



***Le LEXES Comme Technique de
Métrologie Entrant dans le Contrôle du
Processus de Fabrication des Circuits
Intégrés***

Rabah Benbalagh (CAMECA), GN-MEBA 6 juin 2007

Usages et contraintes liés aux « semi-conducteurs »

- Métrologie non destructrice et pas de contact avec les structures à analyser
- Diamètres des tranches de Si de 200 et 300 mm
- Analyses dans des motifs nécessitant une taille de faisceau de 5 μ m à 50 μ m
- Analyses chimiques. Mesures pour des éléments $Z > 4$
- Analyses quantitatives et qualitatives (identification d'éléments)
- Justesse, précision et fiabilité de l'instrumentation
- Cadences des mesures (productivité de l'instrument)
- Automatisation de l'instrument (normes SEMI et SECS/GEM) ; liaison avec les usines de semi-conducteurs
- Travail en salle blanche : classe 10 et classe 1

Le principe de la spectrométrie d'émission de rayons X induite par électron à basse énergie

- **L**ow **E**lectron induced **X** ray **E**mission **S**pectrometry.
- Irradiation d'un échantillon solide par un faisceau d'électrons à basse énergie et analyser à des rayons X mous émis par la cible.
- Les rayons X sont caractéristiques de l'émission, une analyse sélective des éléments est réalisée.



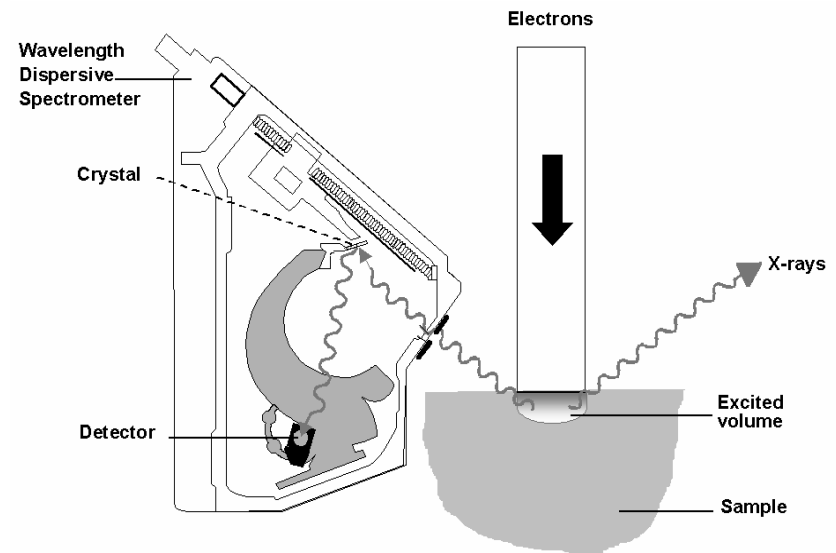
***CAMECA a développé et produit le
Shallow Probe LEXFAB-300***

Un outil d'analyse non-destructif pour la
Métrologie et le Contrôle des Procédés
de Fabrication des Couches Ultra-
minces et des Implants.

Design Instrumental de la Technique **LEXES**

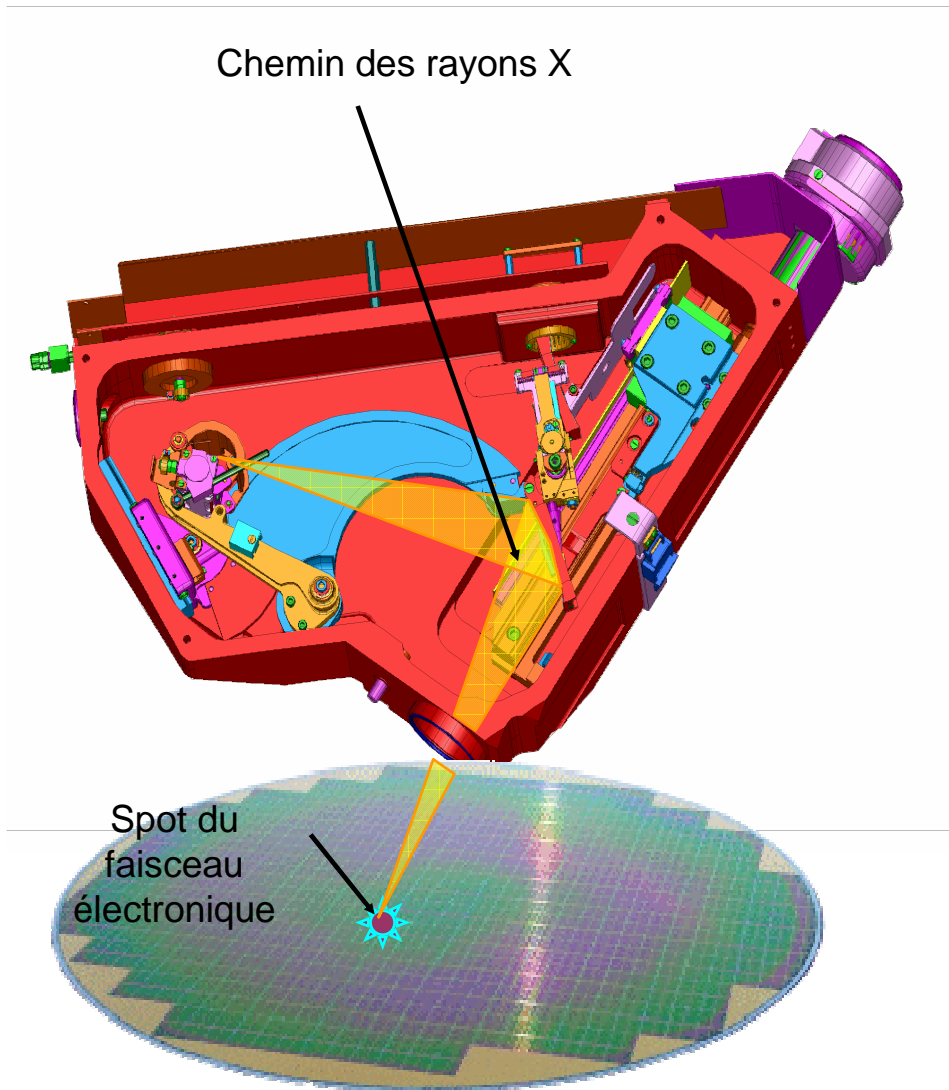
Instrumentation basée sur l'EPMA avec la grande différence qui réside dans :

- L'optimisation de la Colonne pouvant délivrer des énergies d'impact de 0.2 à 10 keV et des courants sonde de 0.15 μA à 30 μA
- L'Analyse en profondeur : de la surface jusqu'à 700nm



Largeur ~ 5-50 μm
Profondeur 0-700nm

Spectromètre à Dispersion de Longueur d'Onde (Wavelength Dispersive Spectrometer)

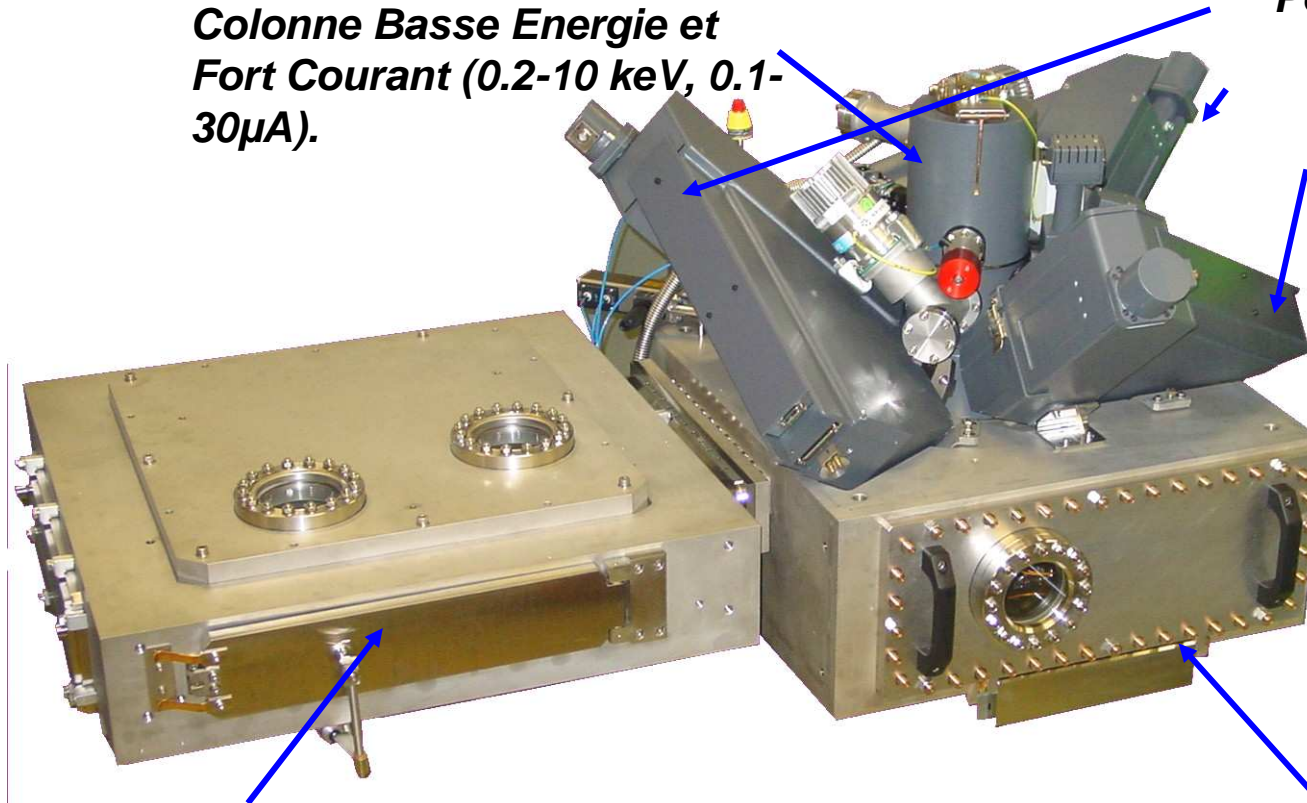


- **Le choix d'un WDS a été fondamental pour exploiter toutes les possibilités de la technique**
- Un spectromètre avec un large rayon de focalisation (160mm) conduit à une **détermination précise du rapport Pic/Fond** qui est relié à la **sensibilité** de la méthode.
- Une **résolution** suffisante en énergie qui permet de discriminer des raies d'émission proches
 - exemple : As La -1188 eV- and Ge La -1282 eV-, qui n'est pas résolue avec un EDS classique
- **Polyvalence**
 - 3 spectromètres sont installés
 - Plus de 4 Cristaux peuvent être montés
 - Optimisation de la configuration des cristaux pour une application donnée
- On peut analyser tous les éléments avec $Z > 4$

**Shallow Probe LEXFAB 300 :
Corps de l'instrument**

**Colonne Basse Energie et
Fort Courant (0.2-10 keV, 0.1-
30 μ A).**

**3 Spectromètres X:
Permettant multi
détection**

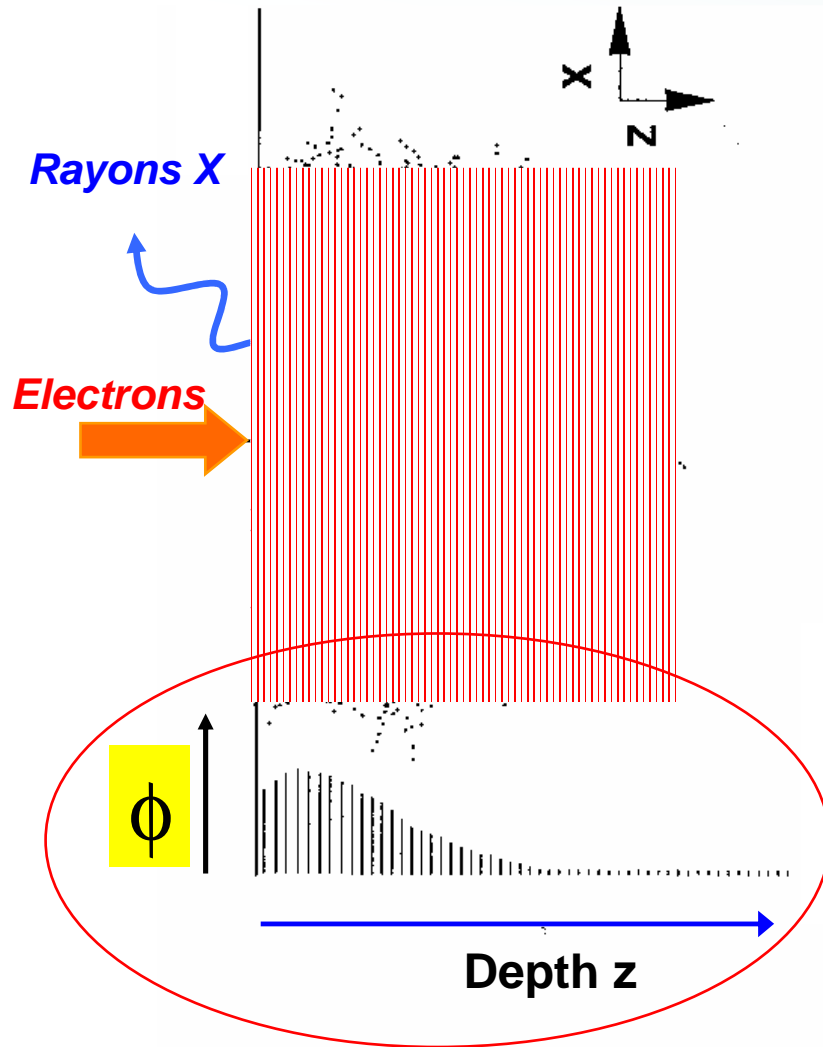


**Sas d'introduction
200 et 300mm, équipé
avec un robot.
Compatible avec un
FOUP.**

**Chambre d'analyse pour
Wafers de 200 et 300 mm de
diamètre**

Principe de Quantification

Production en Profondeur de Rayons X : la connaissance des $\phi(\rho z)$ est un pré-requis pour accomplir une analyse en quantification

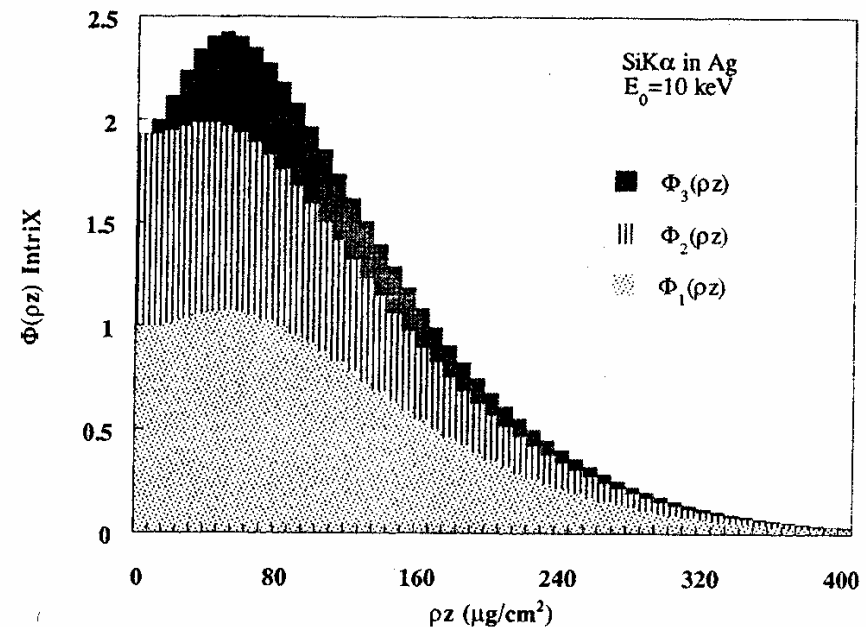
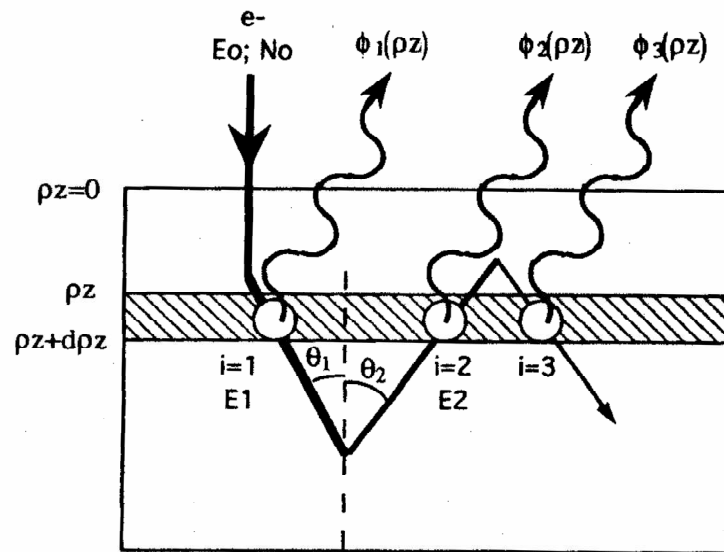


$\phi(\rho z)$ représente la probabilité de la **distribution en profondeur de la production de rayons X**

$\phi(\rho z)$ est déterminée par : la **perte d'énergie des électrons, la diffusion, la section efficace d'électro-ionisation et l'absorption des rayons X** dans l'échantillon

Modélisation de la Distribution en Profondeur pour Quantifier:

Modèle de Simulation « IntriX » (Staub et al., 1998).

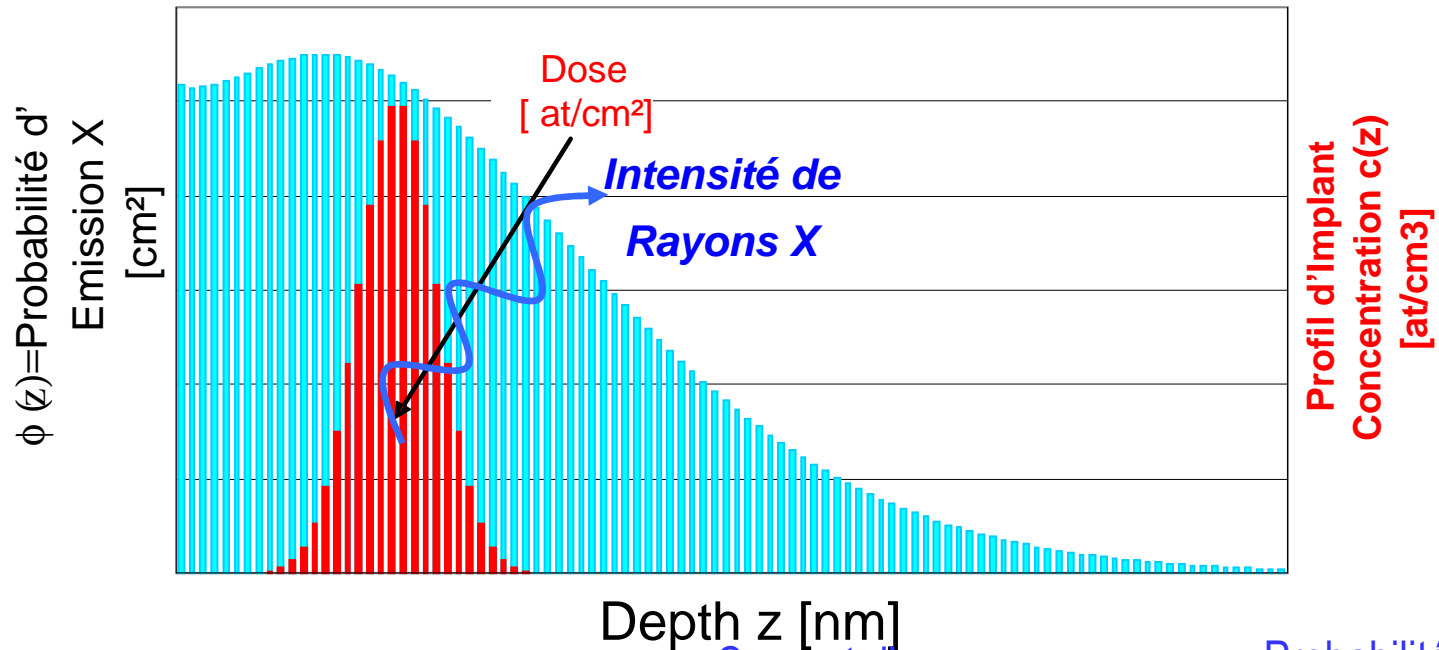


- Simulation des $\phi(\rho z)$ pour des électrons à basse énergie.
- Echantillon est découpé en tranches, chacune située à une profondeur ρz d'épaisseur $d\rho z$.
- Fonction de distribution en profondeur résulte des électrons transmis (ordre 1), rétrodiffusés (ordre 2) et transmis une seconde fois (ordre 3)
- Contribution des électrons d'ordre supérieur est supposée négligeable car peu nombreux et trop peu énergétiques pour contribuer efficacement à l'intensité X.

Introduction dans le calcul d'un modèle de profil supposé connu

Distribution en Profondeur d'une Emission de rayons X

Probabilité ϕ et Concentration de l'élément (Profil)



Intensité de Rayons X (cps/sec) à l'énergie d'impacte E_j

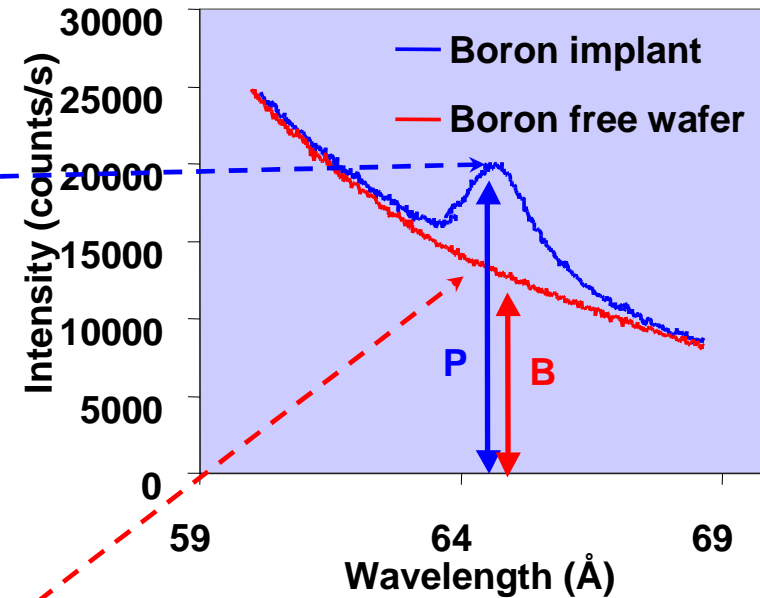
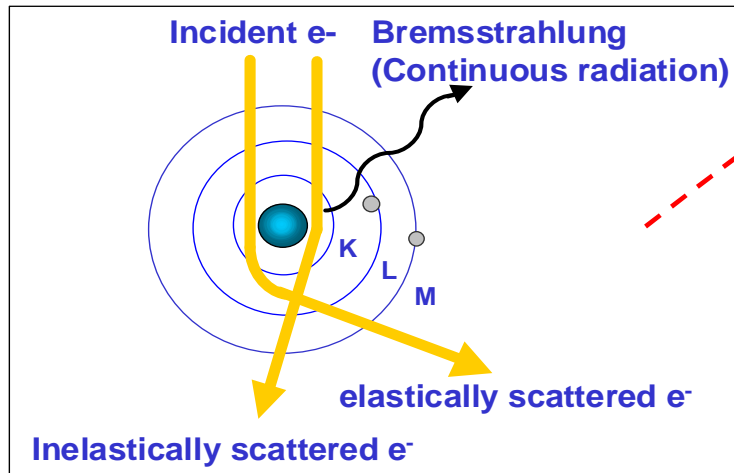
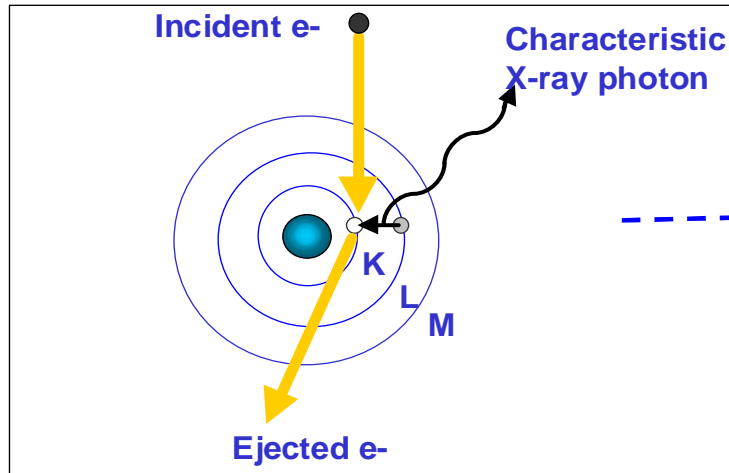
$$I_{E_j}^{Exp} = D \cdot K \cdot N_e \int_0^{\infty} c(z) \cdot \phi_D(E_j, z) dz$$

Labels for the equation components:

- $I_{E_j}^{Exp}$: Intensité de Rayons X (cps/sec) à l'énergie d'impacte E_j
- D : Dose
- K : Constante de Calibration
- N_e : Courant d'Electron
- \int_0^{∞} : Profil Normalisé
- $c(z)$: Concentration
- $\phi_D(E_j, z)$: Probabilité d'émission X

Rabah Benbalagh

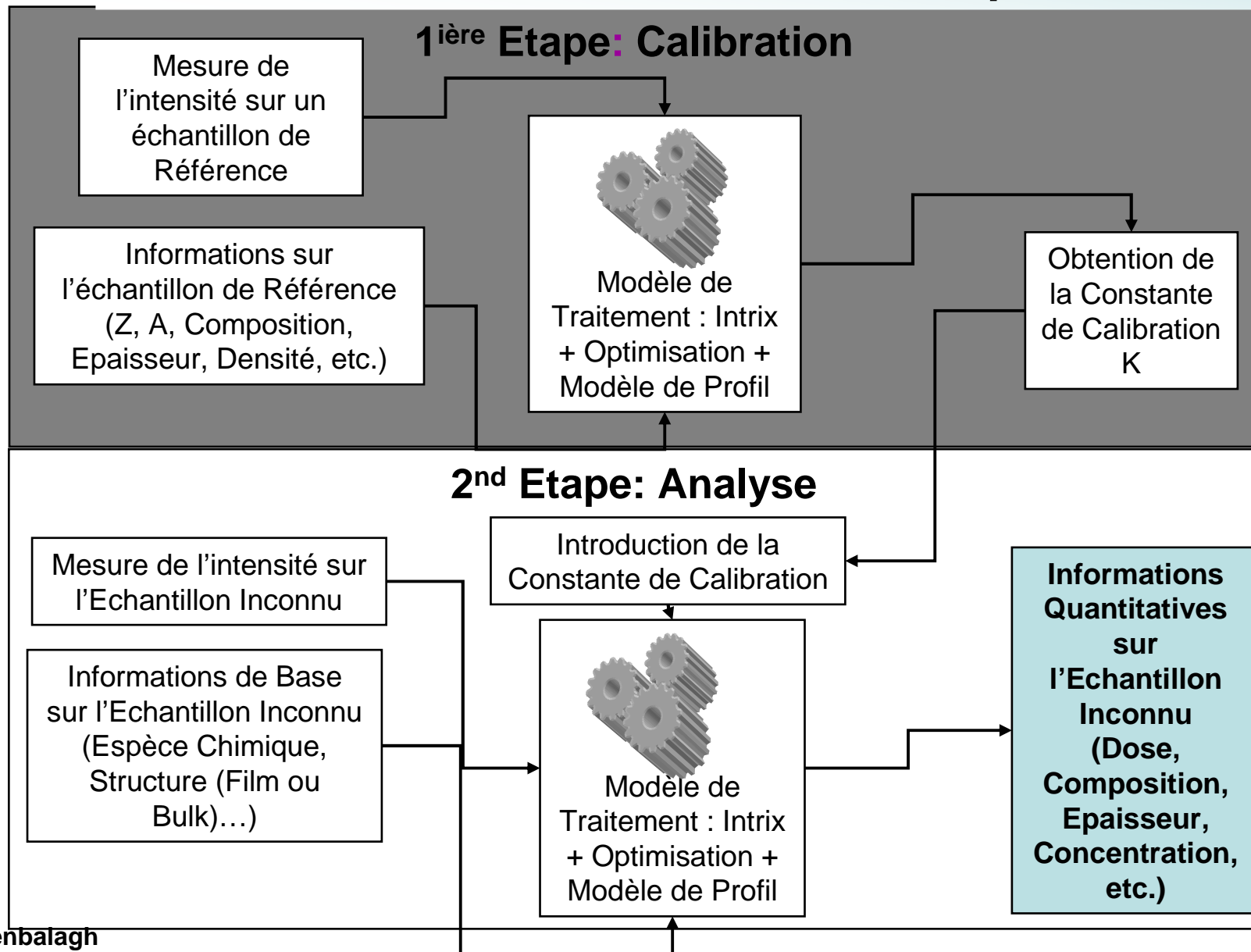
Détermination Expérimentale du Signal Analytique : Intensité « I ».



$$I_{\text{Elément}} \text{ (cps/sec)} = P - B$$

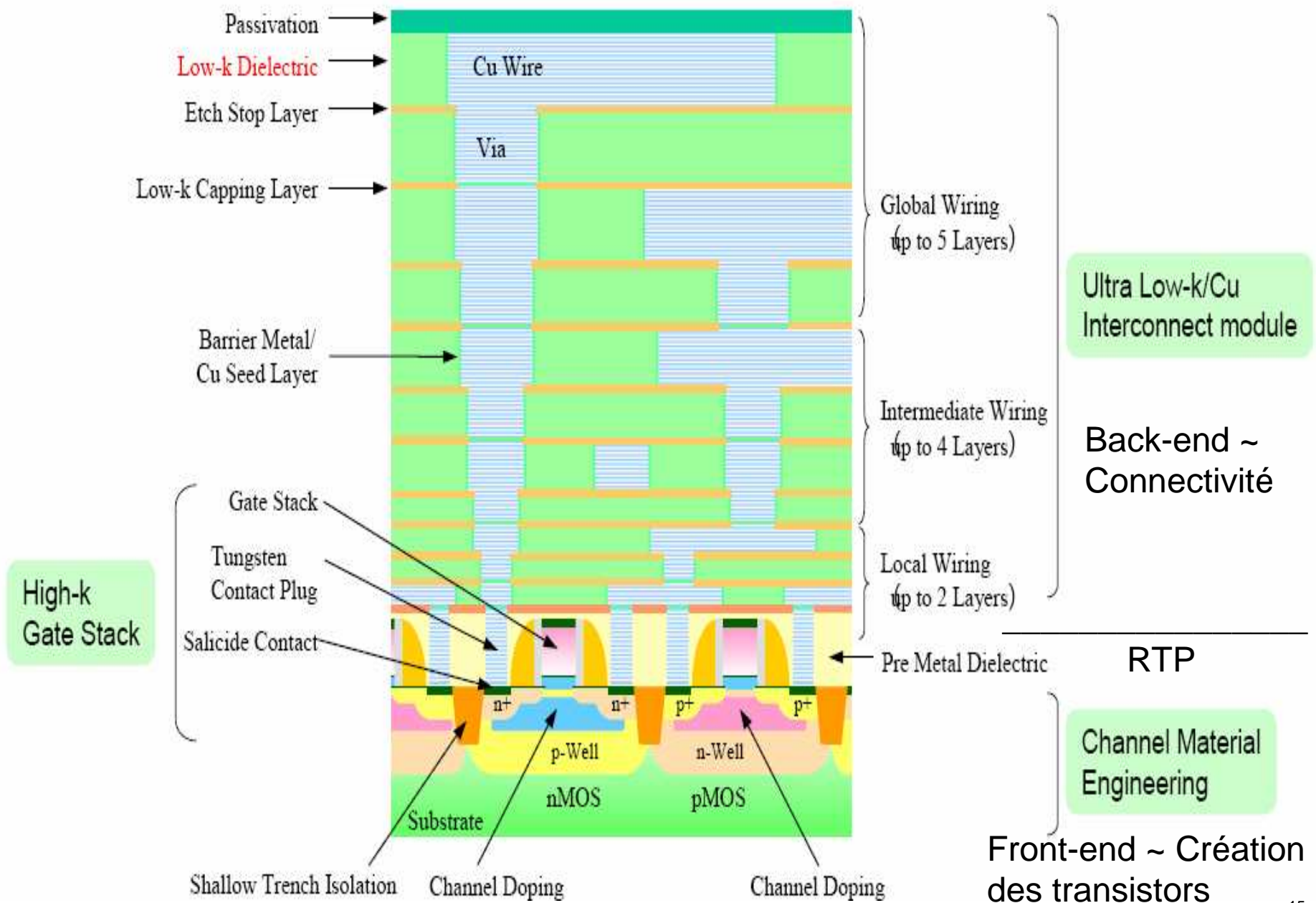
$$I_{Ej}^{\text{Exp}} = D.K.N_{e^-} \int_0^{\infty} c(z) \cdot \phi_D(E_j, z) \cdot dz$$

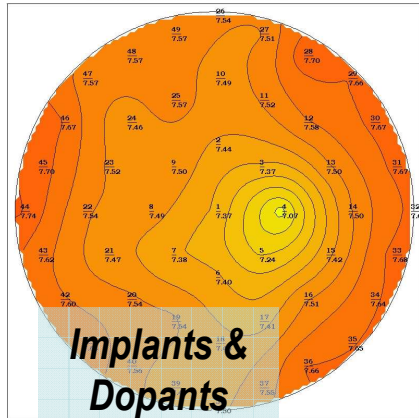
Comment le signal de rayons X est converti en information quantitative?



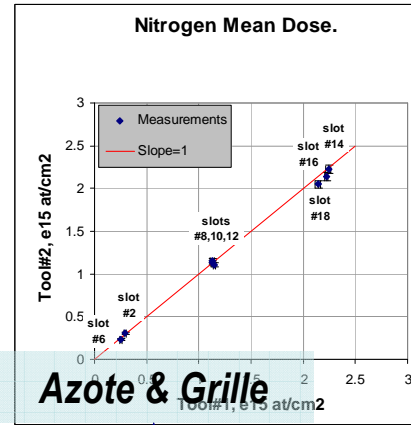
Applications du LEXES en Métrologie dans la Technologie du Semi-conducteur

Exemple de flux de production standard

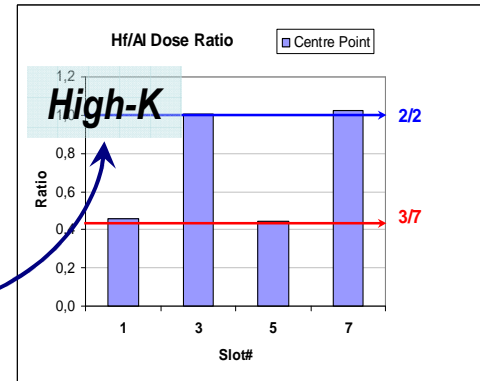




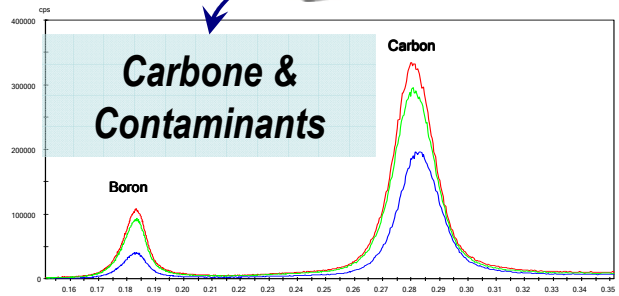
Implants & Dopants Dosimétrie



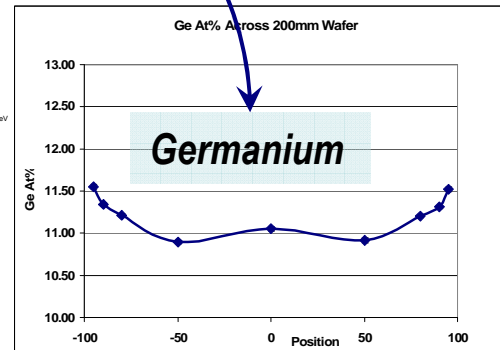
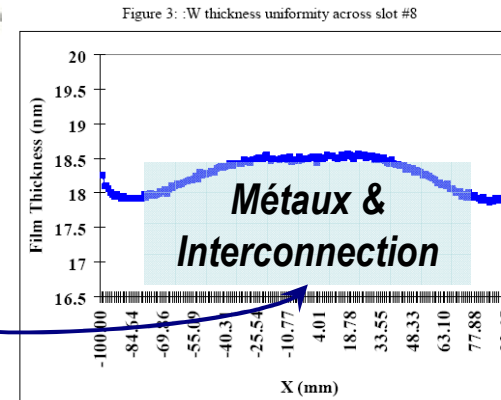
Azote & Grille



LEXFAB-300



Rabah Benbalagh



R&D
caractérisation de procédés

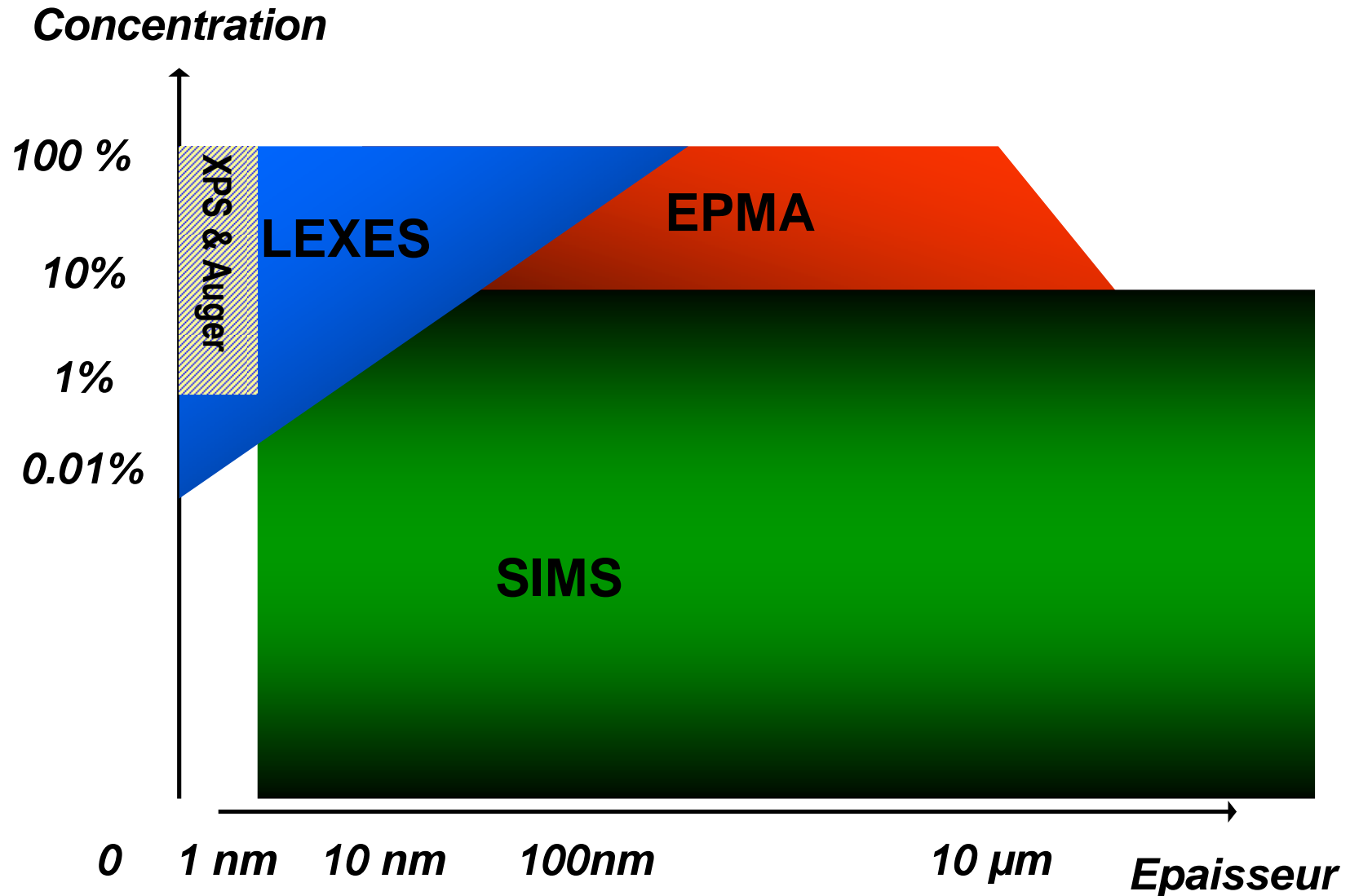
Contrôle et Suivi Statistique des Procédés de fabrication
« SPC and APC Charts »

- Implants (Ultra-Shallow, basse et forte Dose) : B & BF₂, As, P, In,...
- Films Minces :
 - Oxyde de Grille (SiON) Fin & Epais :
 - NO : bas Niveau de dopage d'Azote ($7e14$ at/cm²)
 - DPN : Haut Niveau de dopage d'Azote ($2e15$ at/cm²)
 - High-k : HfAlO_x (i.e. Epilement de HfO₂ & Al₂O₃), ZrO_x, ZrAlO_x...
 - SiGe : Couche Obtenue par Epitaxie
 - « Atomic Layer Deposition » & « Chemical Vapor Deposition » films minces : TiN/Si, WN/Si, W/Si
 - GST dans un plasma d'Azote : GexSbyTez

| Applications | Plage de Dose/Conc | Précision | # de Cristaux | Détection limite |
|--------------|--------------------|-----------|---------------|------------------|
| B implants | >5E14 | <0.5% | 3 LPCX | 5E+13 |
| As implants | >5E14 | <0.8% | 2LTAP | 5E+12 |
| P implants | >5E14 | <0.8% | 2LTAP | 1E+13 |
| NO | N>6E14 | 1%-2% | 2LPC1 | 1E+14 |
| | O>1E16 | <0.8% | 1LPC1 | NA |
| DPN | N>2E+15 | 1%-2% | 1LPC1 | 1E+14 |
| | O>1E16 | <0.8% | 1LPC1 | NA |
| HfAIO | Hf dose: 2E16 | <0.6% | 1LTAP | 1E+13 |
| | Al dose: 3E15 | <1% | 1LTAP | 1E+13 |
| TiN | Ti:25at% | <0.8% | 1LPC1 | 1E+14 |
| | N:75at% | | 1LPC1 | 1E+14 |
| SiGe | >5% at | <0.6% | 2LTAP | 5E+12 |
| GST | Ge:22at% | <0.7% | 1LTAP | 5E+12 |
| | Sb: 22at% | | 1LPET | 1E+14 |
| | Te: 56at% | | 1LPET | NA |

La Précision dépend de la dose/concentration et de la configuration des cristaux installés dans la machine

Domaine de travail de la technique LEXES



***Le LEXES/LEXFAB est une Technique Adaptée
aux Contraintes, Usages et Applications de la
Technologie du Semi-conducteurs.***

***C'est une Technique polyvalente qui conduit vers
une ouverture plus large d'applications.***