

L'IMPLANTATION

IONIQUE

INTRODUCTION

- **Principe : modification des propriétés d'un matériau par l'insertion d'ions dans le volume.**

- **Modifications électriques :**
 - Structure électronique des ions différente de celle du matériau

- **Modifications chimiques :**
 - Ions de nature différente de celle du matériau
 - L'énergie d'implantation active les réactions chimiques

- **Modifications structurales :**
 - La structure (cristalline ou non) est endommagée ou détruite (amorphisation)

INTRODUCTION

■ Mise en œuvre

- Production d'un plasma contenant l'ion désiré
- Accélération des ions
- Bombardement du matériau

■ Principaux paramètres

- Nature des ions
- Nature du matériau
- Énergie d'accélération
- Quantité d'ions à planter (dose)

INTRODUCTION

■ Domaines d'application :

- Semi-conducteurs
 - Dopage
 - Silicon On Insulator
 - Mésotaxie

- Matériaux
 - Traitement de surface
 - Solidification des aciers

■ Gammes d'énergie

- < 1 Kev Dépôt PECVD

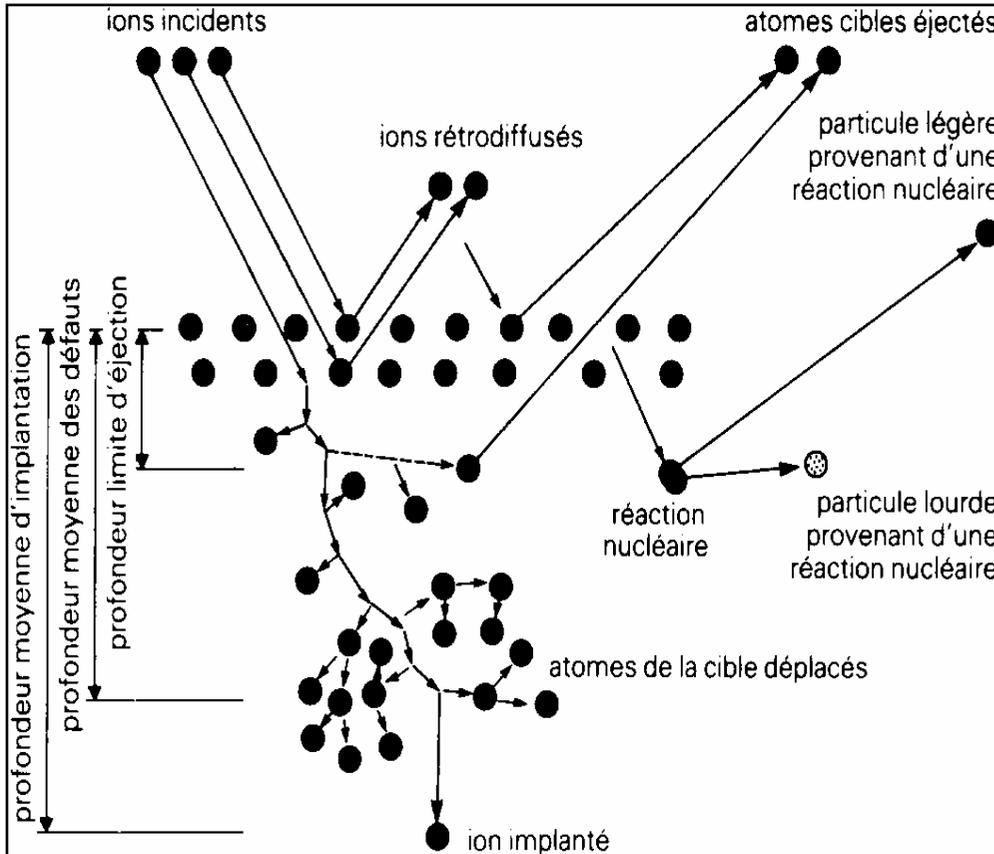
- **1 – 15 Kev** **Basse énergie**
- **15 – 500 KeV** **Moyenne énergie**

- > 500 KeV Haute énergie (accélérateurs de particule)

PLAN

- Principes théoriques [1,2,3,4]
 - Phénomènes physiques
 - Profil d'implantation
- Paramètres technologiques [1,2,3,4]
 - Canalisation
 - Défauts cristallins
 - Masquage
- Les techniques et équipements
 - Implantation par immersion
 - Principes
 - Équipements
 - Applications
 - Implantation par faisceau d'ions
 - Fonctionnement d'un implanteur à ligne de faisceau
 - Équipements
 - Applications
- L'implantation ionique au LAAS
 - Équipement
 - Procédures
- Bibliographie
- Annexe : les méthodes de caractérisation

Phénomènes physiques : interactions ions/matériau



~~Rétrodiffusion~~

Interactions électroniques

- Transferts énergétiques
 - Freinage de l'ion
 - Excitation atomique

Interactions nucléaires

- Déplacements (en cascade)
- Substitutions
- Implantations interstitielles
- ~~Réactions nucléaires~~

Interactions ions/matériau : pertes d'énergie

■ Théorie Linhard, Scharff, Schiott

- Les interaction électroniques et nucléaires sont indépendantes
- Les électrons de la cible se comportent comme un gaz d'électrons
- Pas de réactions nucléaires
- Potentiel atomique coulombien
- Fonction d'écran électronique de Thomas-Fermi

■ Pertes d'énergie (cible amorphe)

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{électronique}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{nucléaire}}$$

$$-\frac{dE}{dx} = NS_e(E) + NS_n(E)$$

- N nombre d'atomes par cm²
- S_e(E) pouvoir d'arrêt électronique
- S_n(E) pouvoir d'arrêt nucléaire

Interactions ions/matériau : pouvoirs d'arrêt

■ Pouvoir d'arrêt électronique

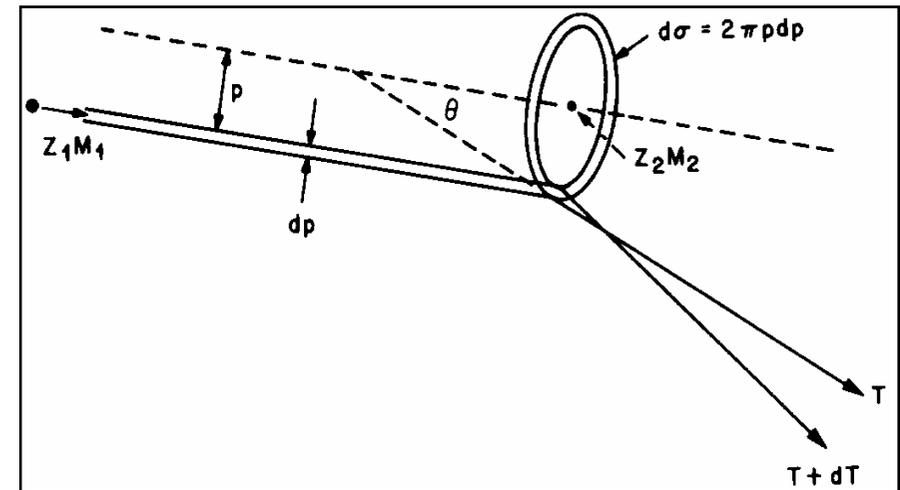
$$S_e(E) = k.E^{1/2} \text{ (eV.cm}^2 \text{ / At)}$$

$$k = Z_1^{1/6} . 8 . \pi . e^2 . a_0 . Z_1 . Z_2 . (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{-3/2} . (2/M_1)^{1/2} . (1/V_0) \text{ (eV)}^{1/2} . \text{cm}^2$$

- N nombre d'atomes par cm²
- Z₁, Z₂ numéros atomiques de l'ion et de la cible
- e charge élémentaire (1.602 10E⁻¹⁹ C)
- a₀ rayon de Bohr (0.529 Å)
- M₁ masse atomique de l'ion
- V₀ vitesse de Bohr (2.188 10E⁸ cm.s⁻¹)
- E énergie cinétique de l'ion

■ Pouvoir d'arrêt nucléaire

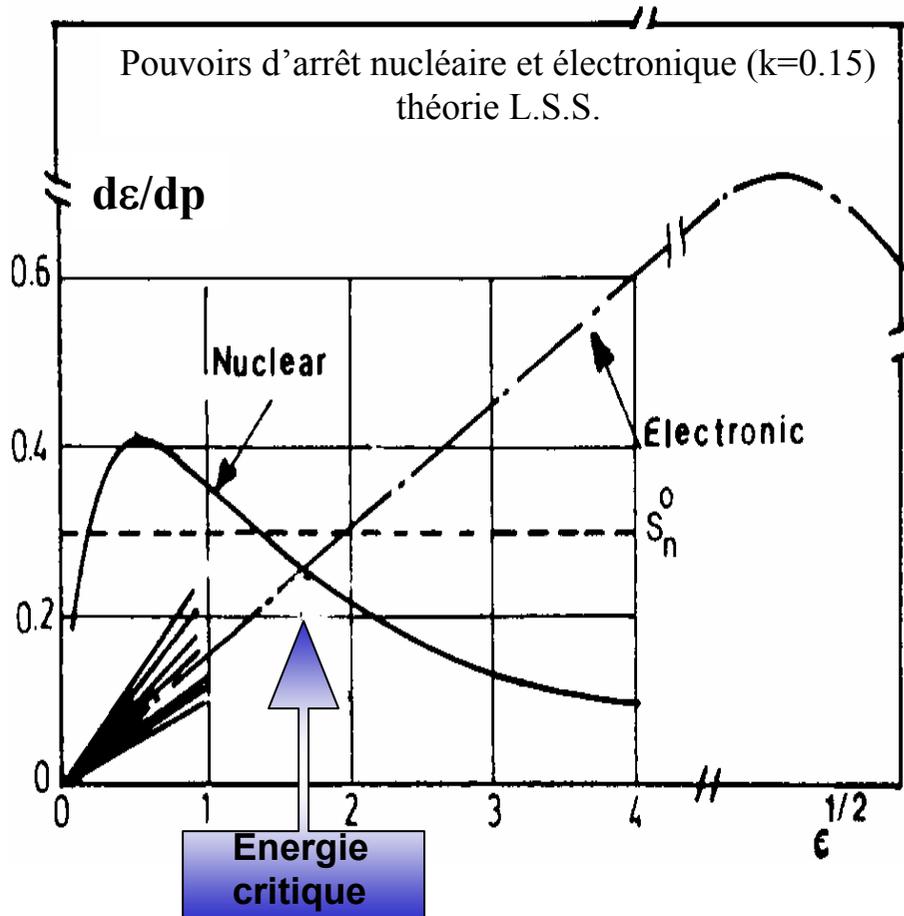
$$S_n(E) = \int_0^{T_{\max}} T(p, E) . 2 . \pi . p . dp \text{ (eV.cm}^2 \text{ / At)}$$



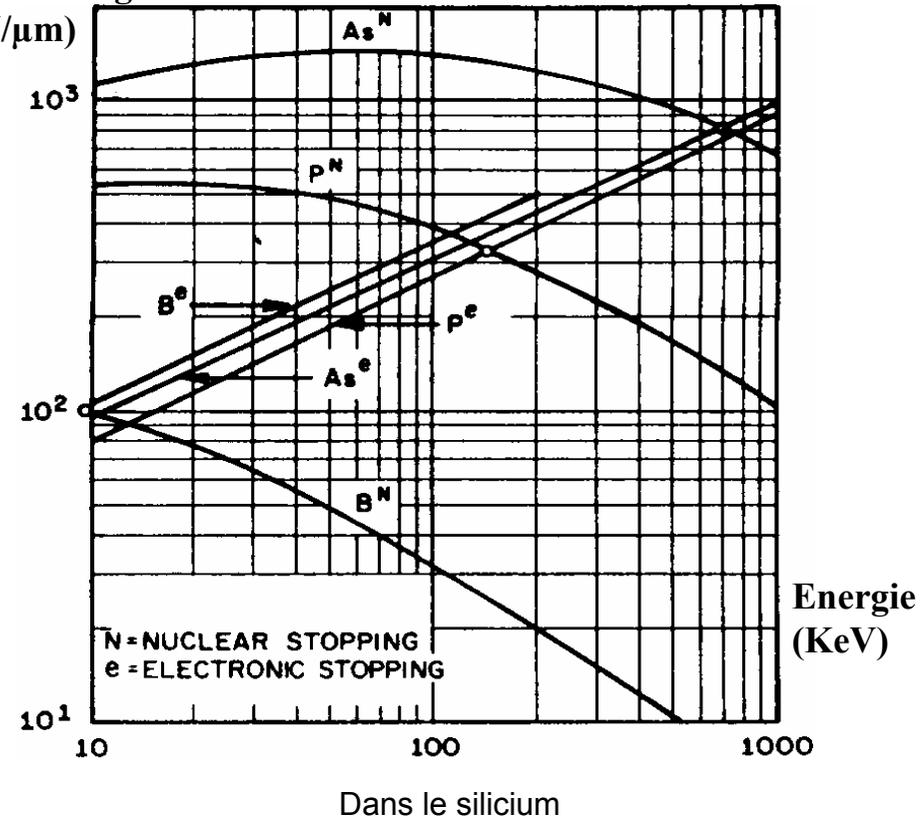
Référentiel du centre de masse

- T(p,E) énergie perdue pendant la collision
 $T(p) = [4M_1.M_2/(M_1+M_2)].E.\sin^2[\Theta(p)/2]$

Interactions ions/matériau : énergie critique



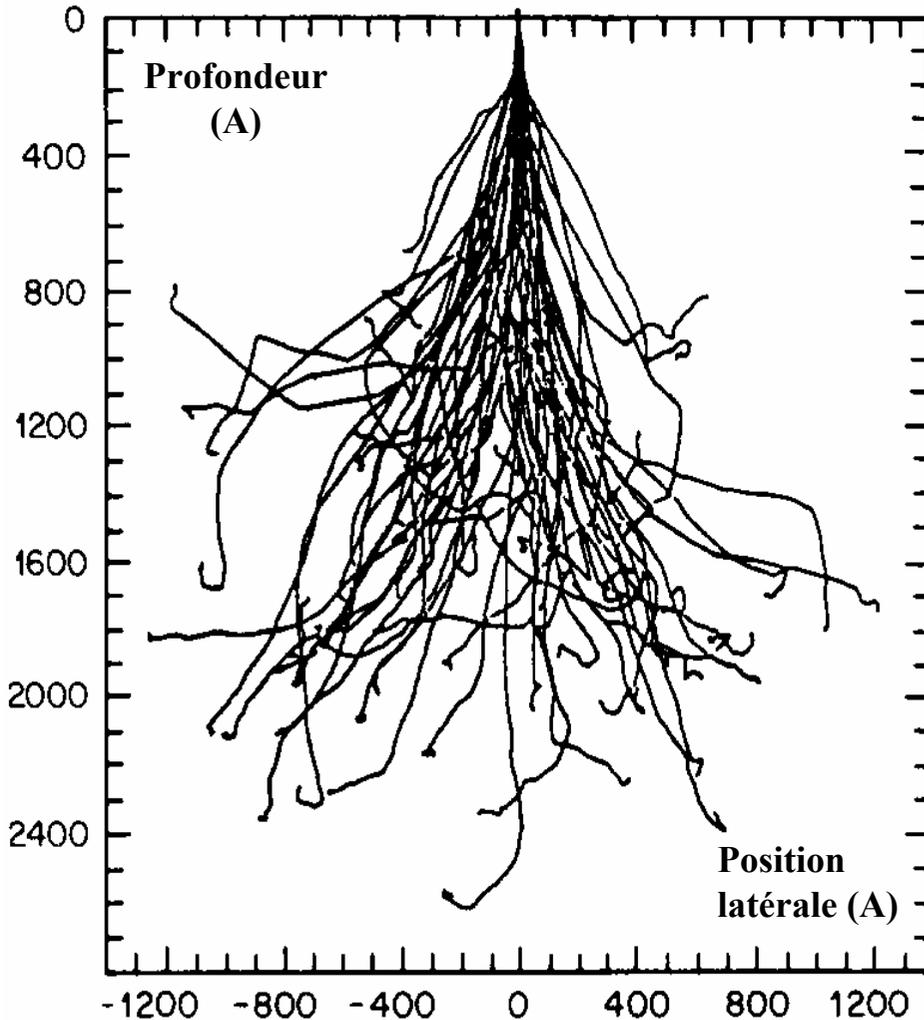
Perte d'énergie
(KeV/ μ m)



- p,ε variables réduites (référentiel du centre de masse)
- ε proportionnelle à E

- B $E_{critique} = 15 \text{ KeV}$
- P $E_{critique} = 150 \text{ KeV}$
- As $E_{critique} = 700 \text{ KeV}$

Trajectoires ioniques



■ Définitions associées au profil d'implantation

- R parcours total d'un ion

$$R = \int_0^{R_{\max}} dx = \int_0^E dE / [S_e(E) + S_n(E)]$$

- Parallèlement au faisceau incident

- R_p distance moyenne

$$R_p = R / [1 + (M_2/3M_1)]$$

- ΔR_p déviation standard

$$\Delta R_p = (2R_p/3) [(M_1 M_2)^{1/2} / (M_1 + M_2)]$$

- Perpendiculairement au faisceau incident

- R_T distance latérale moyenne

- ΔR_T déviation latérale standard

Trajectoires simulées de 128 ions de B⁺ implantés dans le silicium à 50 KeV

Profil d'implantation

■ Longitudinal (sans dispersion transverse)

$$n(x) = \left[\frac{Q_0}{(2\pi)^{1/2} \Delta R_p} \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{(x - R_p)}{\Delta R_p} \right\}^2 \right]$$

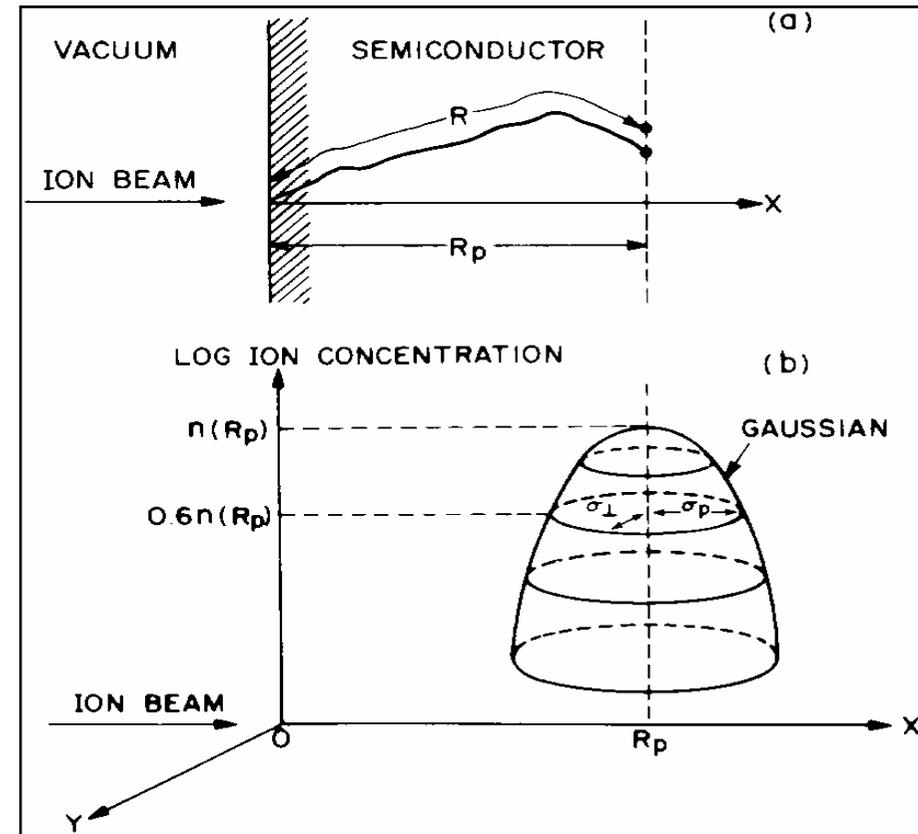
□ Dopage maximum $N_{\max} = 0.4Q_0/\Delta R_p$

■ Complet a travers une ouverture ponctuelle

$$n(x, y) = \left[\frac{n(x)}{(2\pi)^{1/2} \Delta R_T} \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left\{ \frac{(-y)}{\Delta R_T} \right\}^2 \right]$$

■ Complet à travers une ouverture de largeur 2a

$$d(x, y) = \left[\frac{n(x)}{2} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{(y - a)}{\sqrt{2} \Delta R_t} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{(y + a)}{\sqrt{2} \Delta R_t} \right]$$

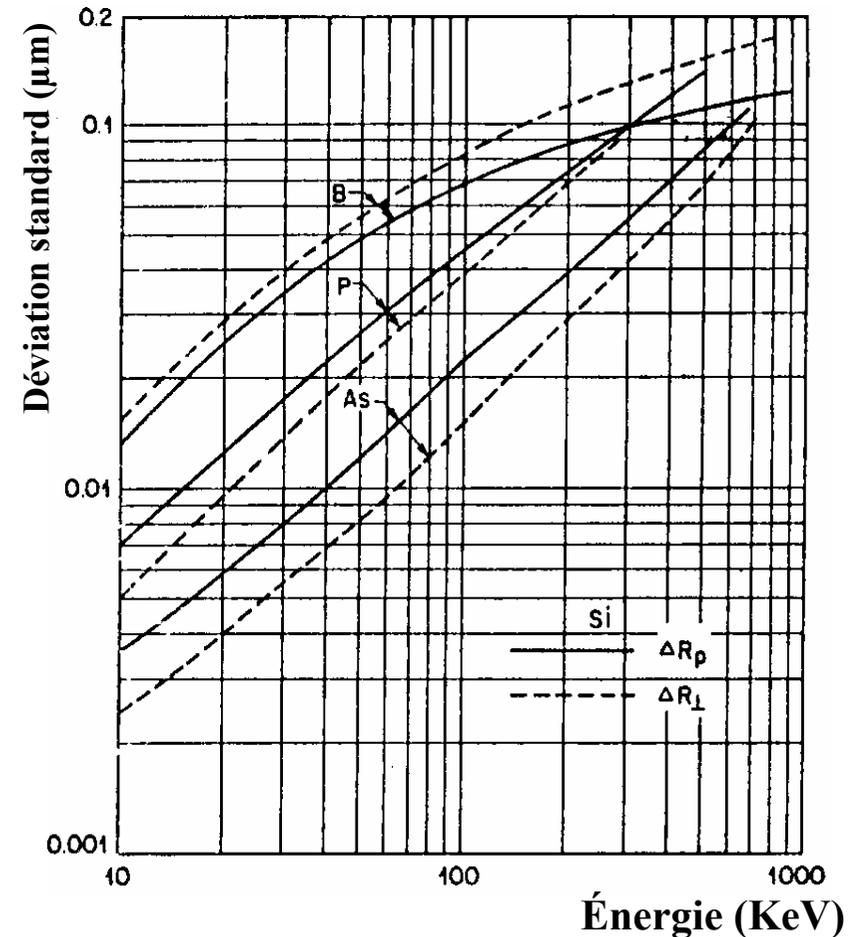
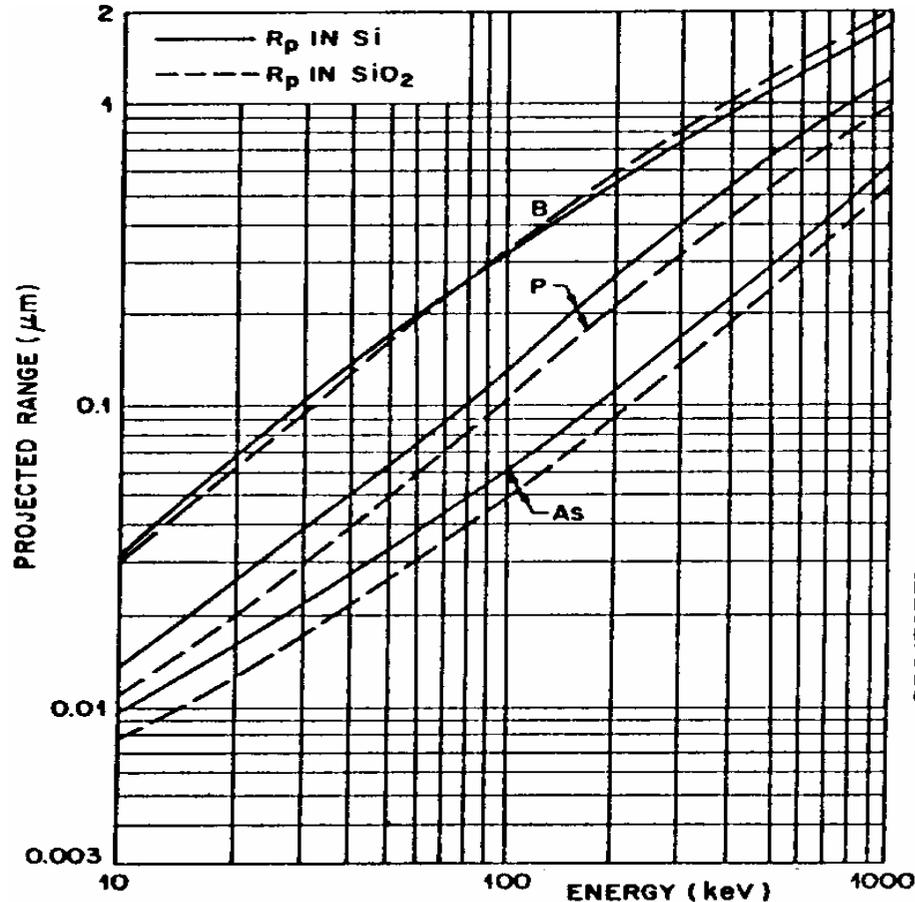


Profil d'implantation dans un matériau amorphe (Théorie L.S.S.)

Profils d'implantation dans le silicium et l'oxyde

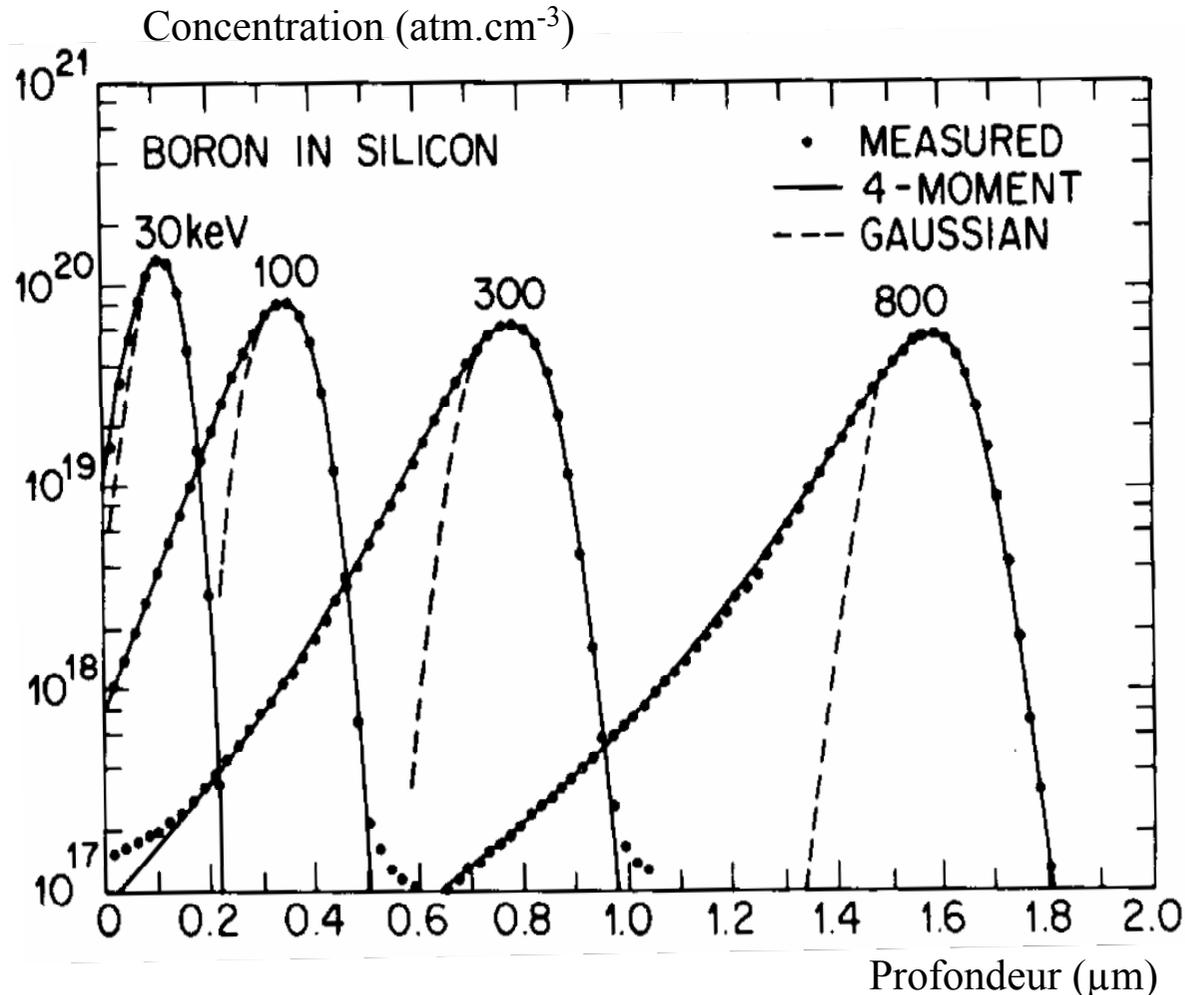
■ Distance moyenne pour B, P et As

■ Déviatoin standard pour B, P et As



Limites de la théorie L.S.S.

■ Implantation de Bore dans le Silicium (résultats expérimentaux et théoriques)



■ Rétrodiffusion

- Non prise en compte
- Concentration proche de la surface plus élevée

■ Définition des moments

$$m_i = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - R_p)^i \cdot n(x) \cdot dx$$

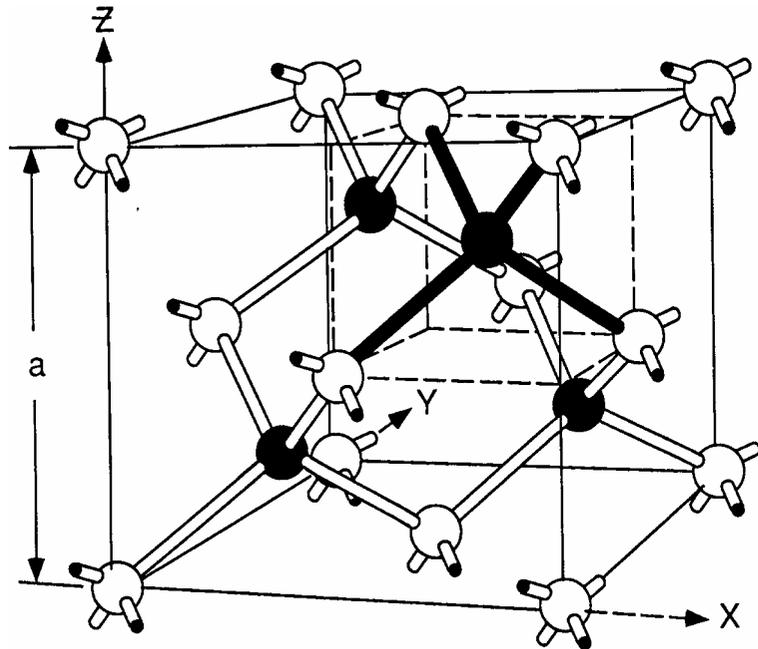
- $i = 1$ distance moyenne
- $i = 2$ déviation standard
- $i = 3$ asymétrie
- $i = 4$ écrasement

PLAN

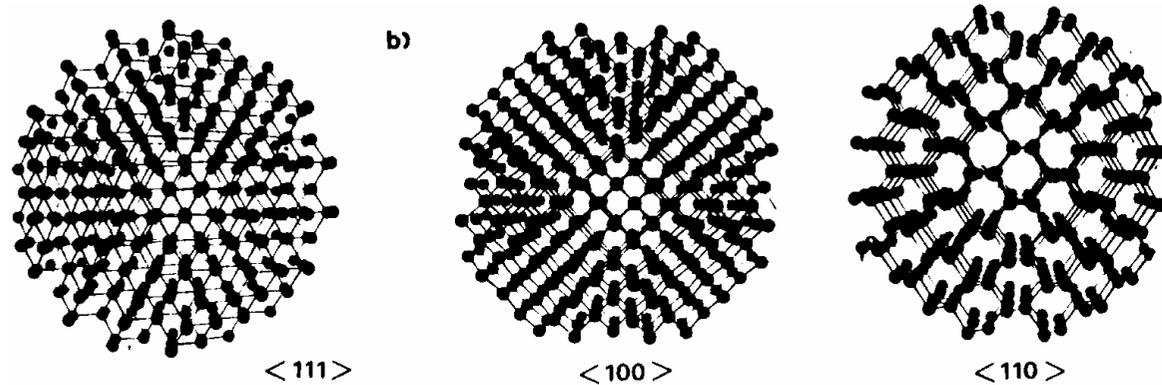
- Principes théoriques
 - Phénomènes physiques
 - Profil d'implantation
- Paramètres technologiques
 - **Canalisation**
 - **Défauts cristallins**
 - **Masquage**
- Les techniques et équipements
 - Implantation par immersion
 - Principes
 - Équipements
 - Applications
 - Implantation par faisceau d'ions
 - Fonctionnement d'un implanteur à ligne de faisceau
 - Équipements
 - Applications
- L'implantation ionique au LAAS
 - Équipement
 - Procédures
- Bibliographie
- Annexe : les méthodes de caractérisation

Phénomène de canalisation : origine

■ Structure du silicium



■ Axes cristallographiques

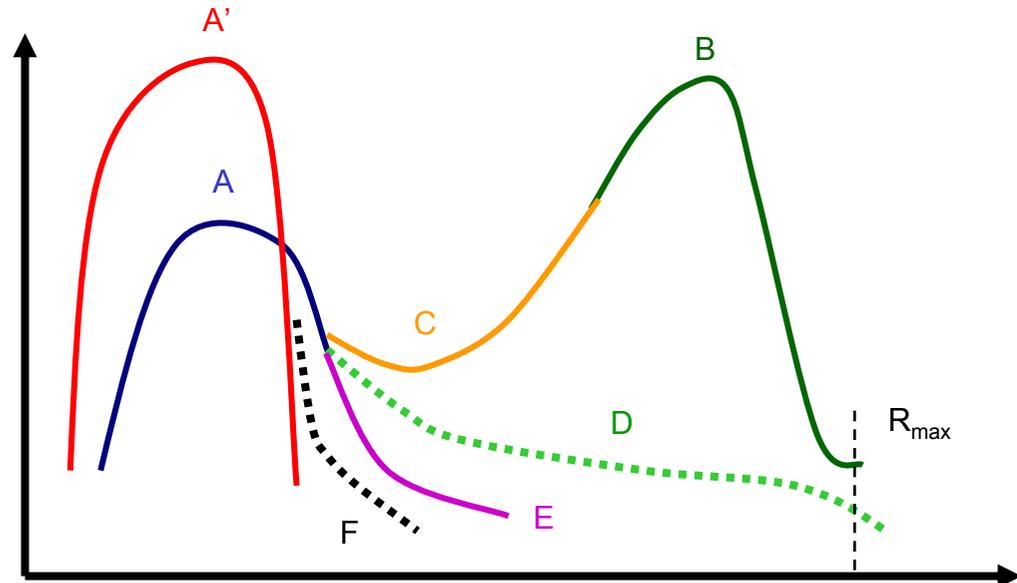
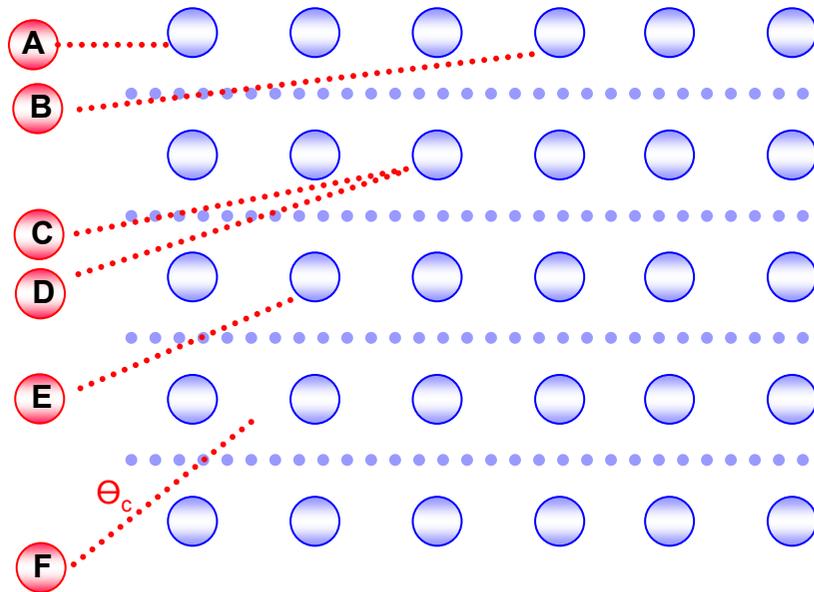


- 2 C.F.C. imbriqués (diamant)
- $\frac{1}{4}$ du paramètre de maille selon la diagonale

- Directions privilégiées
- Influence sur les probabilités de collisions

Canalisation : effets sur le profil d'implantation

■ Trajectoires des ions et profils d'implantations



■ Paramètres

- Structure cristalline
- Angle d'incidence (angle critique)
- Distance aux axes et plans cristallins
- Masses

Angle/Axe	Profil	Effet de canalisation
Faible	A C B	↑ Prédominant ↑
↓ ↓ ↓ ↓ θ_c	A C	
	A D	
	A' E	
	A' F	
		Faible

Canalisation : angles critiques

■ Angle critique axial

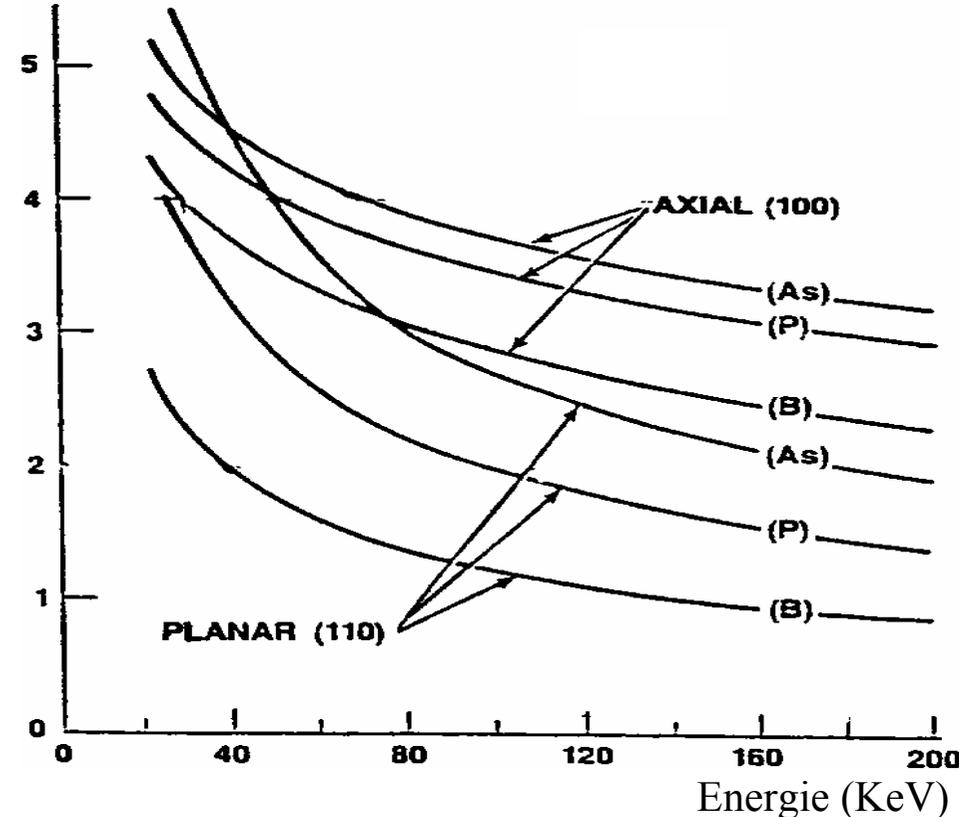
$$\theta_c(axial) = K \cdot \left(Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2 / E \cdot d_{rang} \right)^{\frac{1}{2}}$$

■ Angle critique planaire

$$\theta_c(planaire) = K \cdot \left(Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2 \cdot N_{plan} \cdot d_{plan} / E \right)^{\frac{1}{2}}$$

- K constante dépendant du matériau et de l'axe
- N_{plan} densité d'atomes dans le plan
- d_{rang} distance moyenne entre deux atomes
- d_{plan} distance moyenne entre deux plans

■ Angles critiques dans le silicium



- Energie augmente $\rightarrow \theta_c$ diminue
- Numéro atomique augmente $\rightarrow \theta_c$ augmente

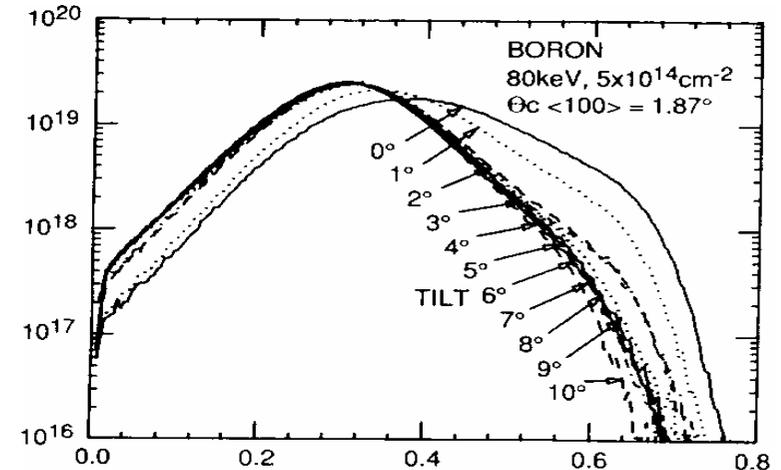
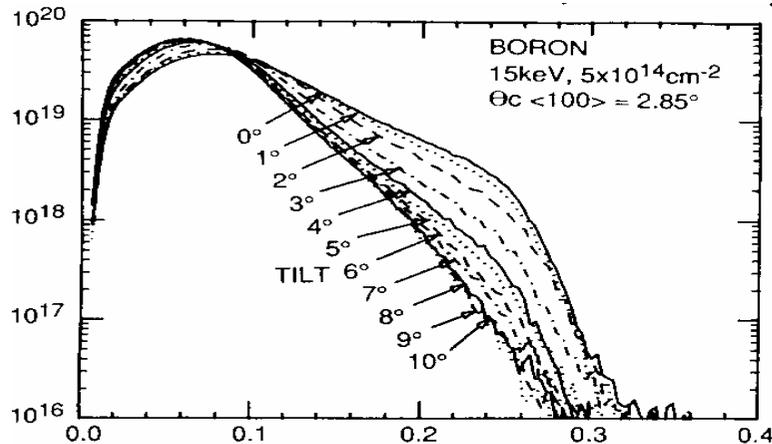
Canalisation : procédures de réduction

■ Problématique théories / réalité

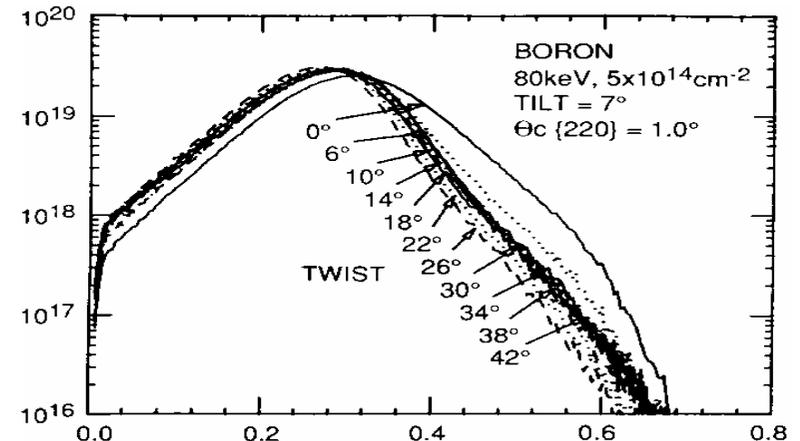
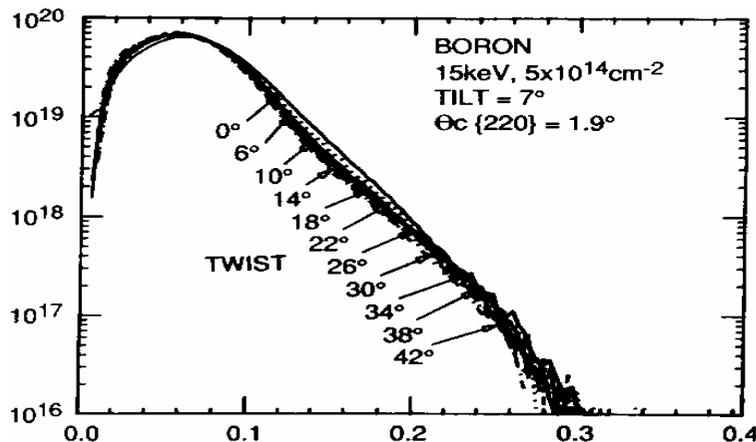
- Profils d'implantations théoriques établis dans des matériaux amorphes
- Dans la réalité implantations dans un monocristal
- Il faut recréer les conditions d'application des modèles
 - Désorientation du substrat par rapport au faisceau
 - Interposition d'une couche amorphe entre faisceau et substrat
 - Pré amorphisation du substrat

Canalisation : réduction par désorientations

- Tilt : Désorientation par rapport à la normale du faisceau (communément 7°)
- Twist : désorientation autour d'un axe perpendiculaire à la surface du substrat



Profils d'implantation de B dans le Si en fonction du Tilt et du twist

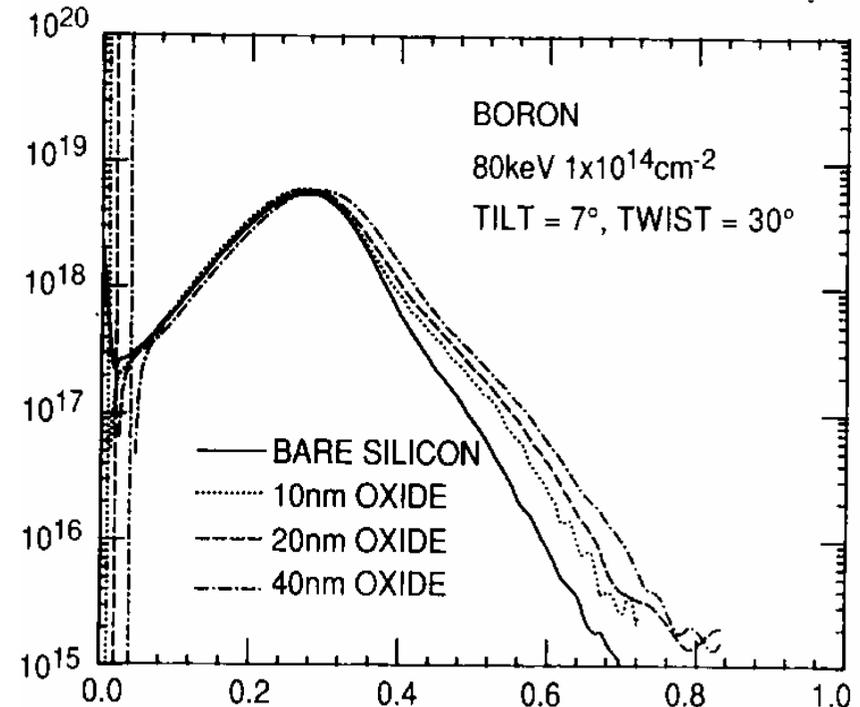
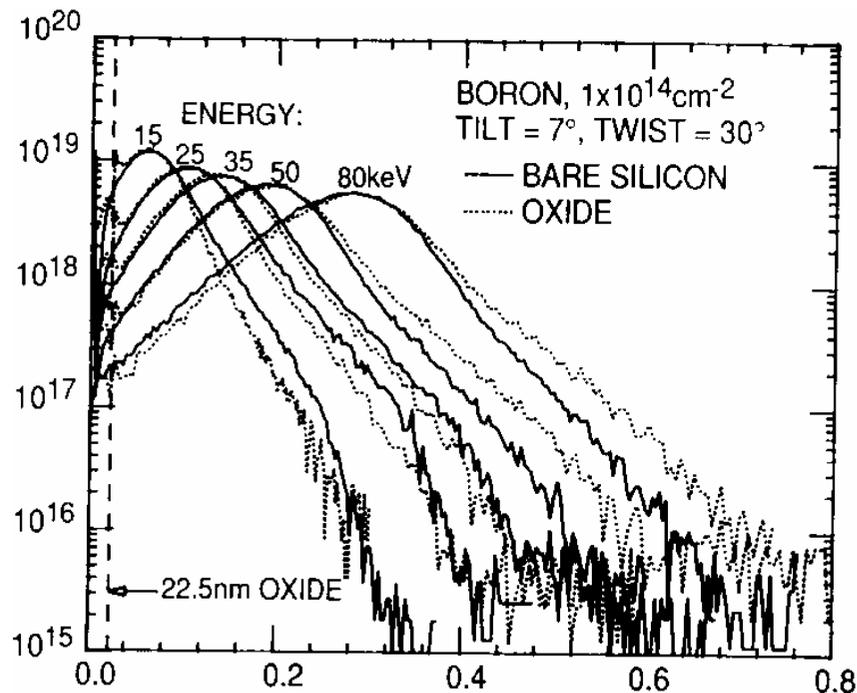


Canalisation : interposition d'une couche amorphe

■ Ecran d'oxyde

□ Epaisseur

- Faible → inefficace
- Forte → dispersion angulaire (canalisation indirecte)
- Fonction de l'énergie, l'espèce, l'orientation



Effet d'un écran d'oxyde sur l'implantation de B dans le silicium

Canalisation : pré amorphisation

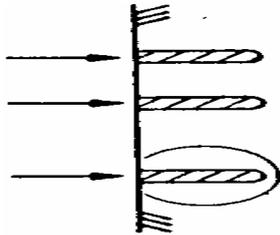
- Amorphisation : destruction de la structure cristalline par déplacement de tous les atomes du réseau

- Procédure
 1. Implantation de pré amorphisation
 - Ion « lourd » (énergie critique faible : favorise le freinage nucléaire)
 - Ion non dopant (même colonne de la classification périodique, Si et Ge pour Si)
 2. Implantation de l'espèce désirée
 - Dopage
 3. Traitement thermique des défauts
 - Recristallisation
 - Activation électrique

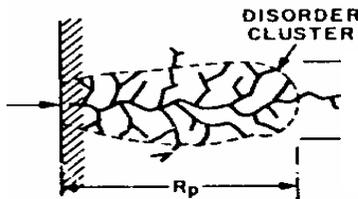
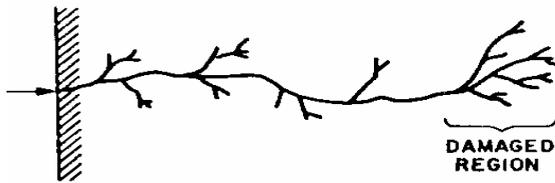
Défauts cristallins : types et profils de répartition

■ Freinage nucléaire → déplacements atomiques

- Dose faible
- Ions légers

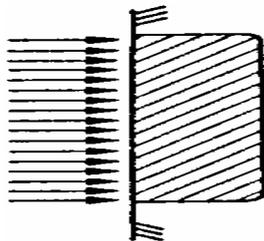


■ Défaut ponctuel



■ Agglomérats (clusters)

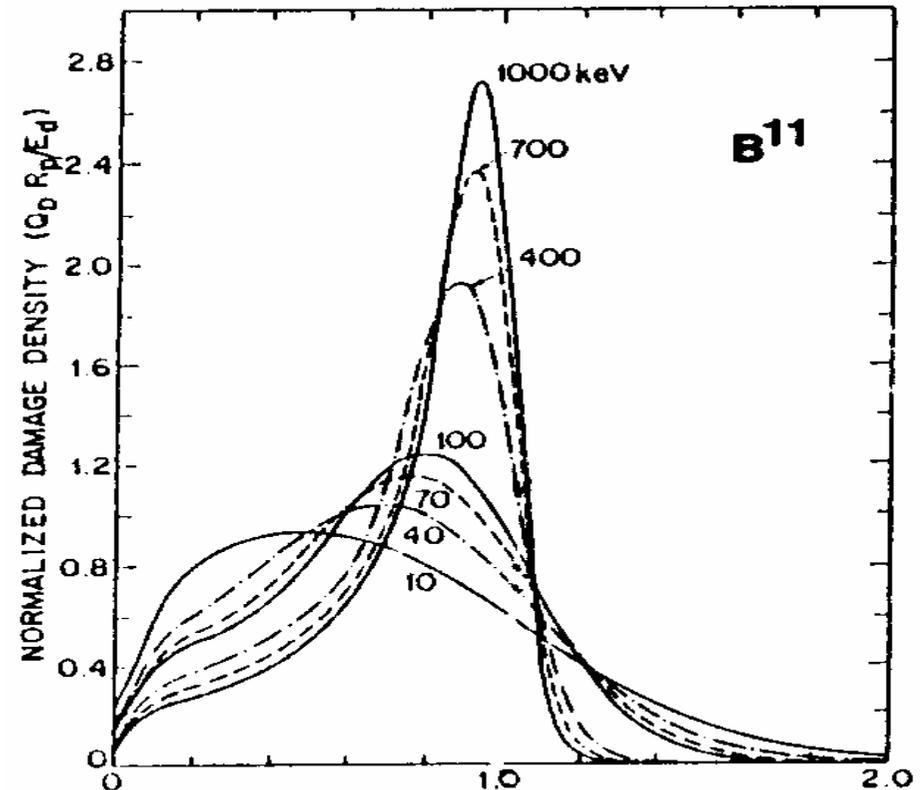
- Dose forte
- Ions lourds



■ Couche amorphe

■ Séparation spatiale défauts / N_{\max}

$$\square R_{\text{défauts}} \approx 0.8 R_p$$



Distribution des défauts de B dans Si

Défauts cristallins : traitement thermique

■ État physique du matériau après implantation

- Défauts primaires
 - Lacunes dans les mailles cristallines
 - Atomes ou ions interstitiels
- Clusters
 - Zones riches en lacunes entourées de zones riches en interstitiels
- Amorphes
 - Agglomération de clusters

■ État électrique du matériaux

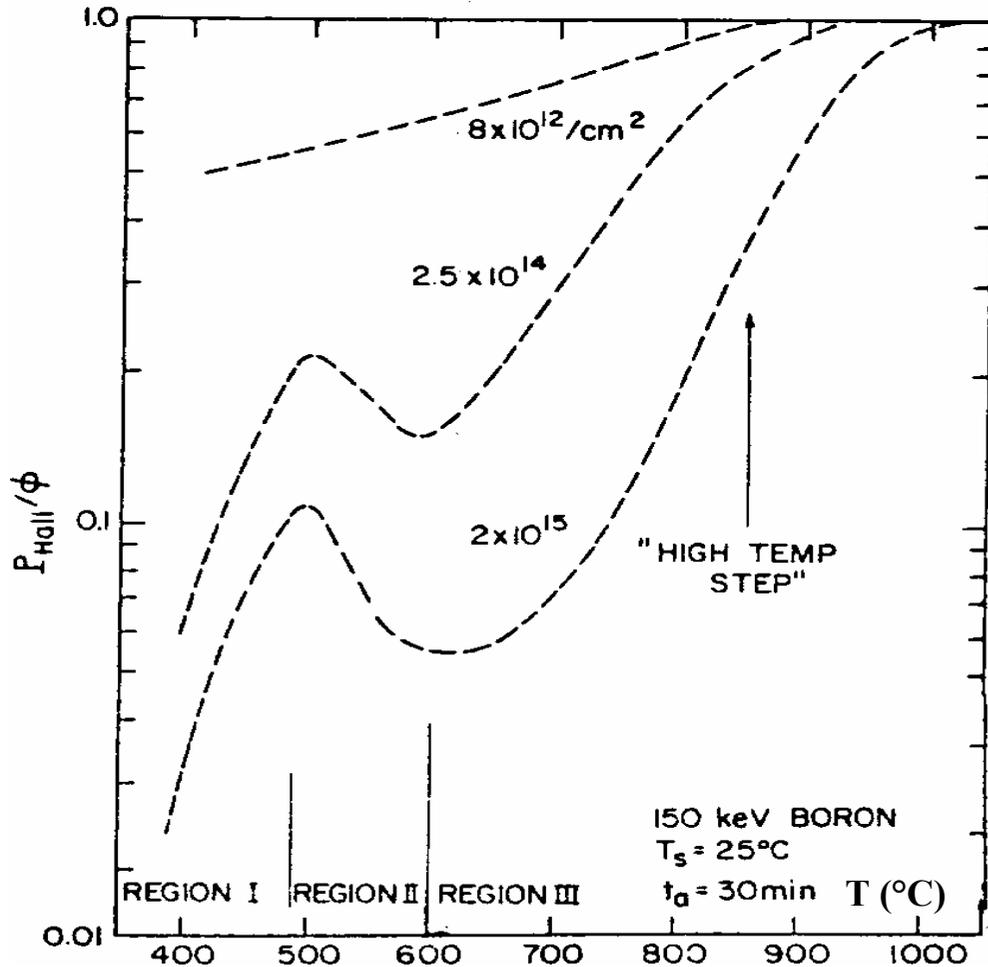
- Chute de la mobilité des porteurs
- Durée de vie des minoritaires réduite

■ Traitement thermique

- Objectifs
 - Reconstitution du réseau cristallin
 - Activation des charges
- Paramètres
 - Température
 - Durée
 - Coefficients de diffusion
- Caractérisation
 - Effet Hall
 - Résistivité du substrat

Défauts cristallins : traitement thermique

■ Activation électrique



■ Région I ($\rightarrow 480^\circ\text{C}$)

- La concentration en pièges diminue les porteurs libres rejoignent les bandes de conduction et de valence
- Diffusion des impuretés

■ Région II ($480^\circ\text{C} \rightarrow 580^\circ\text{C}$)

- Dislocation du matériau
- Chute de mobilité

■ Région III

- Reconstruction du cristal
- Occupation des sites substitutionnels
- 900°C coefficients de diffusion $\times 3$
- $> 1000^\circ\text{C}$ coefficients de diffusion vérifiés

■ RTP \rightarrow prévention de la diffusion

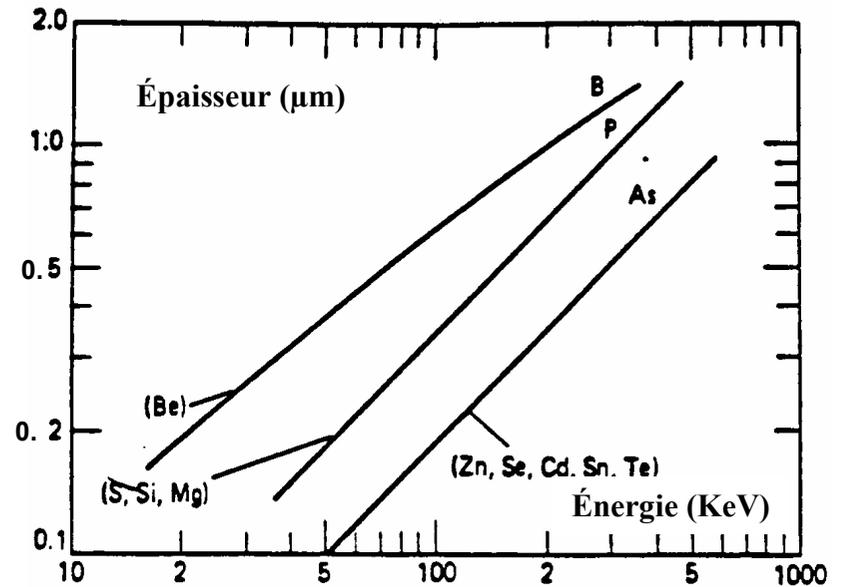
Le masquage en implantation

■ Critères de choix du matériau de masquage

- Pouvoir d'arrêt
- Compatibilité avec la microlithographie
- Contrôle de la contamination
- Facilité d'enlèvement

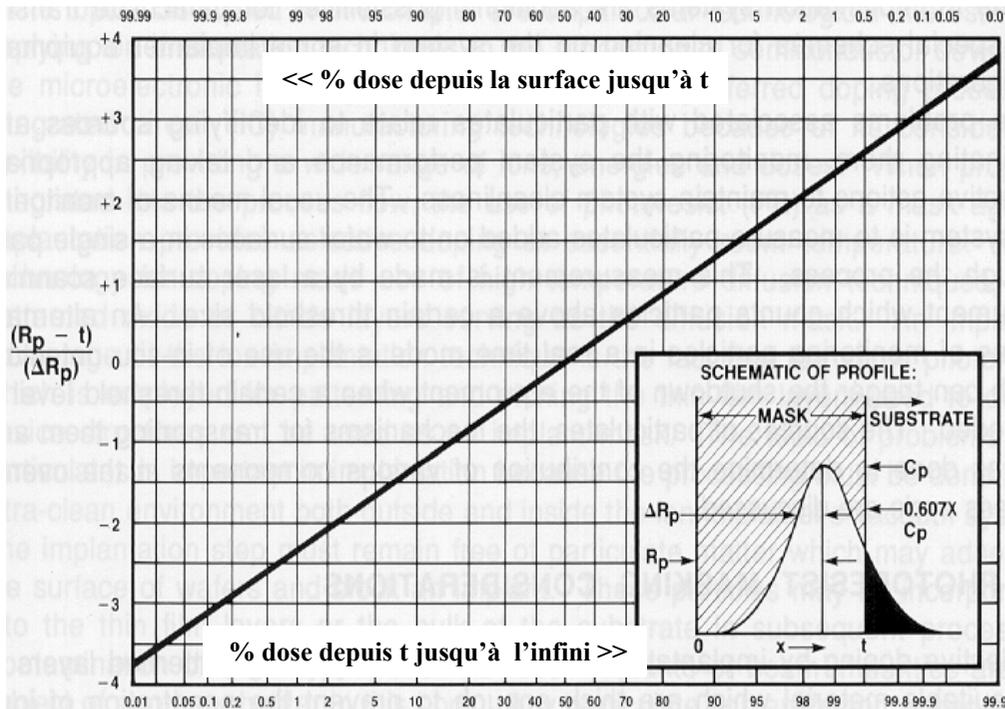
■ Nature des matériaux

- Résines photosensibles
 - Contrôle thermique in situ



Épaisseur minimum de résine pour stopper 99.99 % du faisceau

- Oxyde, nitrure
 - Effet de canalisation
- Métaux
 - Pollution des surfaces



Évolution de l'efficacité de masquage

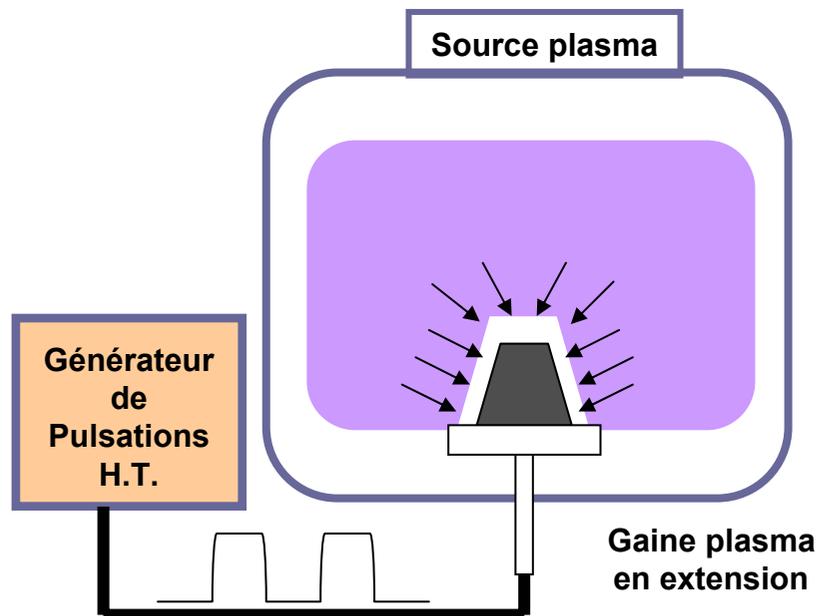
PLAN

- Principes théoriques
 - Phénomènes physiques
 - Profil d'implantation
- Paramètres technologiques
 - Canalisation
 - Défauts cristallins
 - Masquage
- Les techniques et équipements
 - **Implantation par immersion**
 - Principes
 - Équipements
 - Applications
 - Implantation par faisceau d'ions
 - Fonctionnement d'un implantateur à ligne de faisceau
 - Équipements
 - Applications
- L'implantation ionique au LAAS
 - Équipement
 - Procédures
- Bibliographie
- Annexe : les méthodes de caractérisation

Les techniques d'implantation

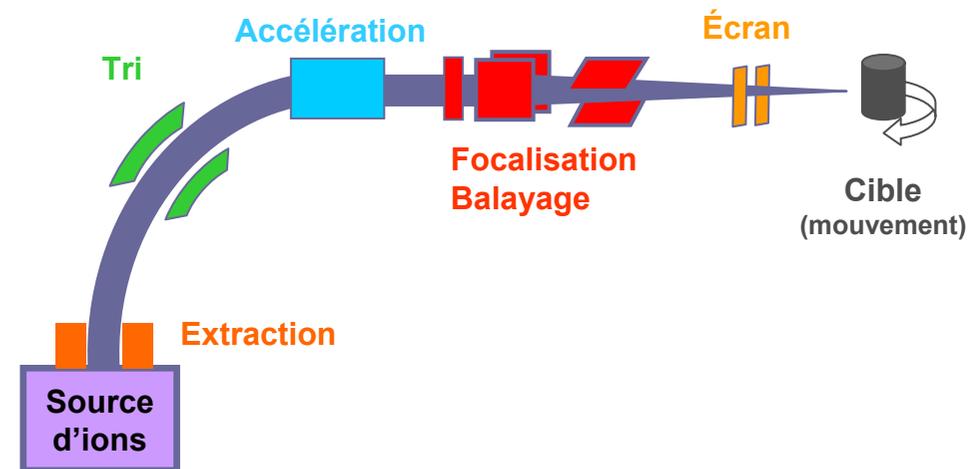
■ Immersion plasma

- La cible est dans une enceinte contenant un plasma
- Des pulsations haute tension appliquées à la cible causent un bombardement ionique sur toute sa surface



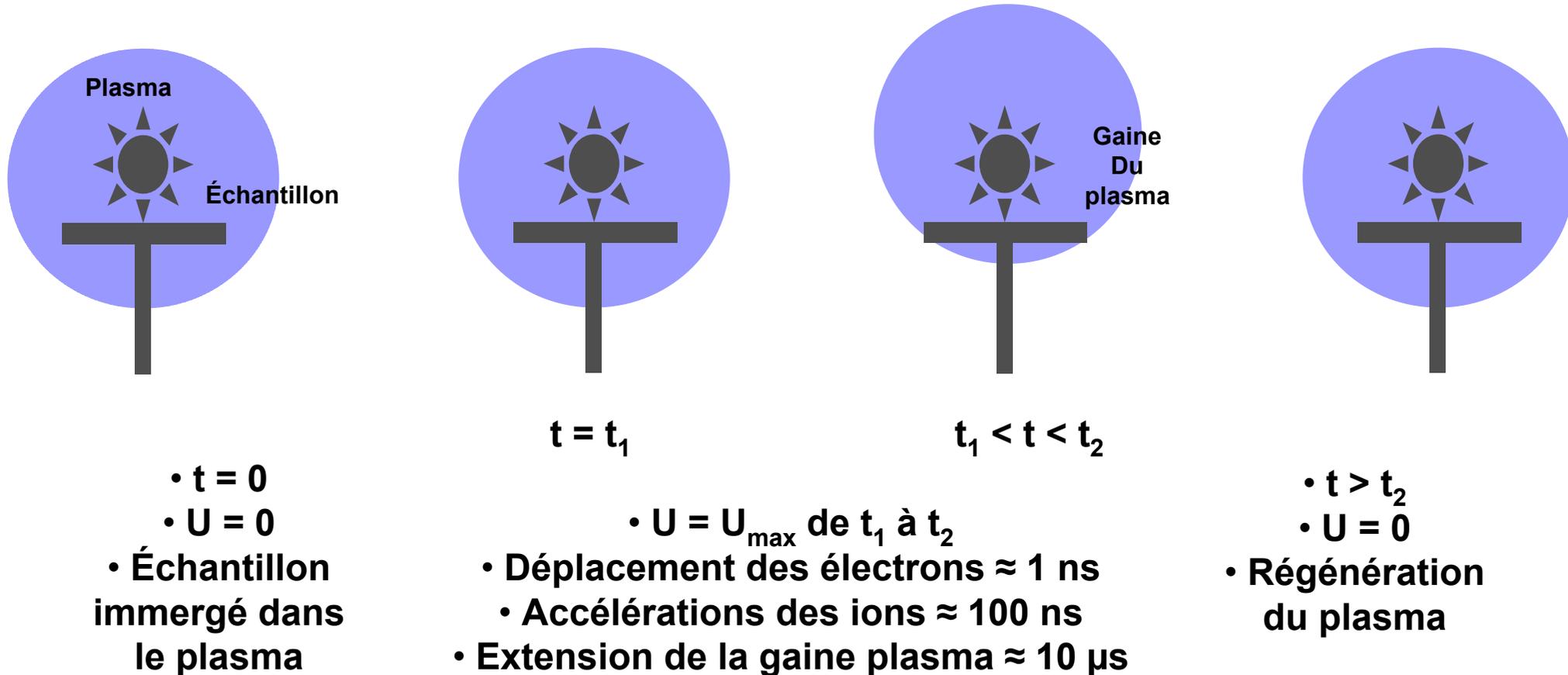
■ Par ligne de faisceau

- La cible est sur un support indépendant
- Une ligne de faisceau guide, trie et accélère les ions depuis la source jusqu'à la face visible de la cible



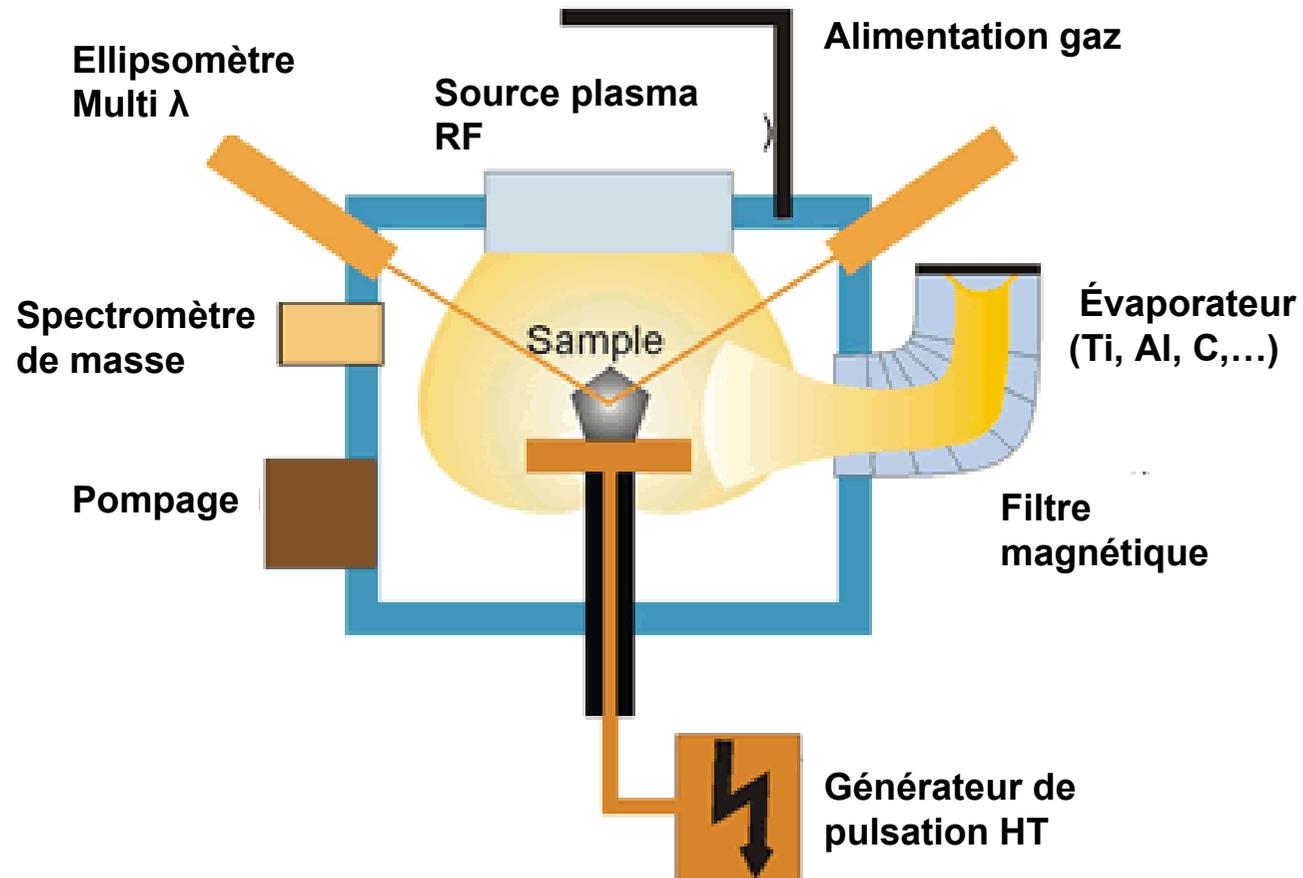
Principe de l'Implantation ionique par immersion plasma [5,6,7]

■ Évolution temporelle du plasma



PIII : les équipements

■ Configuration d'une machine MePIIID

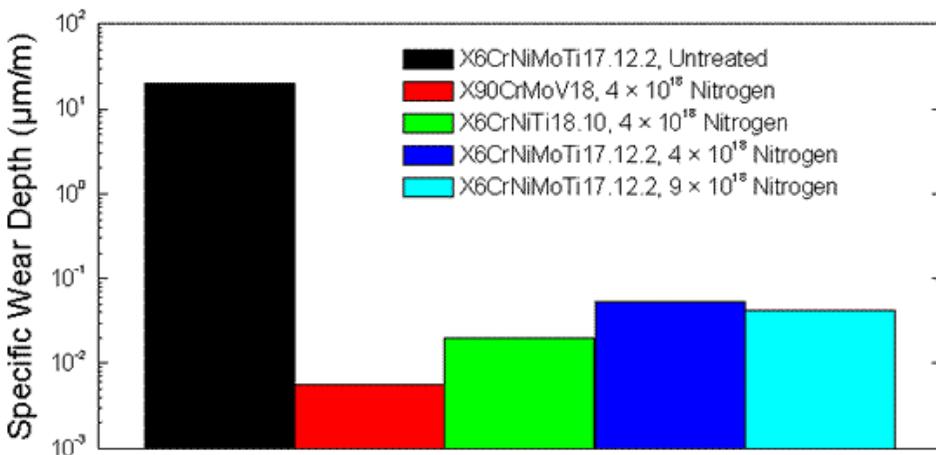


PIII : les équipements

■ Traitement de pièces métalliques



- Chambre 1.6 m³
- Pulsation : 50 KV - 5 A max
- T_{max} = 800 °C



■ Traitement de substrats



- Substrats 200 mm
- Pulsation :
 - HT : 15-50 KV
 - Fréquence : 0-200Hz
 - Dureé : 5-50 µs
- Puissance RF : 2 – 5 KW
- Température substrat : <150°C ou >550°C
- Vide limite : < 50 10⁻⁸ Torr
- Ions : H⁺, He⁺, Ar⁺, O⁺, etc.

Paramètres de l'implantation ionique par immersion plasma

■ Nature du plasma

- Espèces
- Densité

■ Morphologies

- Réacteur
- Cible

■ Pulsation plasma vs HT

- Amplitudes
- Fréquences
- Durées
- Synchronisation

■ Température

- Phénomène de diffusion

Cœxistence entre Implantation – Diffusion - Dépôt

Limitations et perspectives des techniques PIII

■ Limitations

- Technique basse énergie
 - < -10KV électrons secondaires
 - < -30KV rayons X
- Maîtrise de la taille de gaine plasma
 - < taille objet pour dopage conforme
 - Sinon traitement non conforme
 - 3D par mise en mouvement de la cible
- Coût (traitement des aciers)
 - Rentable si T° doit être faible
- Procédé multi énergétique
- Pureté spectrale très faible
- Traitement des isolants difficile
 - Géométries particulières
 - Conditions de plasma particulières

■ Perspectives

- Gamme < -50 KV
- Améliorations des sources pulsées
 - HT
 - Plasma
- Meilleur contrôle in situ
- Techniques PIII&D plutôt que PIII
- Développement du traitement conforme

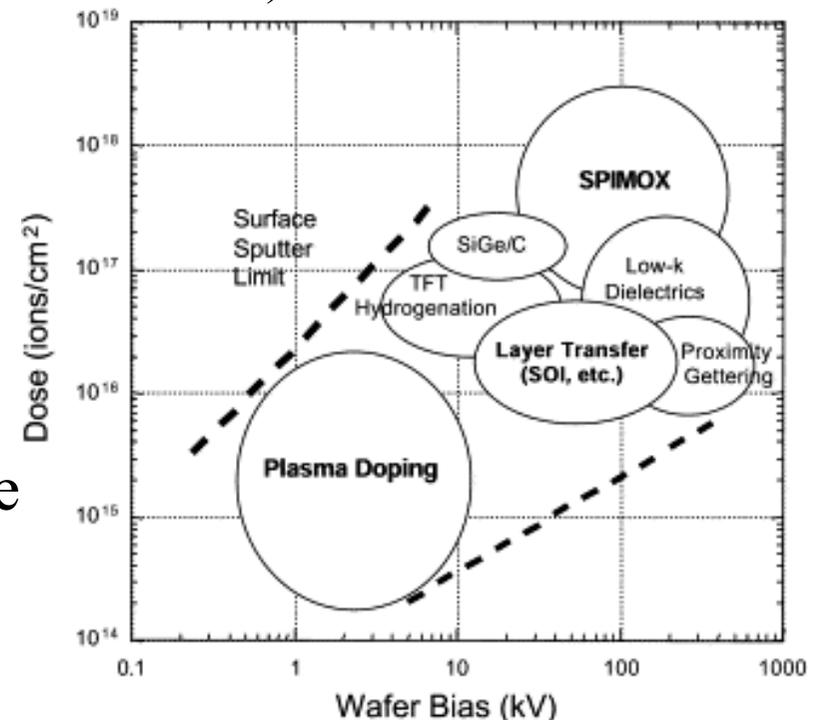
Plasma Immersion Ion Implantation : applications en micro électronique et micro systèmes [8,9]

■ Faible dose

- Dopage Si, Polysilicium (Absence de défauts après recuit).
 - facteur d'idéalité : 1.05
 - courant de fuite $2\text{nA}/\text{cm}^2$ à -5V
- Dopage conforme dans des tranchées (rapport de forme 1:12)
- Dopage H^+ pour process SOI
- Croissances conformes dans des tranchées
- Piégeage d'impuretés métalliques face arrière
- Traitement de surface (promotion d'adhérence)

■ Forte dose

- Separation by **IM**plantation of **OX**ygene
- Recuit Si-Ge
- Formation de micro cavités



Plasma Immersion Ion Implantation : autres applications [5]

Nom	Polarisation HT	Conditions plasma	Nature des ions	Autres conditions	Applications
Plasma Immersion Ion Implantation	Négative Pulsée	Classiques	N	Température élevée	Amélioration de la résistance à l'usure (aciers, aluminium, etc.)
			O		Amélioration de la biocompatibilité (Ti et alliages)
Metal Plasma Immersion Ion Implantation	Négative Continue	Pulsation rapide	C , Ti, Er	Synchronisation des pulsations	Implantation d'ions métalliques purs
			Al, Sb		
Metal Plasma Immersion Ion Implantation Deposition	Négative Pulsée	Classiques	Métaux	Plusieurs pulsations HT pendant une pulsation plasma	<i>Sous vide</i> Films métalliques minces haute qualité (Ta, C structure diamant) Remplissage de tranchées (Cu)
					<i>Avec gaz réactifs</i> Films minces haute qualité

- Polymères : traitement possible lorsque le support permet la polarisation

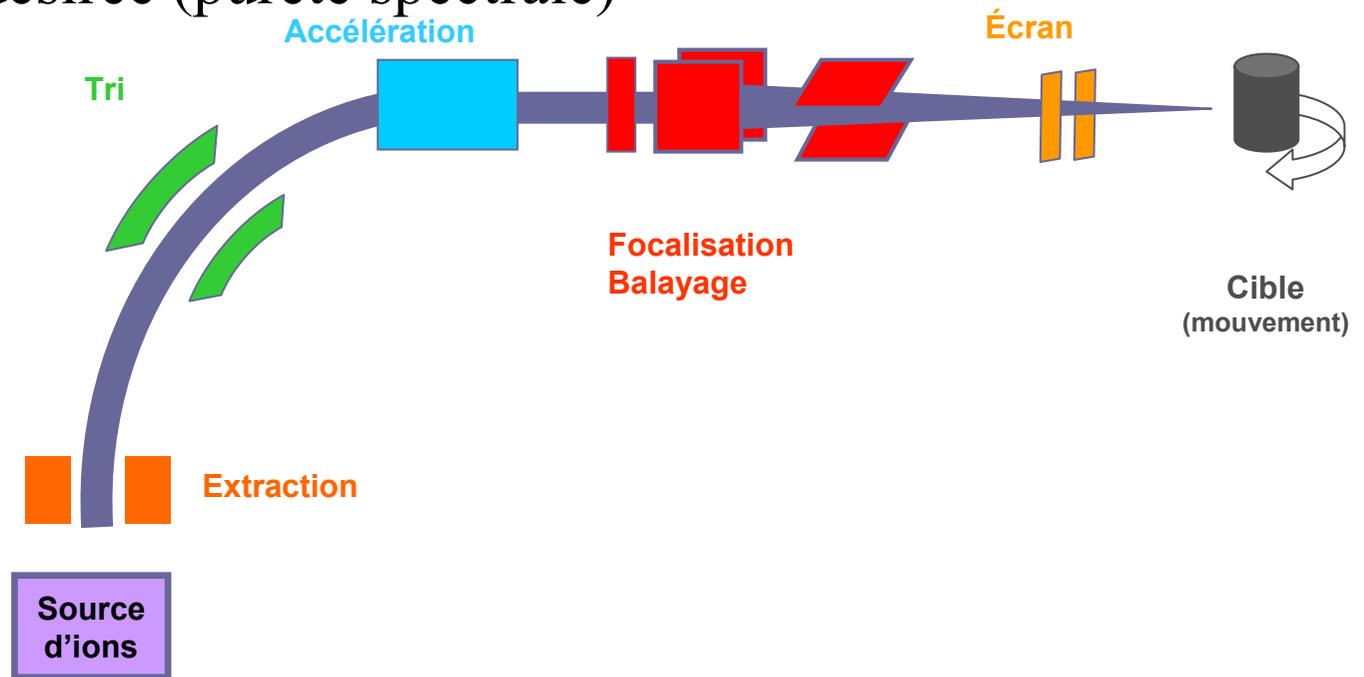
PLAN

- Principes théoriques
 - Phénomènes physiques
 - Profil d'implantation
- Paramètres technologiques
 - Canalisation
 - Défauts cristallins
 - Masquage
- Les techniques et équipements
 - Implantation par immersion
 - Principes
 - Équipements
 - Applications
 - **Implantation par faisceau d'ions**
 - **Fonctionnement d'un implantateur à ligne de faisceau**
 - **Équipements**
 - **Applications**
- L'implantation ionique au LAAS
 - Équipement
 - Procédures
- Bibliographie
- Annexe : les méthodes de caractérisation

Principe de l'Implantation ionique avec ligne de faisceau

Architecture générale d'une ligne de faisceau

1. Production du plasma
2. Extraction des ions
3. Tri de l'espèce désirée (pureté spectrale)
4. Accélération
5. Focalisation
6. Balayage
7. Implantation

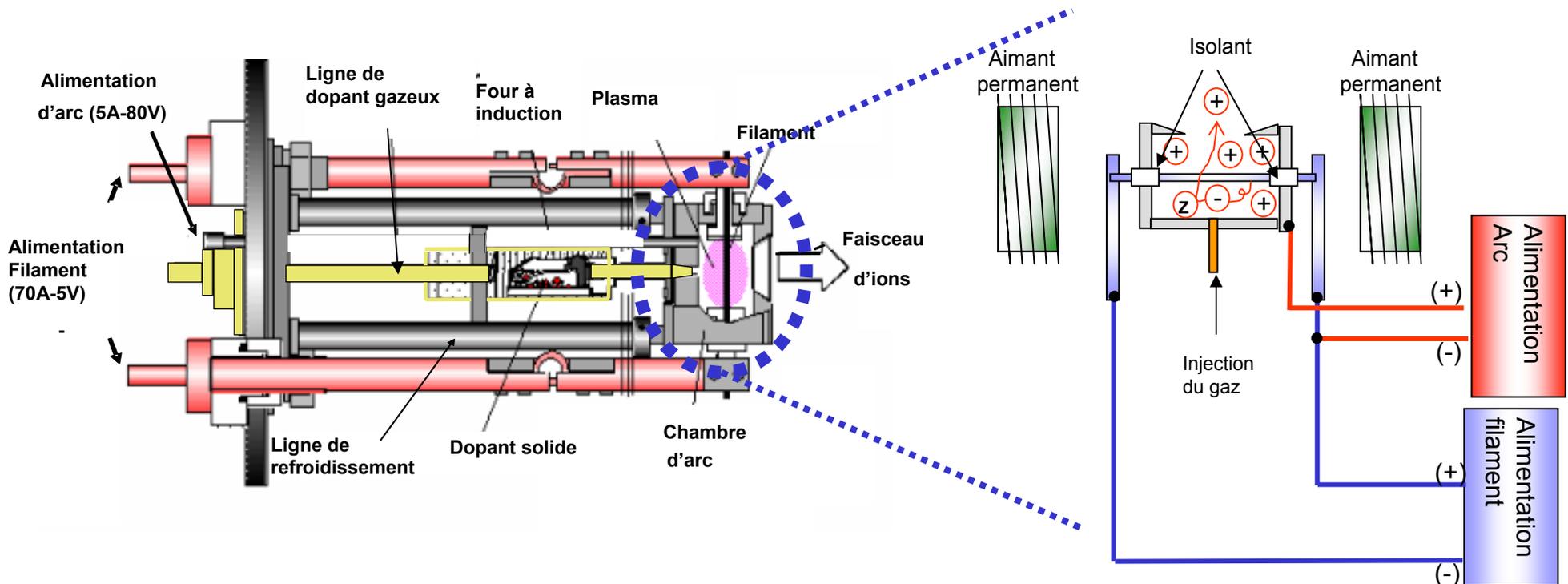


En fonction du type de machine la position relative des éléments peut varier

Fonctionnement d'un I.I. : La source

■ Production du plasma

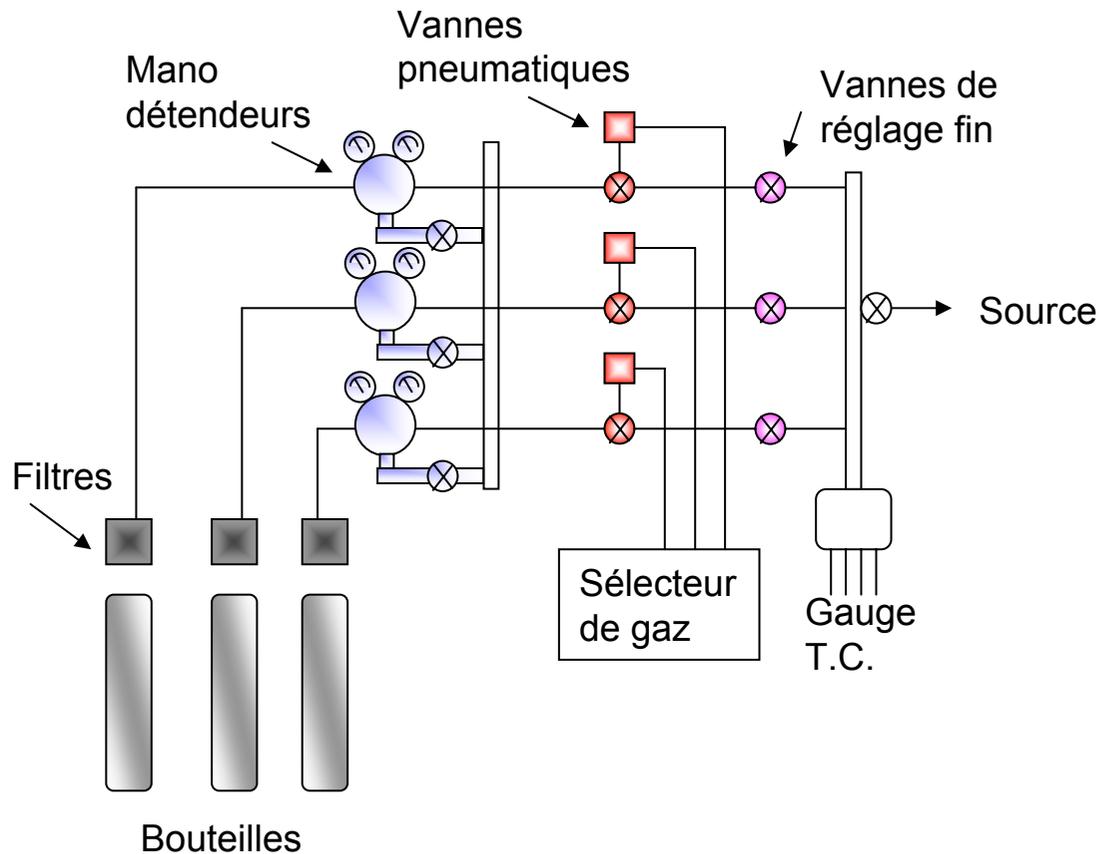
1. Injection du dopant
2. Courant filament (émission thermo électronique $\approx 2200^{\circ}\text{C}$)
3. Tension d'arc (allumage et entretien du plasma)
4. Aimant permanent (trajectoire hélicoïdale des particules chargées)



Fonctionnement d'un I.I. : Injection des dopants dans la source

■ Dopants en bouteilles

- Gazeux
- Liquides (Faible pression de vapeur)



■ Dopants solides

- Canne dans la source
 - Creuset ($\approx 8 \text{ mm}^3$)
 - Four à induction (600°C)
- Sécurité !!
 - Protocole de mise en œuvre
 - Système de stockage sous vide



Fonctionnement d'un I.I. : formation du faisceau

■ Source :

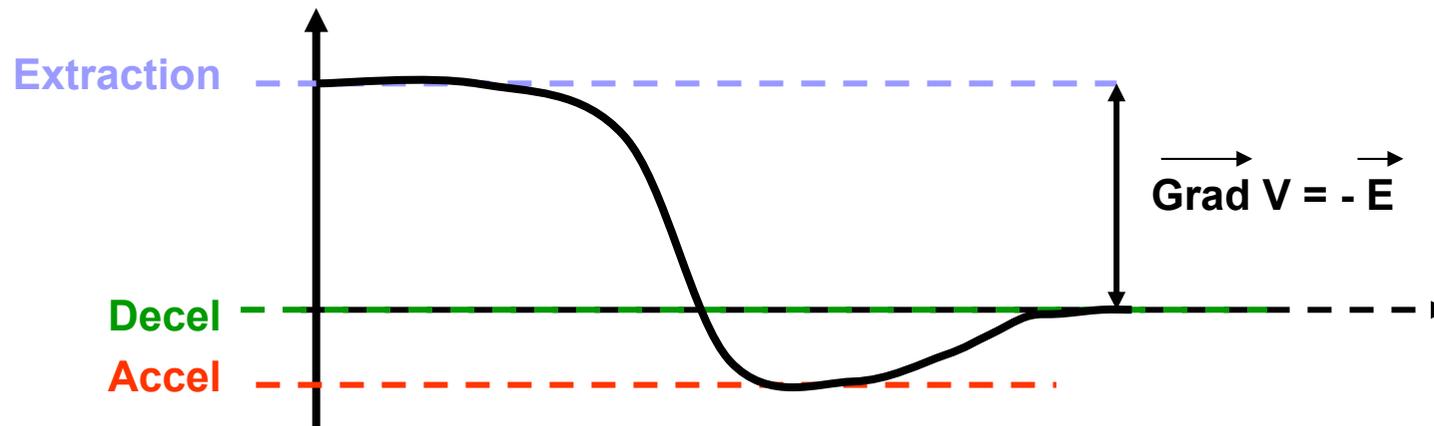
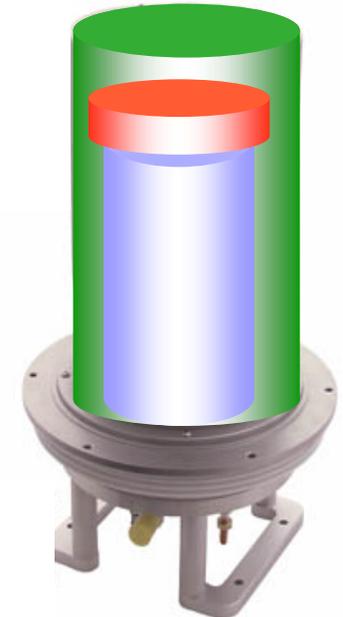
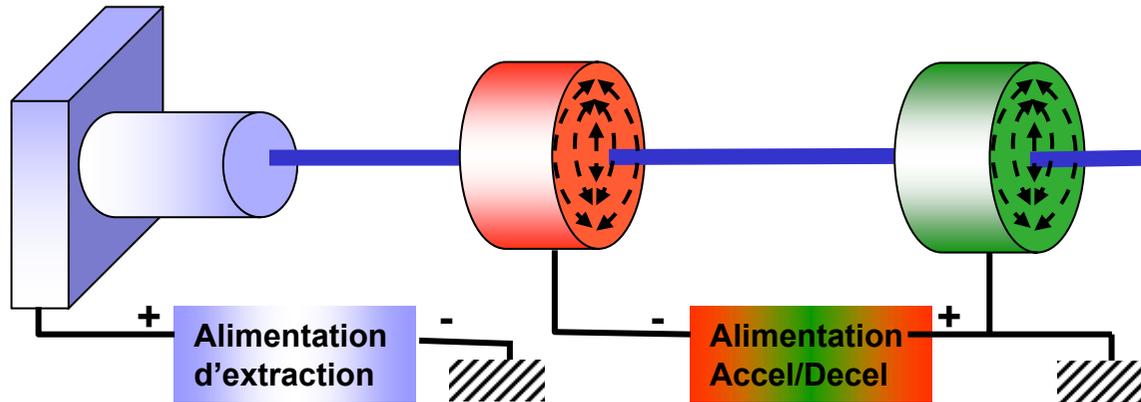
- Potentiel 20 KV / Terre
- Tension d'extraction

■ Electrode Accel :

- Potentiel -5 KV / Terre
- Extraction des ions

■ Électrode Decel

- Potentiel nul / Terre
- Pré focalisation



Fonctionnement d'un I.I. : Tri des espèces

Secteur électromagnétique

- 90° avec $B \propto I_{\text{bobines}}$

$$r = \frac{1}{B} \left(2M_{\text{ion}} V_{\text{accélération}} / q \right)^{\frac{1}{2}}$$

Pureté spectrale

- Sélection par

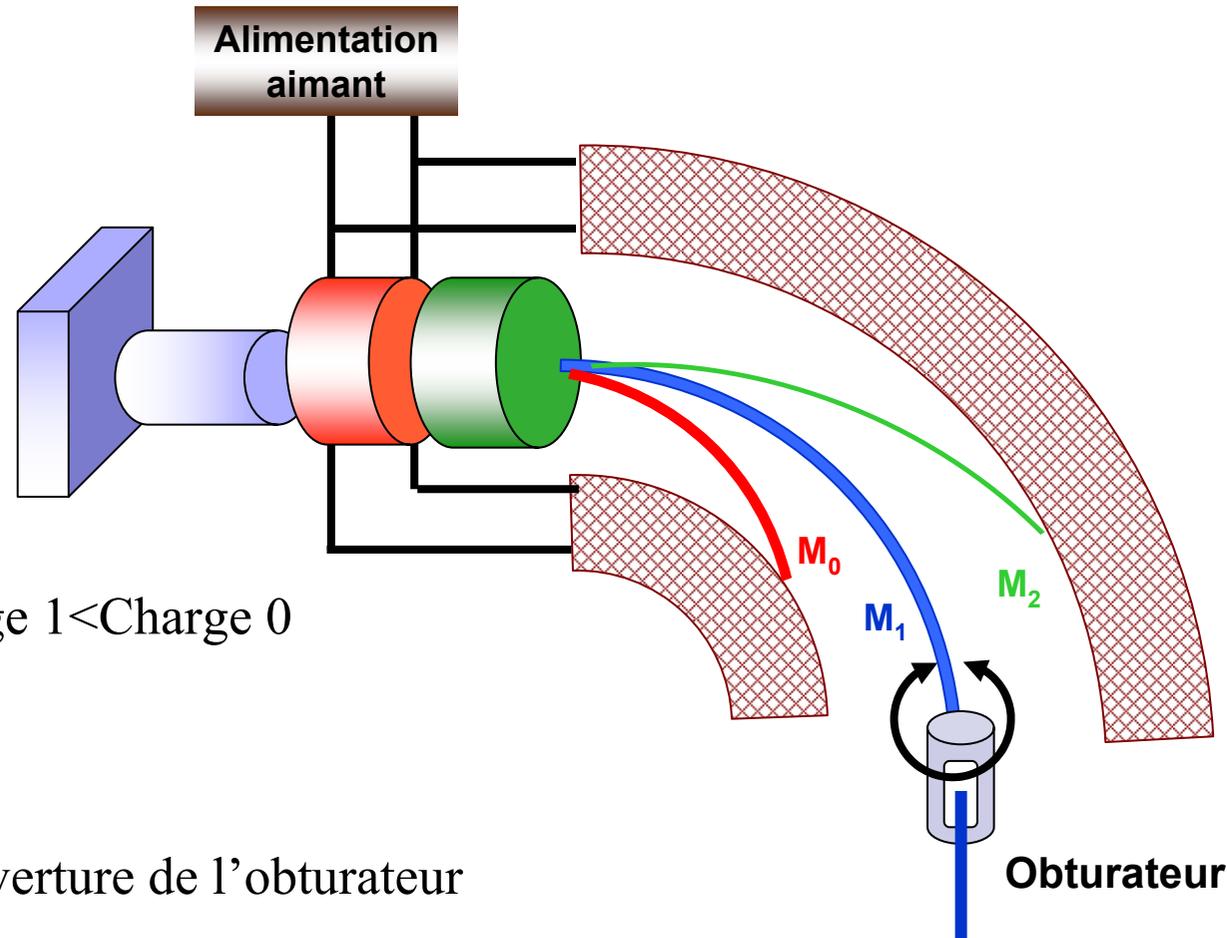
- La masse $M_0 < M_1 < M_2$
- La charge $\text{Charge } 2 < \text{Charge } 1 < \text{Charge } 0$

- Résolution

$$\frac{M_1}{M_0} = \left(\frac{w}{3r_0} - 1 \right)^2$$

w ouverture de l'obturateur

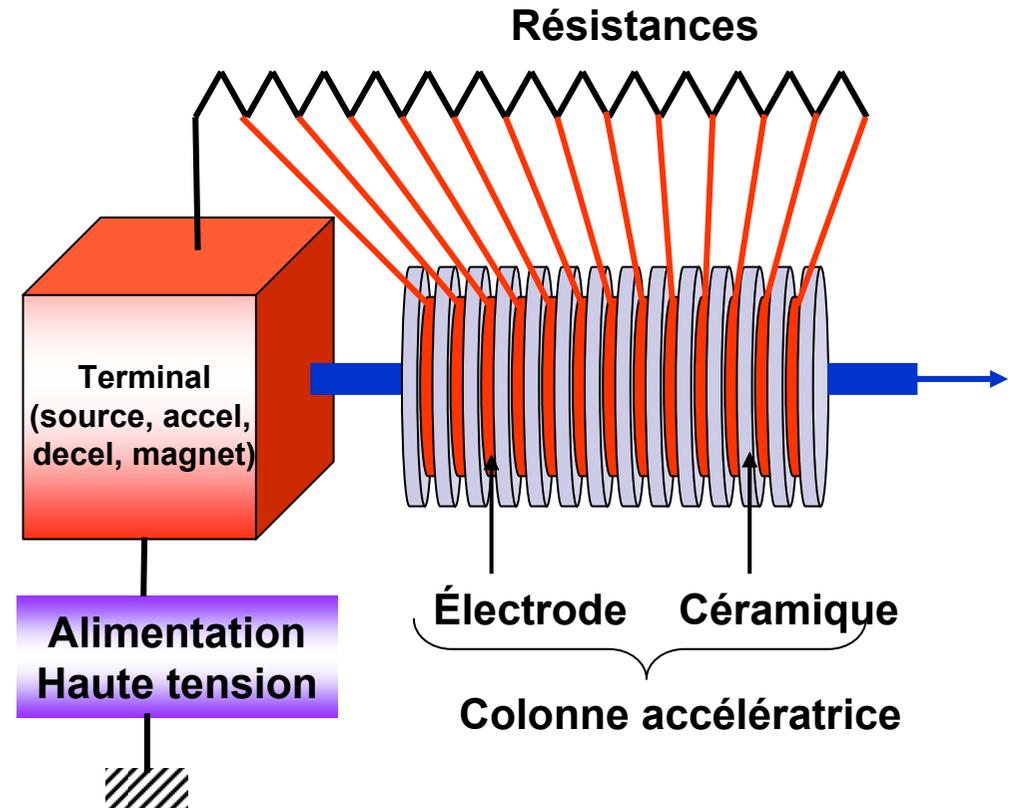
- $0 < w < 1\text{cm}$



Fonctionnement d'un I.I. : Accélération des ions

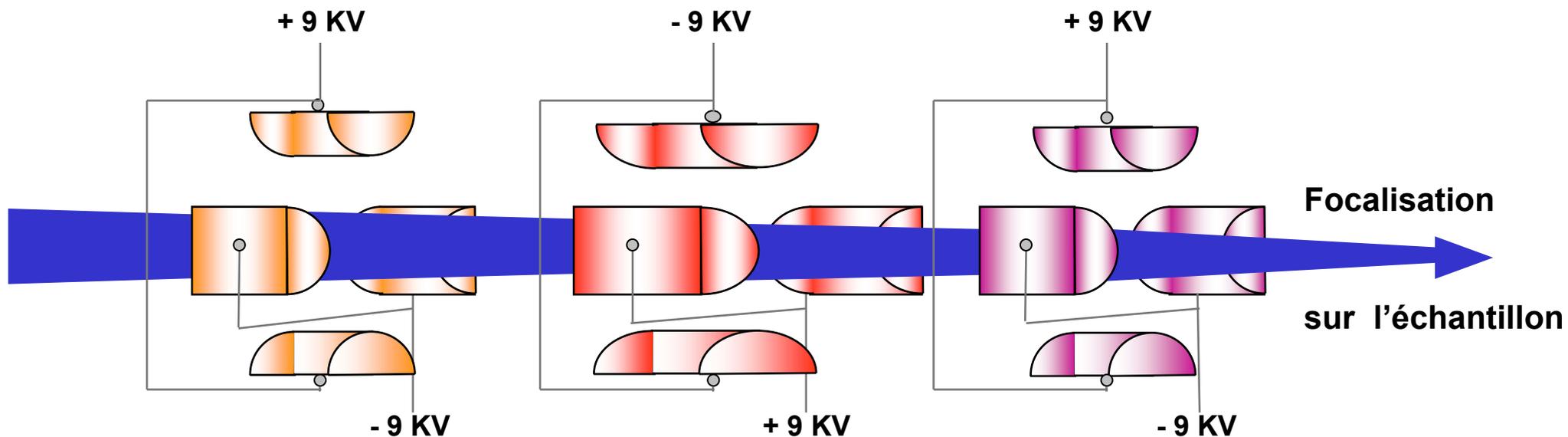
■ Colonne d'accélération

- 13 électrodes séparées par des isolateurs en céramique
 - Collage vinylique
- Répartition uniforme du potentiel
 - Maximum 180 KV
 - 1/12 de la tension entre deux électrodes adjacentes
 - Shunt des premières électrodes pour les très basses tensions
- Convergence du faisceau
 - Électrodes de plus en plus étroites
 - Agissent comme des lentilles



Fonctionnement d'un I.I. : Focalisation

- Faisceau faiblement convergent issu de la colonne d'accélération
- Lentilles quadripolaires
 - Trois lentilles
 - Indépendantes
 - Ajustables



Fonctionnement d'un I.I. : Balayage des échantillons

■ Plaques de balayage

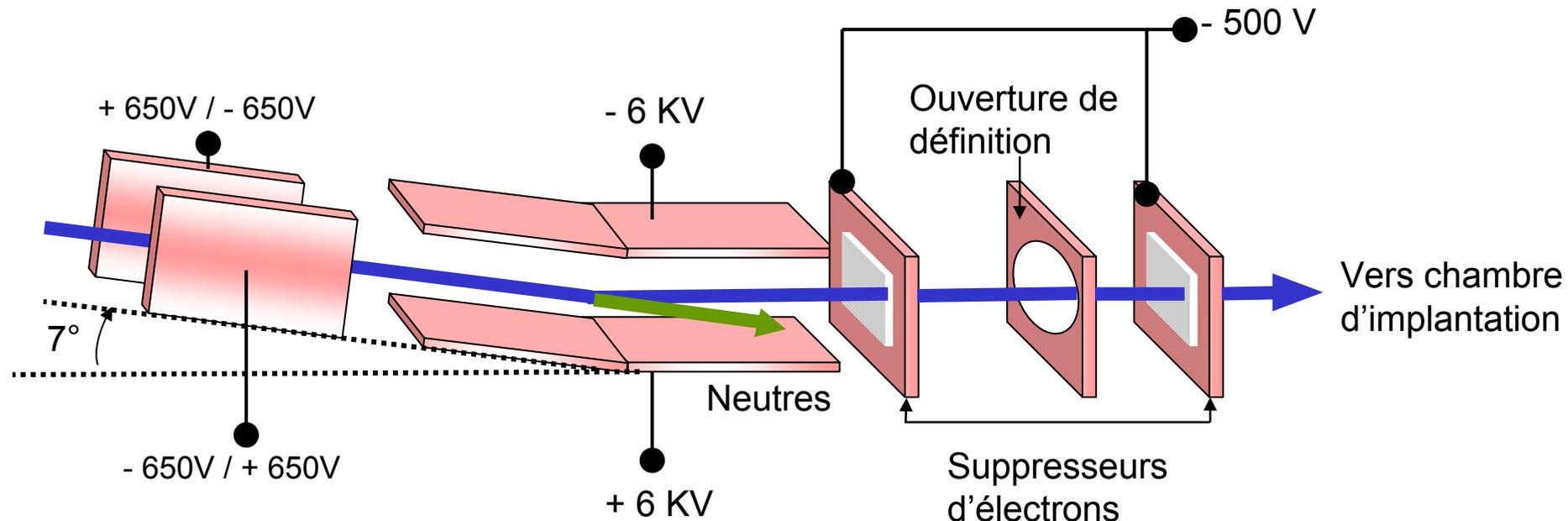
- Balayage horizontal : $-650\text{ V} / + 650\text{ V}$
 - Ajustables et opposées
 - Fréquence : 576 Hz
- Balayage vertical : $0 / \pm 6\text{ KV}$
 - Ajustable
 - Fréquence : 4 KHz

■ Suppresseurs d'électron : $- 500\text{V}$

- Repousser les électrons résiduels entraînés par le faisceau

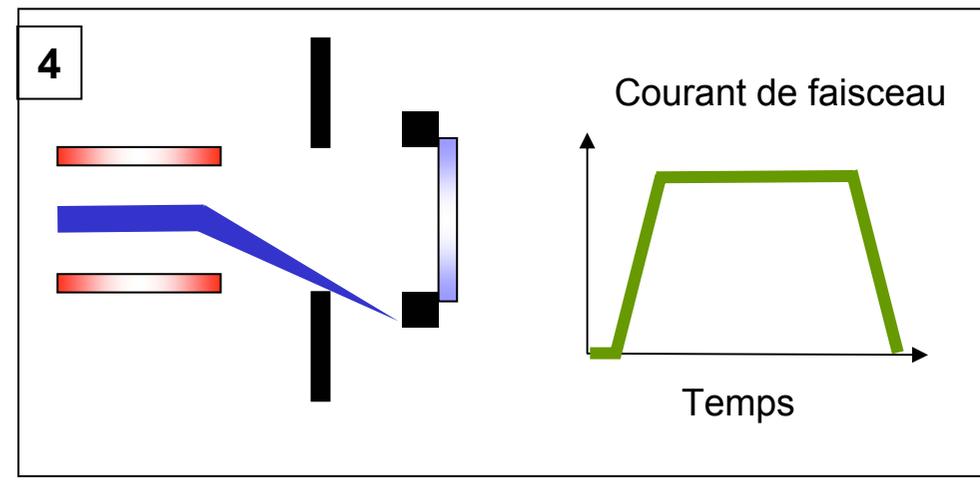
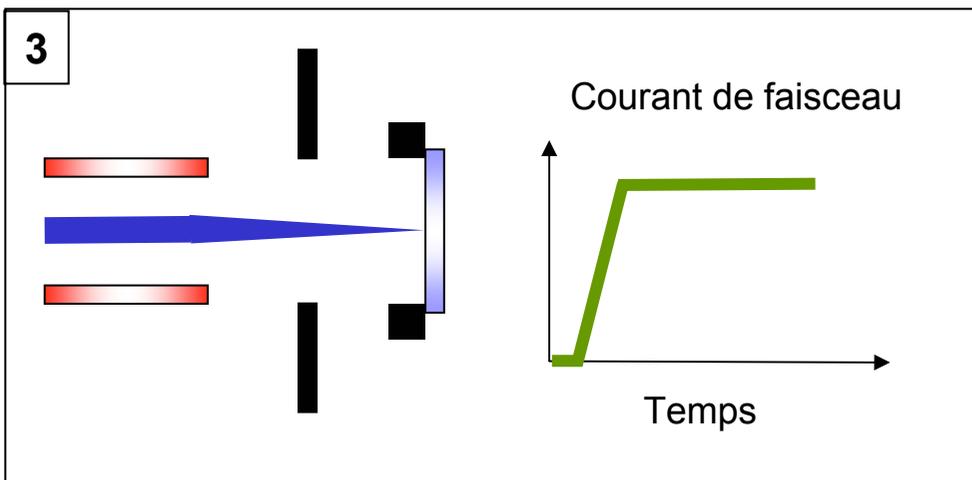
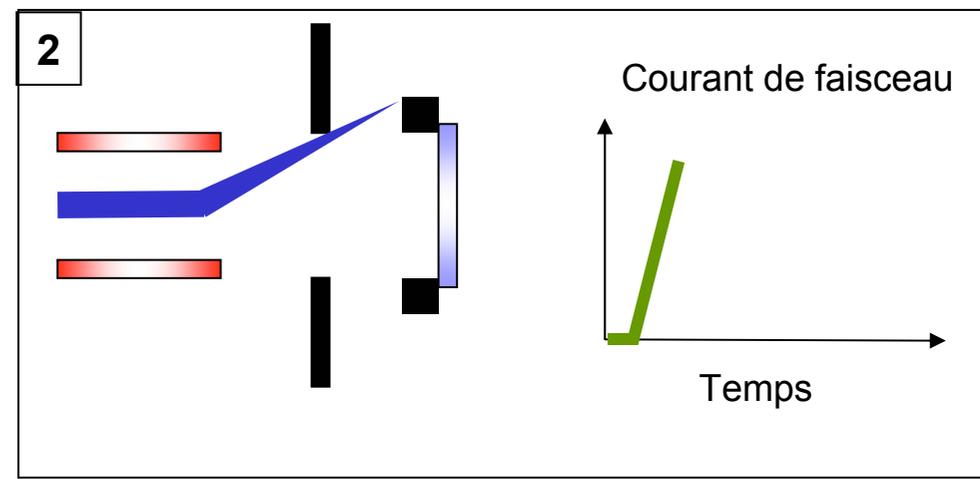
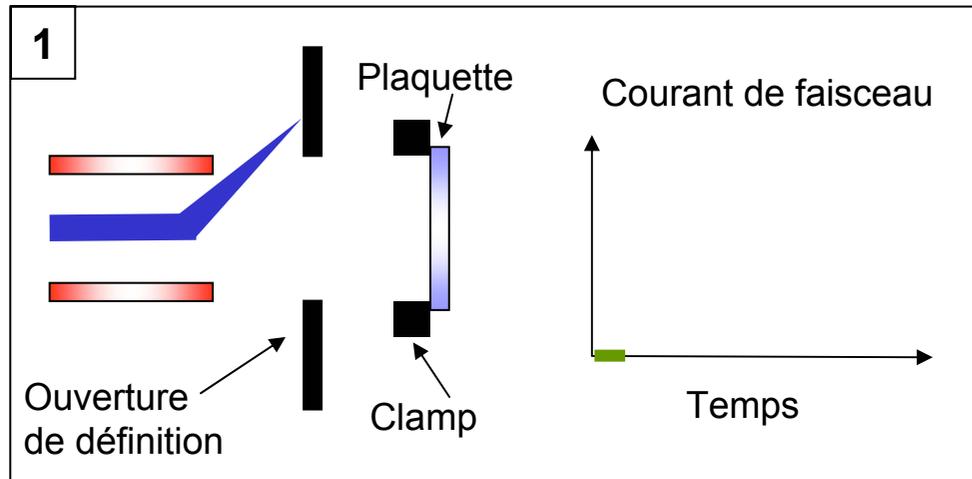
■ Ouverture de définition

- Collimation du faisceau



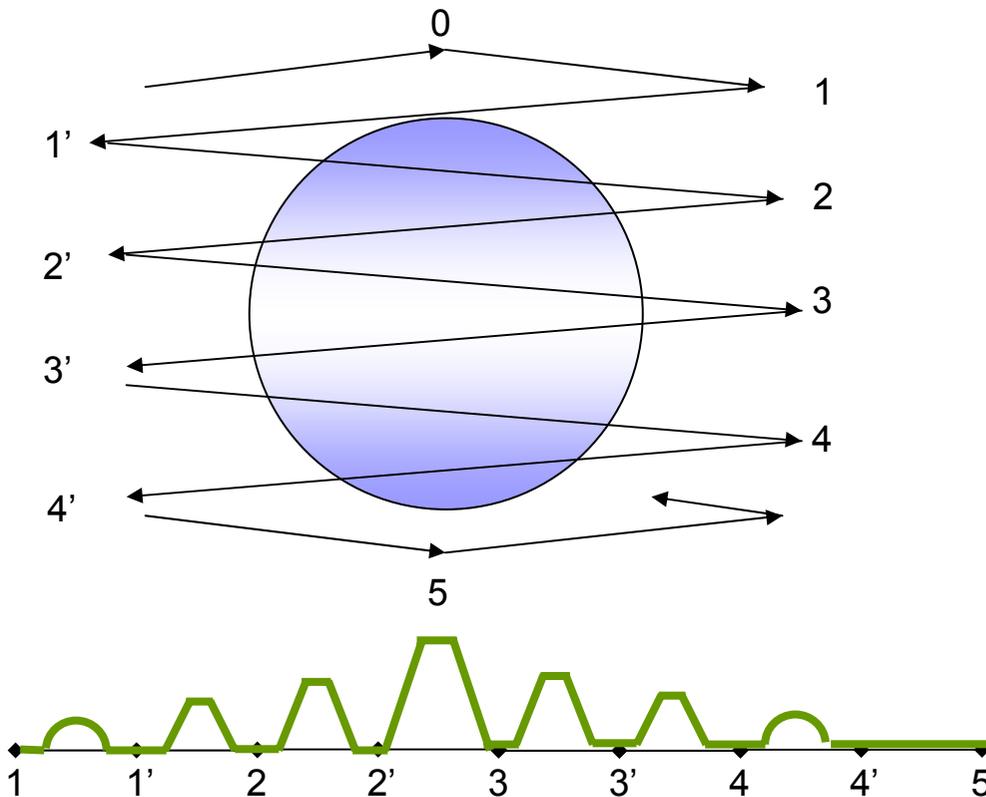
Fonctionnement d'un I.I. : Balayage des échantillons

■ Visualisation du courant de faisceau



Fonctionnement d'un I.I. : Balayage des échantillons

■ Visualisation du courant de faisceau



□ Contrôle de l'uniformité de dopage

□ Calcul de la densité de puissance

■ $P = V_{\text{accel}} \cdot I_{\text{faisceau}}$

■ 200 μA à 150 KV

□ Puissance instantanée 30 W

□ Densité (4 pouces) 0.38 W/cm²

□ Refroidissement échantillon

Image
composée



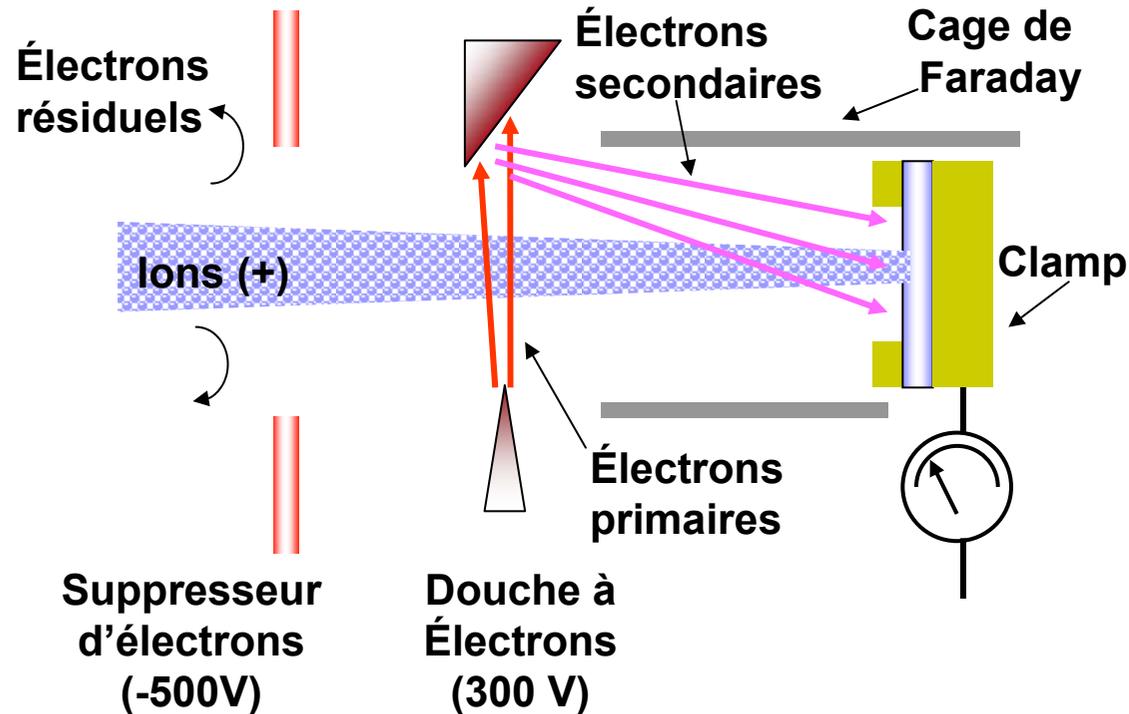
Fonctionnement d'un I.I. : Dosimétrie

■ Comptage de la dose

- Temps réel
- Intégration pour comparaison avec la consigne

■ Cage de faraday

- Isolation des interférences

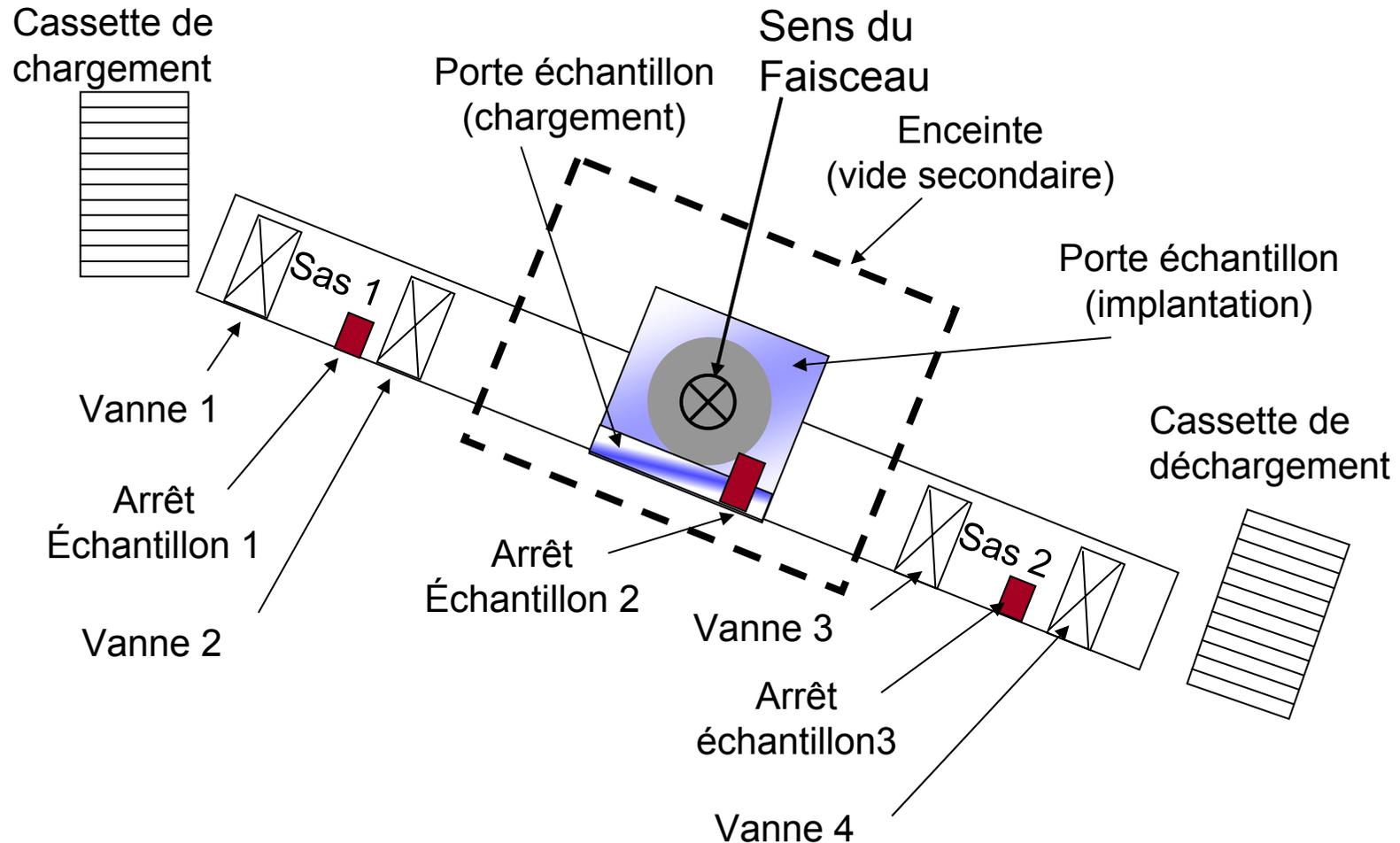


■ Douche à électrons Compensation de la charge induite par les ions

- Émission d'électrons par un filament pour le bombardement d'une cible
- Émission d'électrons secondaires de très faible énergie (quelques eV)
- Les électrons sont entraînés par le flux d'ions (1 ion – 1 électron)

Fonctionnement d'un I.I. : Chargement des échantillons

■ Par gravité (Semi automatique)



Fonctionnement d'un I.I. : Refroidissement des échantillons

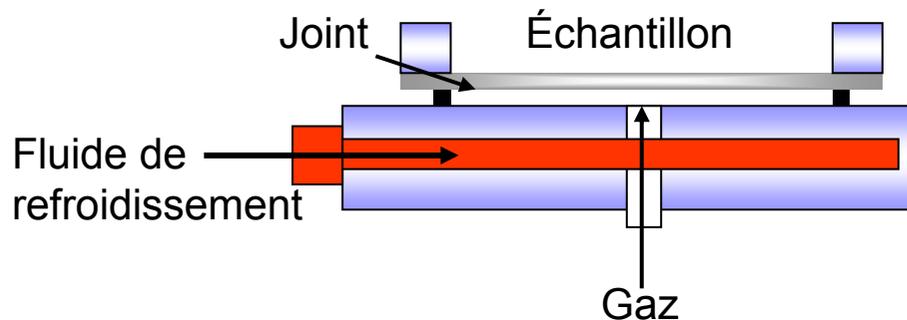
■ Porte échantillon

1. Circulation d'un fluide de refroidissement (Galden HT 110)
2. Échantillon sur un joint d'étanchéité
3. Gaz (Helium) effectuant le transfert de chaleur entre le support et l'échantillon

■ Effet sur la résine

Après refroidissement

Sans refroidissement



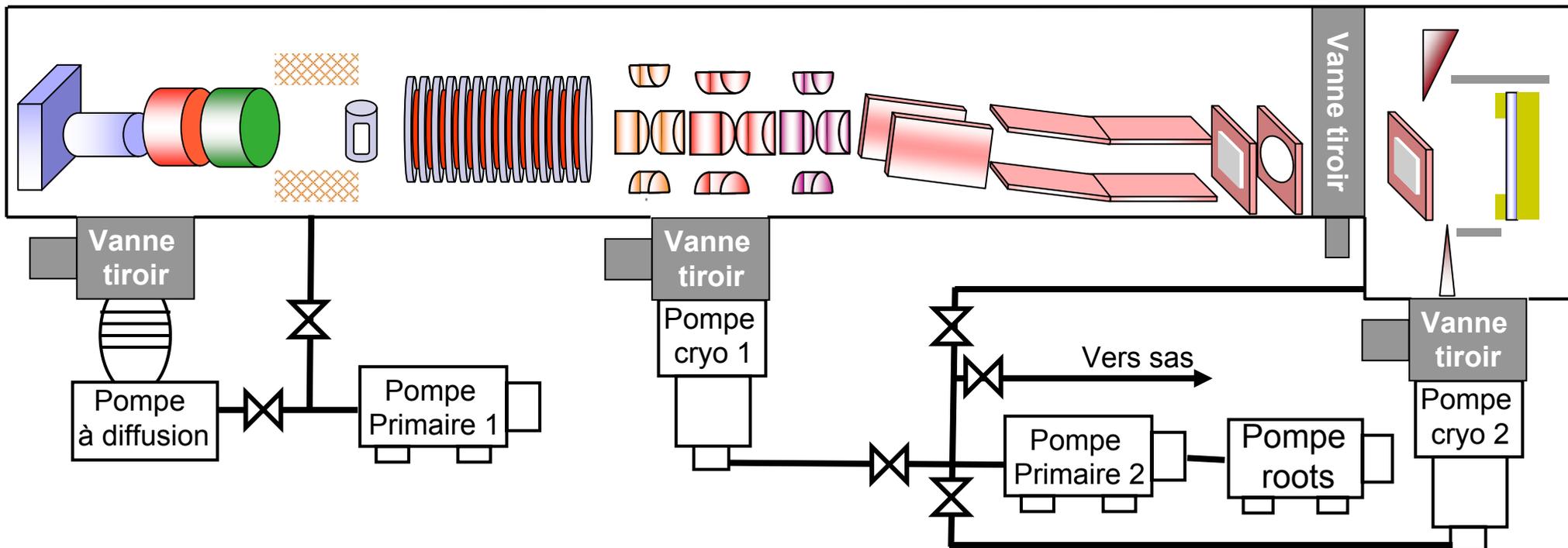
Fonctionnement d'un I.I. : Système de pompage

■ Pompage primaire

- Pré vidage de l'enceinte
- Soutien du pompage secondaire
- Sas chargement/déchargement
- Régénération des pompes cryogéniques

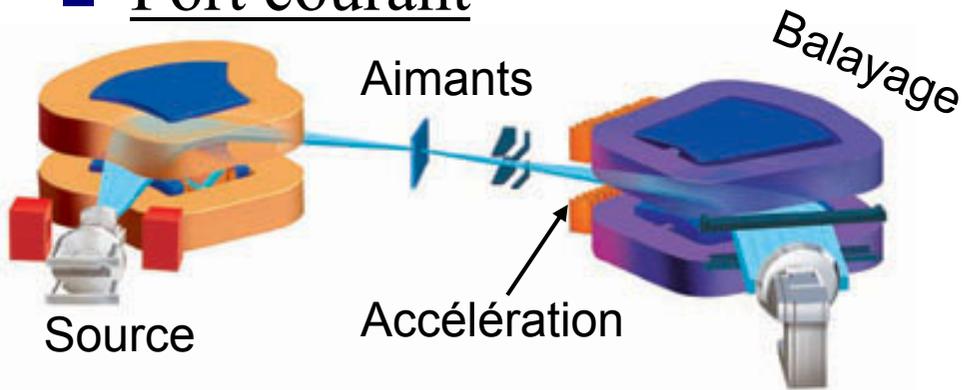
■ Pompage secondaire

- Vide limite $\approx 10^{-8}$ mTorr
- Vide process $\approx 10^{-6}$ mTorr
- Régénération automatisée des pompes cryogéniques

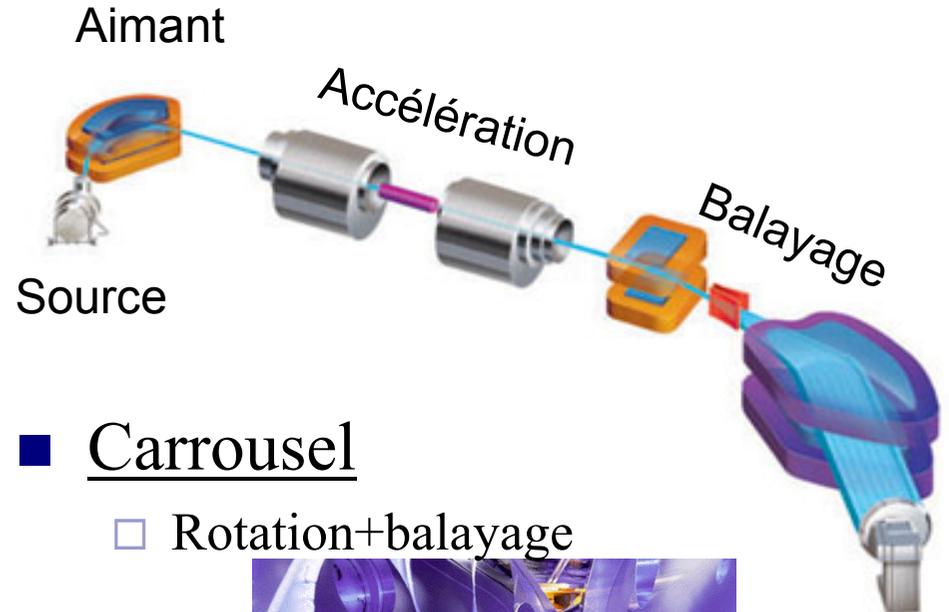


Exemples de configurations

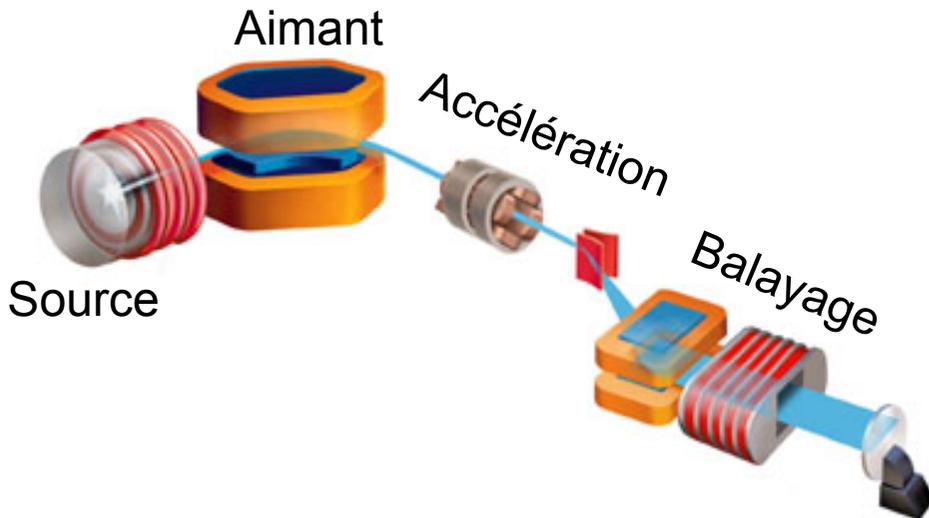
■ Fort courant



■ Forte énergie

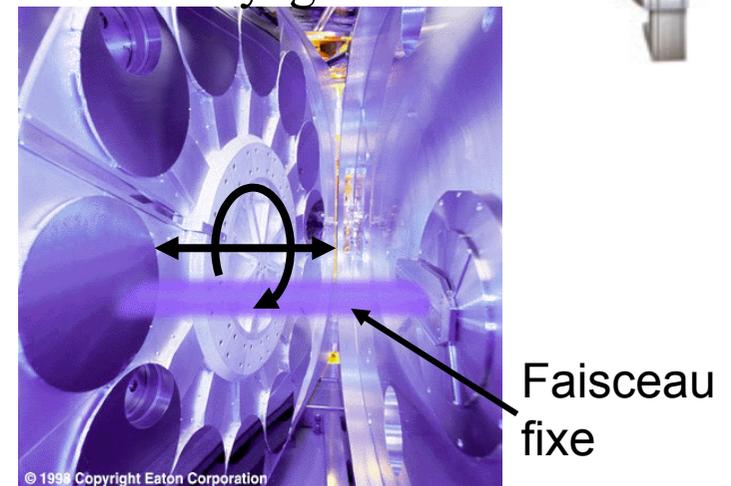


■ Moyen courant



■ Carrousel

□ Rotation+balayage



Paramètres de l'implantation ionique avec ligne de faisceau

■ Plasma

- Source chimique
 - Phase
 - Nature
 - Pression
- Paramètres de source
 - Courant de filament
 - Tension d'arc
 - Morphologie

■ Tension d'implantation

- Pré accélération
- Accélération

■ Focalisation/Balayage

- Tensions

■ Vide

■ Dose

Une classification des implantateurs ioniques

	Gamme de courant	Gamme d'énergie (KeV)	Gamme de doses (ions/cm ²)	Applications typiques
Moyen courants	Quelques μA à quelques mA	5 à 800	10^{11} à 10^{18}	Ajustement des tensions de seuil, isolation, puits, réalisation des bases, traitement de surface
Forts courants	Quelques mA à 30 mA	0.2 à 100	10^{11} à 10^{19}	Grille, source, drain, émetteur, modification de matériaux
Faible énergie	Quelques μA à 10 mA	0.2 à 30	10^{11} à 10^{17}	Couches minces
Forte énergie	Quelques μA à 10 mA	10 à 3000	10^{10} à 10^{16}	Puits, couches enterrées

■ Développement de nombreuses configurations

- Recoupement de certaines caractéristiques (énergie, courant de faisceau, etc..)
- En fonction des filières en technologie des semi-conducteurs

PLAN

- Principes théoriques
 - Phénomènes physiques
 - Profil d'implantation
- Paramètres technologiques
 - Canalisation
 - Défauts cristallins
 - Masquage
- Les techniques et équipements
 - Implantation par immersion
 - Principes
 - Équipements
 - Applications
 - Implantation par faisceau d'ions
 - Fonctionnement d'un implanteur à ligne de faisceau
 - Équipements
 - Applications
- L'implantation ionique au LAAS
 - Équipement
 - Procédures
- Bibliographie
- Annexe : les méthodes de caractérisation

L'implanteur ionique du LAAS : EATON NOVA 4206

■ Moyen courant

- Quelques μA à 2 mA
- 5 à 200 KV
 - Extraction 20 KV
 - Accélération 180 KV

■ Masse atomique maximum 125

■ Origine des dopants

- Gaz
 - B_{11}F_3 enrichi, Ar
- Liquide (tension de vapeur)
 - SiCl_4 , GeCl_4
- Solides
 - As, Mg, In, P, Sn
 - $T^\circ\text{vapeurs} < 550^\circ\text{C}$

■ Échantillons

- Jusqu'à 150 mm



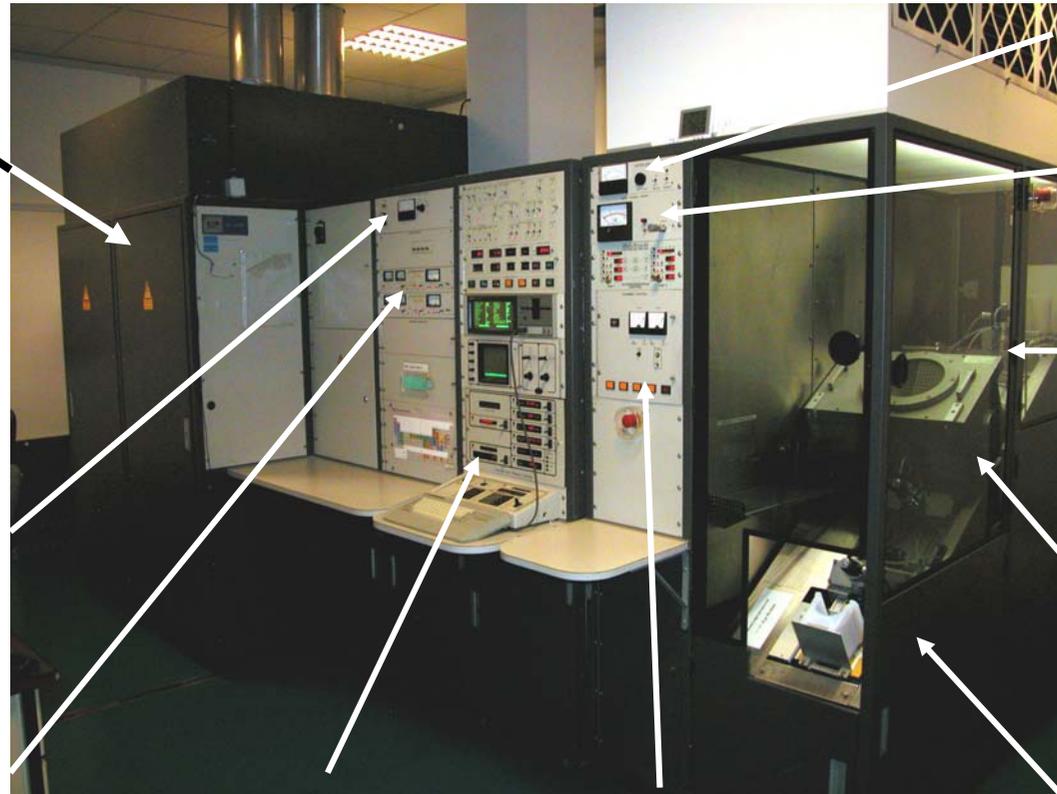
L'implanteur ionique du LAAS : EATON NOVA 4206

■ End station

- Source
- Dopants
- Extraction
- Accel/Decel
- Aimant
- Accélération

■ Lecture des tensions de focalisation et balayage

■ Lecture du vide



■ Pupitre de contrôle

- Gestion du vide
- Consignes d'implantation
- Pilotage des paramètres de faisceau

■ Gestion des sas

■ Contrôle douche d'électrons

■ Gestion du refroidissement

■ Sas de chargement

■ Chambre d'implantation

■ Sas de déchargement

L'implantation ionique au LAAS : procédure

■ Planification des opérations

1. Quelques jours avant les implantations
2. Auprès de
 - J.C. Marrot ou H. Granier



3. Paramètres à indiquer
 - Nature du dopant
 - Dose
 - Énergie
 - Nombre et taille des échantillons
 - Face à implanter
 - Nature d'un masquage
 - Autres contraintes

■ Conduite des opérations

1. Échantillons fournis avec la **fiche de process** et les coordonnées du demandeur
2. Opérations effectuées par les intervenants TEAM (pas de libre service)
3. Enregistrement des paramètres appliqués pour archivage
4. Facturation et inscription de la référence de l'implantation sur la fiche de process
5. Retrait des échantillons

PLAN

- Principes théoriques
 - Phénomènes physiques
 - Profil d'implantation
- Paramètres technologiques
 - Canalisation
 - Défauts cristallins
 - Masquage
- Les techniques et équipements
 - Implantation par immersion
 - Principes
 - Équipements
 - Applications
 - Implantation par faisceau d'ions
 - Fonctionnement d'un implanteur à ligne de faisceau
 - Équipements
 - Applications
- L'implantation ionique au LAAS
 - Équipement
 - Procédures
- Bibliographie
- Annexe : les méthodes de caractérisation

Bibliographie

1. J.F. Ziegler
Handbook of ion implantation technology
North Holland
2. S.M. SZE
VLSI technology
Mc Graw-Hill international editions
3. S. Wolf and R.N. Tauber
Silicon processing for VLSI
Volume 1 Process technology

Lattice press
4. P.N. Favennec
L'implantation ionique pour la microélectronique et
l'optique
Masson
5. A. Anders
From plasma immersion ion implantation to deposition :
a historical perspective on principles and trends
Surface and coating technology
volume 156- juillet 2002 pp3-12
6. Conrad, Radtke, Dodd, Worzala, and Tran
Plasma source ion implantation technique for surface
modification of materials
Journal of applied physic
Vol 62 – decembre 1987 – pp 4591-4596
7. Anders, Anders, Brown, Dickinson, MacGill
Metal plasma immersion ion implantation and
deposition using vacuum arc plasma sources
Journal of vacuum science technologies
Vol B12 – mars avril 1994 – pp 815-820
8. Kumar, Rajkumar, Kumar and George
Semiconductors applications of plasma immersion ion
implantation technology
Bulletin of materials sciences
Vol 25 n°6 – novembre 2002 – pp 549-551
9. Cheung, Gao, Iyer, Jones, Linder, Liu, Lu, Min
and Shieh
Plasma immersion ion implantation for electronic
materials applications
Conference on solid state devices and materials 1995
Pp 351-353

Caractérisation de l'I.I. : Dose et uniformité

■ Quatre pointes

1. Recuit d'activation
 2. Mesure de la résistivité
- Sensibilité
- Dose 10^{11} à 10^{16} ions/cm²
 - $\pm 5 \%$

■ Dosimétrie optique

1. Enduction d'un substrat transparent (résine)
 2. Implantation
 3. Cartographie de l'absorption lumineuse
- Sensibilité
- Dose 10^{11} à 10^{16} ions/cm²
 - $\pm 1 \%$

■ Sonde à mercure

1. Réalisation d'une structure MOS
 2. C(V) après gravures successives de l'oxyde
- Sensibilité
- Dose 10^{11} à 10^{16} ions/cm²
 - $\pm 5 \%$

■ Attaque chimique

1. Implantation dans une couche d'oxyde
 2. Gravure au HF 5%
 3. Variation de dose => variation de couleur
- Sensibilité (méthode qualitative)
- $\pm 5 \%$

Caractérisation de l'I.I. : Dose et profil

■ Secondary Ion Mass Spectroscopy

1. Gravure du matériau par bombardement ionique
 2. Spectroscopie des espèces volatilisées
- Sensibilité
 - Dose 10^{12} à 10^{23} ions/cm²
 - ± 1 %
 - Fortement dépendant des conditions de gravure

■ Spreading resistance

1. Recuit d'activation
 2. Réalisation d'un biseau
 3. Mesure de la résistivité (deux pointes)
- Sensibilité
 - Dose 10^{14} à 10^{21} ions/cm²

■ Microscopie à effet tunnel

1. Recuit d'activation
 2. Réalisation d'un biseau
 3. Mesure du courant tunnel
- Sensibilité
 - Dose 10^{14} à 10^{20} ions/cm²