

Les détecteurs EDS : technologie, principe de fonctionnement, évolution

Laurent MANIGUET, Aline MEURIS*
Francine ROUSSEL-DHERBEY, Frédéric CHARLOT

GRENOBLE INP – CMTC, 1260 rue de la piscine - Bât. PHELMA - BP 75 - 38402 SAINT MARTIN D'HERES

*CEA/IRFU/Service d'Astrophysique, CE Saclay, Bâtiment 709, Orme des Merisiers, 91191 GIF SUR YVETTE

Plateforme de caractérisation des matériaux de Grenoble INP



Microscopie électronique et techniques d'analyse associées

- 1 MEB FEG ZEISS Ultra 55 avec EDS & EBSD
- 1 MEB FEG Environnemental QUANTA 250
- 1 MEB-FIB ZEISS NVision 40, Fondation Nanosciences (en partenariat avec les plateformes PFNC & PTA)
- 1 Microsonde de Casting CAMECA SX50 (WDS)
- 3 MEB conventionnels avec EDS
- 1 MET JEOL 2010 200 kV LaB6 avec EDS

Rayons X

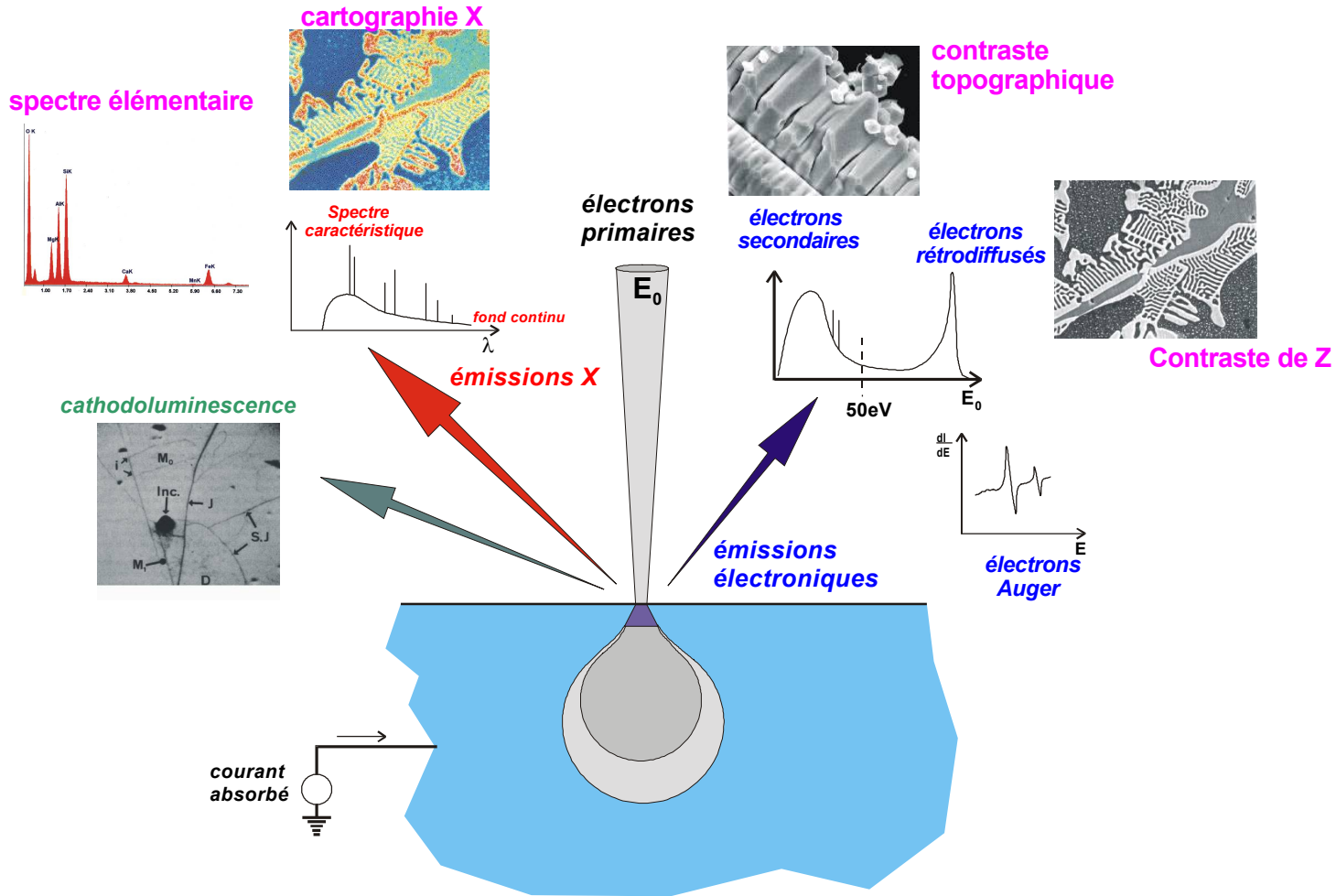
- 1 Diffractomètre X D8 Advance Bruker
- 1 Diffractomètre X X'Pert PRO MPD PANalytical
- 1 Diffractomètre X 5 cercles Rigaku avec anode tournante

Spectrométrie Raman

- 1 Spectromètre Raman T64000 (+ centre commun LEPMI, CEA, CMTC)

► **Au service :**
 - de la recherche, de la formation, des entreprises

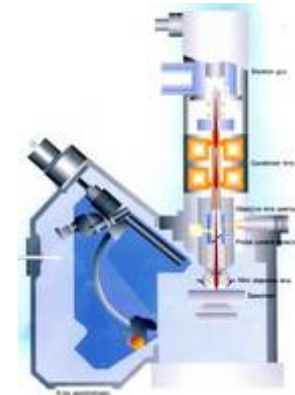
Rappels : interactions électrons - matière



Microanalyse X : émission X caractéristique lors de l'interaction d'un faisceau d'électrons avec la cible...

Petite histoire de la microanalyse X

- 1913 : les spectres de rayons X (Moseley)
- 1940 : spectrométrie de rayons X WDS (Guinier, Cauchois)
- 1947 : 1er travaux sur la microanalyse par Hillier (USA)
- 1949 : début de la thèse de Castaing sous la direction de Guinier
- 1951 : 1er prototype de microsonde WDS par Castaing (thèse)
- 1955 : 1er prototypes industriels



1965 : commercialisation du MEB

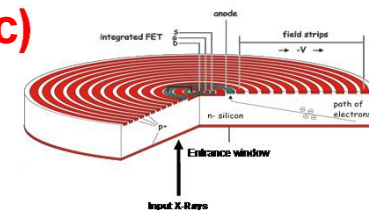
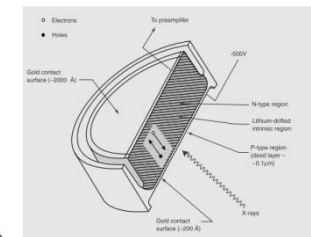
1968 : spectrométrie EDS – diode semi-conductrice (USA)

1984 : découverte du détecteur SDD par GATI et REHAK

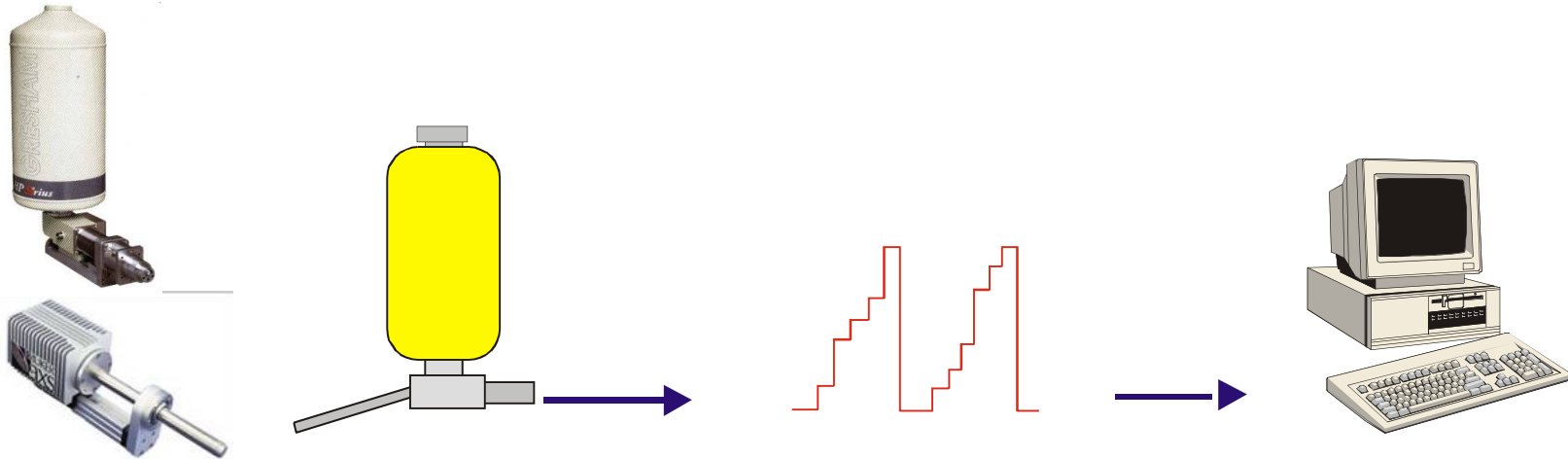
1995 : spectromètre EDS à chaîne de mesure numérique

1998 : commercialisation des premiers SDD pour l'EDS (Roentec)

Depuis 2002 : développement rapide du SDD



Spectrométrie de rayons X à sélection d'énergie EDS (*Energy Dispersive Spectrometry*)



Détecteur

Chaîne électronique
de traitement
de l'impulsion

Poste de traitement
des spectres

Diode Si(Li) ou Ge
ou
Silicon Drift Detector (SDD)

Plan

1 - Généralités sur les détecteurs à semi-conducteurs : diode et SDD

2 - Critères de performances d'un détecteur X

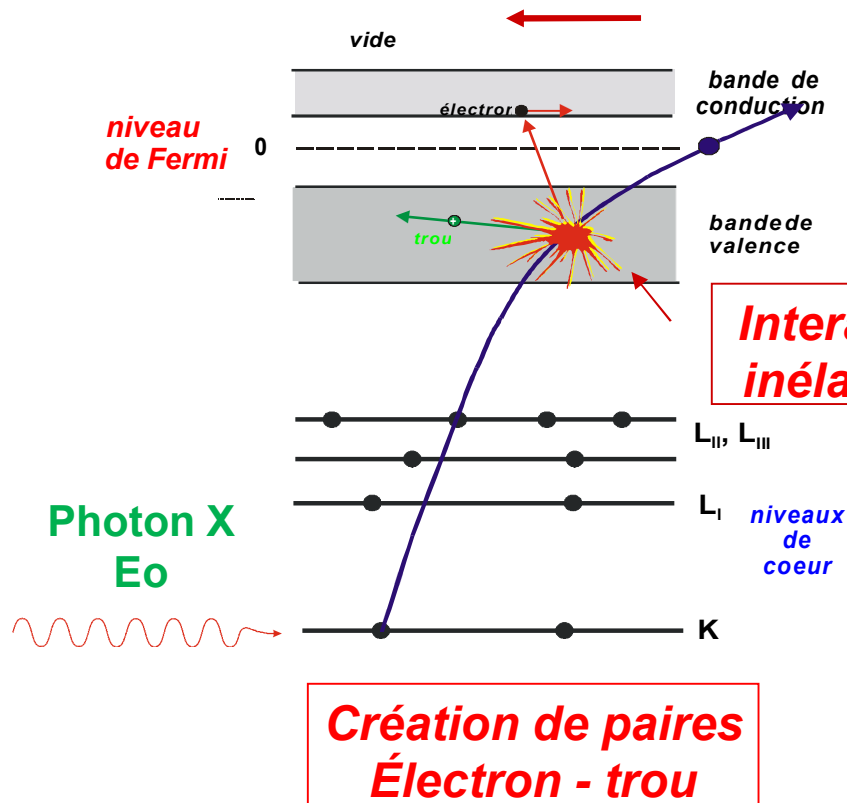
3 - Développements récents

Certain commercial equipment, instruments, or materials are identified in this presentation to foster understanding. Such identification does not imply recommendation or endorsement, nor does it imply that the materials or equipment identified are necessarily the best available for the purpose

**1 - GENERALITES
SUR LES DETECTEURS A SEMI-CONDUCTEURS :
DIODE ET SDD**

DETECTEUR A SEMI-CONDUCTEURS

➤ Collecte directe des paires électrons-trous produites dans le semi-conducteur par le passage d'un photon X



Énergie moyenne ϵ
de création d'une paire électron-trou :

Si : 3,8 eV
Ge : 2,38 eV

Nb moyen de paires
électron-trou engendrées :

$$n = E_0 / \epsilon$$

Charge électrique
moyenne libérée :

$$Q = e E_0 / \epsilon$$

➡ Charge Q proportionnelle à l'énergie E_0 du photon incident

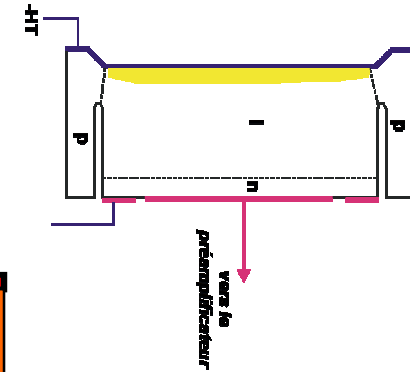
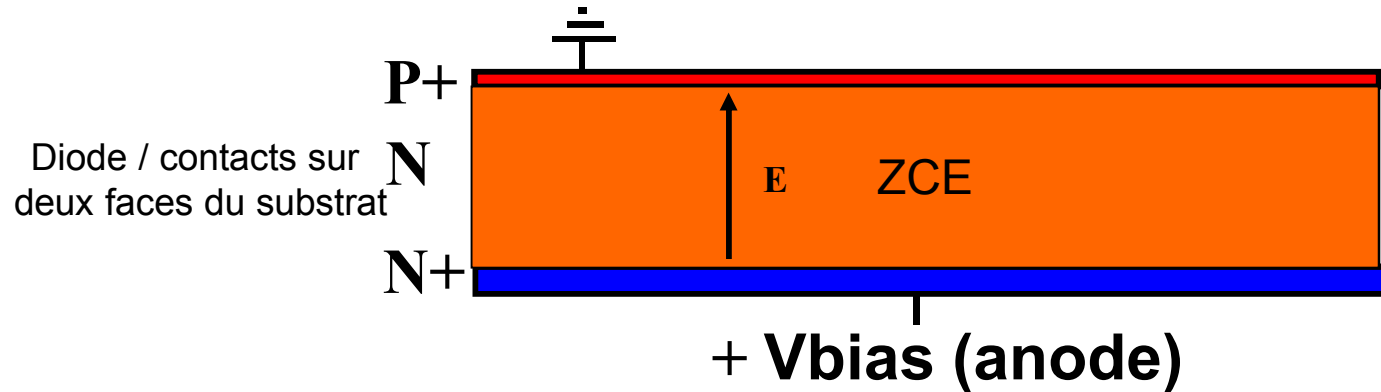
La durée de vie d'une paire est faible et la recombinaison rapide

Il faut éviter la recombinaison...

LA DIODE SEMI-CONDUCTRICE

Structure d'une diode semi-conductrice

Diode : jonction entre 2 semi-conducteurs dopés différemment



En appliquant une tension sur l'anode on crée une Zone de Charges d'Espace (ZCE)

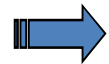
Si la tension à l'anode est suffisamment élevée, le détecteur est totalement déplété

Zone déplétée : zone sensible du détecteur (zone vidée de ses porteurs majoritaires)

Dans le cas d'une diode Si(Li), la zone déplétée correspond globalement à la région intrinsèque *i*

Principe de fonctionnement

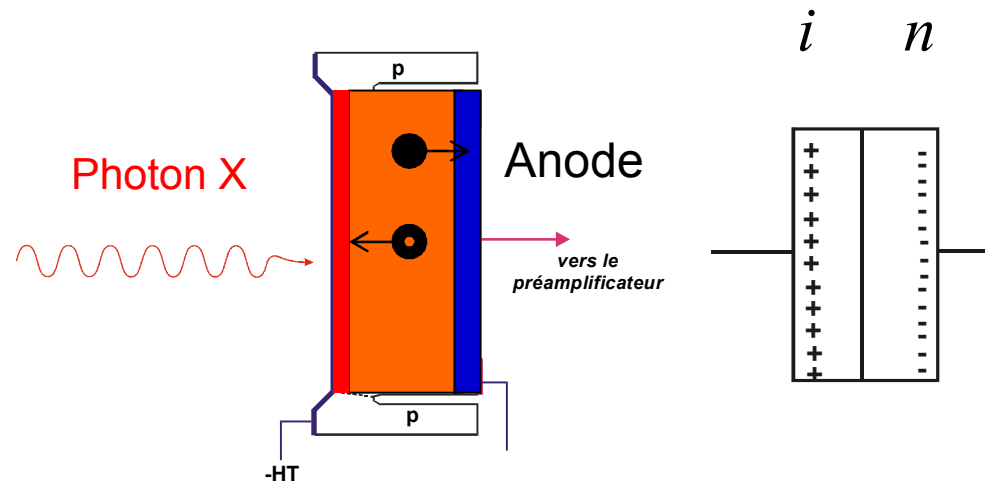
Lorsqu'un photon X, d'énergie E_0 , pénètre dans la diode, il est absorbé par ionisation d'un atome du cristal



création de paires électron-trou

Il faut éviter la recombinaison...

- les électrons générés vont migrer vers l'anode
- les trous migrent vers l'électrode P+

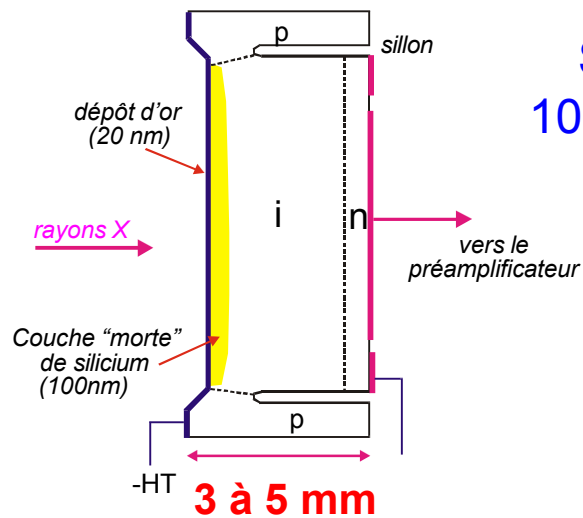
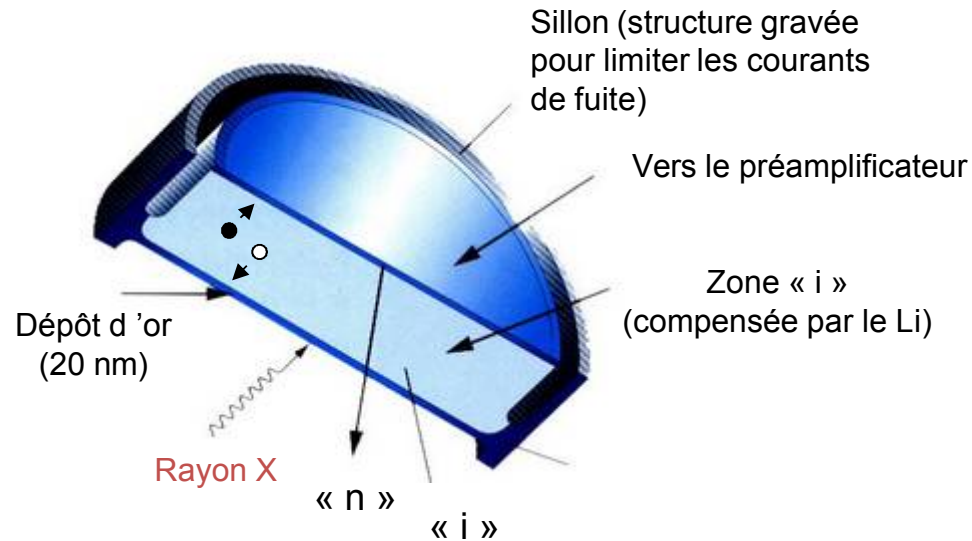


- « i » : intrinsèque (pur)
- « n » : dopé avec des éléments à 5 électrons de valence
- « p » : dopé avec des éléments à 3 électrons de valence

Accumulation des charges : la diode se comporte comme une capacité

La tension de polarisation inverse est de l'ordre de -500 V à -1000 V

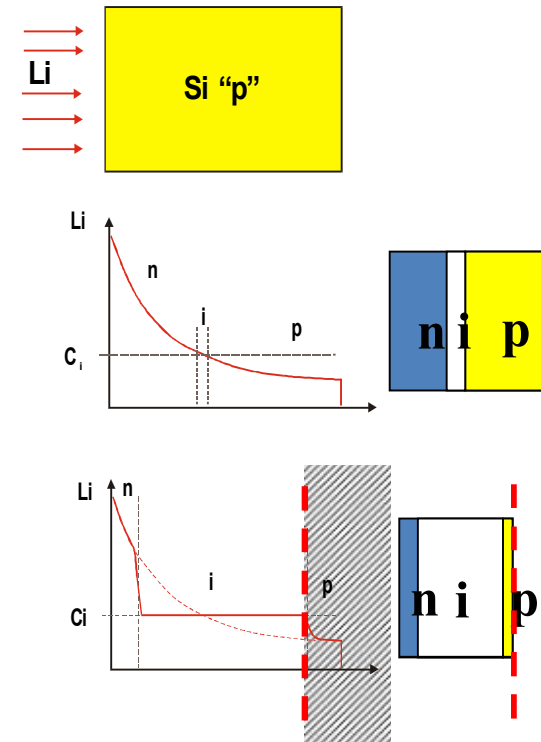
Fabrication d'une diode



Surface active :
10, 30 voire 60 mm²

Comment obtenir une zone « intrinsèque » ?

Dopage au Li



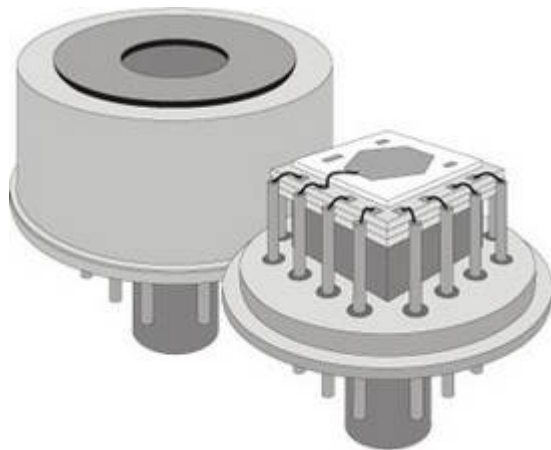
Détecteur Si(Li)

LE DETECTEUR SDD (Silicon Drift Detector)

Détecteur à dérivation en silicium

L'invention des SDD (Silicon Drift Detector)

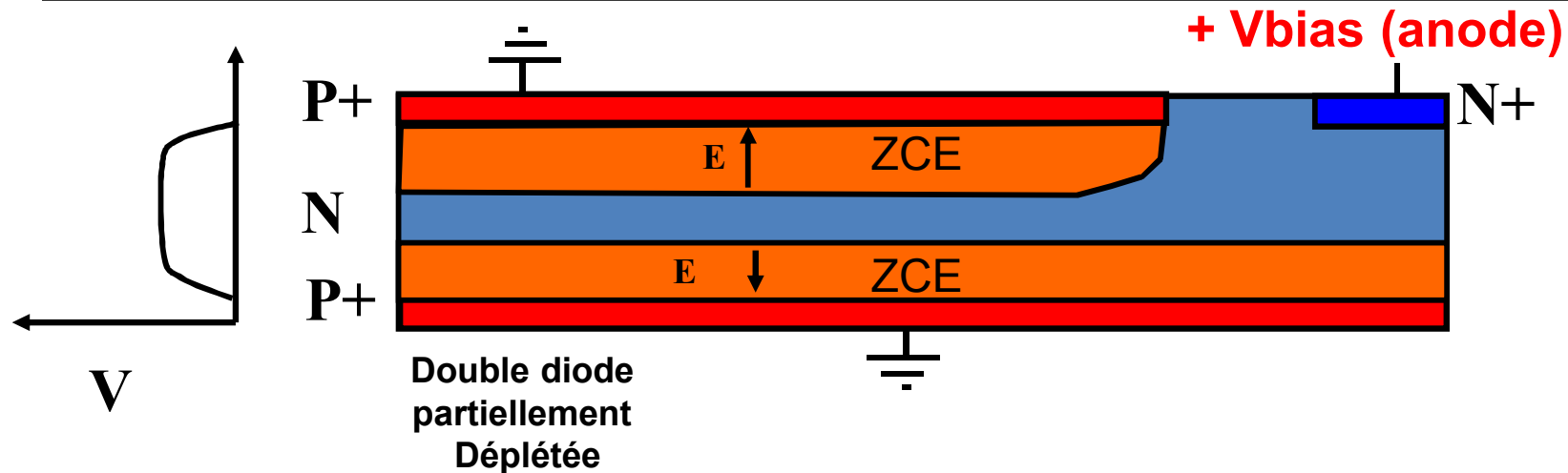
- Détecteur inventé par Gatti et Rehak en 1984
- Les premiers prototypes ont été réalisés en 1985 en collaboration avec Kemmer du Technical University et le Max Planck Institute à Munich



E. Gatti, P. Rehak, Semiconductor Drift Chamber - An Application of a Novel Charge Transport Scheme, Nucl. Instr. and Meth. A 225, 1984, pp. 608-614.

Structure d'un SDD

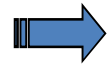
- On dispose deux **diodes dos à dos sur les deux faces d'un substrat de Si (wafer)**
- Contrairement à une diode Si classique, l'anode, qui va collecter les électrons (paires électron-trou), n'a pas besoin de couvrir toute la surface du détecteur pour être efficace.
- En appliquant une tension sur l'anode on crée deux Zones de Charges d'Espace (ZCE) séparées par une zone semi-conductrice non déplétée



- Si la tension à l'anode est suffisamment élevée, le détecteur est totalement déplété

Principe de fonctionnement

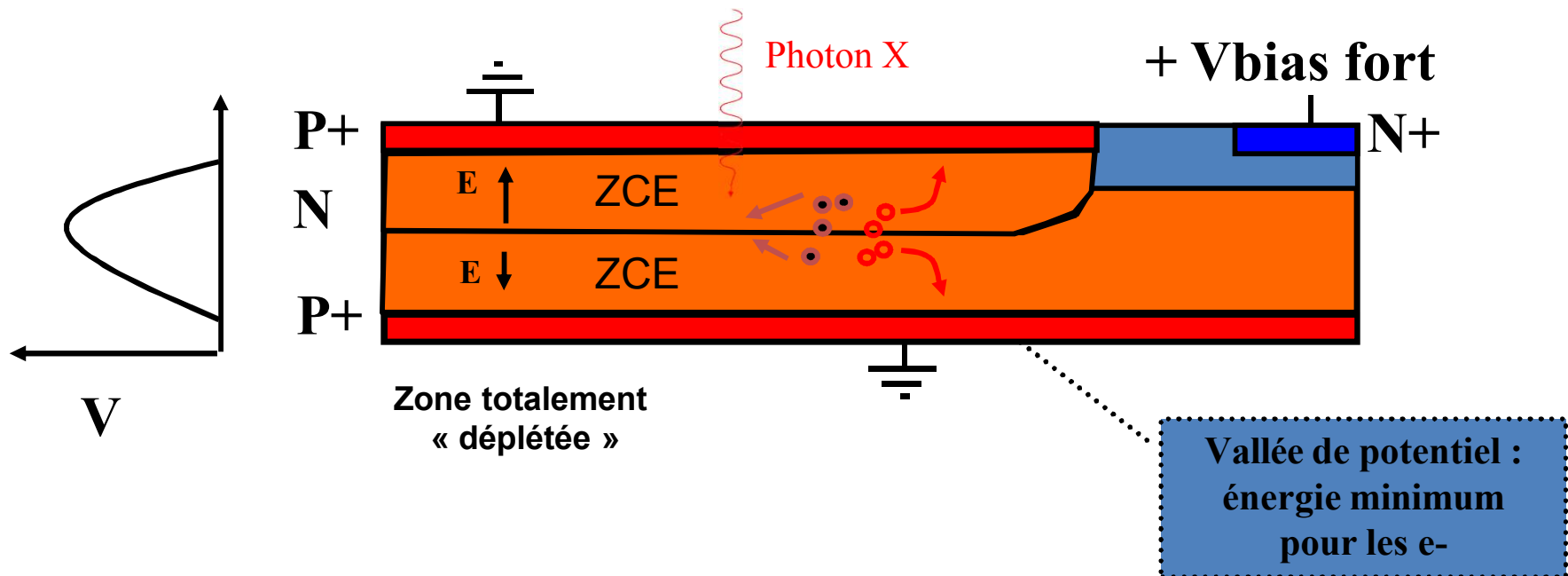
Lorsqu'un photon X, d'énergie E_0 , pénètre dans le SDD, il est absorbé par ionisation d'un atome du cristal



création de paires électron-trou

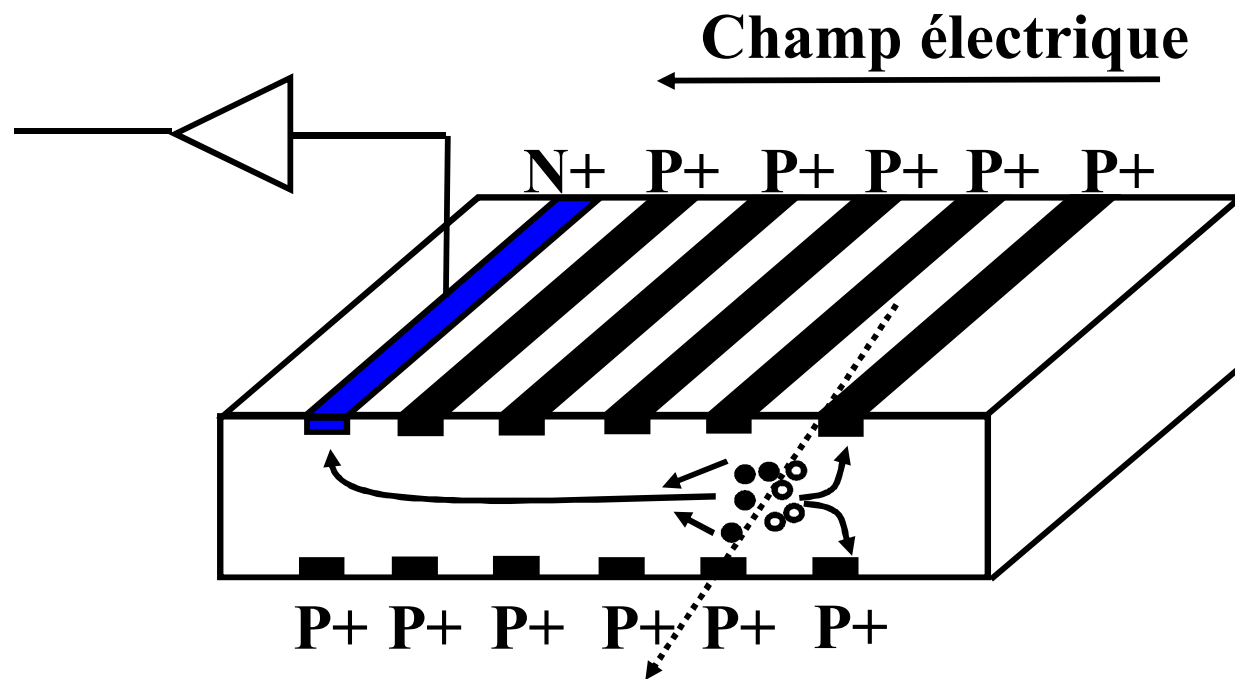
Il faut éviter la recombinaison...

- les électrons générés vont migrer dans une vallée de potentiel
- les trous dérivent (ou « driftent ») vers les électrodes P+



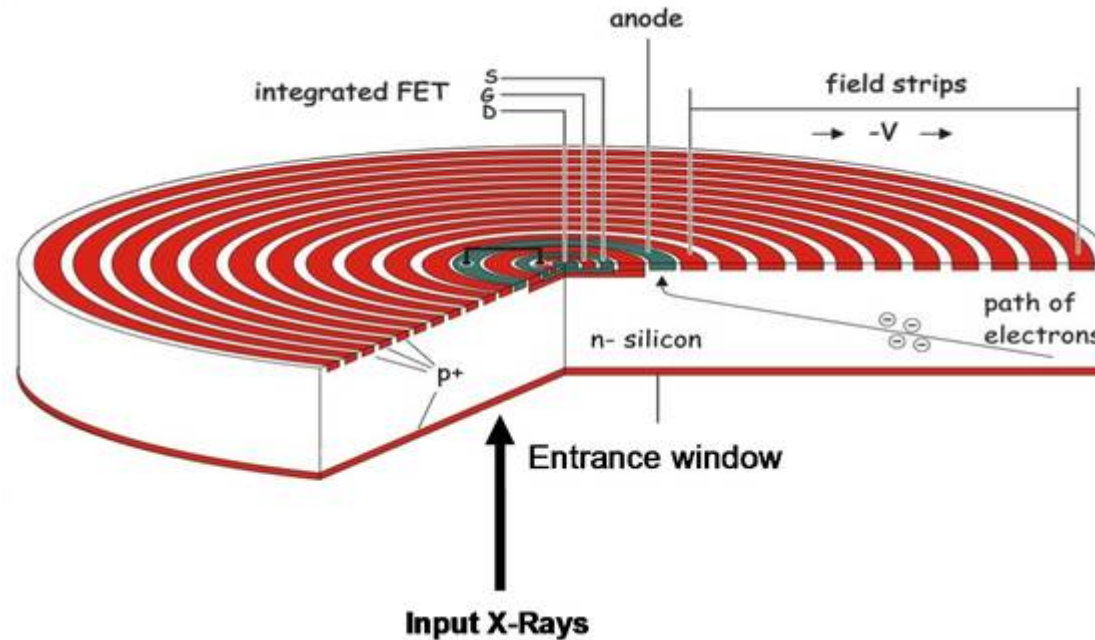
« Collecte » des électrons vers l'anode

Un champ électrique supplémentaire est créé parallèlement à la surface pour faire dériver ou « drifter » les électrons vers l'anode (contact N+)



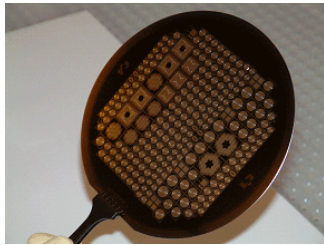
Géométrie du détecteur

A l'origine conçu comme un détecteur linéaire...



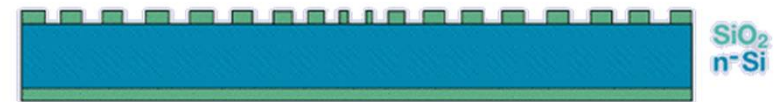
Aujourd'hui, un détecteur radial autour de l'anode centrale avec une série d'anneaux concentriques formant un champ électrique parallèle à la surface

Fabrication des SDD

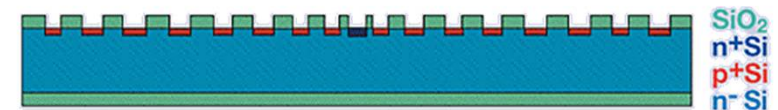


Wafer de Si

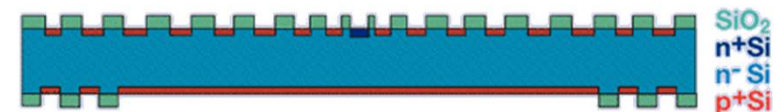
Épaisseur des wafer :
de $300\ \mu\text{m}$ à $500\ \mu\text{m}$



Passivation et gravure

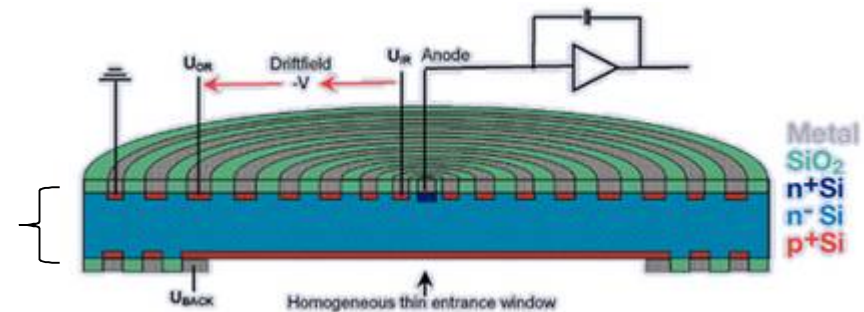


Implantation, métallisation ...



Mise en œuvre complexe en raison de la technologie basée sur le semi-conducteur

Cela explique en grande partie son développement et sa commercialisation plutôt récente



Principaux fabricants de SDD dans le monde

Les premiers SDD ont été produits dans le laboratoire de semiconducteur du Max Planck Institute à Munich (MPI HLL Halbleitorlabor)

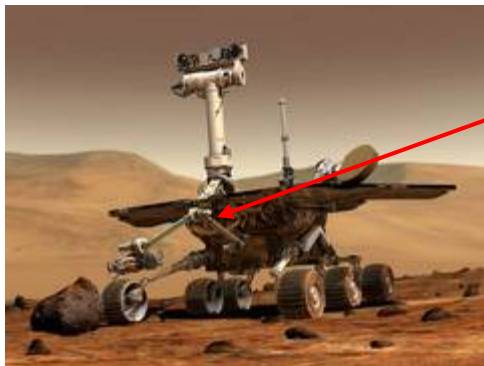
Aujourd'hui : seules quelques compagnies dans le monde produisent ces composants :

- PnSensor (PnDetector) - Allemagne
- Ketek - Allemagne
- SII NanoTechnology – USA
- ...

Applications

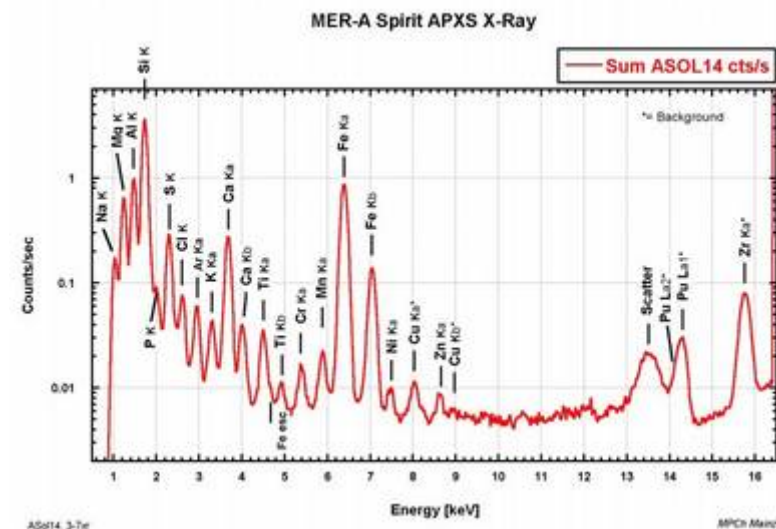
Ces fabricants ont développé une large gamme de SDD pour différentes applications :

- Fluorescence X,
- Diffractometrie X,
- Holographie X
- Microanalyse X



SDD

Robot martien



Spectre de sol martien

Une partie seulement de ces SDD est utilisée pour de la microanalyse X EDS

Stratégie des fabricants de système EDS

Différentes approches :

Les fabricants de système EDS achètent le composant SDD

Certains fabricants achètent aussi le système de refroidissement et l'électronique de traitement

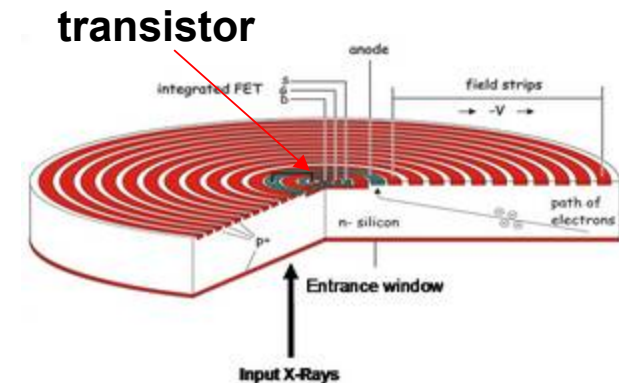
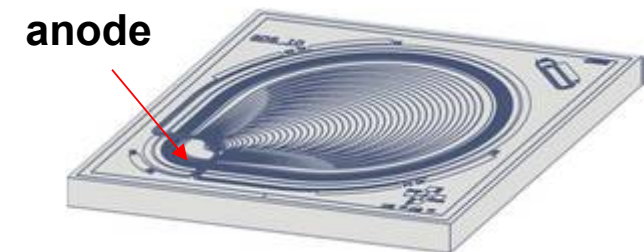
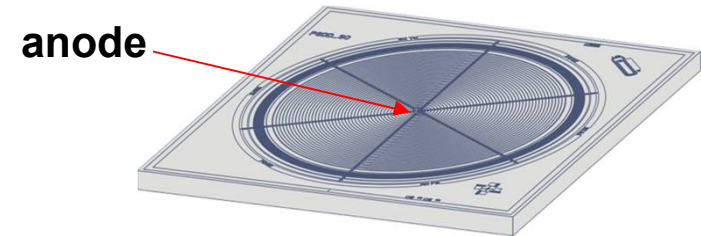
Certains fabricants développent en interne ces fonctions

Conséquences : les propriétés du système EDS peuvent varier

Différents types de SDD

Différentes géométries et différentes électroniques :

- Détecteur radial avec anneaux concentriques
→ Pour les grandes surfaces
- Forme en “goutte” (Droplet rings)
→ Meilleure résolution (123-121 eV @ 5,9 keV)
→ Rapport pic sur fond continu élevé
→ Réservée aux petites surfaces (10 mm²)
- Avec transistor FET intégré
→ Résolution améliorée et capacité de comptage accrue
- Avec un transistor FET “externe”
→ Le bruit électronique est réduit (protégé du flux de photons X)
→ Rapport pic sur fond continu élevé



Description d'un système de détection SDD



Ketek VITUS H7 SDD

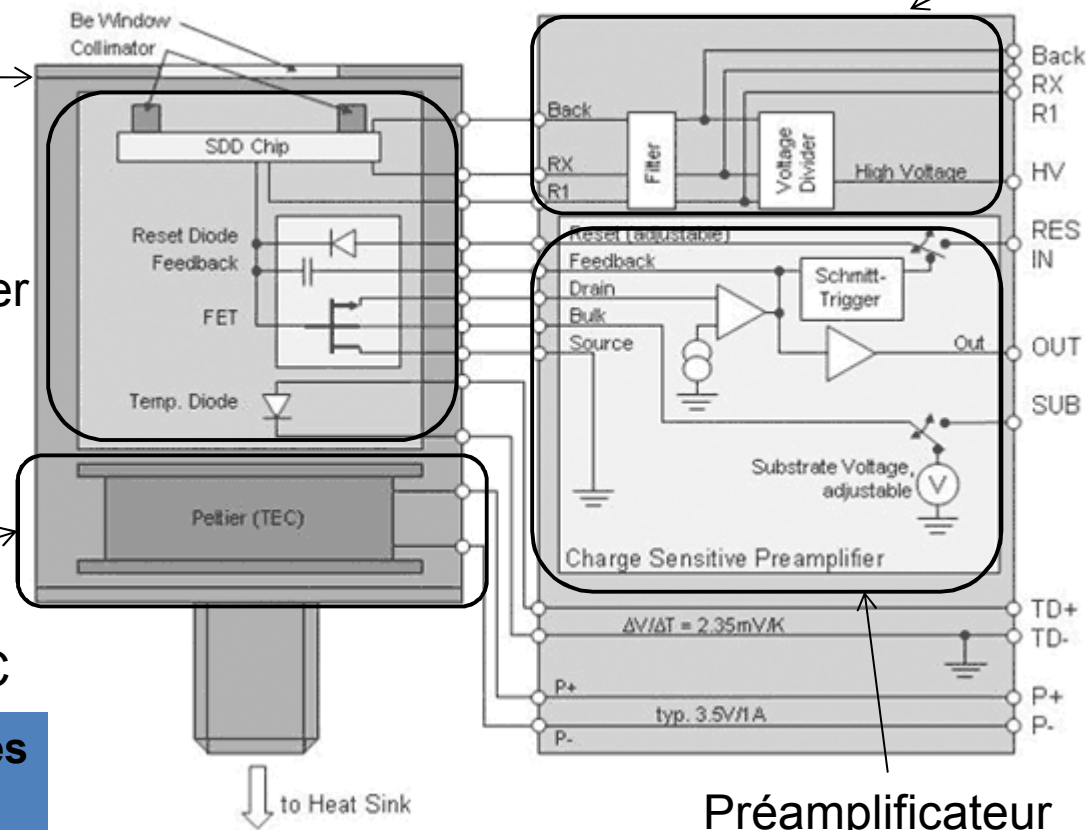
Haute tension régulée

Système de détection :

- Détecteur
- Electronique
- Diode Si pour contrôler la température

Refroidissement par effet Peltier
Entre -20°C et -80°C

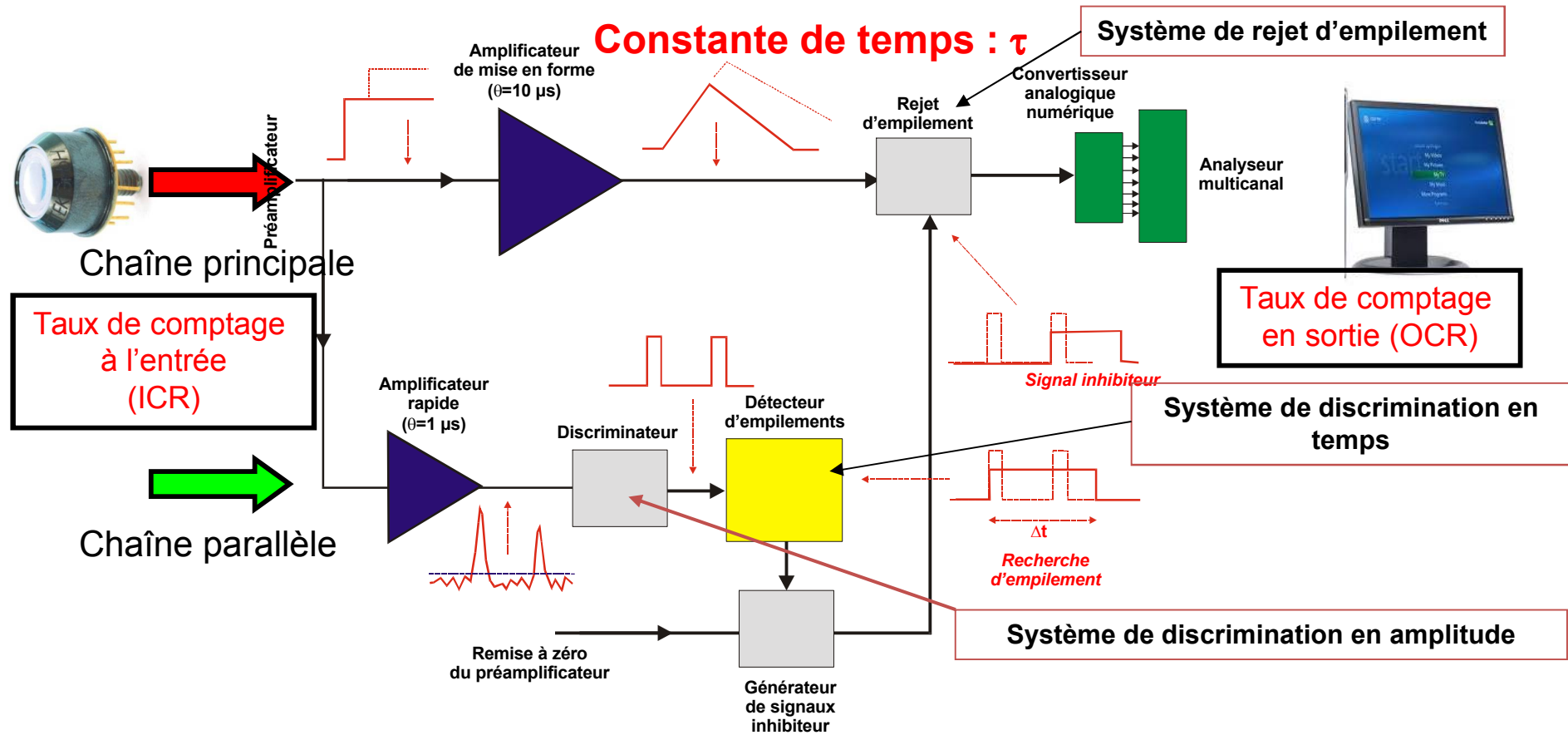
**Prêt en quelques minutes
Pas d'azote liquide !**



Préamplificateur



Chaîne électronique de traitement de l'impulsion



Schématiquement, deux chaînes électroniques en parallèle :

- chaîne principale de traitement de l'impulsion avec amplificateur de mise en forme (constante de temps)
- chaîne de traitement parallèle avec amplificateur rapide :
 - système de discrimination en amplitude (seuillage du bruit, taux de comptage à l'entrée)
 - système de discrimination en temps (détecteur d'empilement)
 - bouclage sur la chaîne principale

2 - CRITÈRES DE PERFORMANCES D'UN DÉTECTEUR X

Critères de performances d'un détecteur X

1. Résolution spectrale ΔE en énergie (eV)

- Plus petite différence d'énergie ΔE capable d'être distinguée (pouvoir de séparation de 2 photons différant d'une énergie ΔE)
- Définition équivalente : largeur totale à mi-hauteur (FWHM, full width half maximum) des raies spectrales

2. Efficacité de détection η

- Capacité à détecter des photons d'énergie E
- Si $\eta(E)=1$ signifie que 100% des photons d'énergie E qui arrivent sur le détecteur produisent un signal mesurable.

3. Capacité de comptage f_C en coups/s

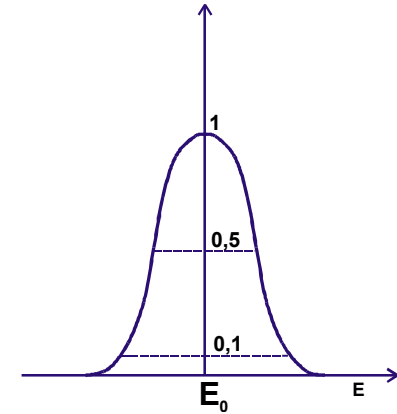
- $\tau_C = 1 / f_C$: Plus petit intervalle de temps entre l'arrivée de deux photons capable d'être distingués (pouvoir de séparation de 2 photons arrivant dans un intervalle de τ_C)

2 - 1 - RESOLUTION SPECTRALE

Résolution

Pour un détecteur à semi-conducteur :

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_0^2 + N^2}$$



**La résolution intrinsèque
du détecteur ΔE_0**

- dépend des fluctuations statistiques liées au mécanisme de conversion (statistique de Poisson)
- du phénomène de perte de collecte de charge (ICC)
→ effet de « Tailing »

Le bruit électronique

- dépend du signal processeur (préamplification avec un transistor FET)
- Dépend du convertisseur Analogique-digital (ADC)

Résolution intrinsèque

$$\Delta E_0 = 2,355 \sqrt{F \varepsilon E_0}$$

F est le facteur de Fano, environ 0,11 pour le silicium

ε : énergie de création d'une paire, 3.62 eV pour le silicium

E_0 : énergie des photons X incidents

La résolution intrinsèque sur la raie $K\alpha$ Mn est :

$$\rightarrow \Delta E_0 (\text{MnK}\alpha) = \mathbf{120 \text{ eV FWHM}}$$

Aujourd'hui, certains SDD sont proches de la résolution intrinsèque !

Bruit électronique

Le bruit électronique s'exprime par la Charge Equivalente de Bruit (CEB) ou Equivalent Noise Charge (ENC) - unité : électron r.m.s.

$$N = 2,355 \cdot \varepsilon \cdot \text{ENC}$$

→ indépendante de E_0 mais ... dépendante du détecteur et du traitement du signal

ENC est la somme quadratiques de 3 contributions indépendantes

$$\text{ENC}^2 = \text{ENC}_s^2 + \text{ENC}_{//}^2 + \text{ENC}_{1/f}^2$$

ENC_s^2 est le bruit électronique série,

$\text{ENC}_{//}^2$ est le bruit parallèle dû au courant de fuite

$\text{ENC}_{1/f}^2$ est le bruit électronique basse fréquence

Charge Equivalente de Bruit (CEB)

Ces 3 contributions sont données par :

$$ENC_s^2 = A \cdot C_t^2 / \tau_p$$

$$ENC_{//}^2 = B \cdot i^2 * \tau_p$$

$$ENC_{1/f}^2 = C \cdot C_t^2$$

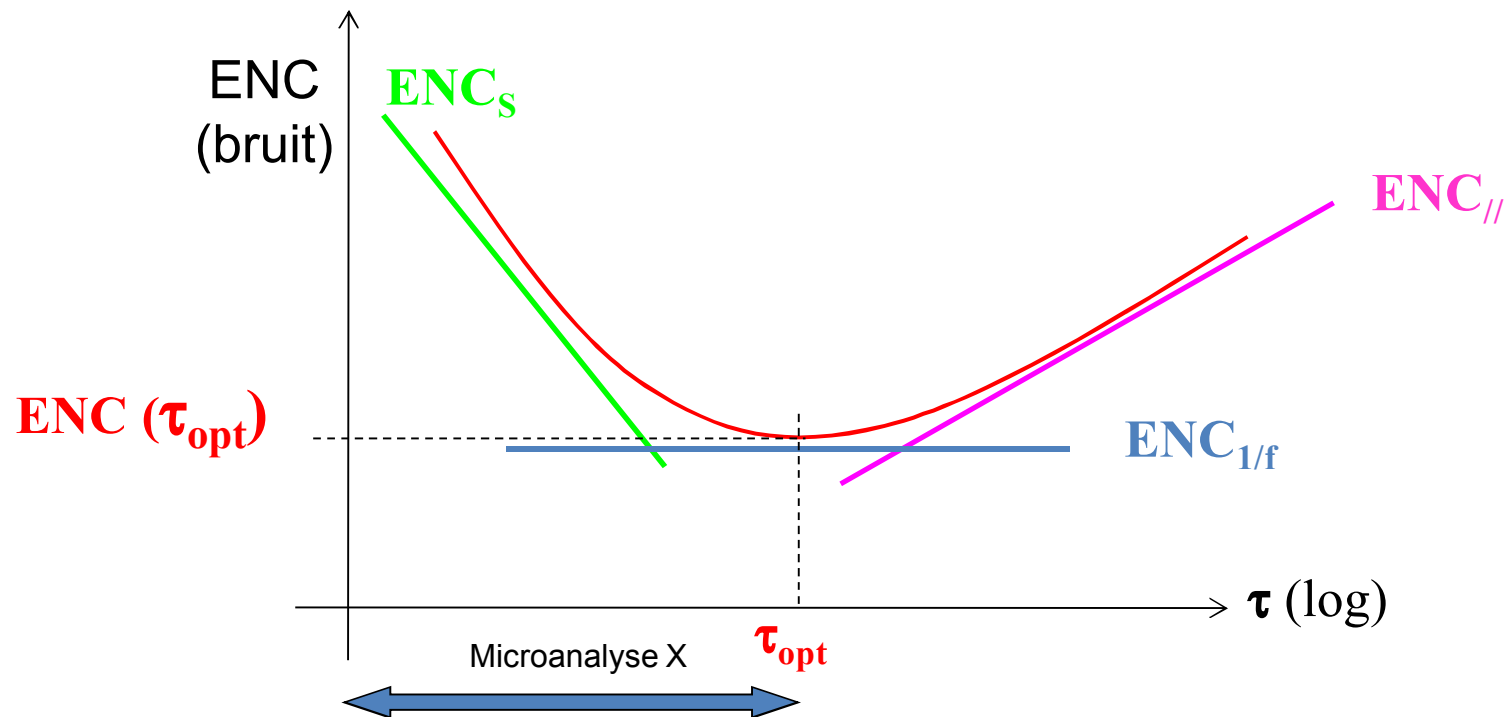
C_t est la valeur de la capacité totale du système (détecteur et préamplificateurs)

i est le courant de fuite (fonction de la température,...)

τ est la constante de temps du traitement du signal

A, B, C constantes (qui dépendent des “ facteurs de forme ”)

Evolution du Bruit en fonction de la constante de temps

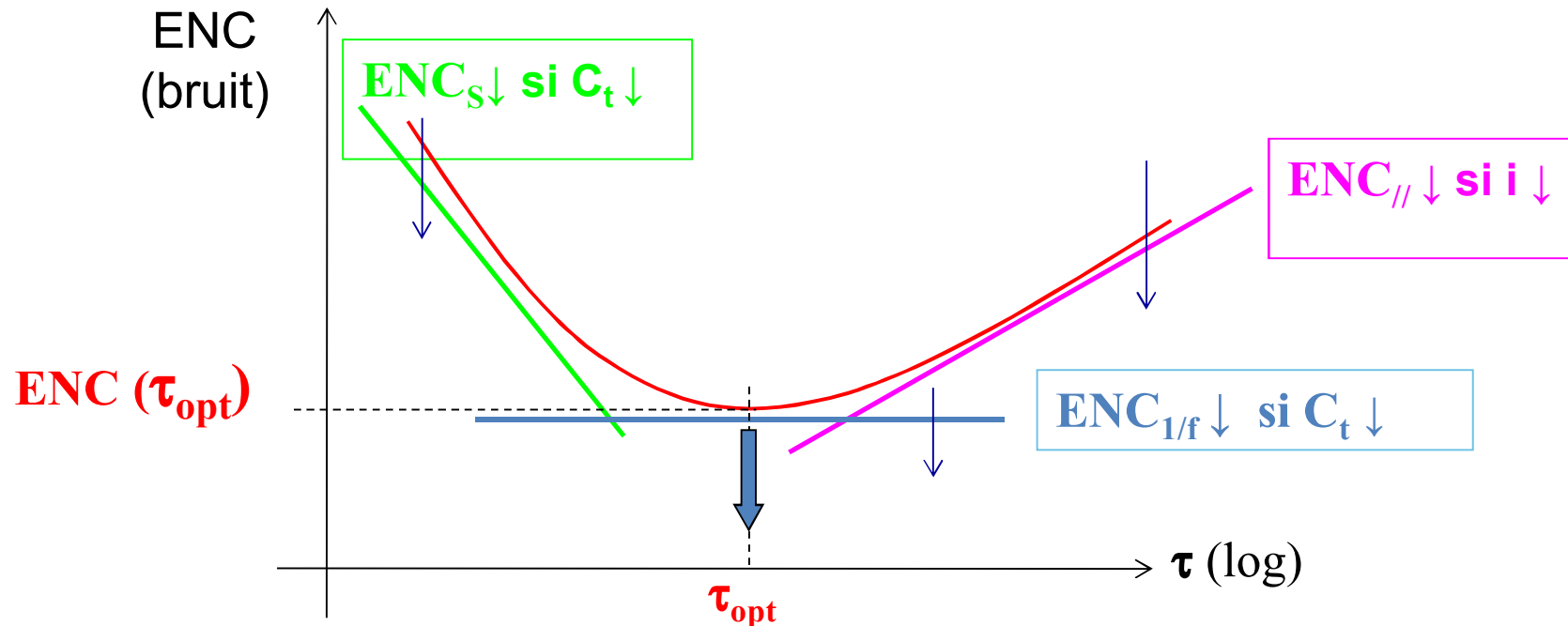


Variation schématique de la Charge Equivalente de Bruit du détecteur en fonction de la constante de temps

Il existe une valeur optimale de la constante de temps (τ_{opt}) qui minimise la charge équivalente de bruit et qui de ce fait optimise la résolution

Comment améliorer la résolution ?

- Réduire le bruit électronique est le meilleur moyen d'améliorer la résolution

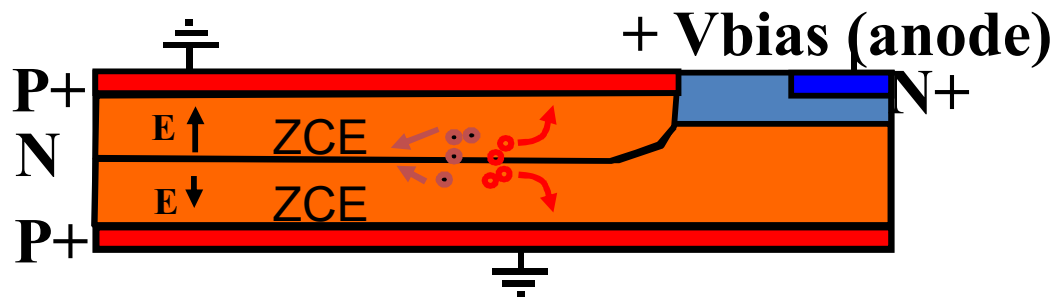


La diminution de la capacité C_t du détecteur et de son courant de fuite i réduit le bruit $ENC(\tau_{opt})$ et donc améliore la résolution

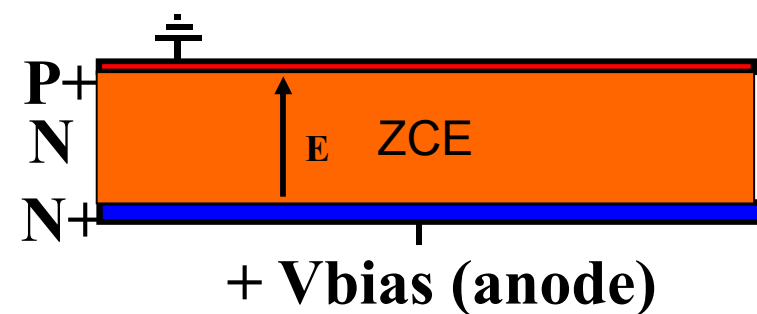
Classiquement : entre 121 eV et 130 eV (FWHM $MnK\alpha$)

Les principaux avantages du SDD

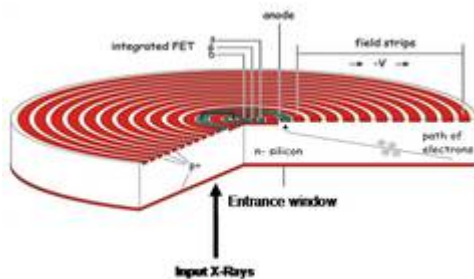
Une faible capacité C_t , définie principalement par la surface de l'anode :



SDD
 $C_t = 0,2 \text{ pF}$
 Surface anode $\sim 400 \mu\text{m}^2$



Diode
 $C_t = 1 \text{ pF}$



→ Faibles ENC_S et $ENC_{1/f}$

Les principaux avantages du SDD (suite)

Un faible courant de fuite à la température ambiante :

$$i(T) \propto T^2 \cdot \exp\left(-\frac{qE_a}{k_B T}\right)$$

$$\frac{i(T_2)}{i(T_1)} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \exp\left(\frac{qE_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)$$

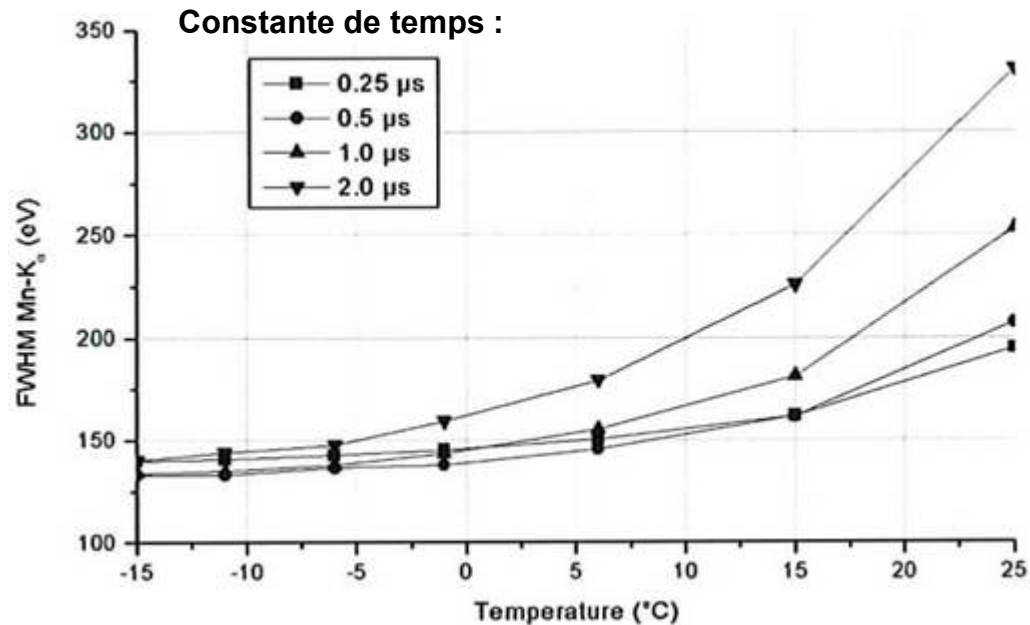
A.N. $i_S(300\text{K}) = 1 \text{ nA/cm}^2$; $E_a = 0.6 \text{ eV}$; $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ S.I.}$; $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ S.I.}$

à 300 K (température ambiante) : $i_S = 1 \text{ nA/cm}^2$

à 250 K (**-23°C**) : $i_S = 7 \text{ pA/cm}^2$

→ faible $\text{ENC}_{//}$ avec un refroidissement modéré

Influence de la T° sur la résolution d'un SDD



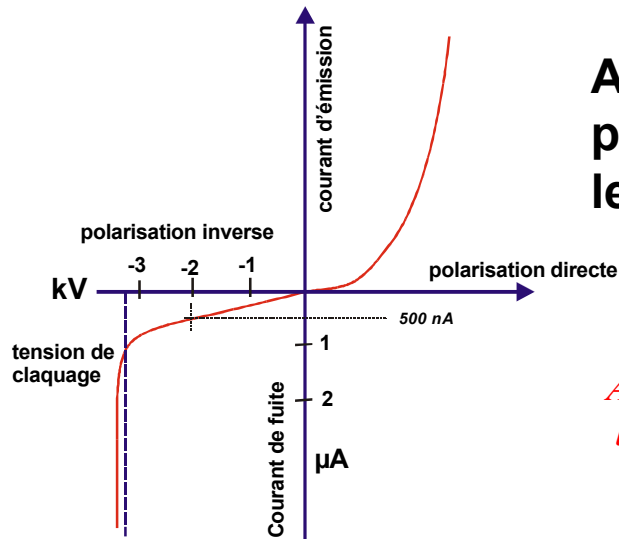
- Diminuer la température améliore la résolution
- En dessous d'une certaine T°, la résolution dépend seulement des termes séries ENC_s et $ENC_{1/f}$. Diminuer encore la T° n'améliore plus les performances du système.

Les SDD peuvent fonctionner avec une bonne résolution près de la température ambiante

→ Simple refroidissement par effet Peltier



Influence de la T° sur la résolution d'une diode



A température ambiante, pour une tension de polarisation inverse de 1000 volts, le courant de fuite est d'environ 250 nA.

A température ambiante, il est impossible de mesurer le signal lié à l'arrivée d'un photon X

Courbe caractéristique de fonctionnement de la diode à la température ambiante (20°C)

à 100 K (-170°C) : courant de fuite de 0,1 pA

Les diodes ne peuvent pas fonctionner avec une bonne résolution près de la température ambiante

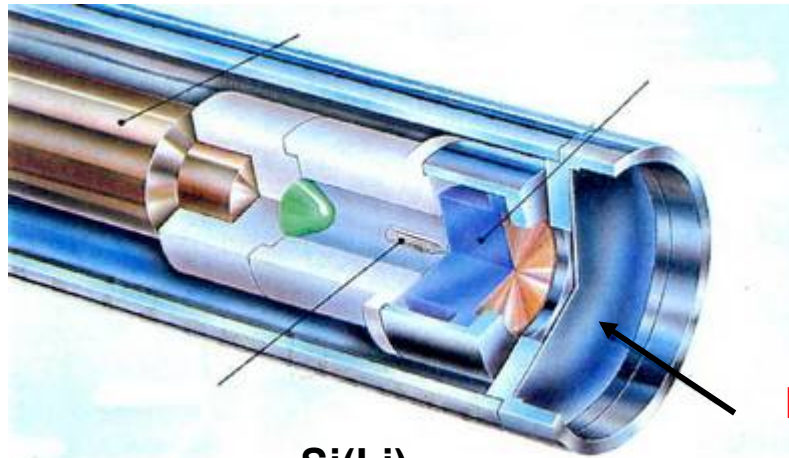
→ Refroidissement par azote liquide



Azote liquide

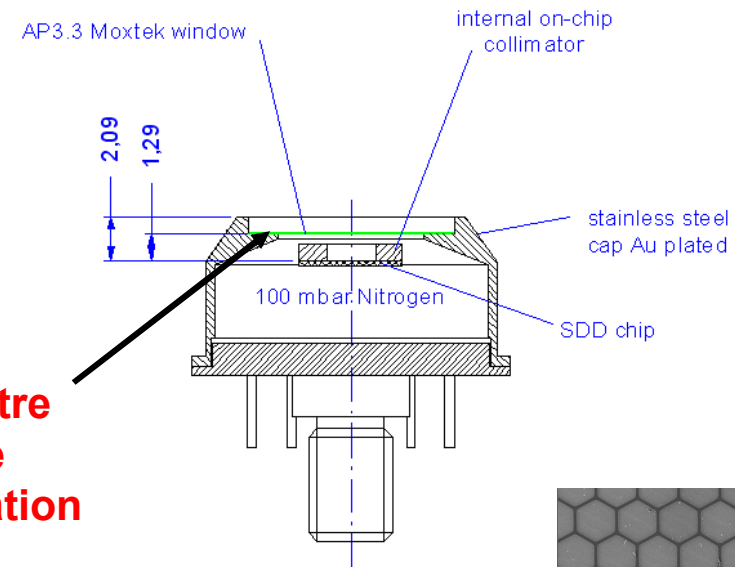


Fenêtre de séparation

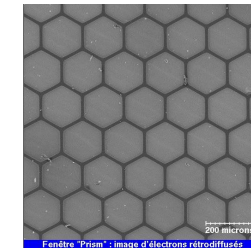


Si(Li)

Fenêtre de séparation



SDD



Solution très répandue : fenêtre mince polymère

Principal fabricant : MOXTEK (USA)

Différents modèles :

- MEB haut vide,
- MEB pression contrôlée

► Le refroidissement du détecteur impose la présence d'une fenêtre de séparation pour éviter la condensation (piège froid)

2 – 2 - EFFICACITE

Efficacité de détection

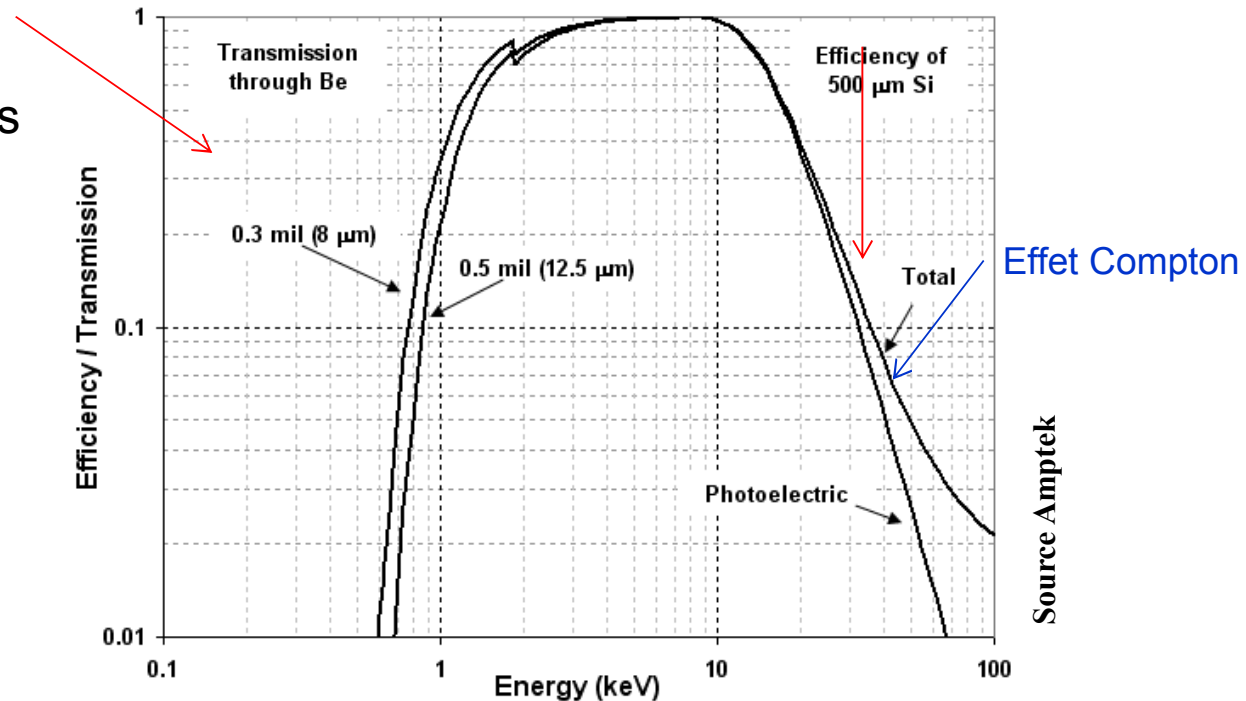
A faible énergie, la détection est limitée par la fenêtre et la couche morte

A haute énergie, la détection est limitée par l'épaisseur totale du détecteur

→ Des fenêtres minces sont disponibles

→ Un soin particulier est apporté à la face d'entrée du détecteur (couche morte)

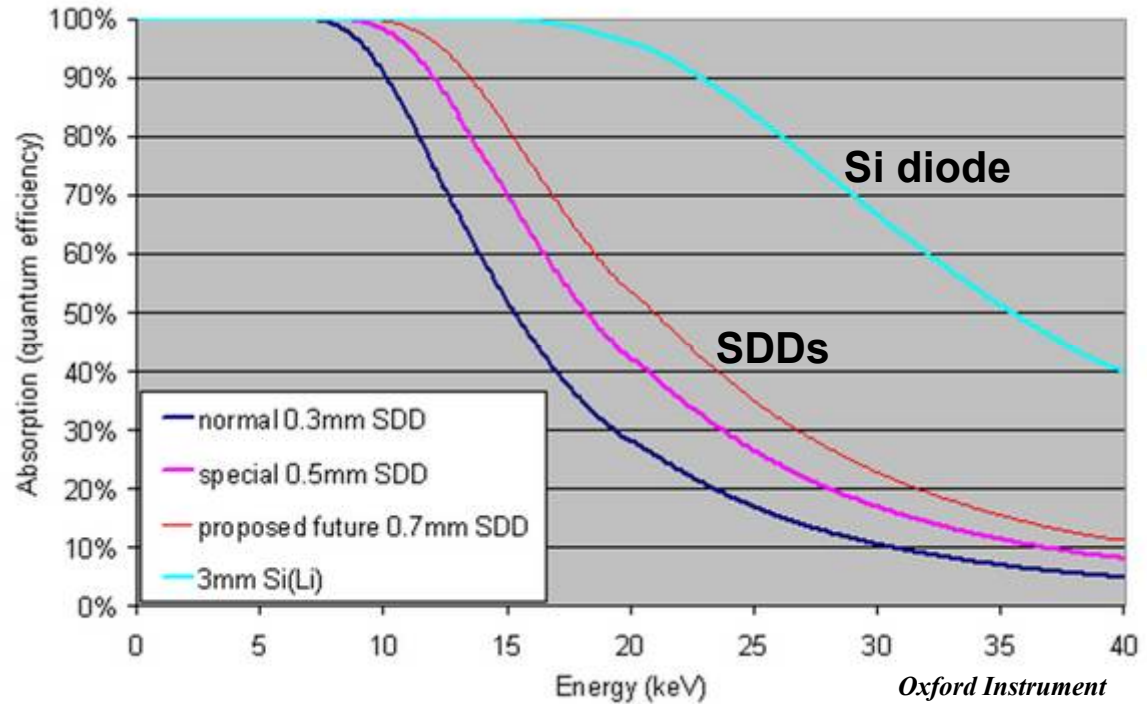
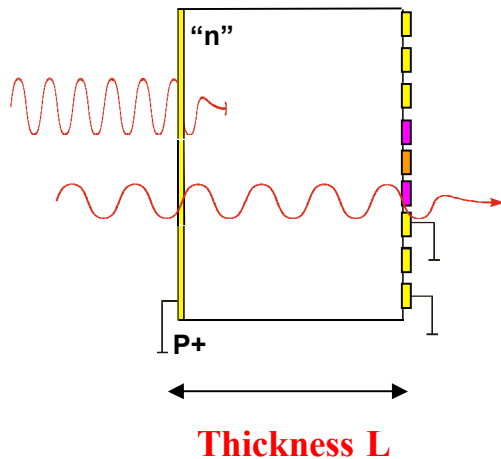
→ Performance en détection des raies de faible énergie



Variation de l'efficacité de transmission en fonction de l'énergie

Efficacité de détection à haute énergie

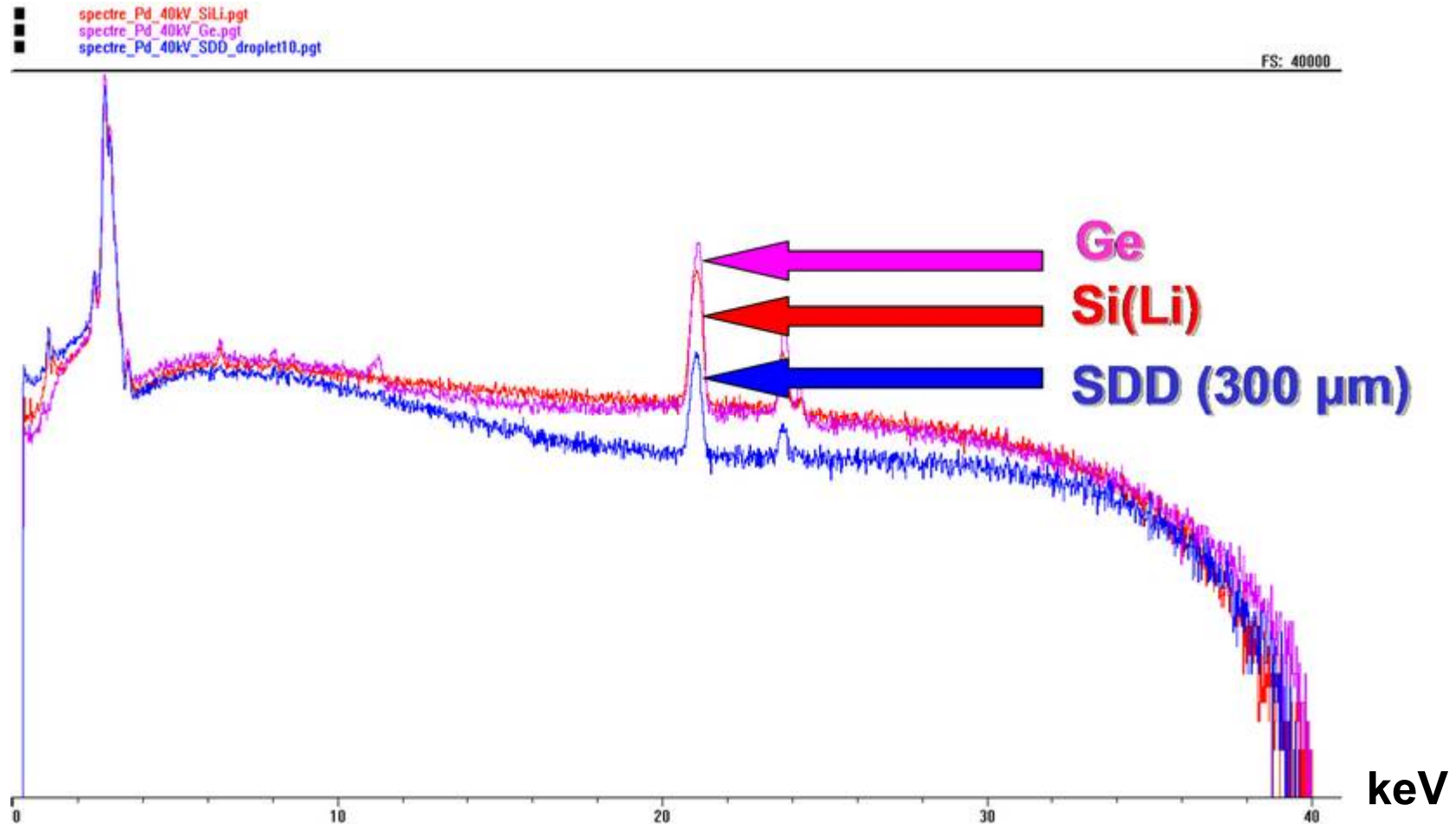
$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot L)$$



L'efficacité du SDD est limitée par l'épaisseur du wafer de silicium (de 300 à 500 μm)

[Augmenter l'épaisseur implique d'augmenter la tension de polarisation \rightarrow cependant, des tensions élevées peuvent induire des pb (pas simple)]

Exemple : spectre de Pd à 40 keV

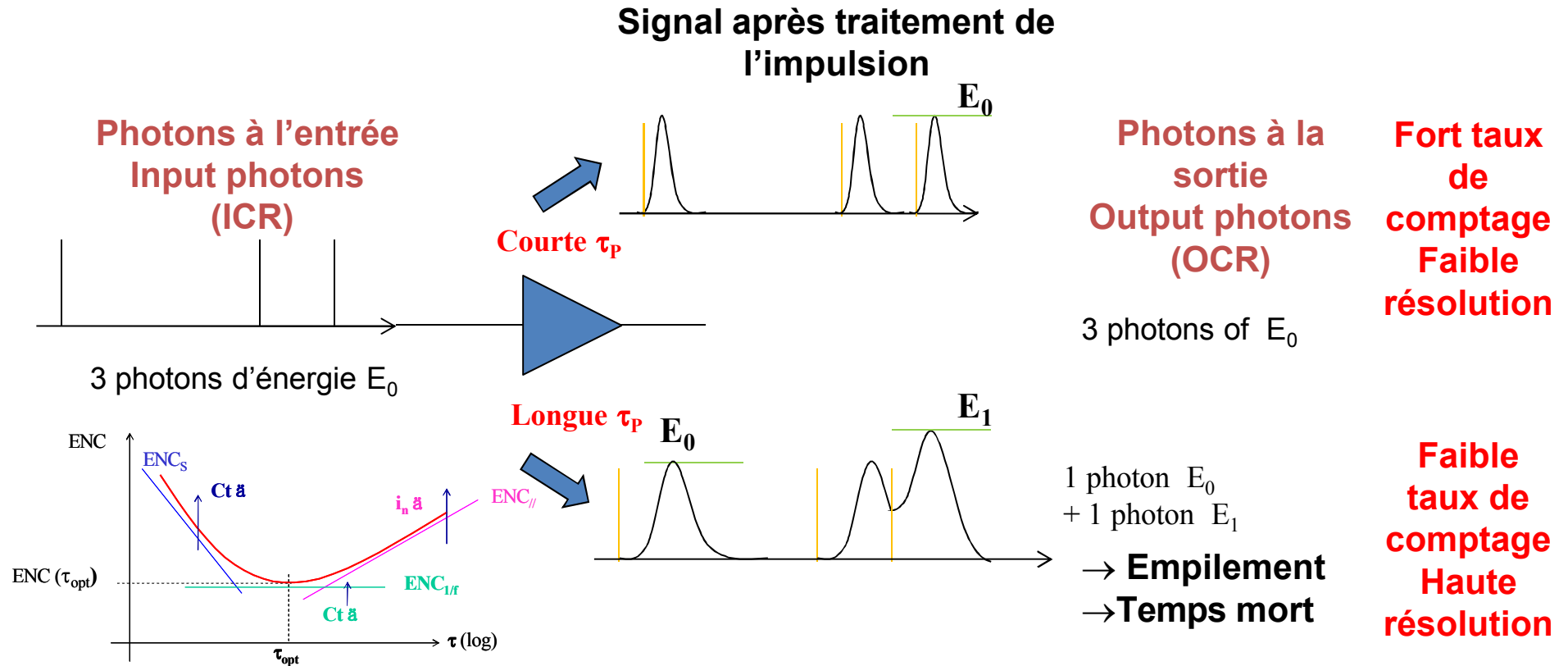


► La perte de sensibilité à haute énergie est probablement le seul point faible du SDD mais elle apparaît comme un problème mineur dans un MEB

2 - 3 - CAPACITE DE COMPTAGE

Capacité de comptage

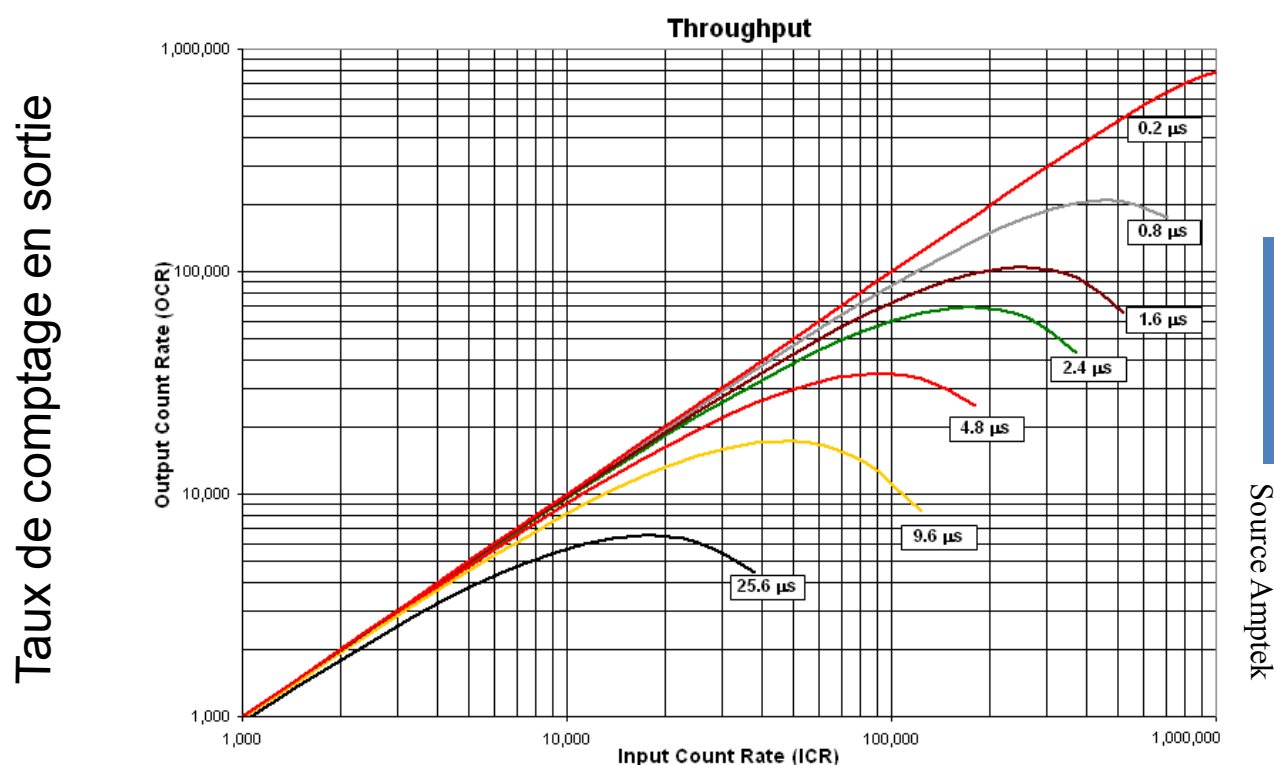
Le taux de comptage dépend du choix de la constante de temps



OCR = f (ICR) = f (courant de sonde, angle solide, τ , temps mort)

Pas toujours facile de s'y retrouver...

Evolution du taux de comptage en sortie en fonction du taux de comptage en entrée

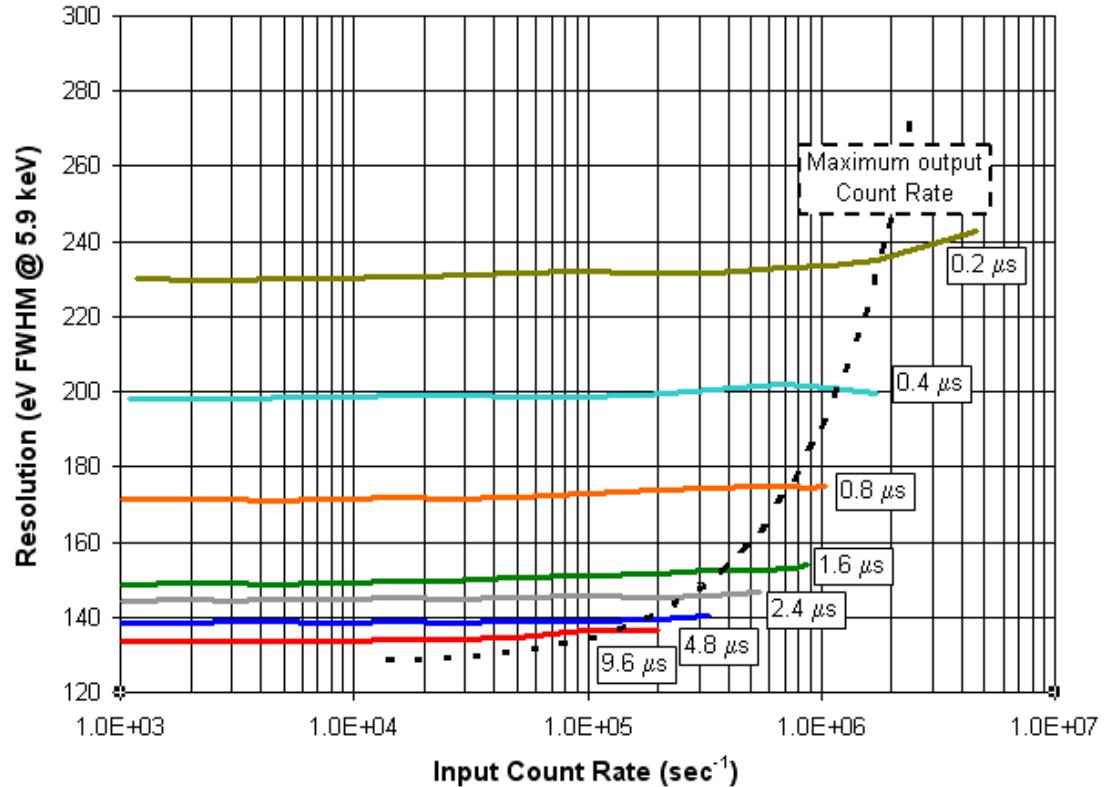
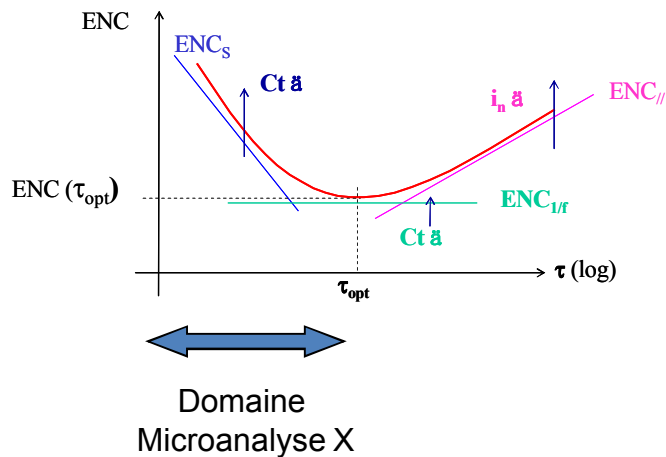


Indépendant
du courant de
sonde et de
l'angle solide

Taux de comptage en entrée, pour différentes constantes de temps

**La déviation de la courbe est due au temps mort associé
au traitement des impulsions**

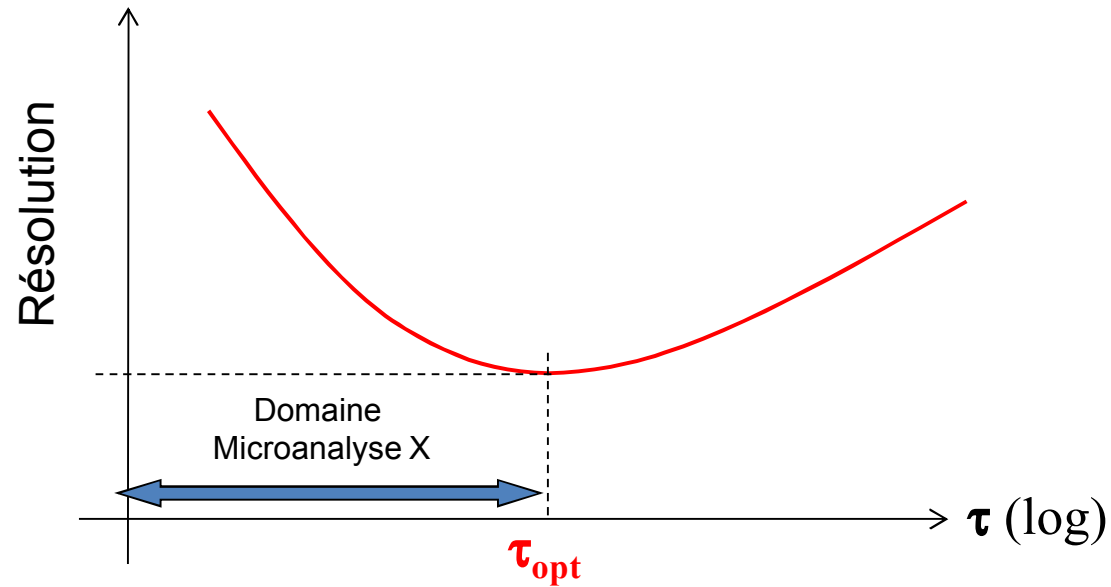
Evolution de la résolution en fonction du taux de comptage en entrée



Taux de comptage en entrée pour différentes constantes de temps

→ Malheureusement, il est parfois difficile d'obtenir ces courbes

Performance en taux de comptage

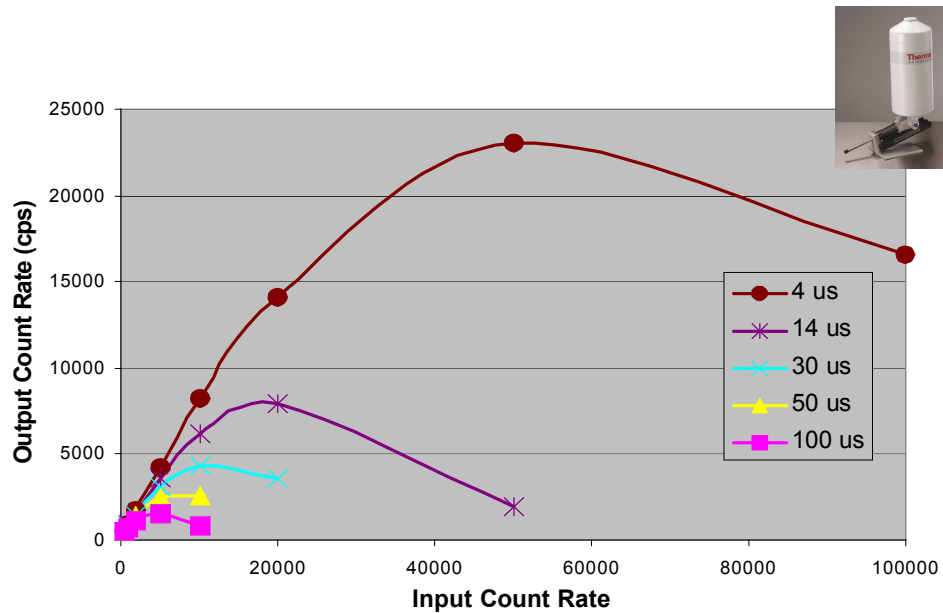


**Faible
résolution
Fort taux
de
comptage**

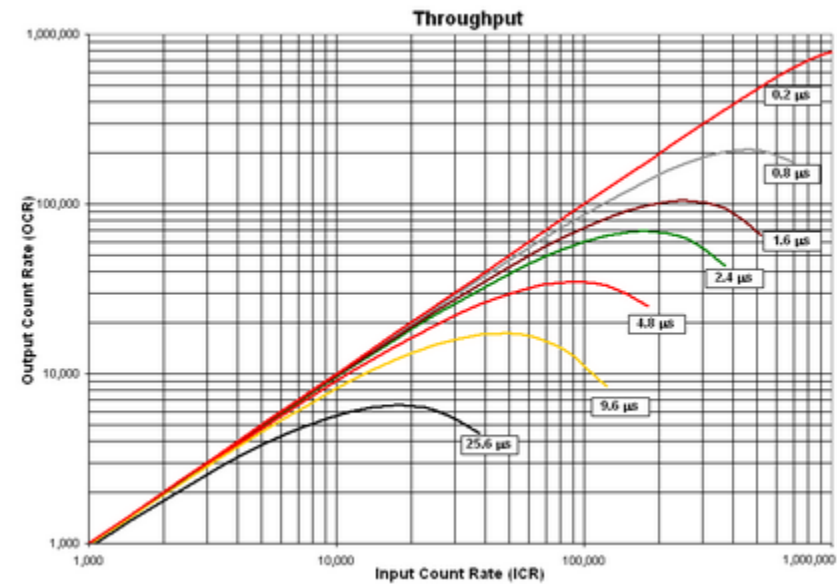
**Haute
résolution
Faible
taux de
comptage**

→ Le taux de comptage maximum est de l'ordre de $\sim 1/\tau$

Comparaison SDD et diode



Diode Si(Li) : $2 \mu\text{s} < \tau < 100 \mu\text{s}$
 $2000 \text{ cps} < \text{OCR} < 30000 \text{ cps}$

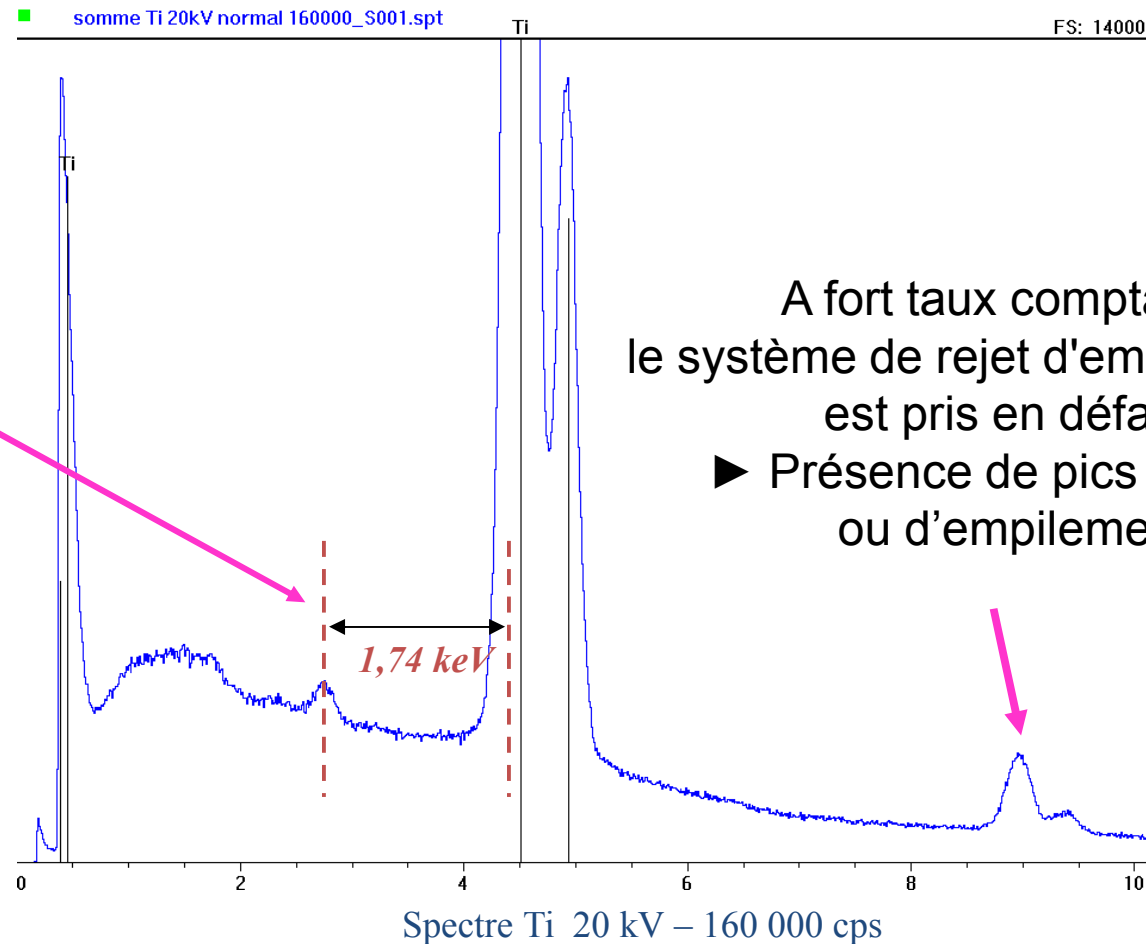


SDD : $200 \text{ ns} < \tau < 10 \mu\text{s}$
 $2000 \text{ cps} < \text{OCR} < 250\,000 \text{ cps}$
 voire au delà (10^6 !)

→ Les SDD révolutionnent les performances en taux de comptage à résolution comparable ...

Artéfacts : pic d'échappement et pic d'empilement

Présence d'un pic de fuite ou pic d'échappement du Si situé à 1,74 keV de la raie principale



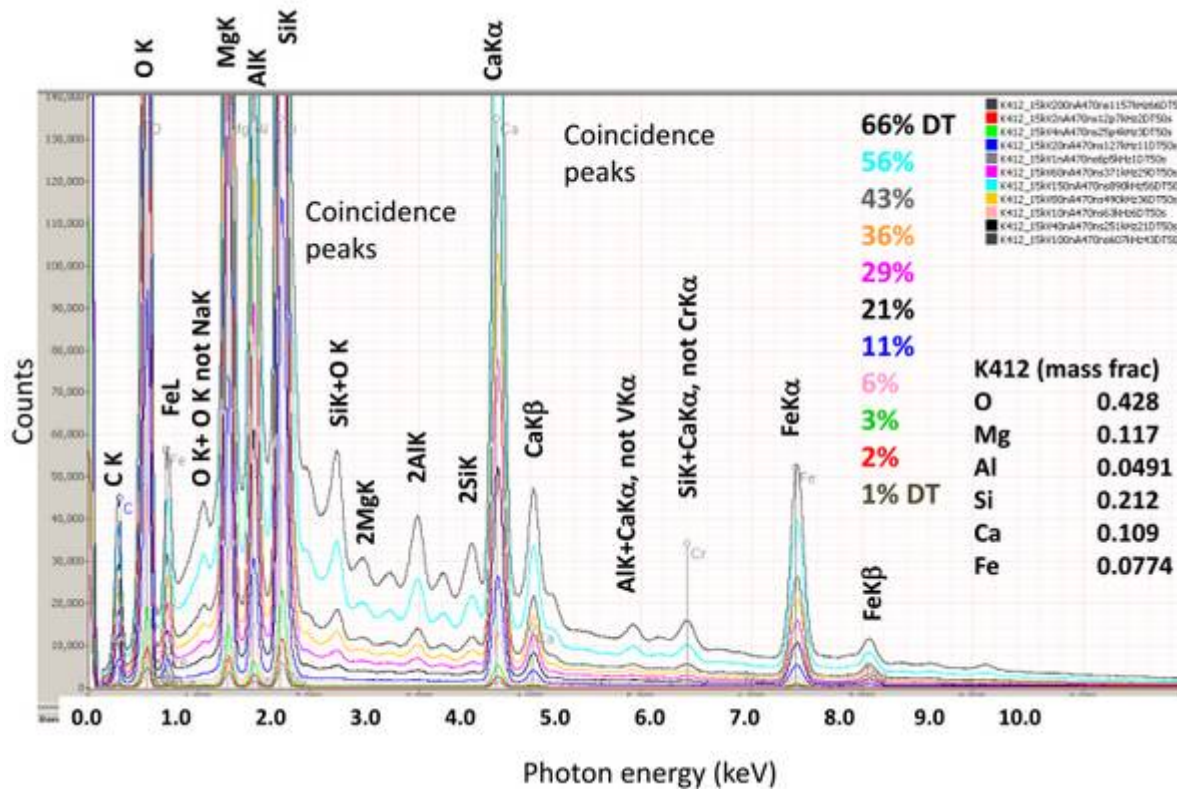
A fort taux comptage,
le système de rejet d'empilement
est pris en défaut
► Présence de pics somme
ou d'empilement

→ **SDD & diode Si(Li) : mêmes artéfacts**

→ **Traitement des pics parasites possibles (traitement du spectre)**

Pics d'empilement dans les SDD

Capacité de comptage élevée mais, à temps mort élevé → risque d'empilement



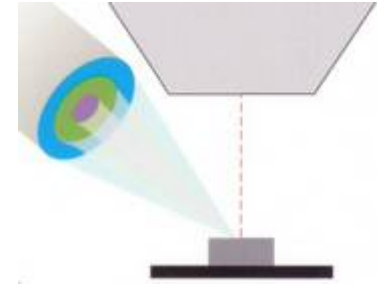
Courtesy
Dale E. Newbury
(NIST)

[Tendance : correction des spectres par logiciel]

3 - DEVELOPPEMENTS RECENTS

SDD : surface active et sensibilité

La tendance est d'augmenter la surface active des détecteurs de façon à augmenter leur sensibilité



Pourquoi ? Les utilisateurs peuvent travailler avec des faibles courants de sonde :

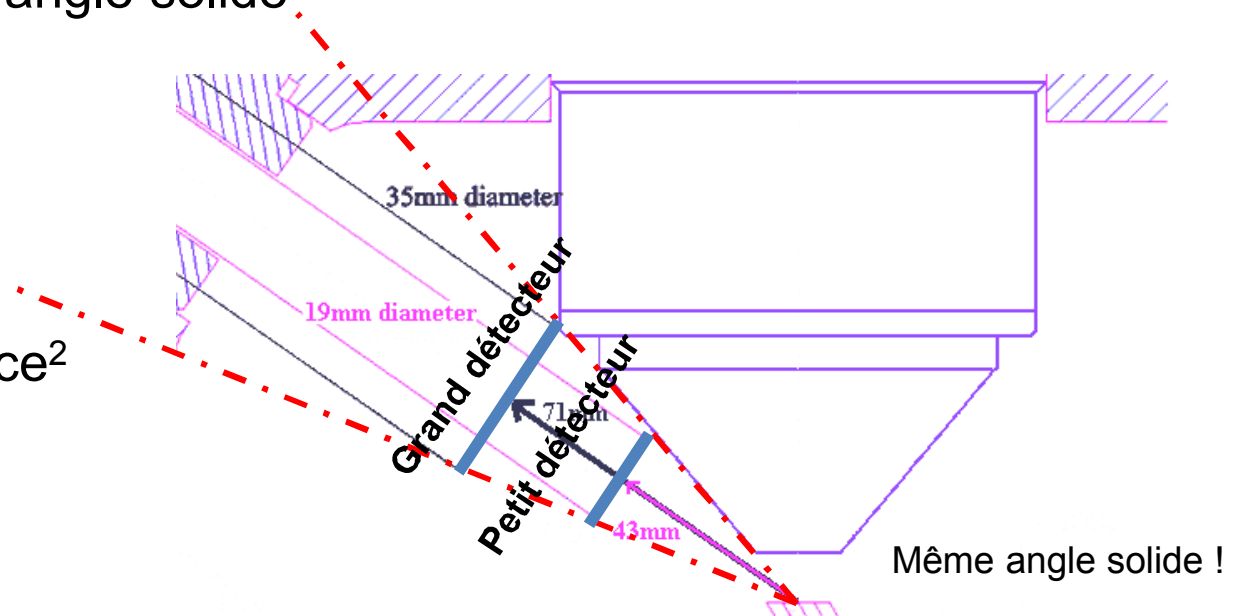
- Par exemple en imagerie haute résolution ou à faible tension d'accélération (imagerie basse tension)
- Travailler avec des forts courants peut endommager des échantillons sensibles
- Acquisitions rapides couplées (ex : EBSD & ESD)

→ **Augmenter la surface active a un réel intérêt dans certaines applications**

Surface active et angle solide

- Un grand détecteur a la capacité de collecter plus de photons X qu'un petit détecteur.
- Cependant, le paramètre à prendre en compte n'est pas la taille du détecteur mais son angle solide

Angle solide :
 $\Omega = \text{Surface} / \text{Distance}^2$

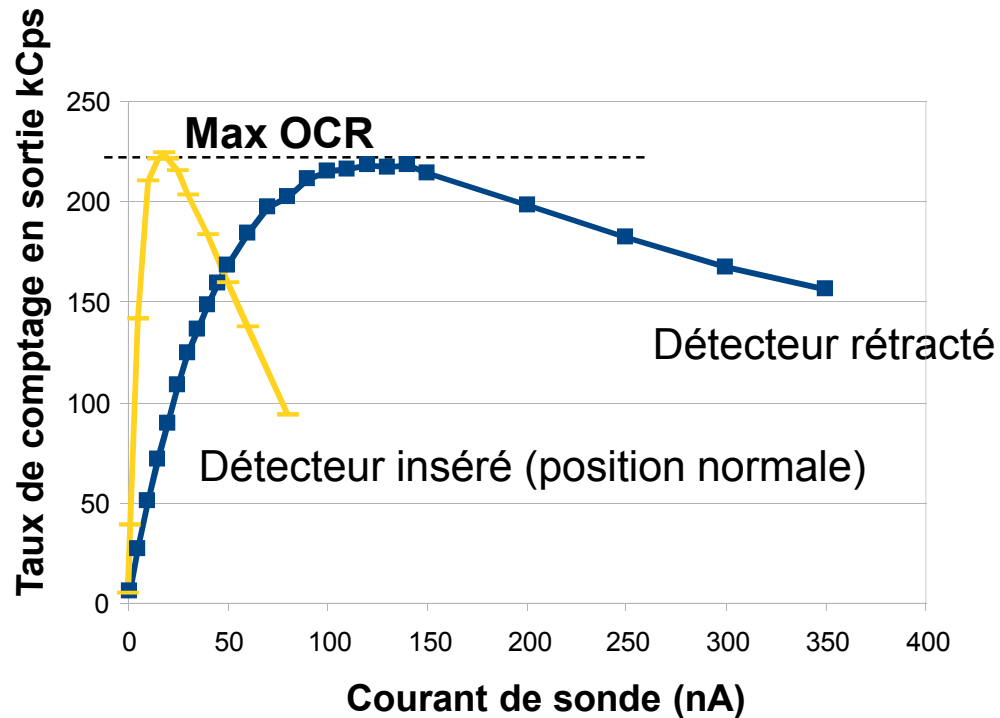


La position d'un grand détecteur dans la chambre du microscope peut limiter l'angle solide

→ **L'angle solide est donc un paramètre clé !**

[Tendance : optimiser les géométries]

Angle solide et taux de comptage



Même détecteur 80 mm²
Même constante de temps
(rapide)

→ La courbe de fonctionnement varie en fonction de la position du détecteur et donc de l'angle solide

→ Optimisation de la position - applications faible courant / fort courant

Ordre de grandeur de l'angle solide : 0,01 – 0,1 sr

SDD de grande surface active

La tendance est d'utiliser des SDD de grande taille



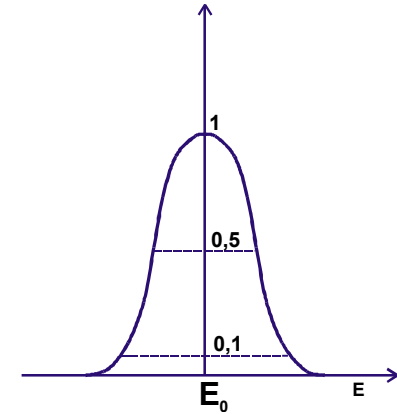
Un SDD de grande surface active a la possibilité de collecter plus de photons X

[Fabriquer des grandes surfaces actives est complexe, d'où un développement plus récent]

Influence de la surface active sur la résolution

Résolution

$$\Delta E = \sqrt{\Delta E_0^2 + N^2}$$



Résolution intrinsèque

- indépendante de la surface active

Le bruit électronique

- dépend de la capacité :

La capacité est fonction principalement de la surface de l'anode : indépendante de la surface active

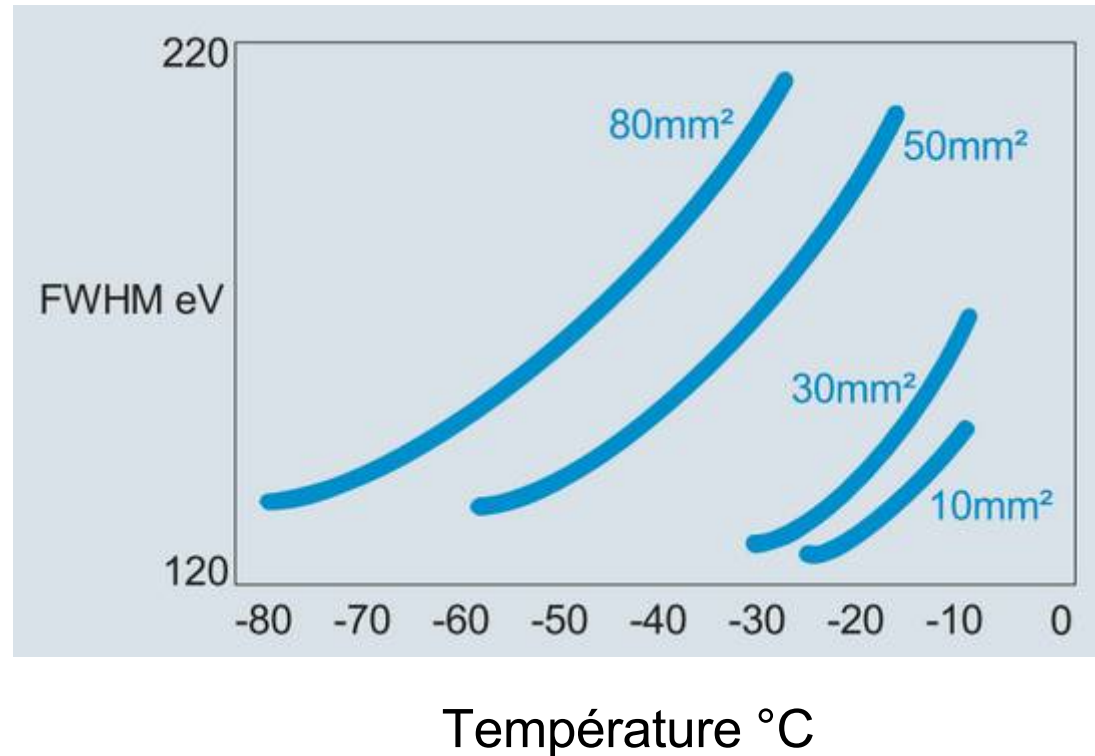
(dans une diode, la capacité du détecteur est proportionnelle à la surface active du détecteur !)

- dépend du courant de fuite

Influence de la surface active sur le courant de fuite

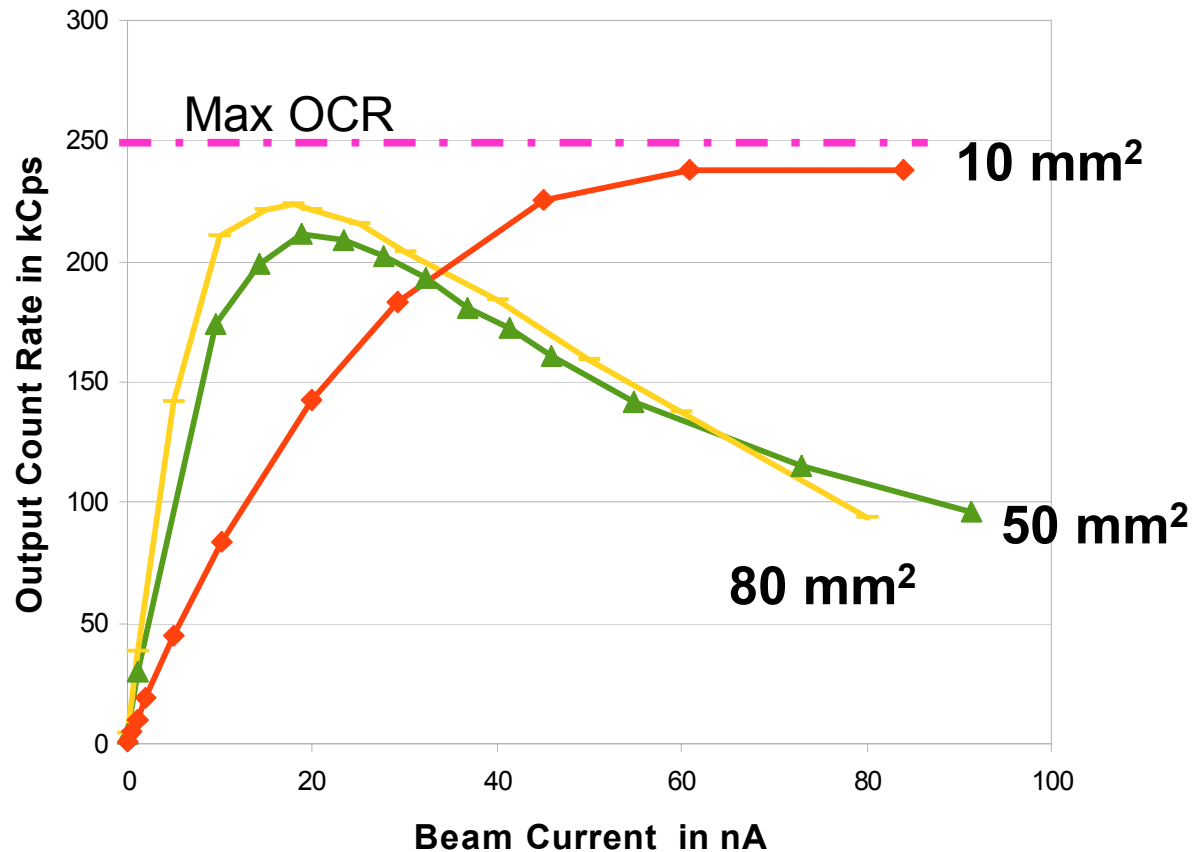
Le courant de fuite est proportionnel à la surface active !

Pour les grandes surfaces, la contribution du courant de fuite doit être réduite par le refroidissement



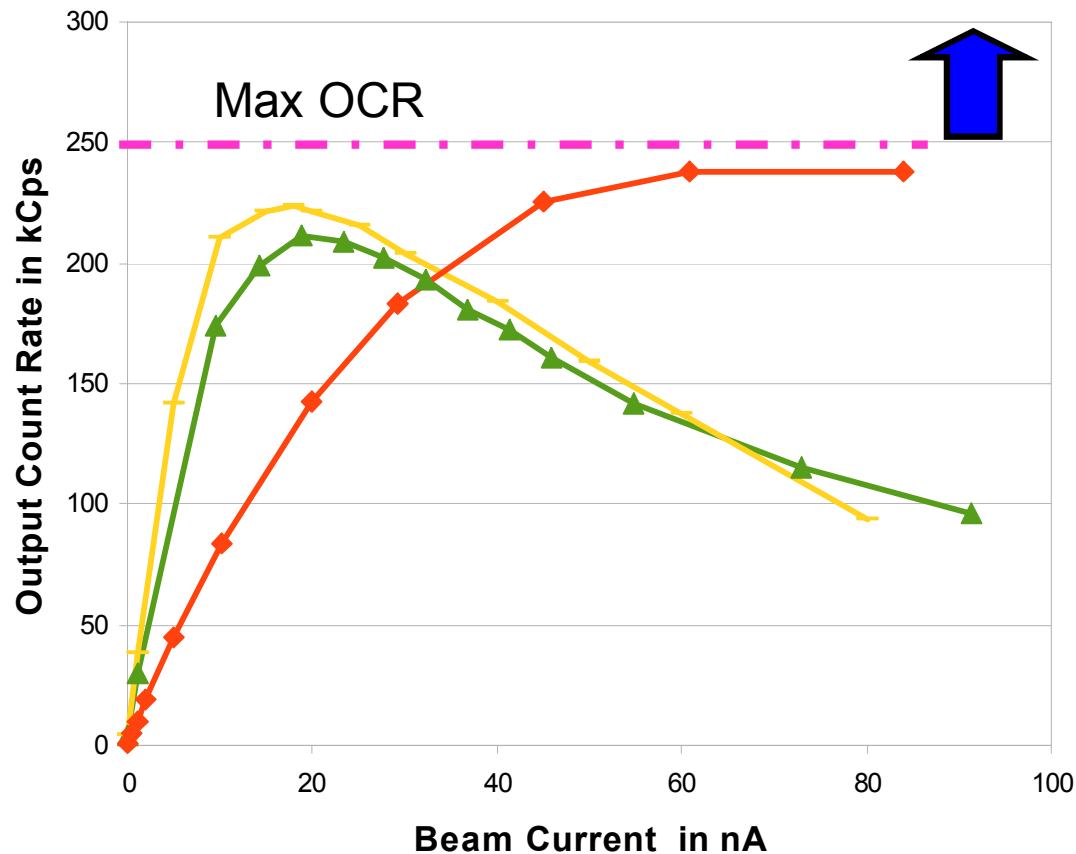
En refroidissant, les détecteurs de grande surface offrent une résolution comparable aux petites surfaces
[L'obligation de refroidir pourrait toutefois limiter l'usage des très grandes surfaces en microanalyse X]

Influence de la surface active sur la capacité de comptage



- à faible courant, la capacité de comptage est quasiment proportionnelle à la surface active – modulo l'angle solide
- le taux de comptage maximum n'est pas proportionnel à la surface active mais dépend de la chaîne de traitement de l'impulsion (τ)

Comment augmenter le taux de comptage maximum ?



Constantes de temps similaires (rapide)

Courbes fonction de l'angle solide

→ Améliorer le traitement de l'impulsion (optimisation de l'électronique en accord avec les performances des SDD) mais au final limitation $\sim 1/\tau$,

→ choisir une constante de temps plus rapide au détriment de la résolution



Autres développements : configuration multi-éléments

Montage de plusieurs détecteurs pilotés par une seule électronique....

Solution 1 : plusieurs détecteurs SDD sur le MEB

Avantages :

→ la surface active totale est augmentée tout en gardant un bon angle solide pour chaque détecteur

→ les zones d'ombre sur l'échantillon peuvent être limitées

Limitations :

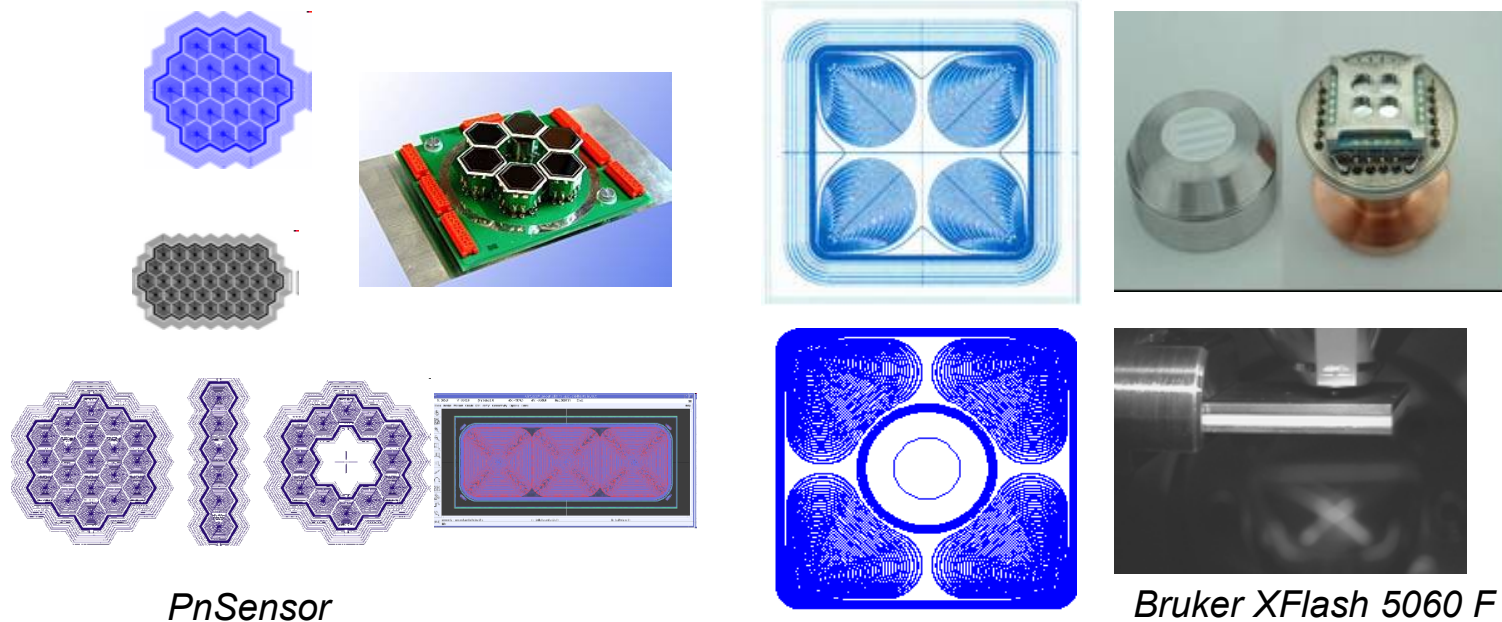
→ le nb de ports disponibles sur la chambre du microscope

→ le coût



Autre solution en cours de développement

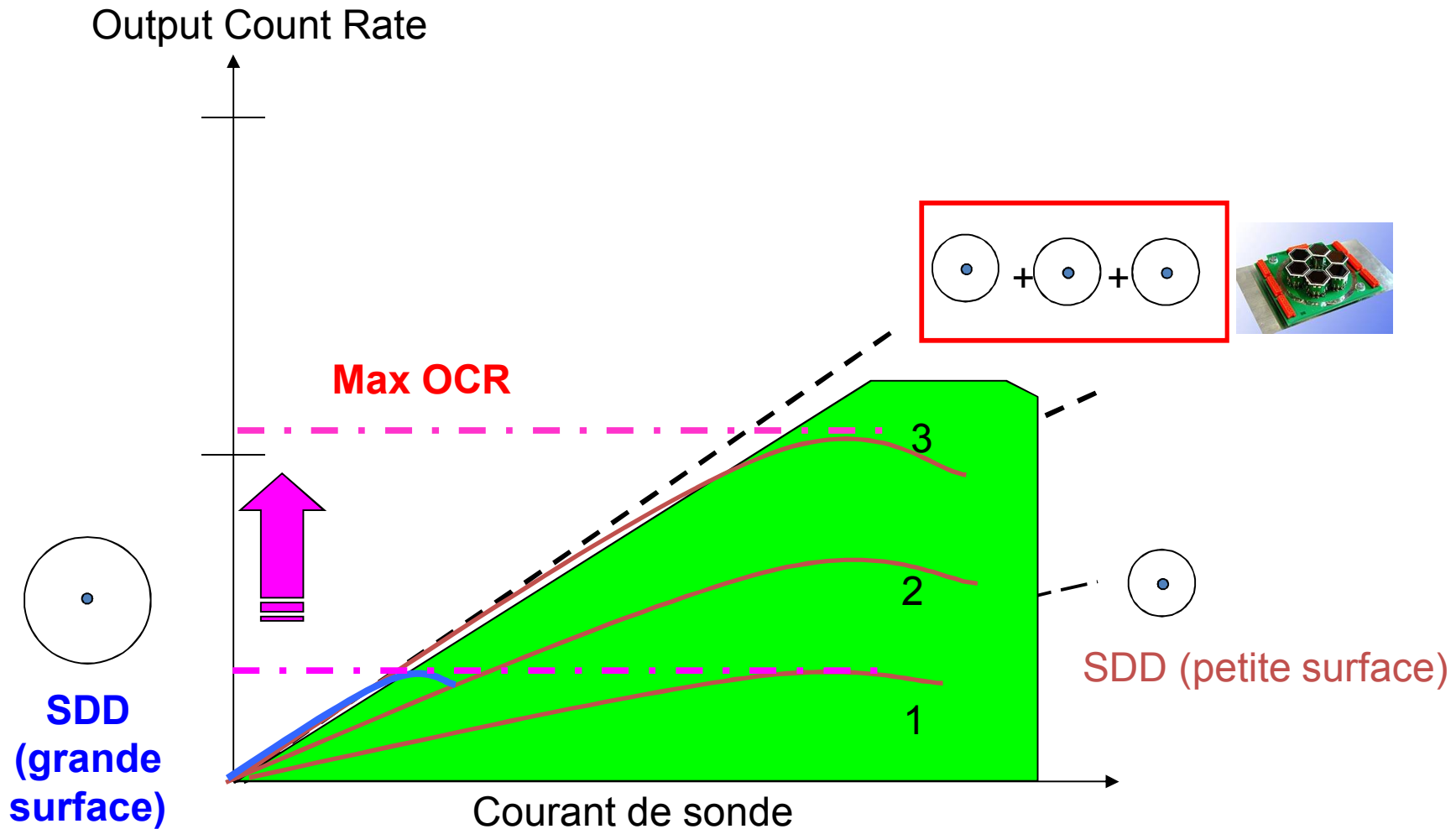
Solution 2 : composant constitué d'un ensemble de détecteurs SDD



Quelques uns commencent à être implantés dans les MEB...

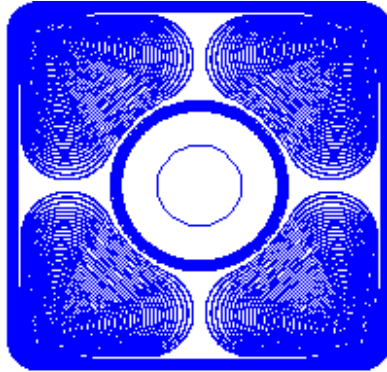
[Fabrication complexe d'où un développement plus récent]

Configuration multi-éléments : quel intérêt ?

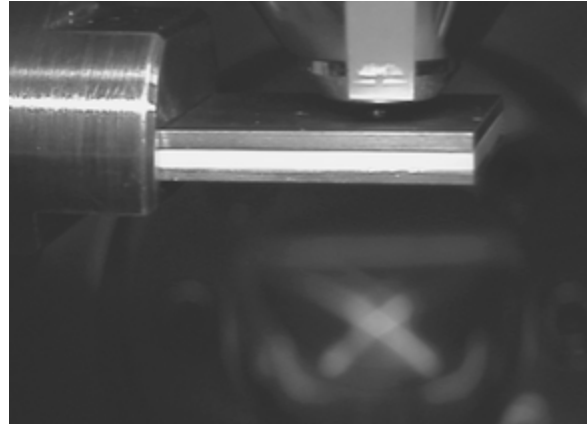


→ **capacité de comptage maximum augmentée tout en conservant la résolution (τ inchangée)**

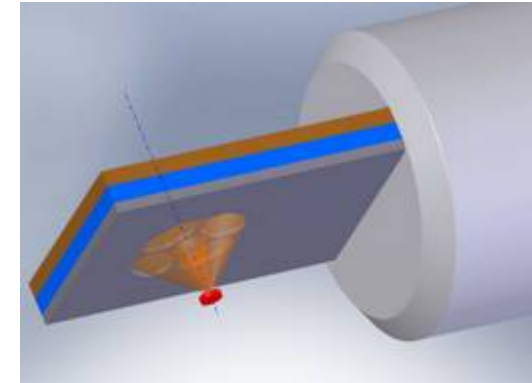
Exemple : détecteur annulaire à 4 SDD (prototype)



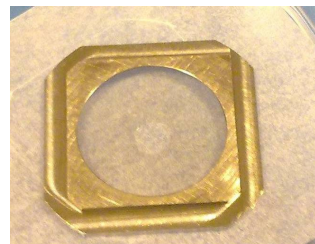
surface active : $4 \times 15 \text{ mm}^2$
avec un trou au milieu



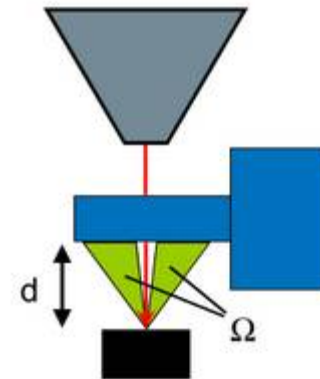
1 à 10 keV



Pas de piège à électrons à cause de la géométrie mais des fenêtres polymère de différentes épaisseurs



$1\mu\text{m}$ - BSE < 9 keV
 $2\mu\text{m}$ - BSE < 12 keV
 $3\mu\text{m}$ - BSE < 15keV
 $6\mu\text{m}$ - BSE < 22 keV



max solid angle at
 $d = 2.5\text{mm}$:
 $\Omega > 1.1 \text{ sr}$

Bruker XFlash 5060 F

Exemple : détecteur annulaire à 4 SDD (prototype) - suite

Cartographie X à grande vitesse



EHT = 5 kV

G x1000

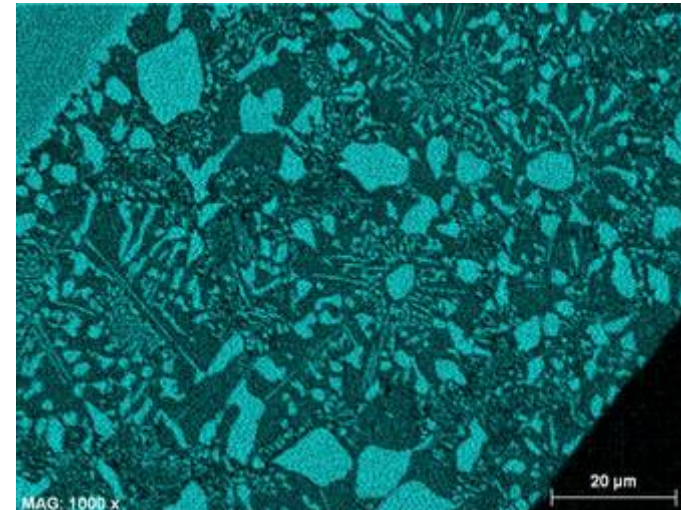
Courant de sonde : 10 nA

OCR : 1100 kCps

1024 x768 pixels

Acquisition : 1 balayage

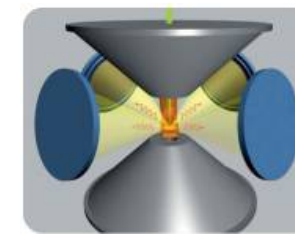
Durée = 64 s



Taux de comptage en sortie OCR > 10⁶ cps avec une résolution < 140 eV

Dans le futur, il pourrait être possible d'aller plus loin dans l'intégration des SDD dans un MEB ...

Exemple MET Osiris (FEI)



Conclusion

Depuis 2002, les SDD s'imposent en EDS

La technologie SDD est maintenant très bien maîtrisée

Des améliorations sont encore à venir dans les domaines suivants :

- détecteur de grande surface,
- détecteur multi-éléments,
- chaîne électronique de traitement
- intégration plus poussée des SDD dans le MEB...

Mais résolution intrinsèque > 120 eV

Gagner en résolution → Changer de technologie

- WDS
- Microcalorimètre ? (www.starcryo.com : à suivre)



Remerciements

Jacky Ruste (GNMEBA)
Jean-François Thiot (SAMx)
Denis Boivin (ONERA)
Florence Robaut (CMTC)
Dale E. Newbury (NIST)
Claudie Josse (Université de Bourgogne)
Frederic Christien (Polytech'Nantes)
Yann Borjon-Piron (Polytech'Nantes)
François-Xavier Lefevre (CNRS CRISMAT, Caen)
Raynald Gauvin (Université McGill, Montréal)
Guillaume Wille (BRGM, Orléans)
Philippe Lasso (Synergie4)
Ralf Terbor (Bruker)
Dominique Condamine (Oxford Instruments)
Peter Statham (Oxford Instruments)
Eric Pasquier (Oxford Instruments)
David Barresi (EDAX)
Thierry Grenut (Elexience)