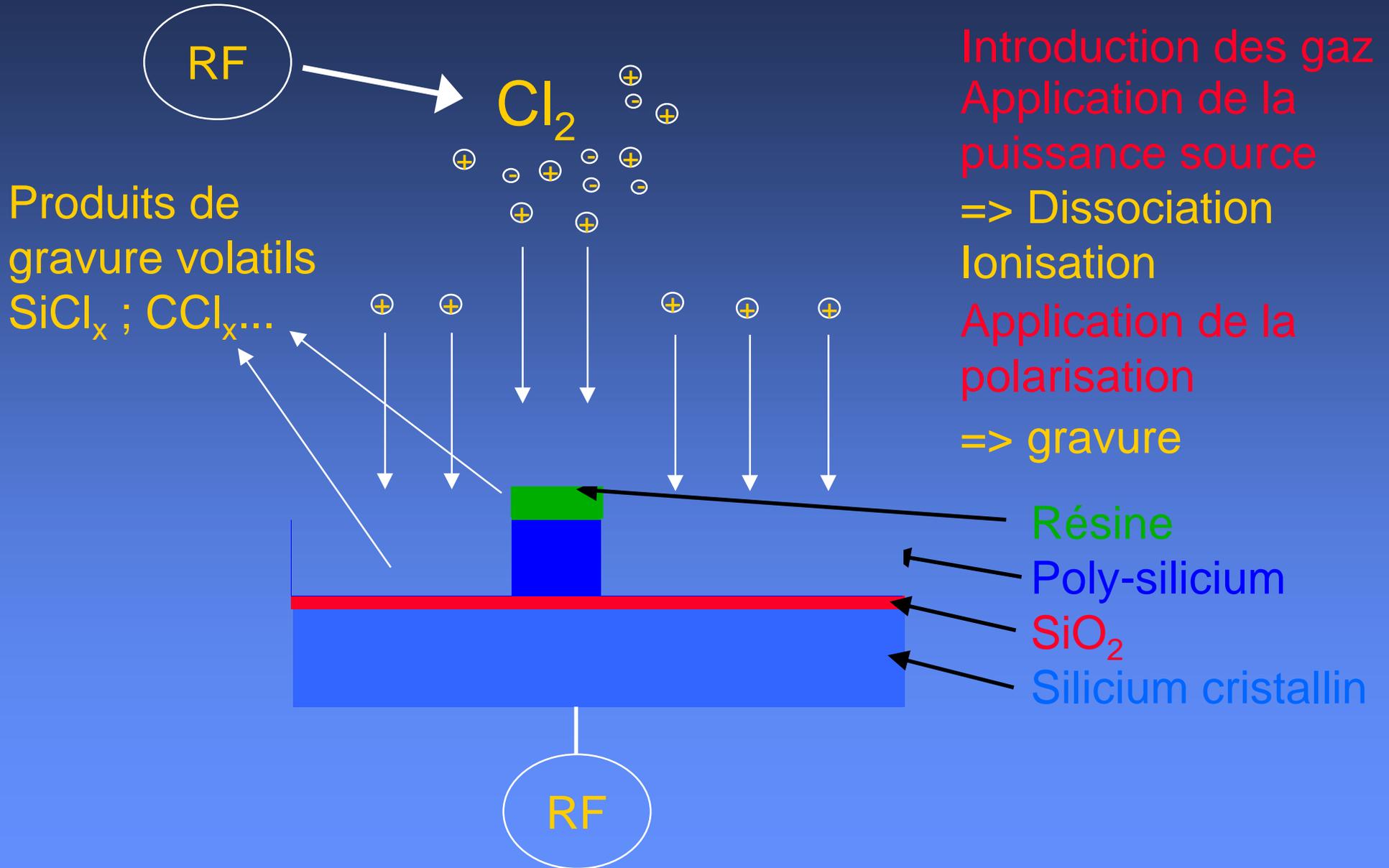
30 millions de transistors
de largeur de grille : $0.18 \mu\text{m}$
dans 1mm^2



Grille

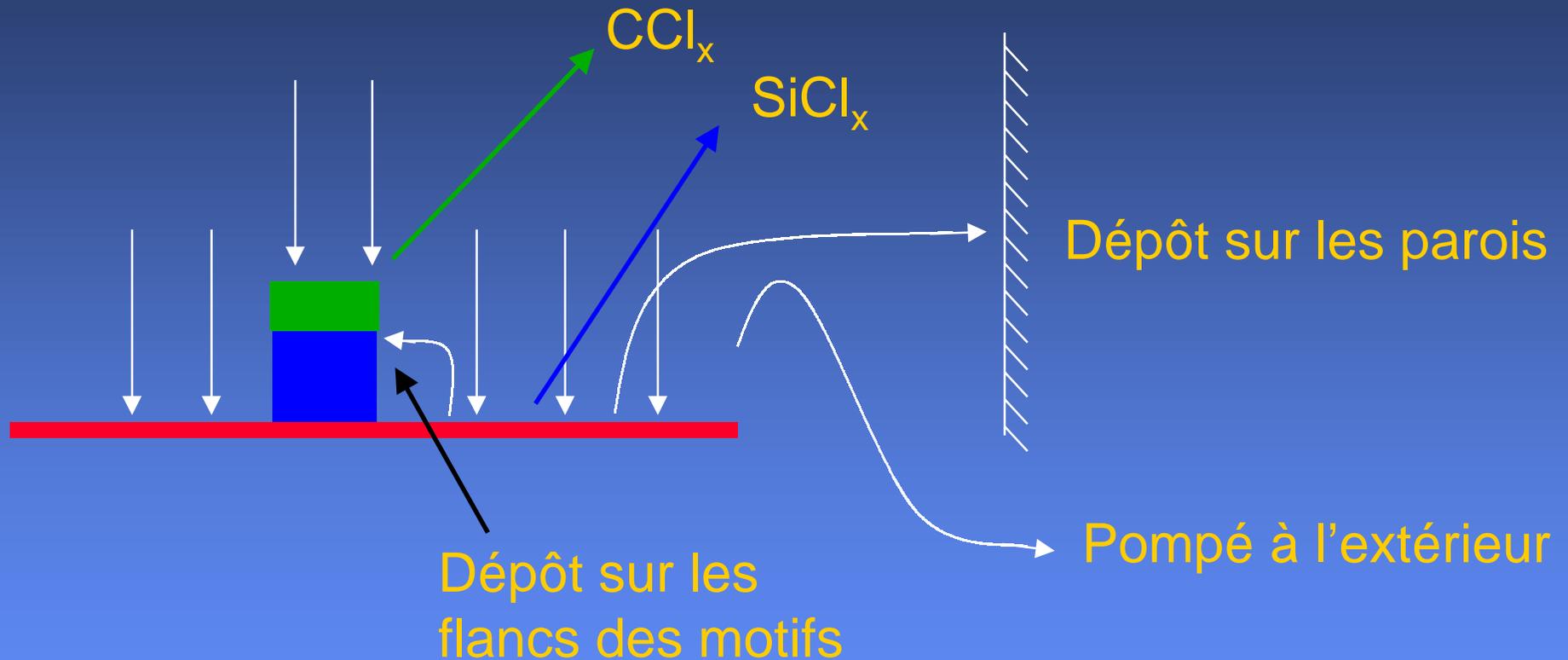
Contact

Principes de gravure plasma



Produits volatils

Les produits volatils sont éliminés par trois possibilités :



SiCl_x est peu volatil, il forme beaucoup de dépôt

Objectifs de la gravure des grilles de transistor :

Le procédé doit obtenir

- Une forte anisotropie
- Une bonne sélectivité Silicium/Oxyde
- Une largeur de grille fixe

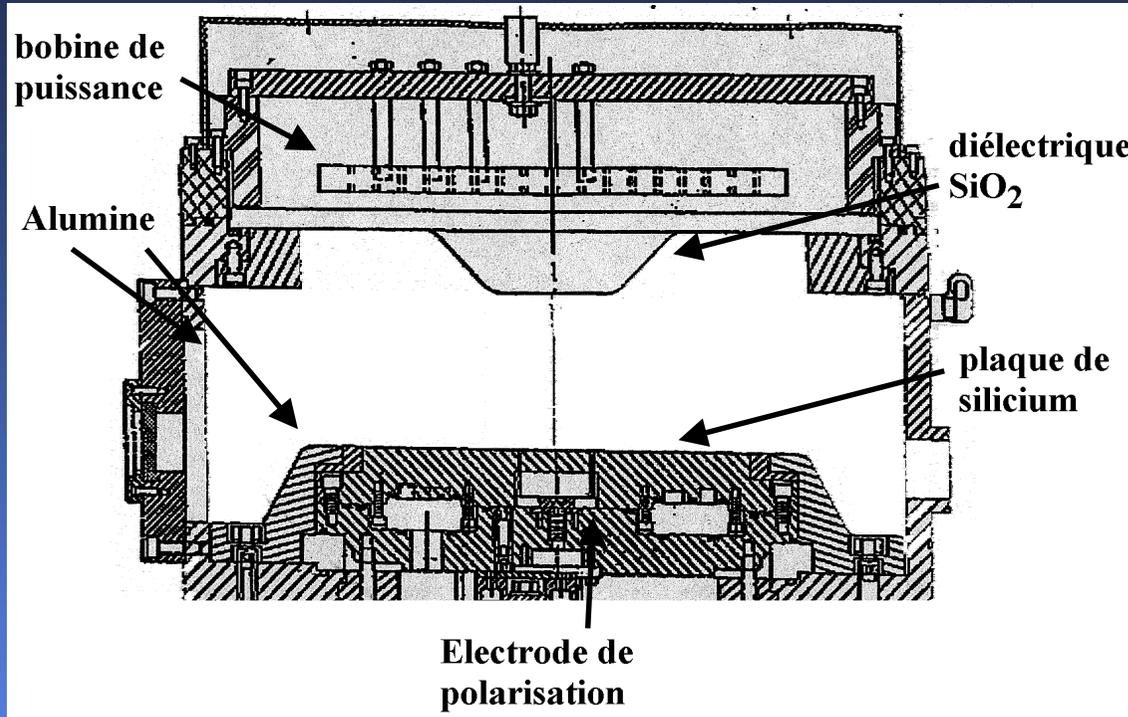
Uniformité sur la plaquette (centre/bord de plaque)
Répétabilité du procédé et stabilité dans le temps

Apparitions de dérives :

- après un nettoyage du réacteur
- lors d'un changement de chimie (gravure de produits différents)

Importance des interactions plasma/surface

- I- Introduction
- II- Dérives des procédés : réacteur LAM 9408
 - dépôts
 - dérives
 - sonde ionique
- III- Résultats avec réacteur de recherche Electrotech
- IV- Conclusion



Réacteur de gravure Si

Milieu industriel :

- salle blanche
- ouverture de chambre rare
- mélange de gaz
- différents produits gravés

Problèmes liés aux dépôts :

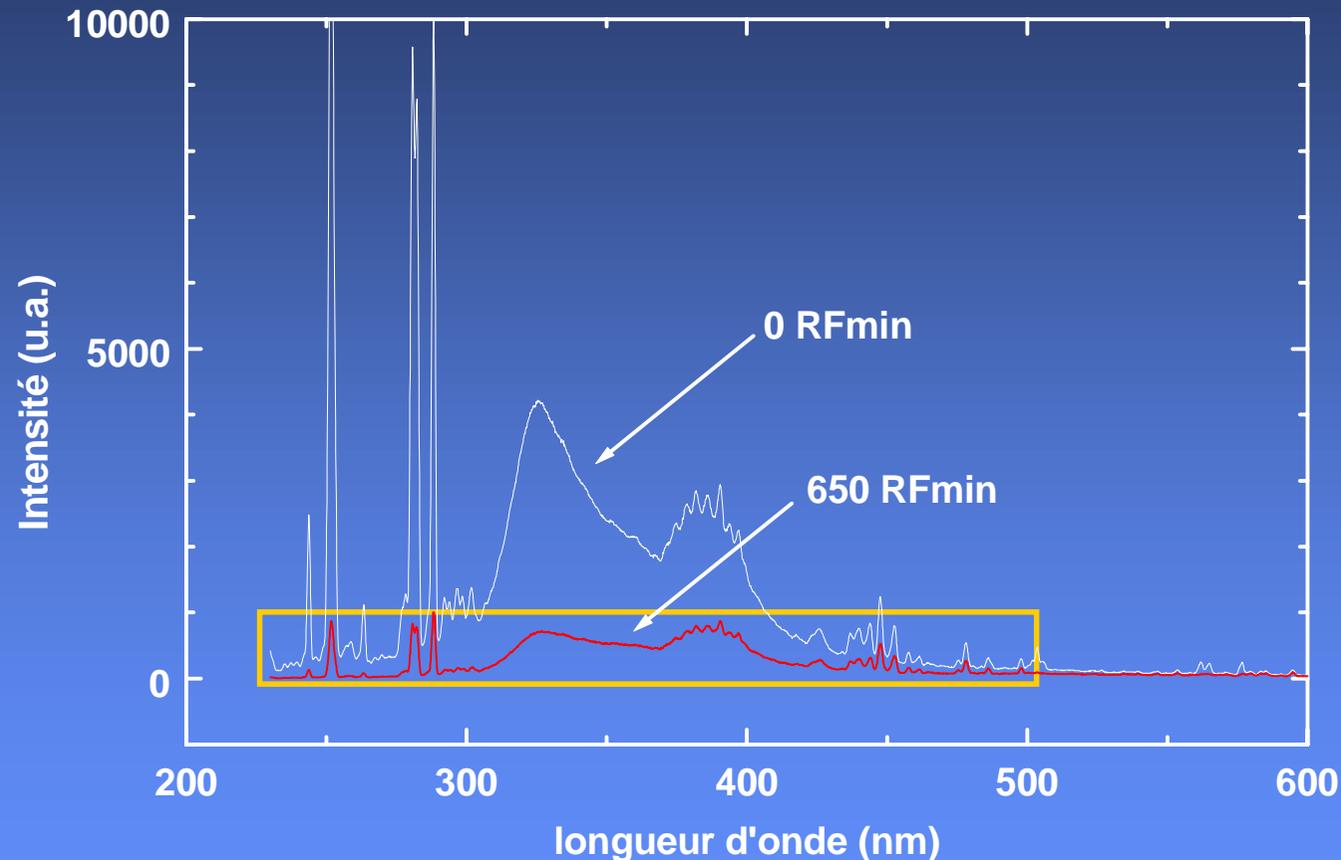
Le dépôt sur les parois peut se détacher et générer des particules

Modification chimique du plasma par ces particules

Influence du dépôt sur l'émission du plasma

9

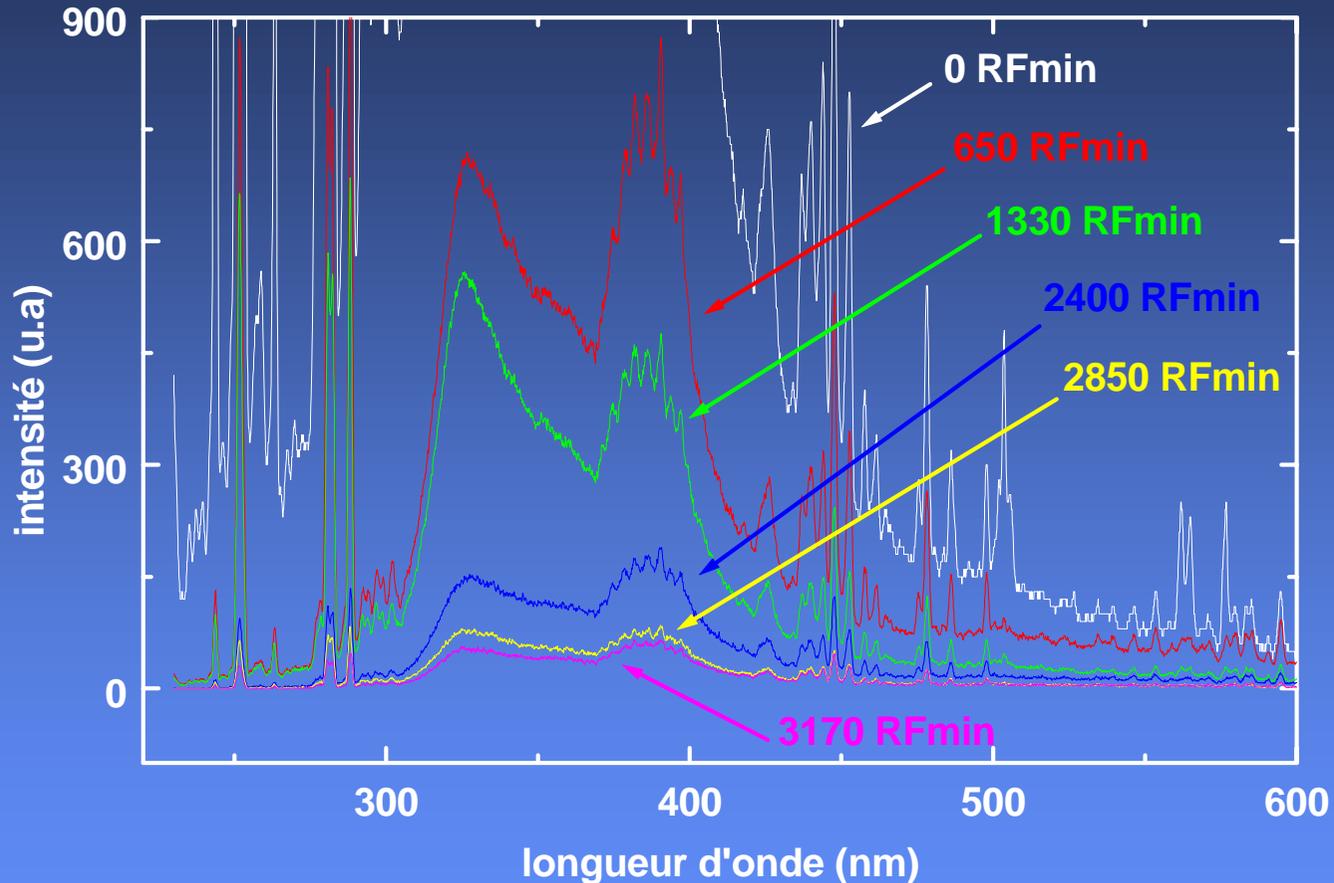
L'émission de la lumière du plasma est utilisée pour les détections de fin d'attaque



Le dépôt des produits volatils rend les hublots opaques

Perte d'intensité de l'émission du plasma

10



Dépôt de plus en plus important

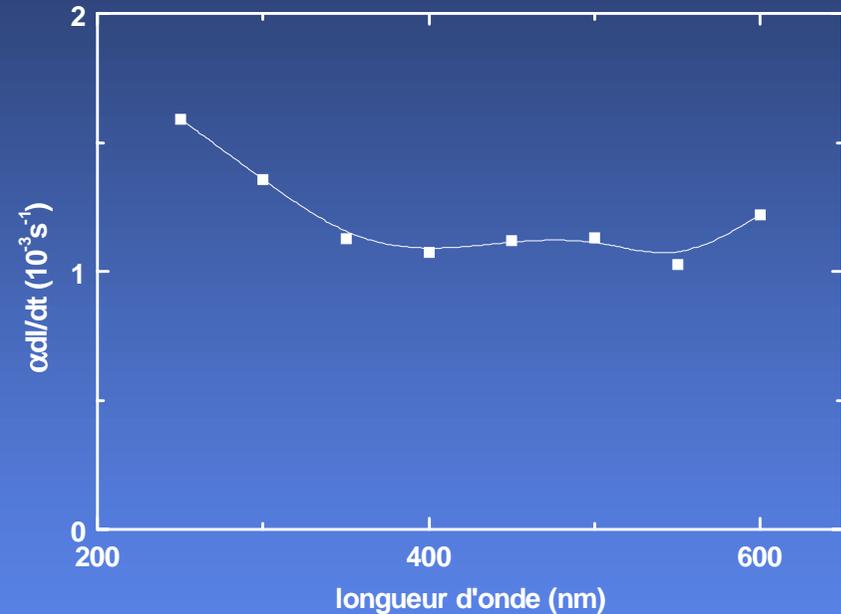
Intensité lumineuse réduite plus particulièrement vers les U.V.

Dépôt selon le temps d'exposition au plasma

Intensité lumineuse en fonction de temps
d'utilisation de la machine :

$$I(t) = I_0 \exp(-\alpha(\lambda)I(t))$$

La perte d'intensité est fonction
de la longueur d'onde



Composition du dépôt :

	Liaisons	C	O	F	Si	Al
Parois	Al-F	28.6	17.7	17.6		36.2
Anneau de gaz	Si-O	20.2	37.6	5	25.3	11.9

Que faire pour éliminer les dépôts ?

- Maintenance (nettoyage complet de la machine avec ouverture de la chambre) - très long
- plasma de nettoyage régulier pour espacer les maintenances

Chimie à base de SF_6/Cl_2

Influence des plasmas de nettoyage

Il faut des nettoyages pour enlever le dépôt

Mais il apparaît des **dérives** après ces plasmas

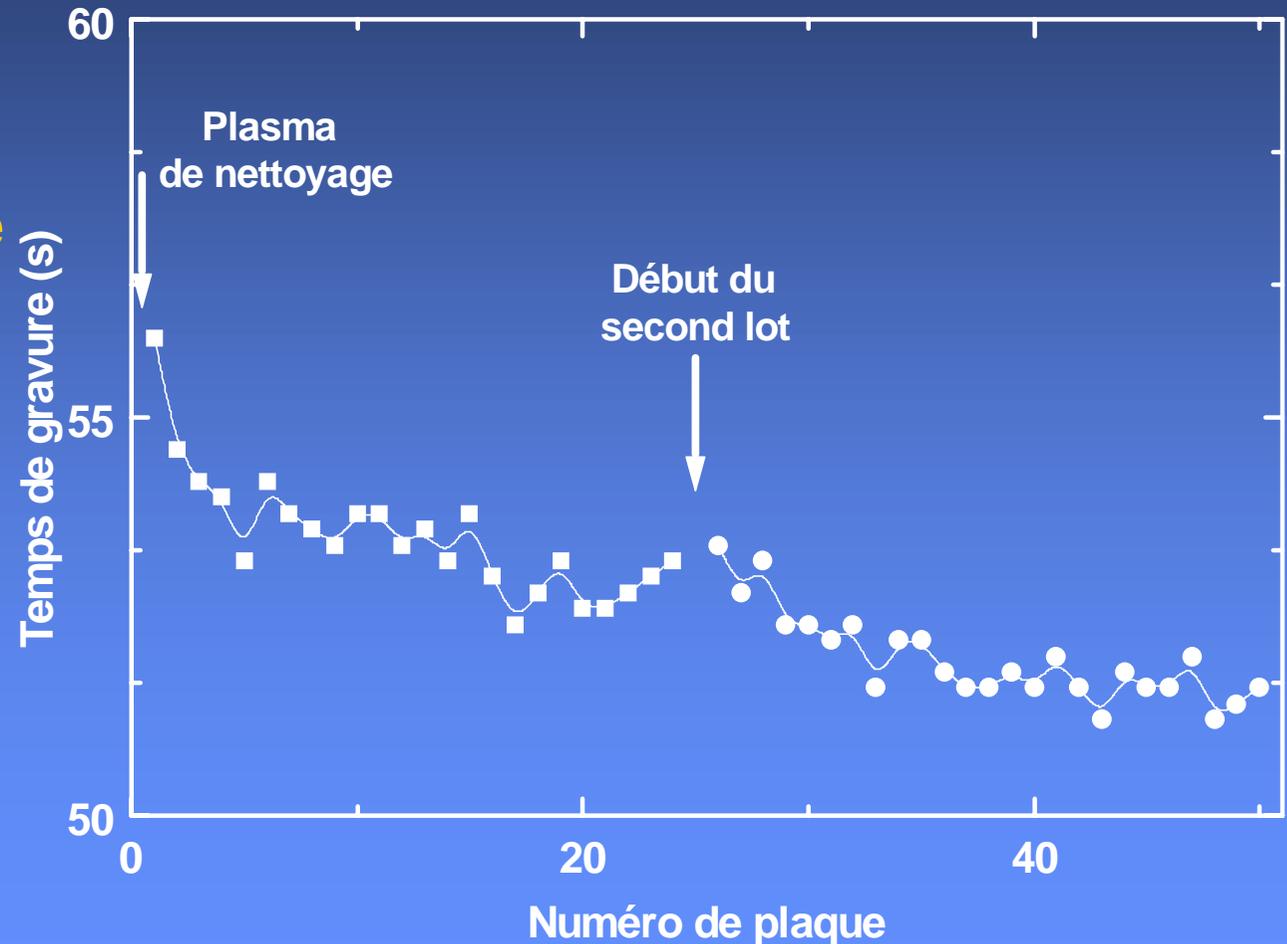
Chimie employée :

Plasma de nettoyage

Gaz : SF_6/Cl_2

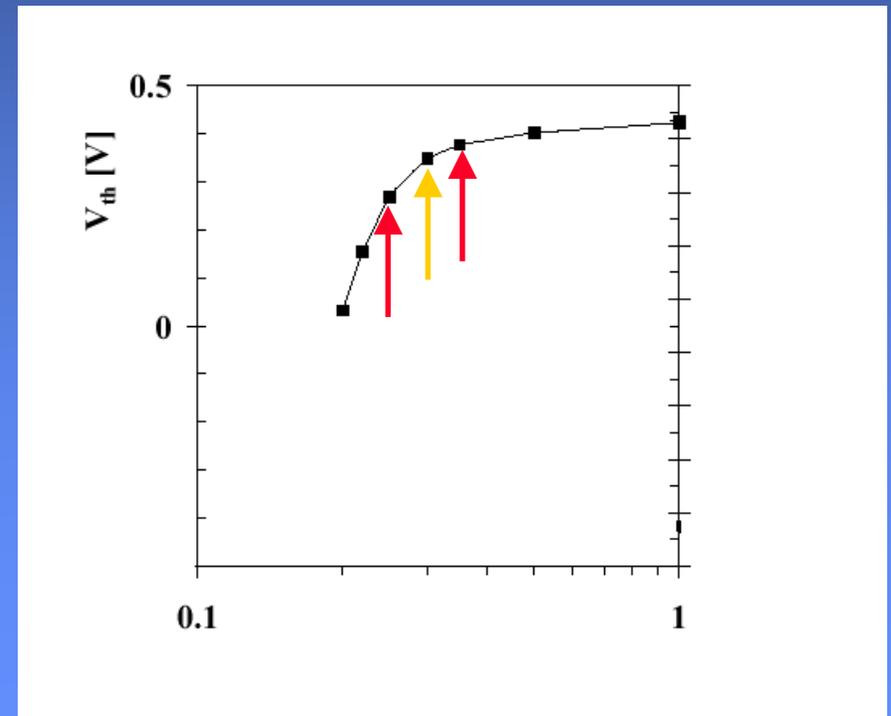
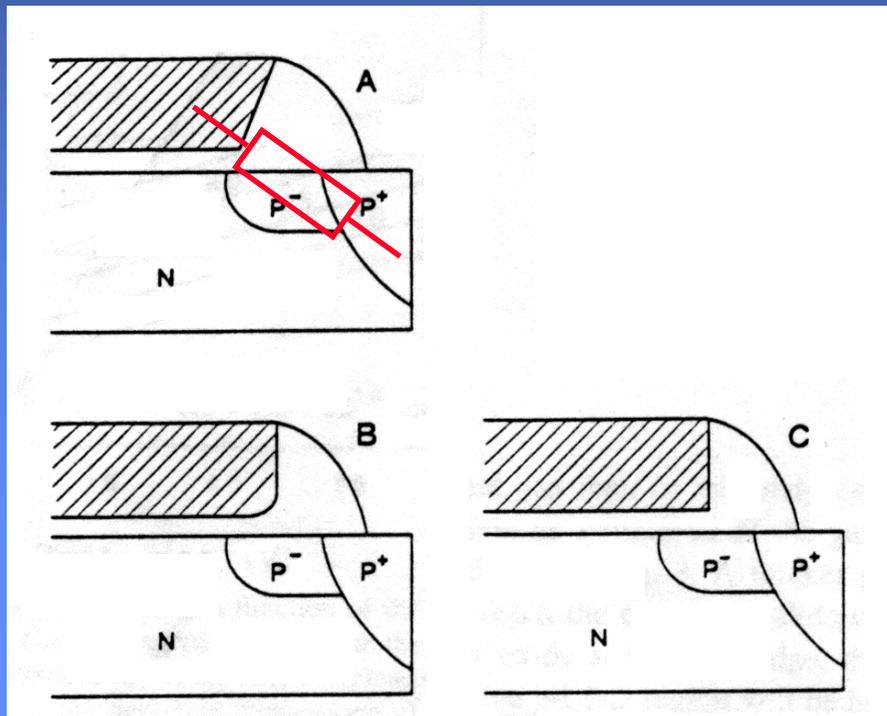
Gravure Grille

Gaz : $HBr/Cl_2/O_2$



Dérives des caractéristiques électriques

	Avant nettoyage	Après nettoyage	Variations
$R_{\text{accès}} (\Omega)$	600	572.7	- 5%
Ecart-type			
CD électrique (1σ)	0.011	0.015	+ 36%



Observations des dérives :

- lors du changement de chimies
- Impacts sur les procédés mesurés ex-situ

Diagnostiques pour comprendre les mécanismes réactionnels impliqués et avoir un contrôle sur les dérives

Caractéristiques des diagnostics :

- In-situ
- Robuste (tolérant aux dépôts)

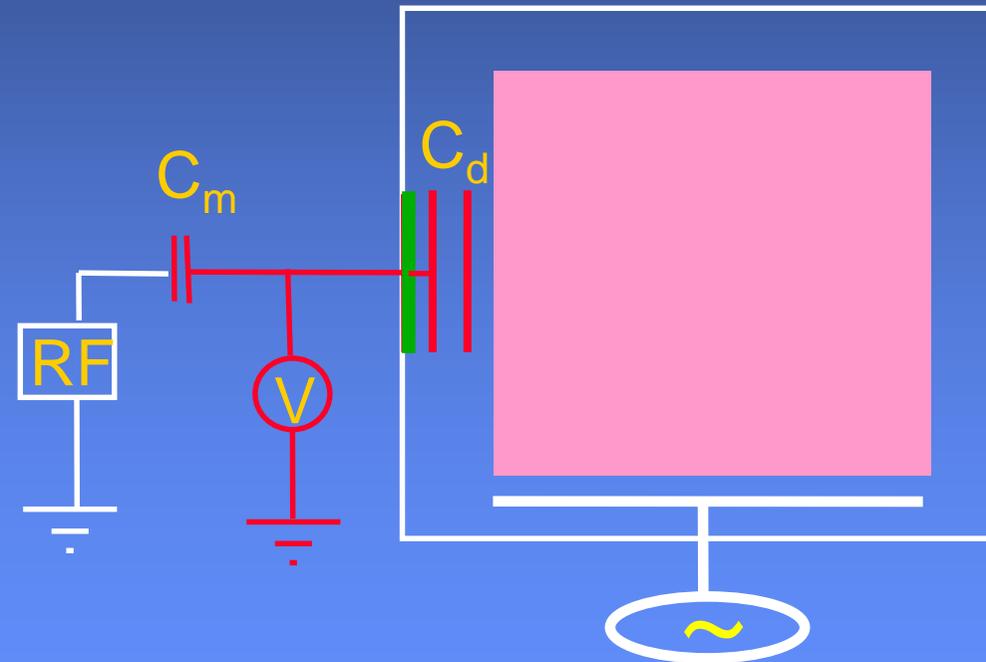
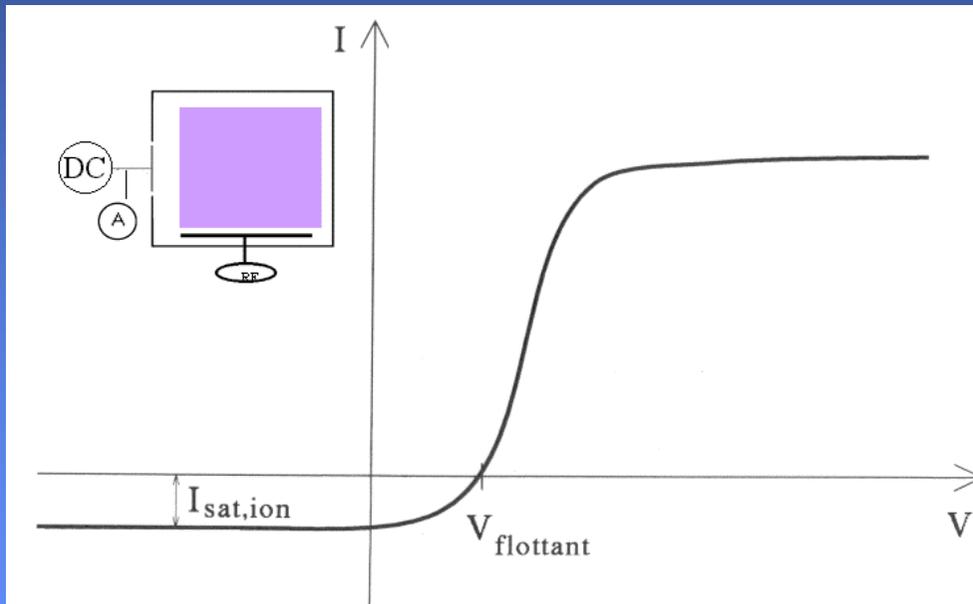


Mesure de flux ionique

Mesure de flux ionique

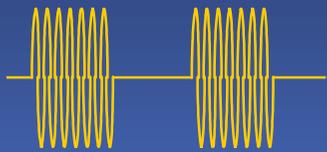
Mesure du flux ionique dans un plasma chimie propre facile
Par contre, impossible lorsqu'il y a des dépôts sur la sonde

Solution : Polarisation alternative



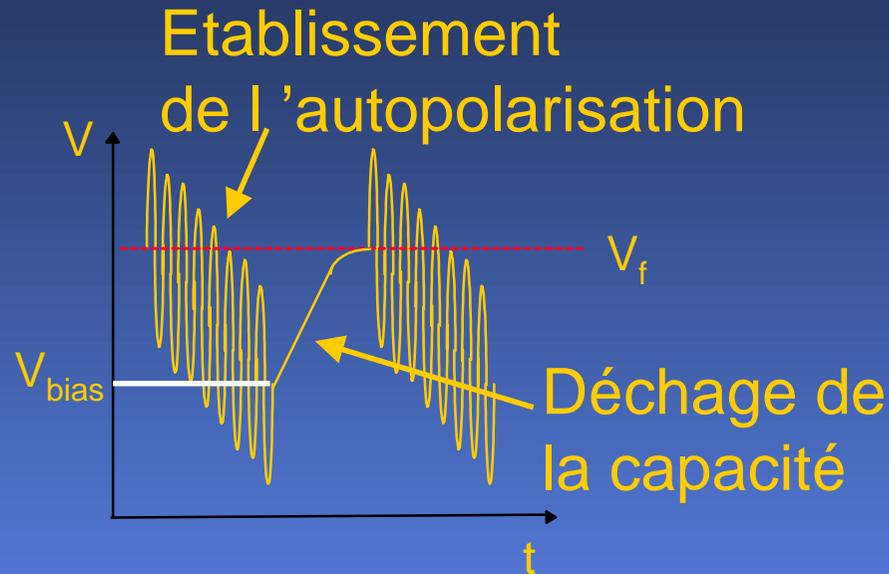
Dépôt de diélectrique = Capacité supplémentaire

Signal RF
appliqué :



$$f \approx 10 \text{ MHz}$$

$$t_{\text{on}} \approx t_{\text{off}} \approx 100 \mu\text{s}$$



Durant la décharge :

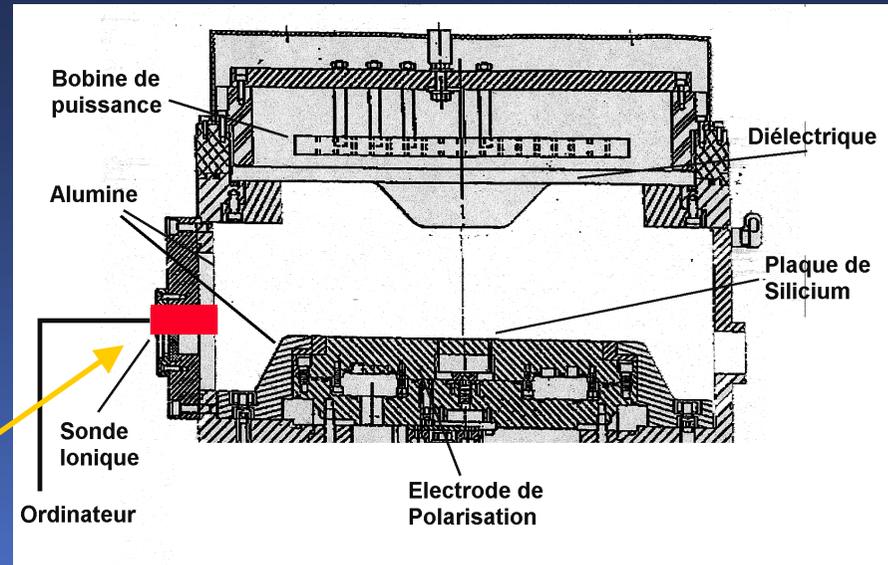
$$I = C_m \frac{dV}{dt}$$

$$I = eA\Gamma_{\text{ion}}$$

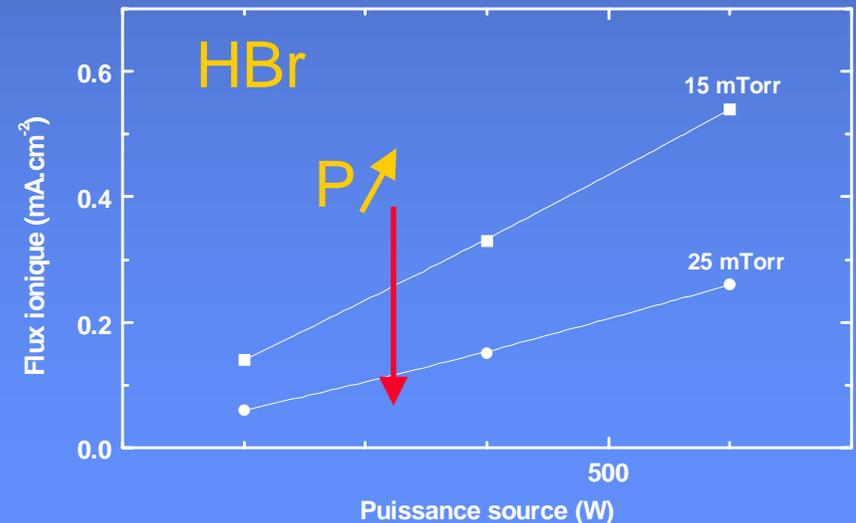
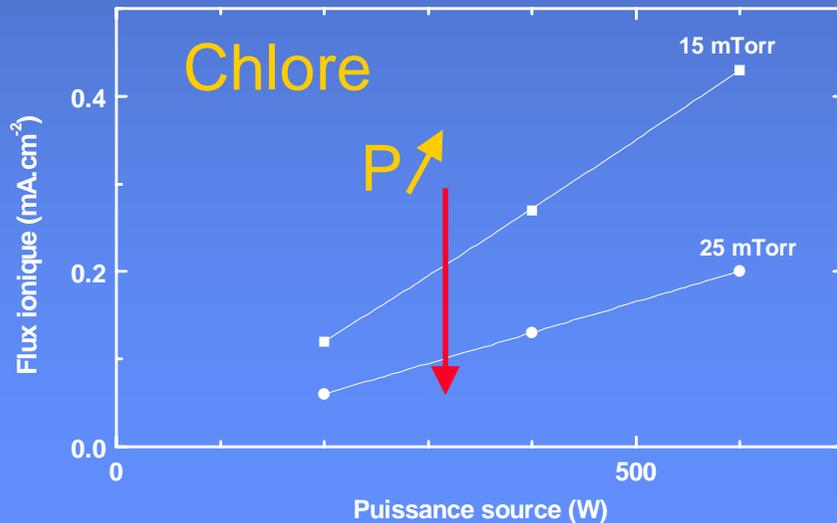
Mesure du flux ion à partir de la décharge de la sonde même avec un dépôt

Mesures de flux ionique (Lam 9408)

Réacteur Lam 9408 :
Milieu industriel

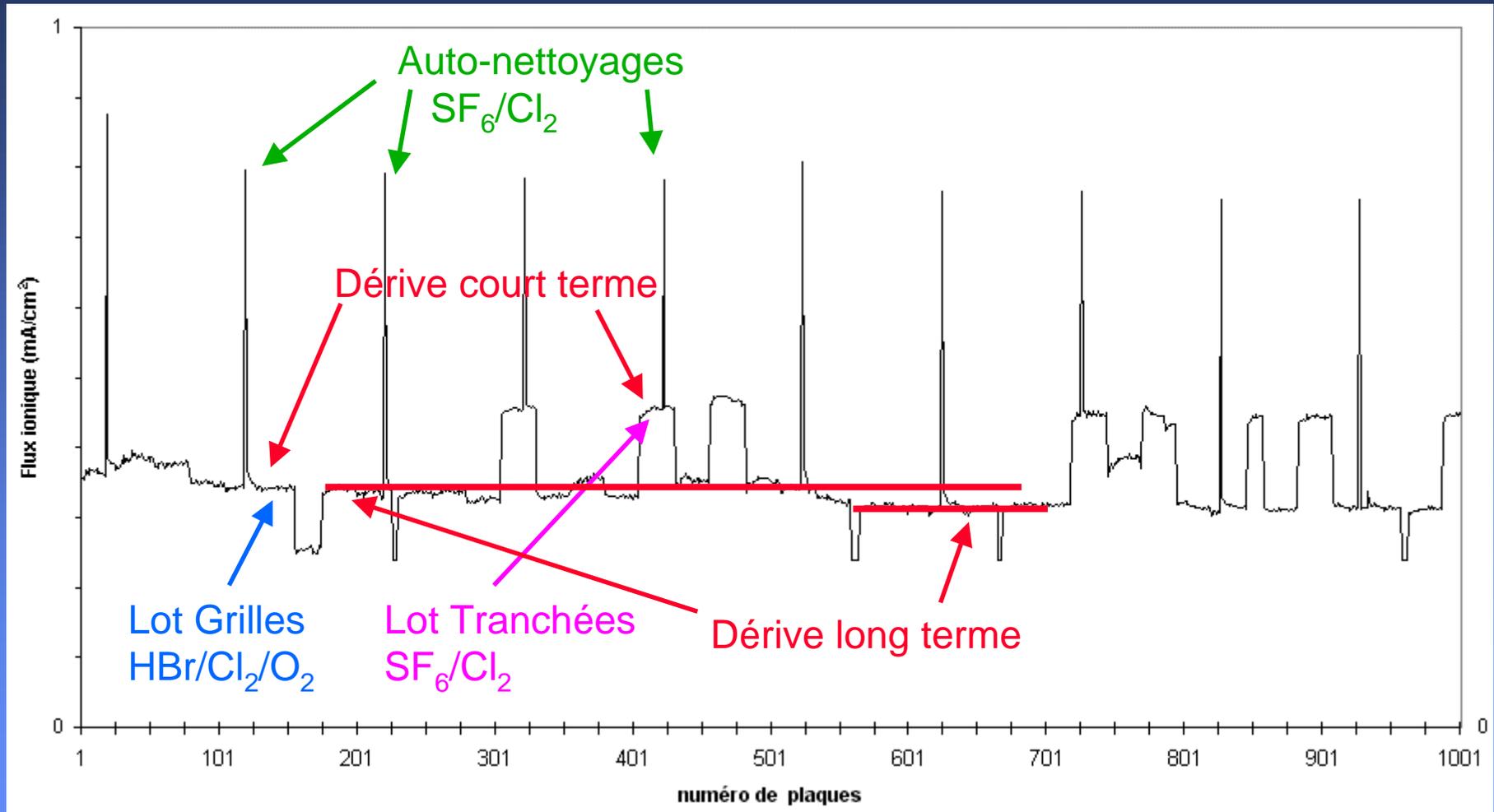


Sonde de
flux ionique



Suivi statistique du flux ionique

Acquisition continue pour toutes les recettes de gravure (Main Etch)



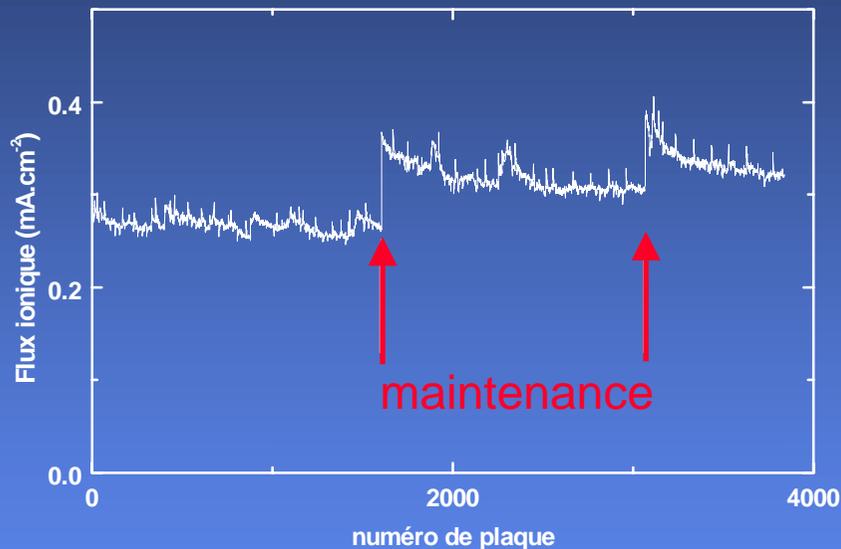
Dérive après changement de chimie

Dérive du matériel

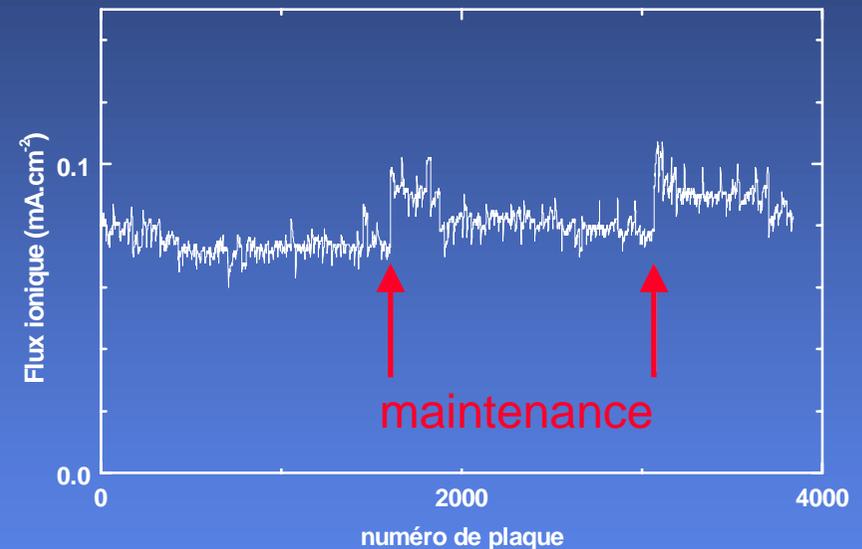
Dérives du flux ionique après maintenance

Flux ionique lors de la gravure du silicium en $\text{HBr}/\text{Cl}_2/\text{O}_2$

Gravure principale (Main Etch)



Surgravure (Over Etch)

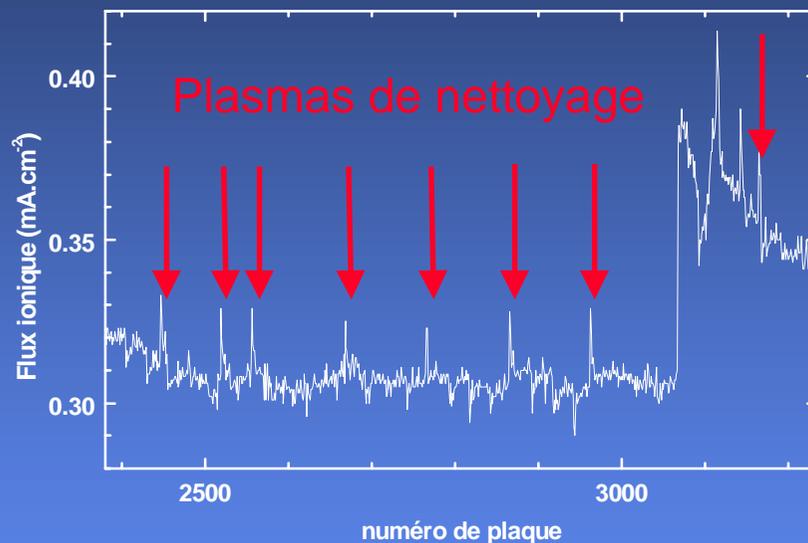


Dérives importantes après les maintenances
parois propres, pas de dépôt

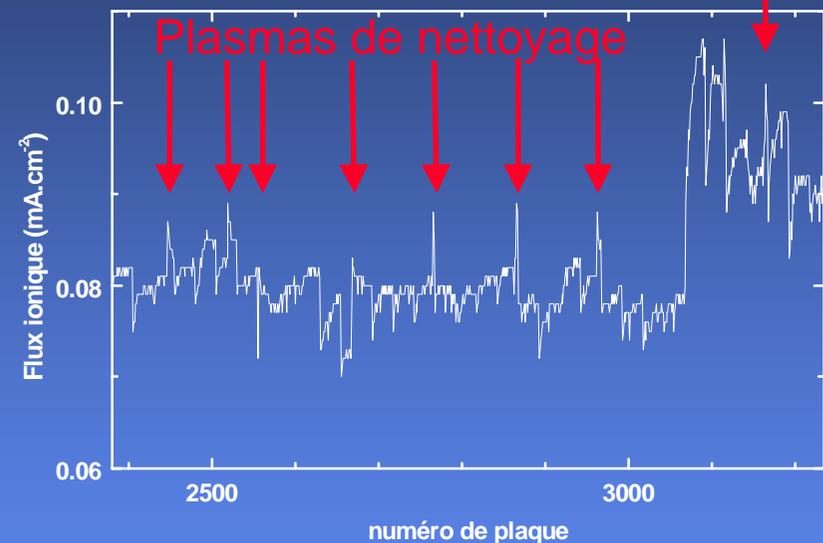
Dérives du flux ioniques après nettoyage

Dérive après les plasmas de nettoyage (chimie SF_6/Cl_2)

Gravure principale (Main Etch)



Surgravure (Over Etch)



Le dépôt modifie la chimie du plasma
par l'attachement et la recombinaison sur les parois

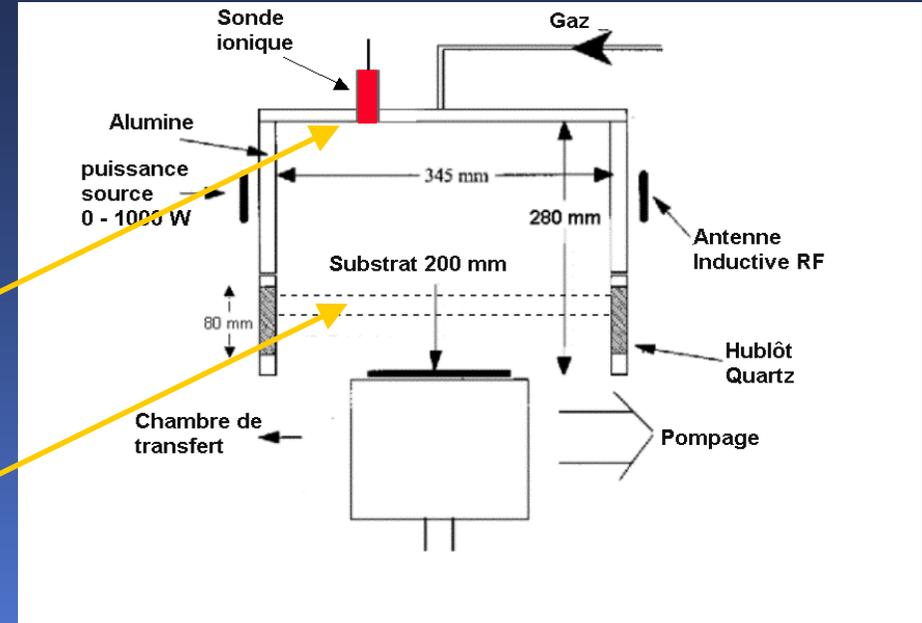
La nature du dépôt influence le courant ionique du plasma

- I- Introduction
- II- Dérives : résultats LAM 9408
- III- Résultat avec réacteur de recherche Electrotech
 - mesure sonde ionique
 - mesure des espèces neutre par absorption U.V.
- IV- Conclusion

Réacteur Electrotech : Réacteur R&D

Sonde de
flux ionique

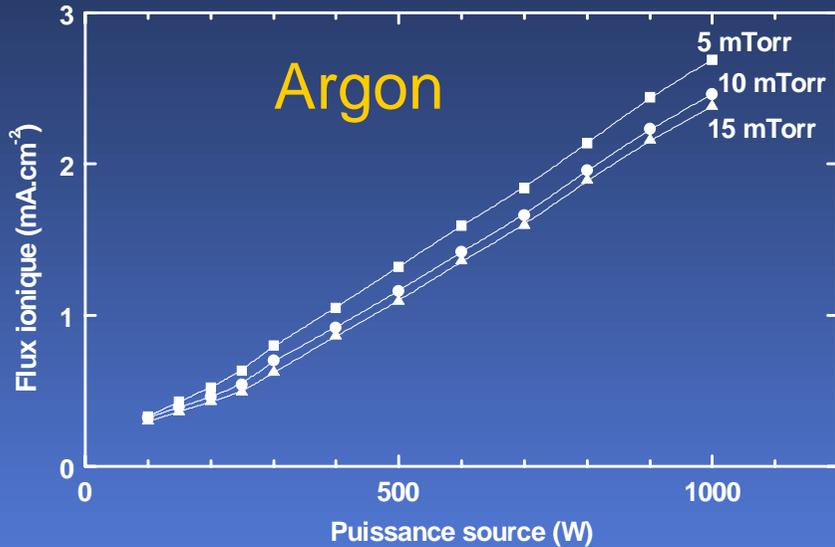
Absorption
U.V.



1) Mesure de flux ionique

2) Mesure des espèce neutres par abso U.V

- taux de dissociation de Cl_2 (modèle cinétique)
- produits de gravure
- Ajout de CF_4 dans un plasma de Cl_2



Flux ionique varie linéairement avec la puissance source $n_e \propto P_{RF}$

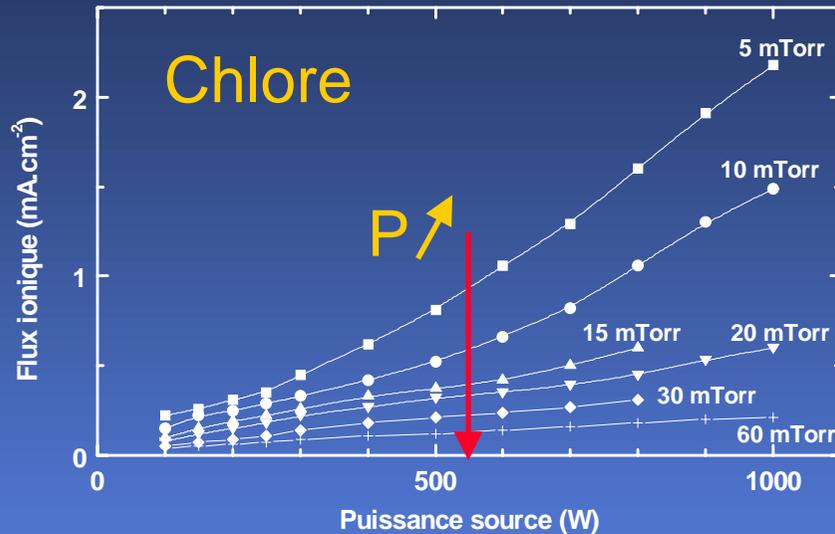
Lorsque la pression augmente :

La température électronique diminue (T_e indépendant de P_{RF})

Moins d'ionisation

Légère diminution du flux ionique

Flux ionique en Cl_2



Puissance source injectée

$$P_{\text{RF}} \propto n_e v_{\text{Bohm}} \varepsilon_l$$

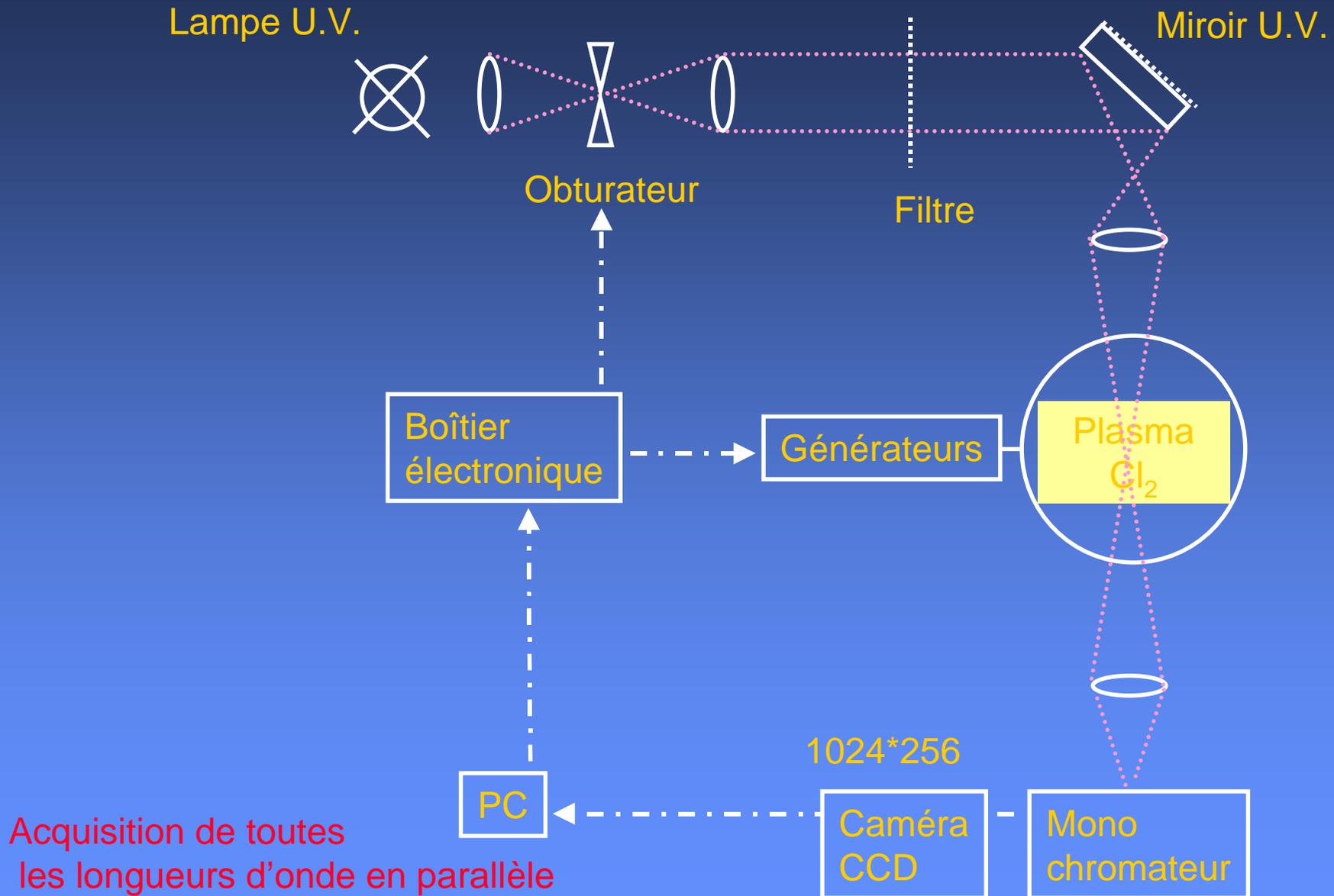
Lorsque la pression augmente :

- plus de collision en volume, la perte d'énergie ε_l augmente
- Moins de dissociation
- Création d'ions négatifs par $\text{Cl}_2 + e^- \rightarrow \text{Cl}^- + \text{Cl}$

La vitesse de Bohm diminue

Le flux ionique diminue rapidement

Absorption U.V. : montage



Absorption U.V. : équation

Loi de Beer-Lambert :

The diagram shows the Beer-Lambert law equation $I_t = I_0 \exp(-\sigma N L)$ centered on a blue background. Five labels are connected to the equation by red arrows: 'Intensité initiale' points to I_0 ; 'Section efficace' points to σ ; 'Chemin optique' points to L ; 'Intensité transmise' points to I_t ; and 'concentration' points to N .

Intensité initiale Section efficace Chemin optique

$$I_t = I_0 \exp(-\sigma N L)$$

Intensité transmise concentration

Absorption U.V. : incertitude

Incertitude :

$$\text{Bruit statistique} = \frac{1}{\sqrt{\text{nombre de photon}}}$$

profondeur
du puits

nb de
lignes

efficacité
détecteur

$$880000 \times 256 \times 18.8 = 12 \times 10^6 \text{ photons lus}$$

$$\frac{1}{\sqrt{N}}$$

$$= 3 \times 10^{-4}$$

Pour une
acquisition

Pour le chlore :

$$\sigma = 25 \times 10^{-24} \text{ m}^2 \text{ à } \lambda = 330 \text{ nm}$$

$$L = 30 \text{ cm}$$

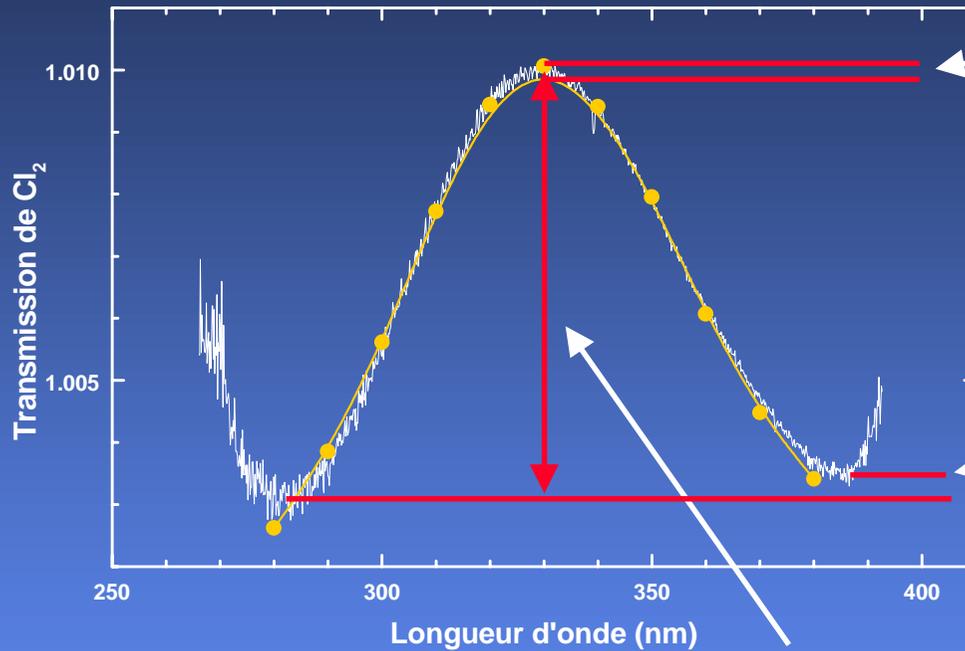


Erreur sur la pression :

1 mTorr

Transmission dans le plasma

30 mTorr de Cl_2 800W source



Bruit statistique

1×10^{-4} soit 0.3 mTorr

Fluctuations de la lampe

3×10^{-4} soit 1 mTorr

$21 \text{ mTorr} \pm 1.3$

Dissociation = 70%

Le Cl_2 est dissocié dans le plasma. La transmission est donc supérieure à 1.

Absorption Cl₂ : réactions

Mécanismes de perte et de création de Cl₂ dans un plasma

Réactions :

Dissociation électronique (k_{diss})



Attachement dissociatif (k_{att})

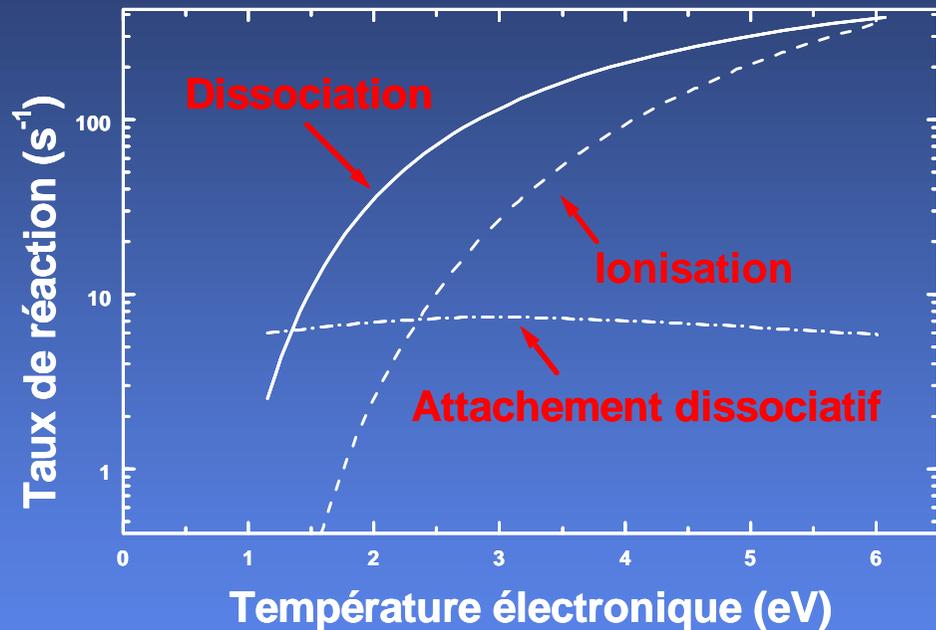


Ionisation



n_e maxwellienne

Recombinaison (γ_{rec})



γ_{rec}

Alumine 0.06

Silicium 0.12

[G. Kota, J. Coburn, D. Graves
JVSTA 16(1), p270 (1998)]

Absorption Cl₂ : modèle

Equation bilan :

$$0 = n_e K_{\text{diss}} [\text{Cl}_2] - n_e K_{\text{att}} [\text{Cl}_2] + \frac{\gamma_{\text{rec}} \bar{v} S}{4V} [\text{Cl}]$$

dissociation
attachement
recombinaison

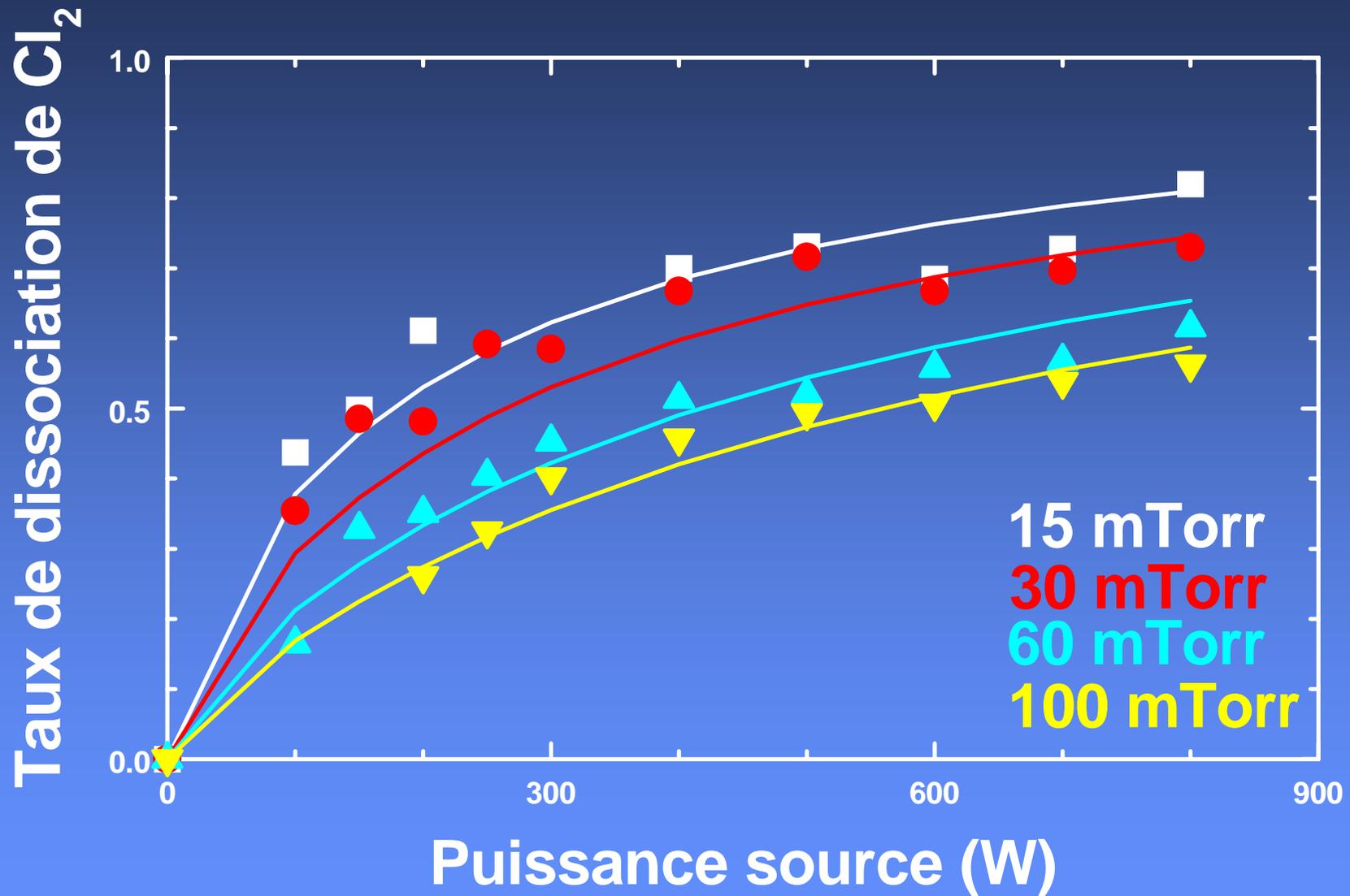
↓
↓
↓

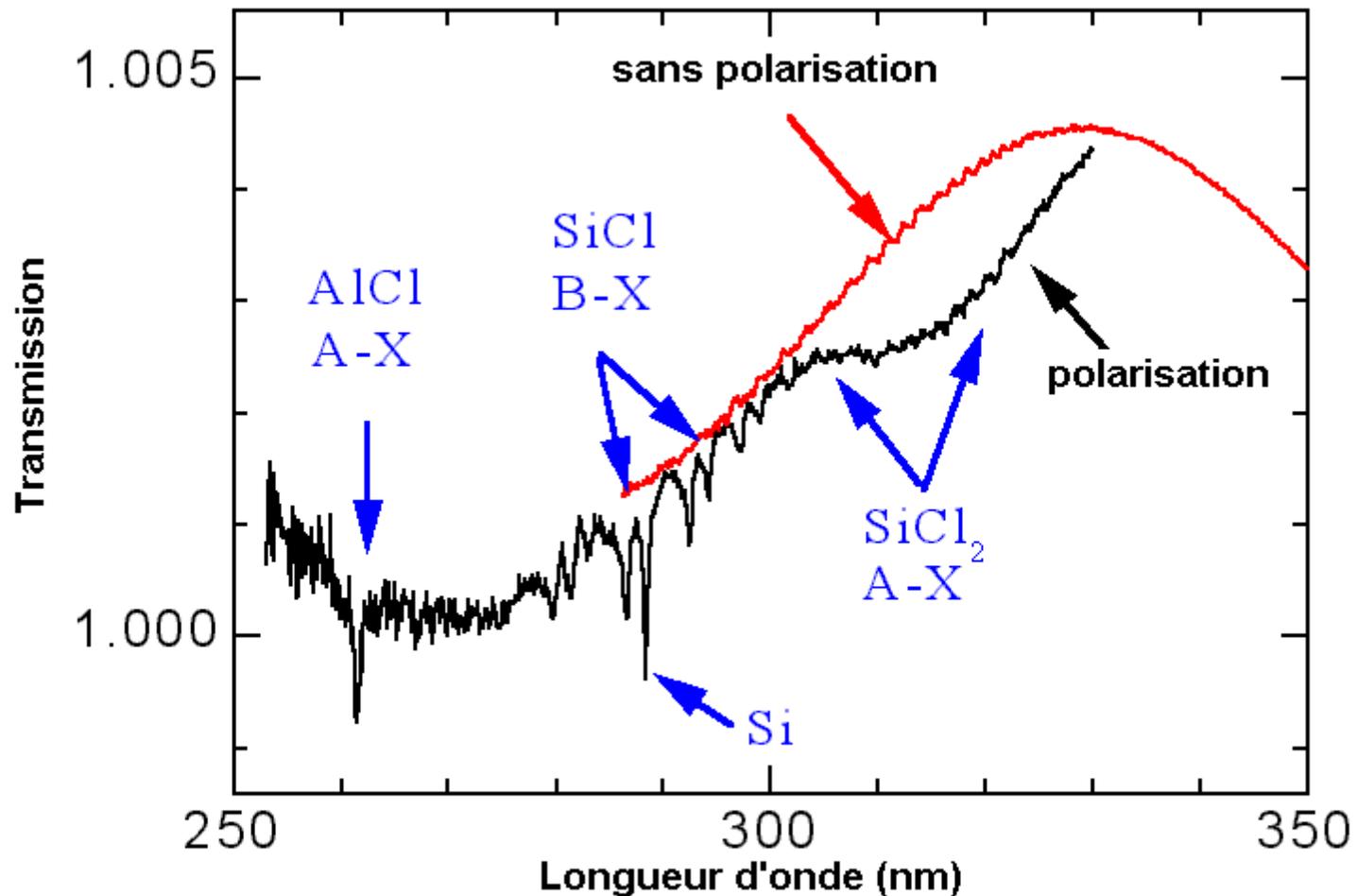
Conservation de la masse : $[\text{Cl}_2] + 2 [\text{Cl}] = [\text{Cl}_2]_0$

Dissociation : $D = 1 - \frac{[\text{Cl}_2]}{[\text{Cl}_2]_0}$

soit $D = 1 - \frac{1}{\frac{8V}{\gamma_{\text{rec}} \bar{v} S} (k_{\text{diss}} + k_{\text{att}}) n_e + 1}$

À pression
constante
 $n_e \propto P_{\text{RF}}$

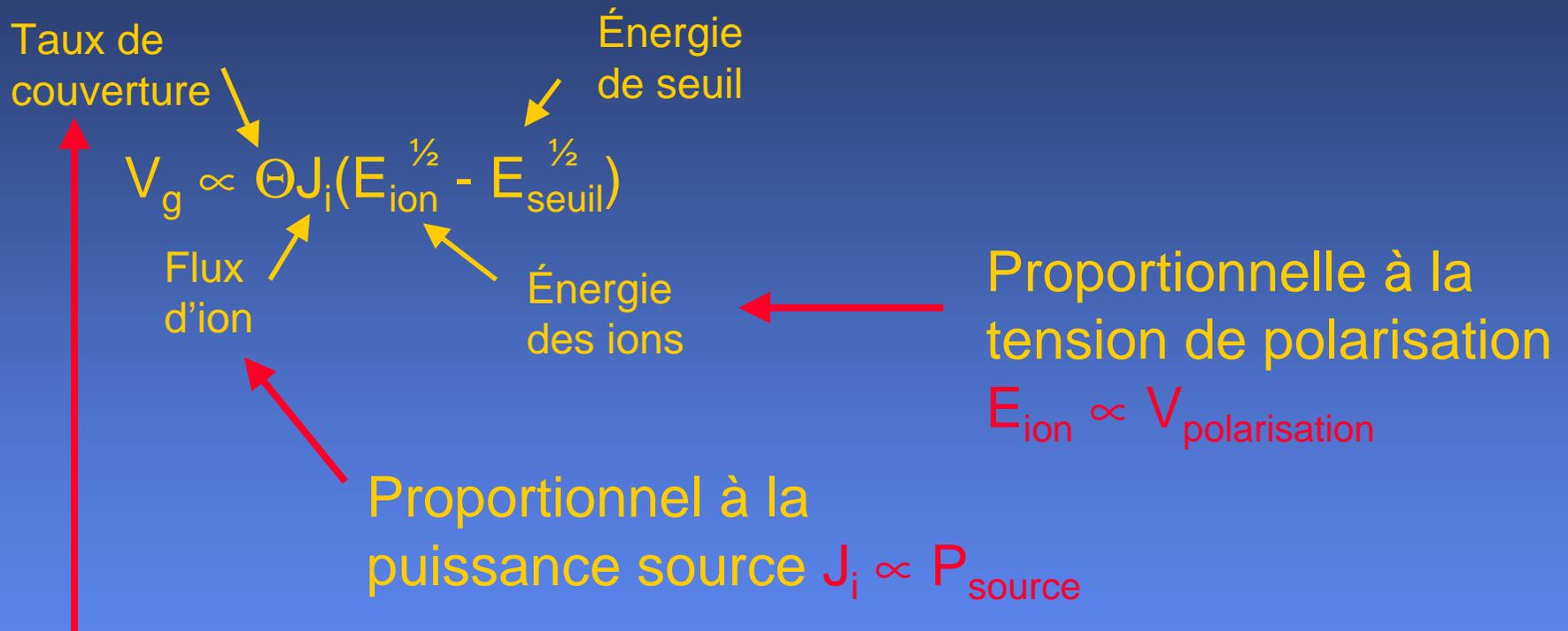




Absorption à 15 mTorr - 800 W source - 600 W polarisation

Modèle de Mayer et Barker

Vitesse de gravure du silicium par le chlore :

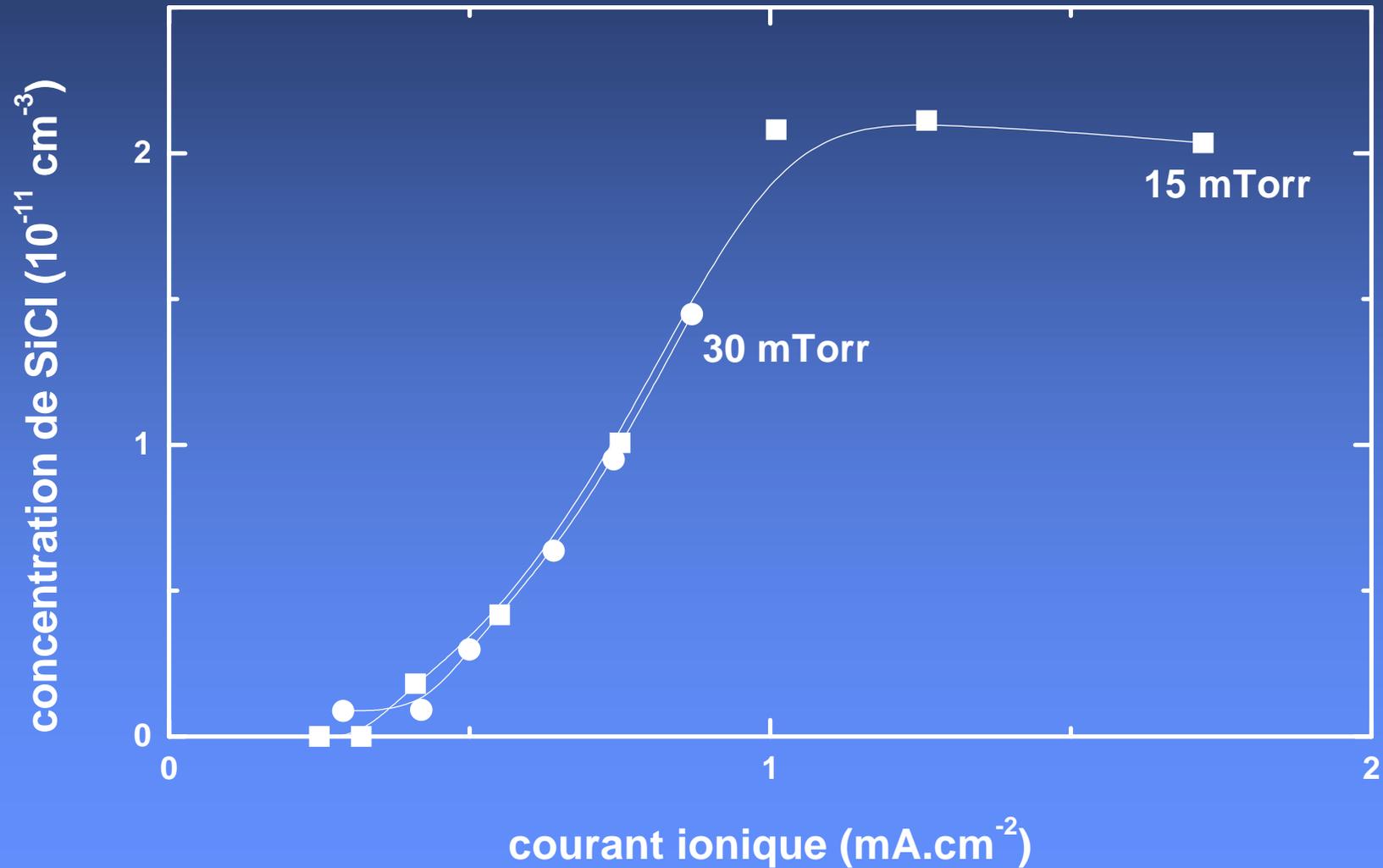


Proportionnel au rapport

flux de neutres J_n sur flux d'ions J_i $\Theta \propto J_n/J_i$

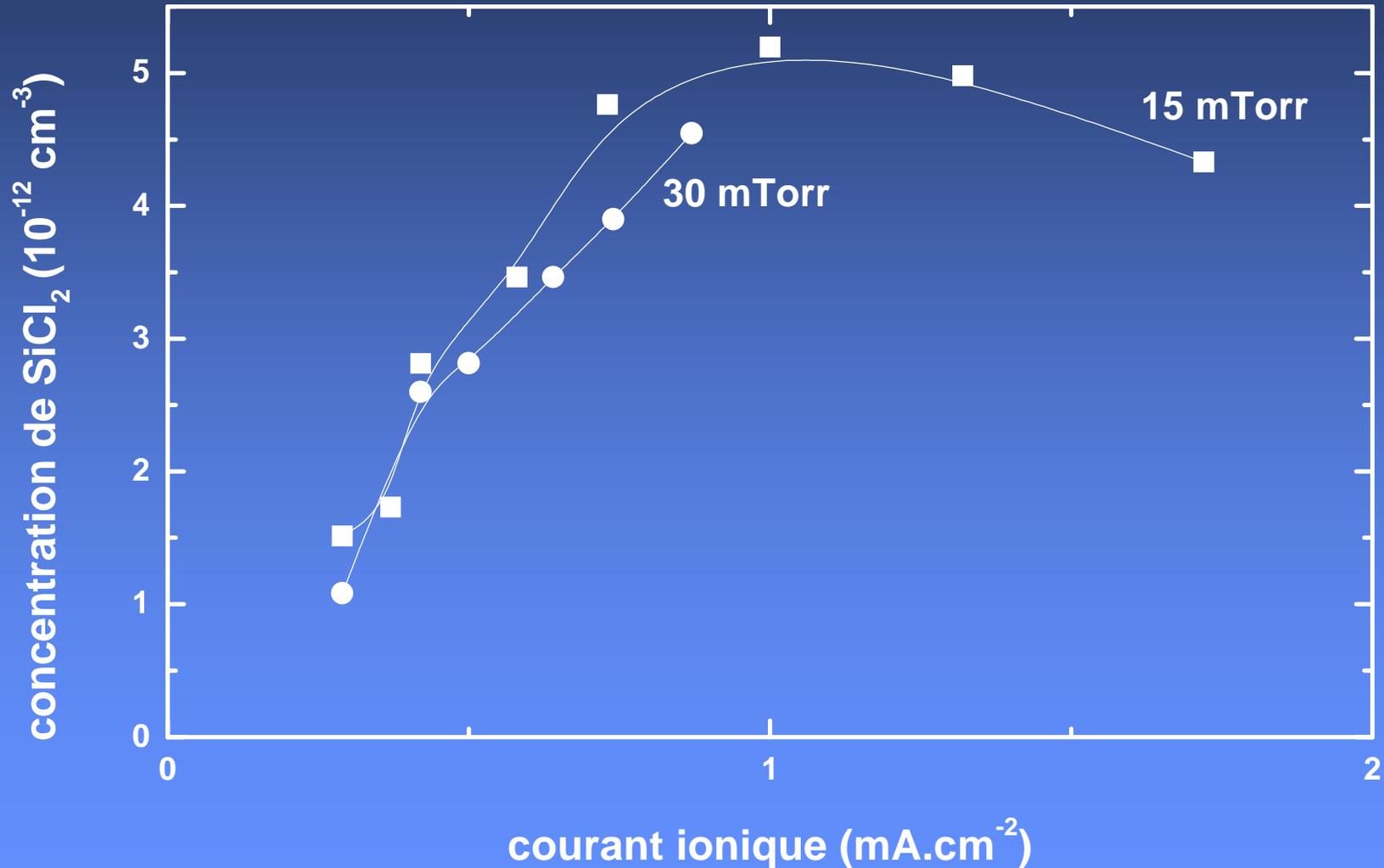
Concentration de SiCl selon la puissance source ³⁵

Polarisation constante



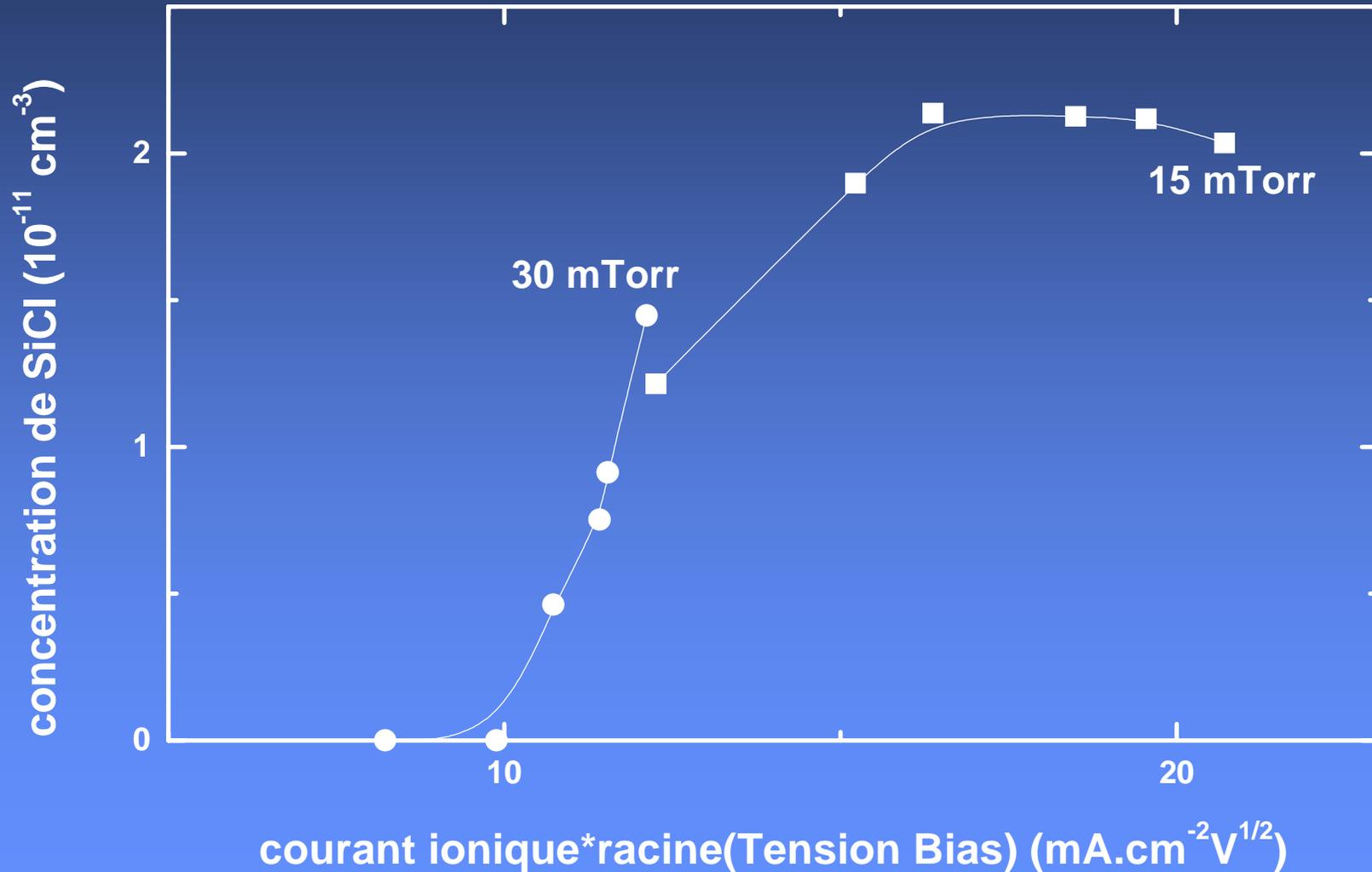
Concentration de SiCl_2 selon la puissance source³⁶

Polarisation constante



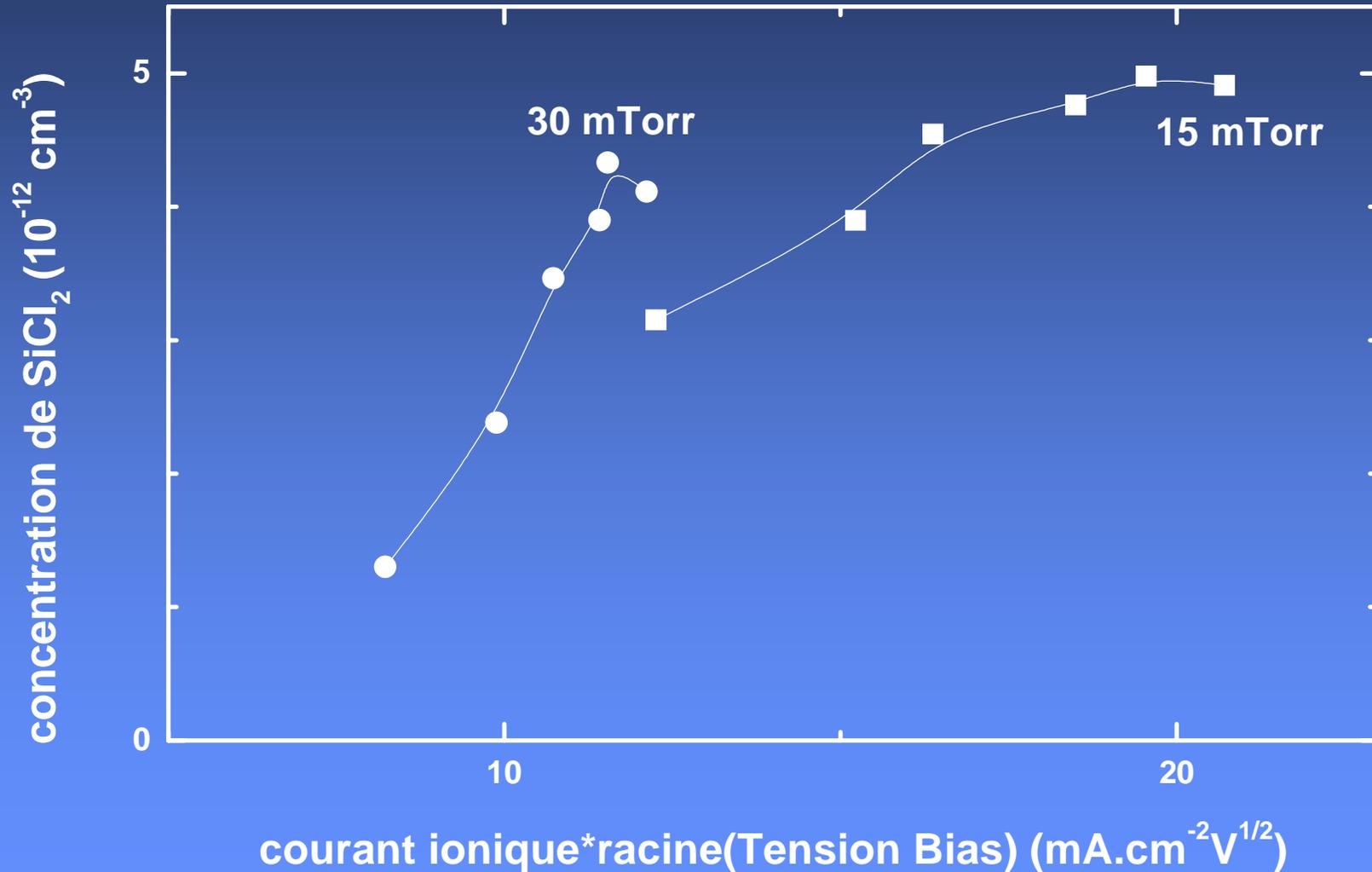
Concentration de SiCl selon la polarisation

Puissance source constante



Concentration de SiCl_2 selon la polarisation

Puissance source constante



Produits de gravure : interprétation

À polarisation constante : $E_{ion} = \text{constante}$

$$V_g \propto \Theta J_i$$

Faible puissance : la vitesse varie linéairement

Forte puissance : Θ diminue, compensation des phénomènes

À puissance source constante : $J_i = \text{constante}$; $\Theta = \text{constante}$

$$V_g \propto (E_{ion}^{1/2} - E_{seuil}^{1/2})$$

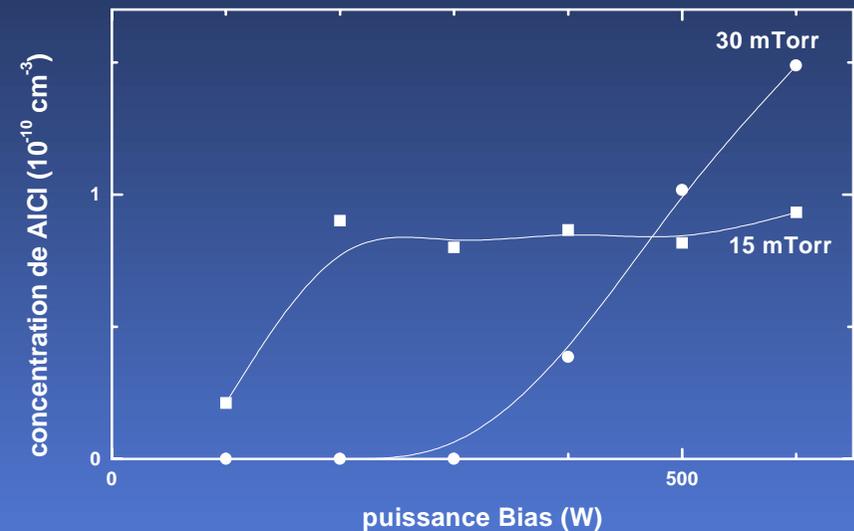
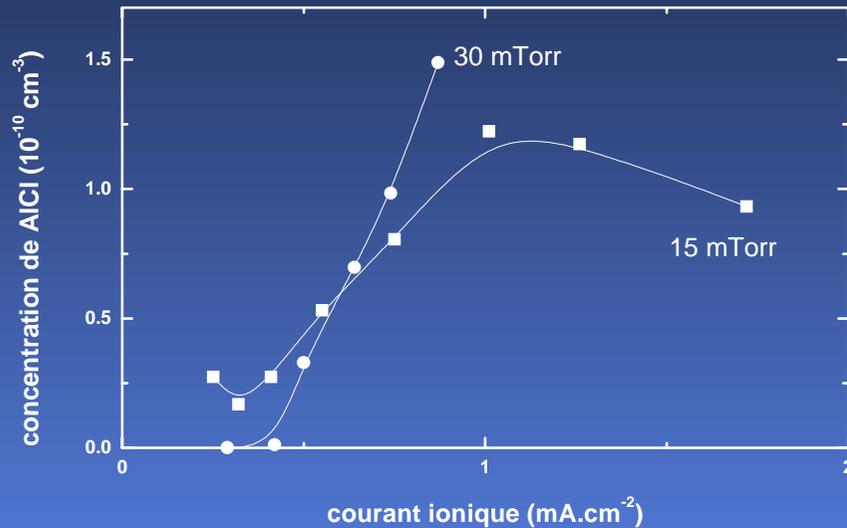
Faible puissance : $E_{ion} < E_{seuil}$: pas de gravure

Forte puissance : modèle de collision en cascade

Donc $SiCl$ et $SiCl_2$ suivent le modèle de Mayer et Barker

AlCl : l'intrus

Gravure du silicium par le chlore



Concentration détectée : 10^{10} cm^{-3}
générations de défauts

D'où vient l'alumine ?

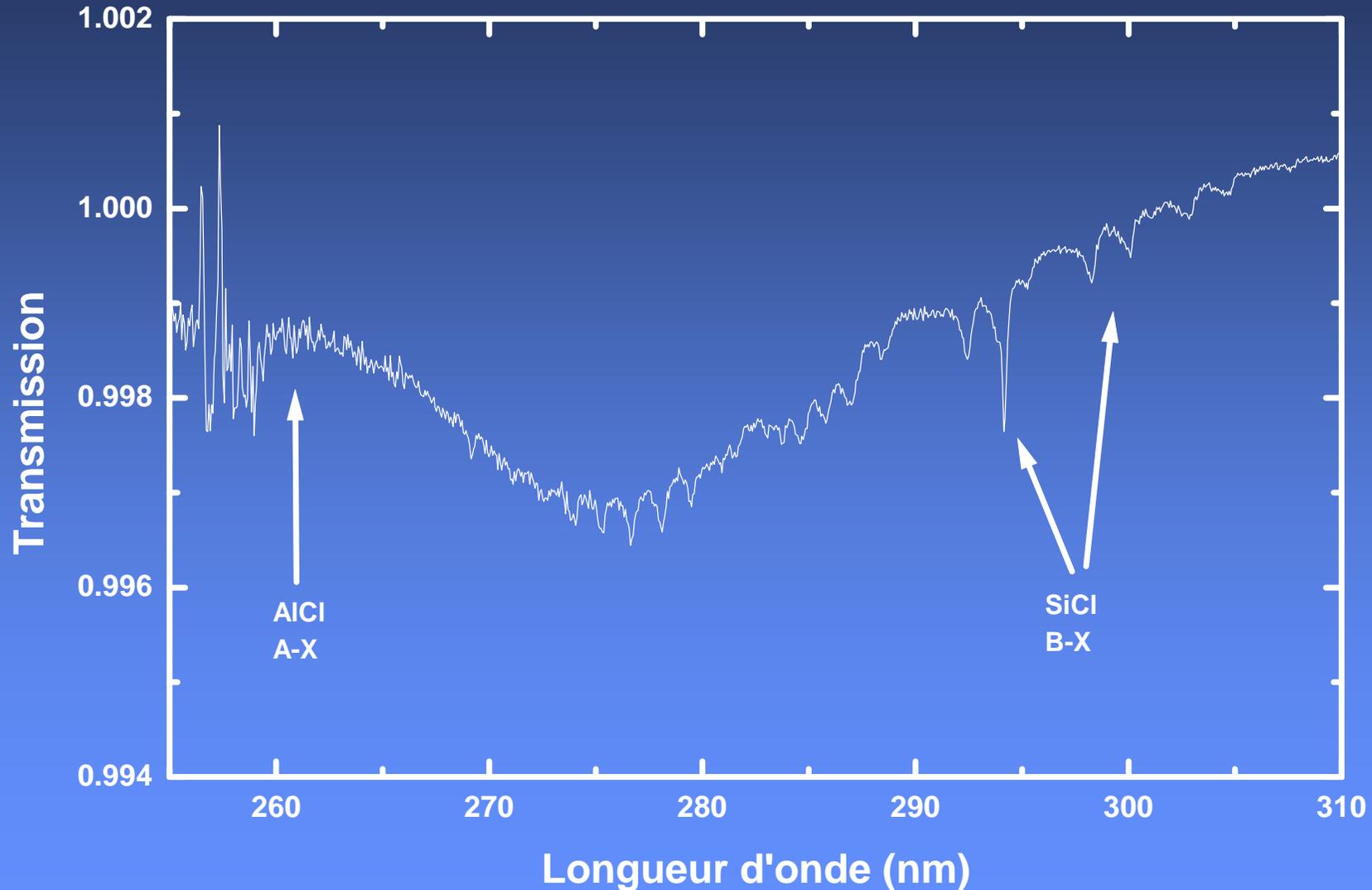
Des parois et du porte-substrat

Auto-polarisation parasite du porte-substrat

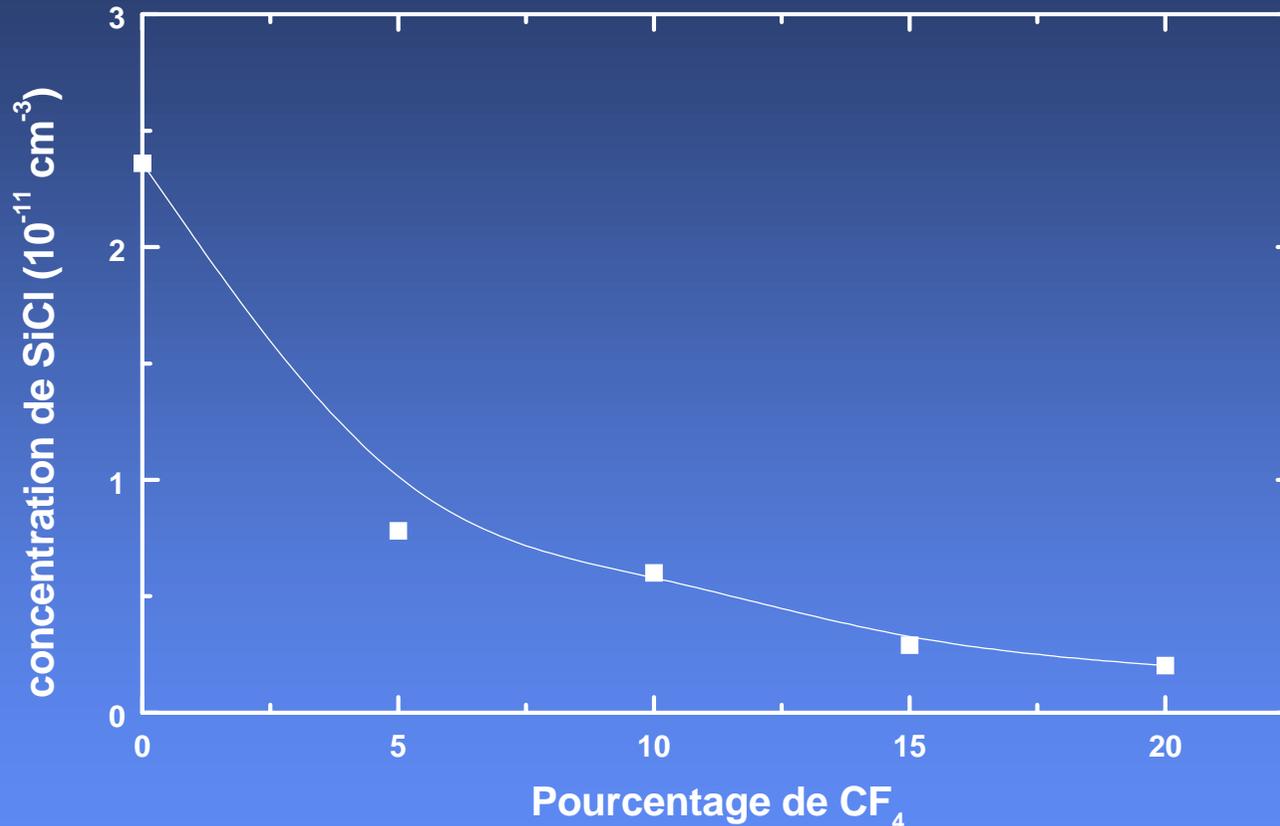
création d'un plasma secondaire au niveau de l'électrode

Ajout de CF_4 dans un plasma de Chlore

15 mTorr ; 800W source ; 600W polarisation ; 5% de CF_4

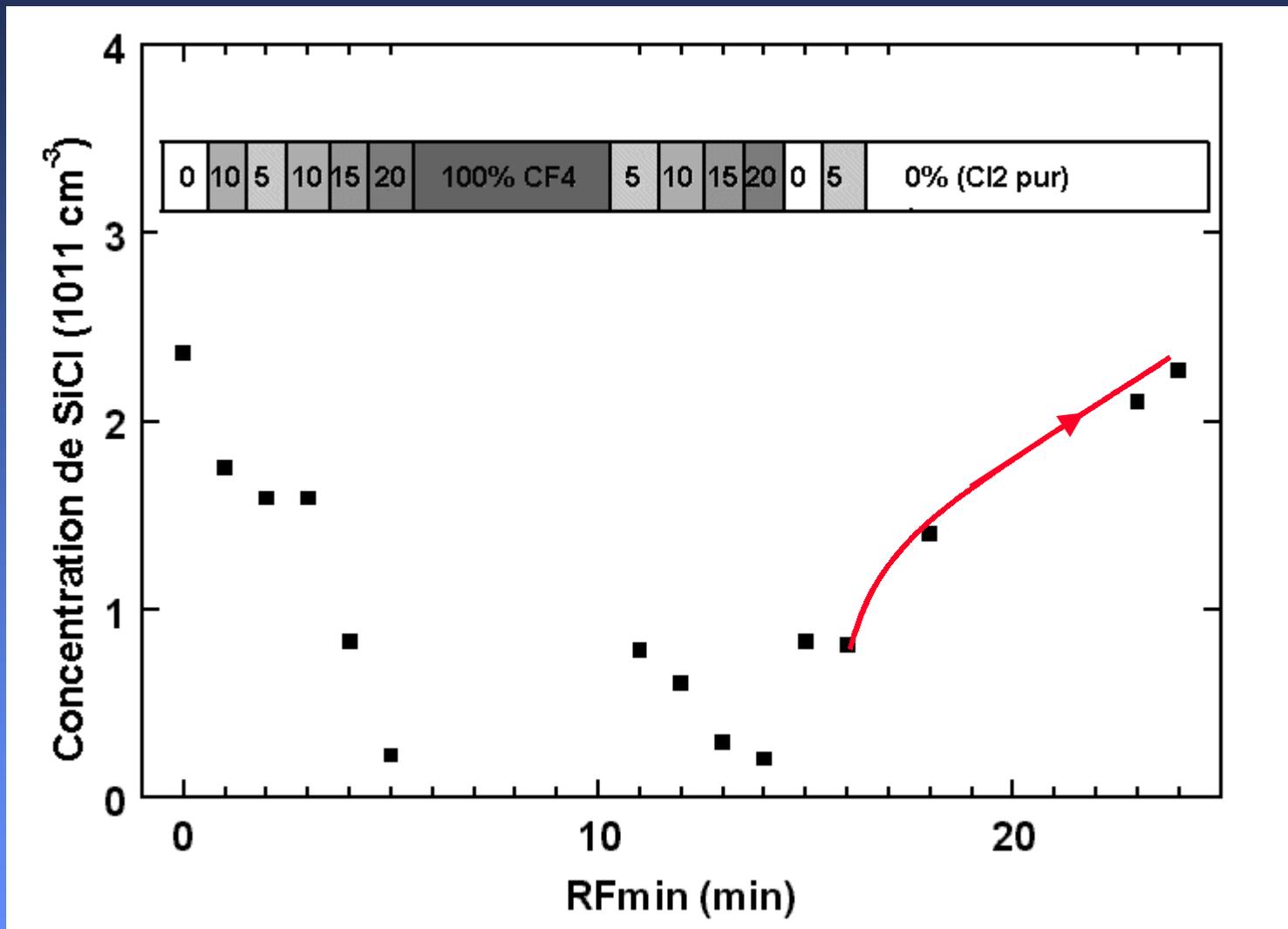


Concentrations de SiCl et SiCl₂ en fonction de CF₄⁴²

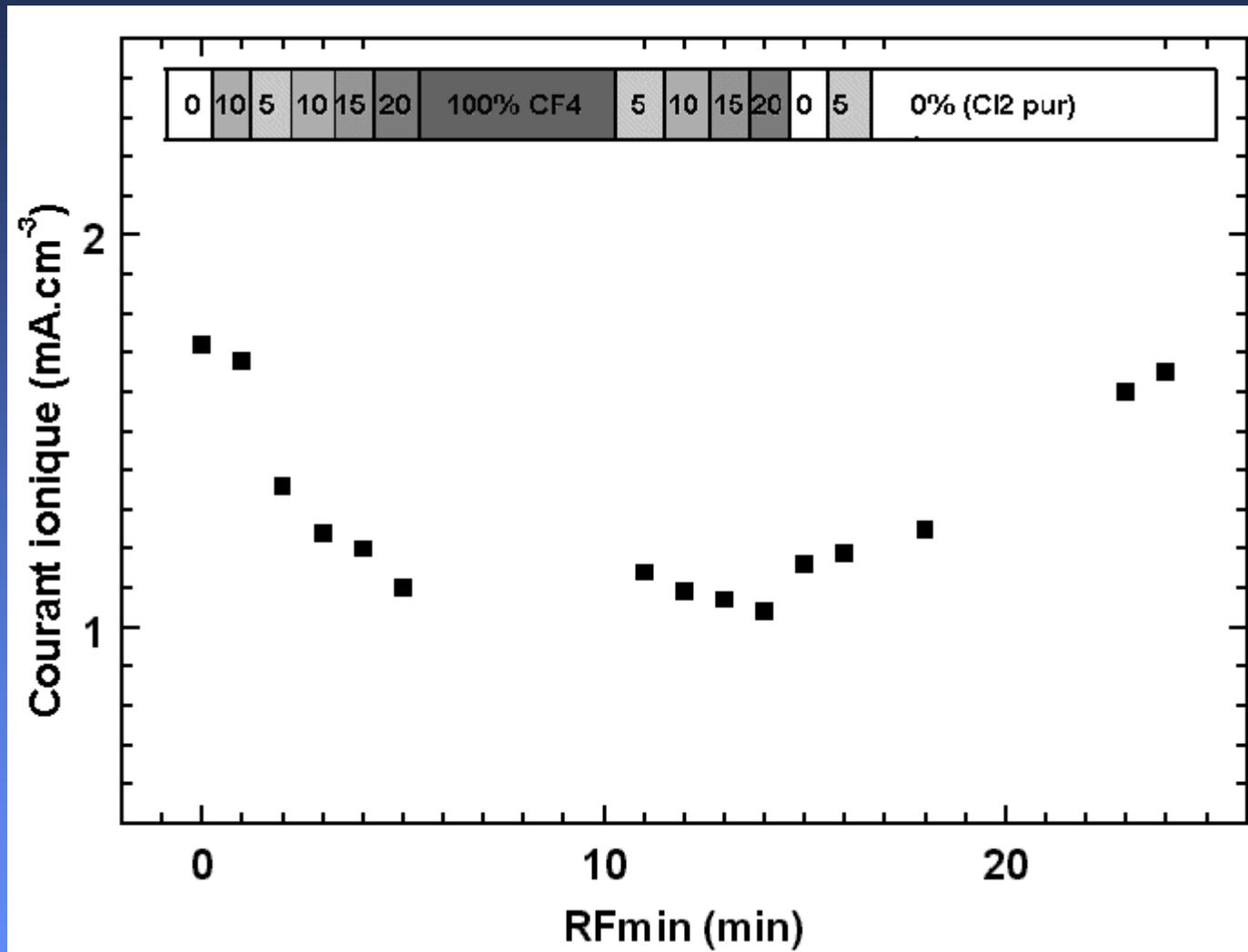


Diminution des concentrations des produits de gravure chlorés au profit des produits de gravure fluorés thermodynamiquement plus probables

Remise en état du réacteur (1/2)



Remise en état du réacteur (2/2)

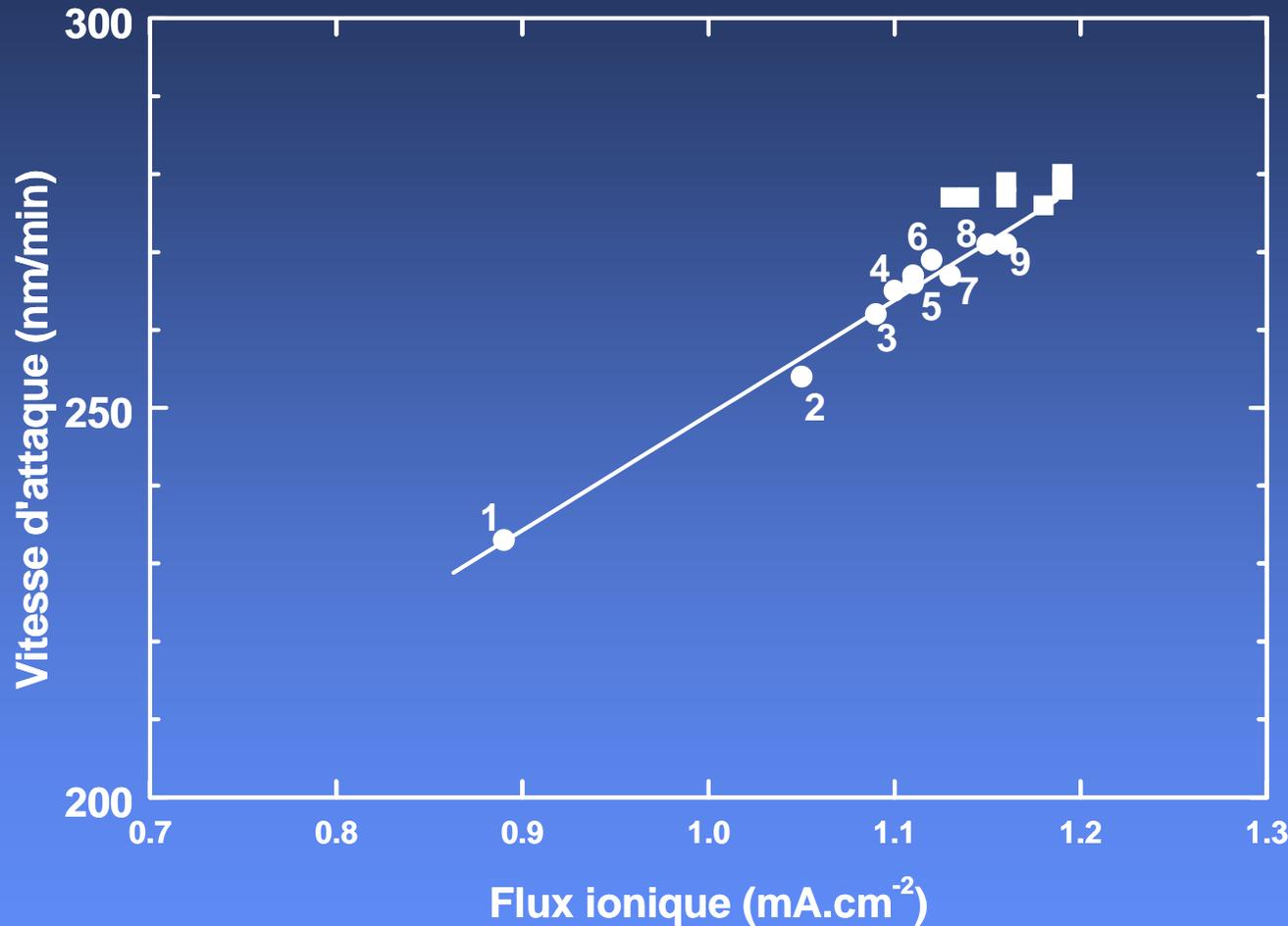


Les dépôts sur les parois agissent sur la chimie et le courant ionique du plasma

Corrélation flux ionique et vitesse de gravure

45

Mesures dans un réacteur de type Hélicon :



2 mTorr
HBr/Cl₂/O₂
600 W source
200 W polarisation

Ajout d'une
quantité fixe d'Ar

➡ DERIVE

L'historique du réacteur joue un rôle primordial

- I- Introduction
- II- Dérives : résultats LAM 9408
- III- Résultat avec réacteur de recherche Electrotech
- IV- Conclusion
 - sonde ionique
 - absorption U.V.
 - Perspectives

La mesure de flux ionique sur les parois

Tolérante aux dépôts

Fonctionne avec tous les plasmas (même électronégatifs)

Technique simple et fiable installée sur un réacteur industriel

Résultats :

Corrélation entre le flux ionique et les caractéristiques électriques des transistors

Mesure de flux ionique (caractérisation électrique du plasma)

Conclusion : absorption

L'absorption U.V. large-bande :

Mesure absolue des concentrations des neutres
Fonctionne avec tous les plasmas

Résultats :

- Mesure de la dissociation de Cl_2 (vérification du modèle)
- Concentration des produits de gravure SiCl et SiCl_2
- Détection d' AlCl (source de défauts des transistors)
lors de la gravure du silicium en chlore

Générateur de défauts en milieu industriel

Ajout de CF_4

- Disparition d' AlCl
- diminution des concentrations de SiCl et SiCl_2
- Retour à un réacteur propre (sans CF_4) progressif

Importance des interactions plasma/surface

Les diagnostics permettent :

- une meilleure compréhension des mécanismes réactionnels lors de la gravure
- un contrôle des procédés en temps réel

Passage du substrat 200 mm au 300 mm implique :

- La fin du suivi à l'aide de plaques de tests ou de mesure aléatoire (SPC)
- Suivi de chaque plaque pour intervention instantanée
 - soit par intervention manuelle
 - soit par rétroaction des diagnostics sur la machine