

# Détecteurs de rayons X à capteurs CCD, CMOS et pixels hybrides pour la cristallographie sur monocristaux



Emmanuel Wenger

*ANF RECIPROCS Fréjus  
11 au 14 octobre 2016*

# Des acteurs à remercier



D. Schaniel



P. Allé



Loïc Ledréau  
C.Caucheteux



G. Fauvet



P. Delpierre



F. Bompard



C. Lecomte



S. Dahaoui



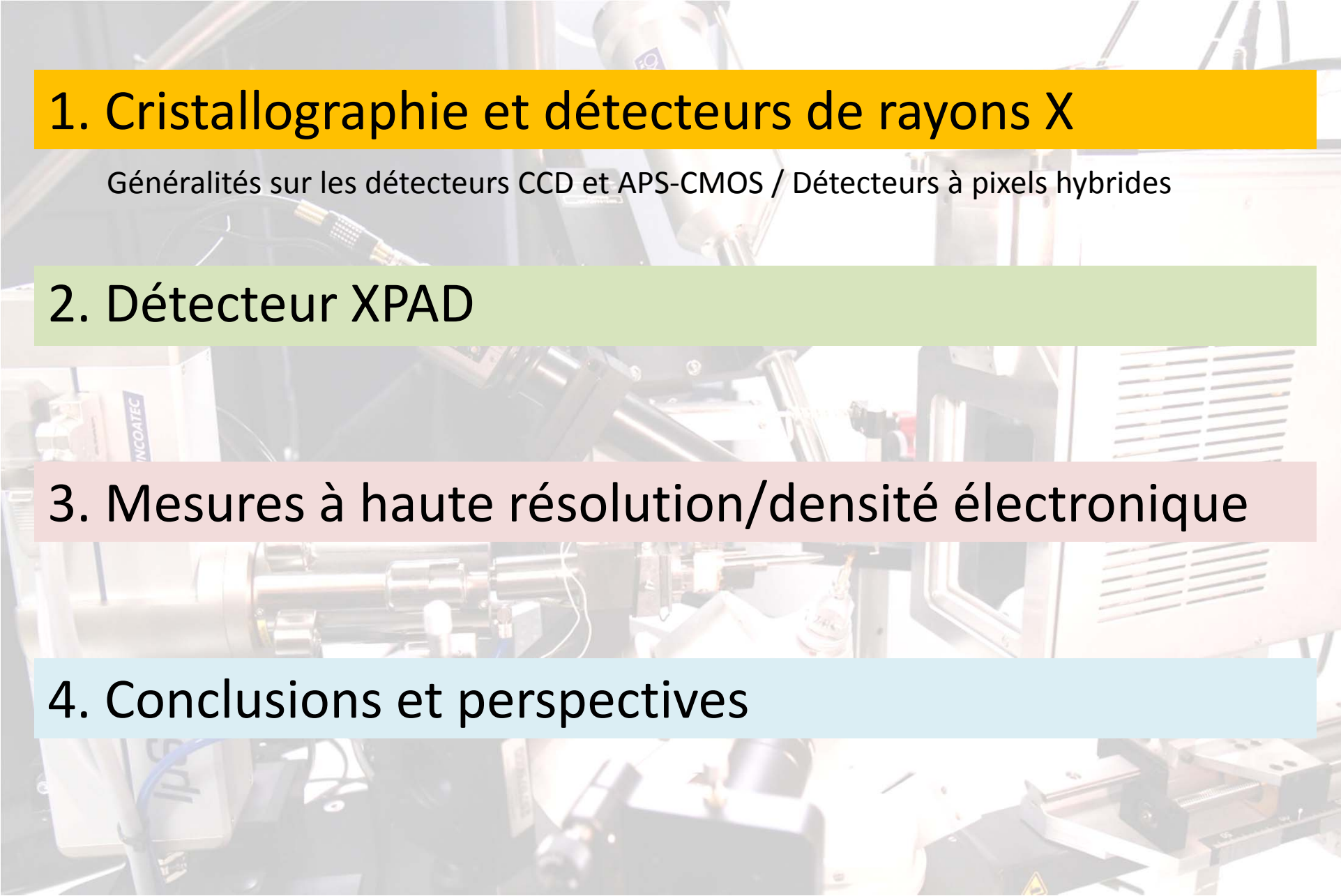
B. Dinkespiller



P. Breugnon



P. Parois



# 1. Cristallographie et détecteurs de rayons X

Généralités sur les détecteurs CCD et APS-CMOS / Détecteurs à pixels hybrides

## 2. Détecteur XPAD

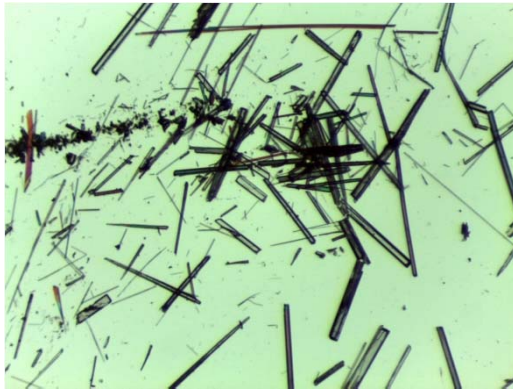
## 3. Mesures à haute résolution/densité électronique

## 4. Conclusions et perspectives

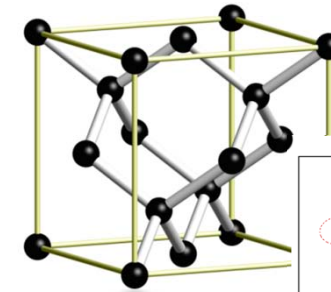


# 1. Cristallographie et diffraction des rayons X

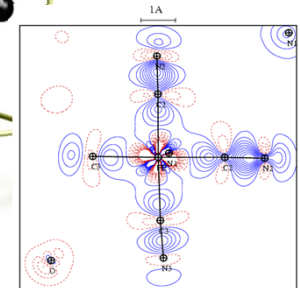
Cristaux



Structure



Propriétés



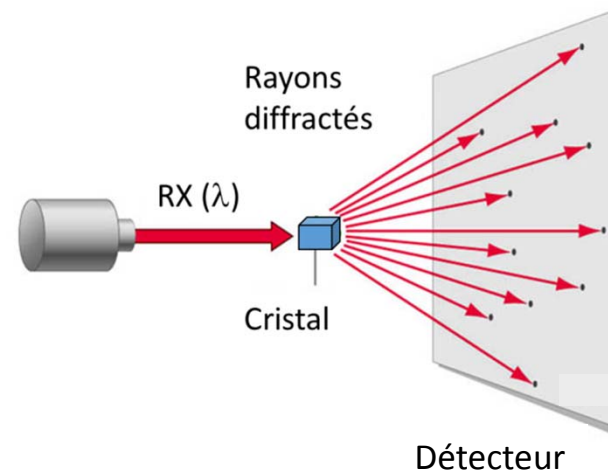
Diffractomètre





# 1. Détecter les rayons X

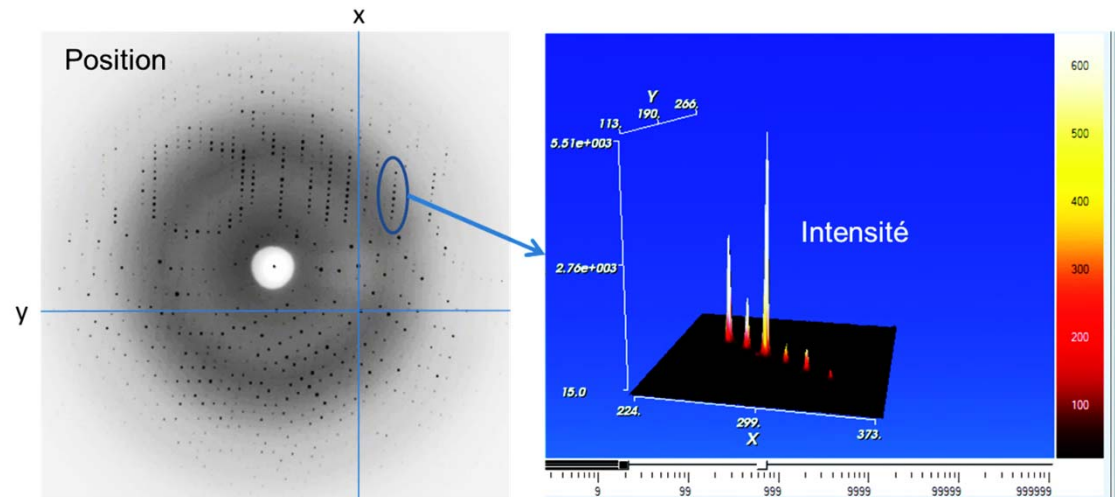
L'expérience



- Fonctions d'un détecteur pour la cristallographie

MESURER

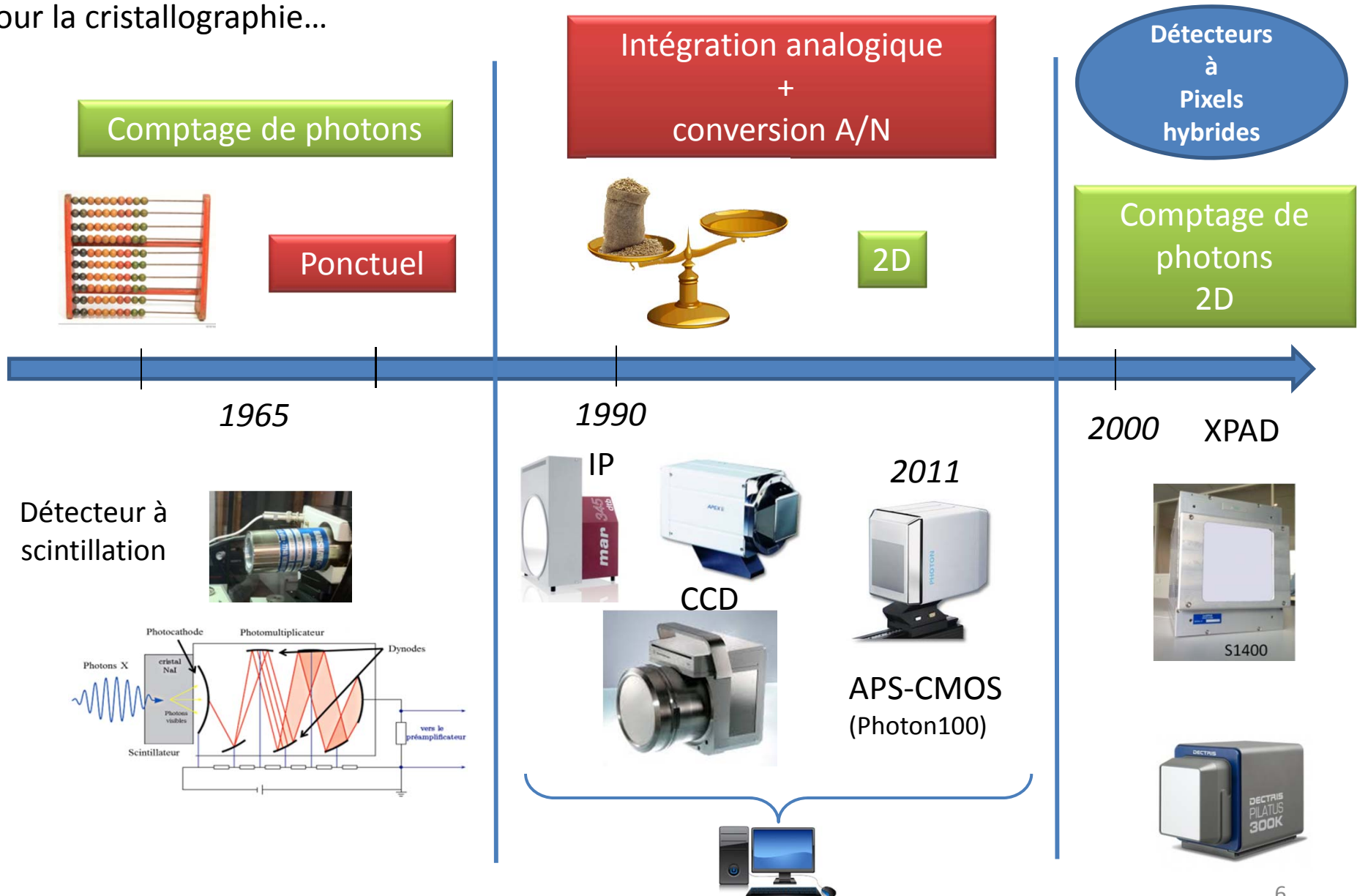
- Direction de diffraction
- Intensité (nombre de photons)



# 1. Détecteurs de rayons X

- *Intérêt des détecteurs pixels*

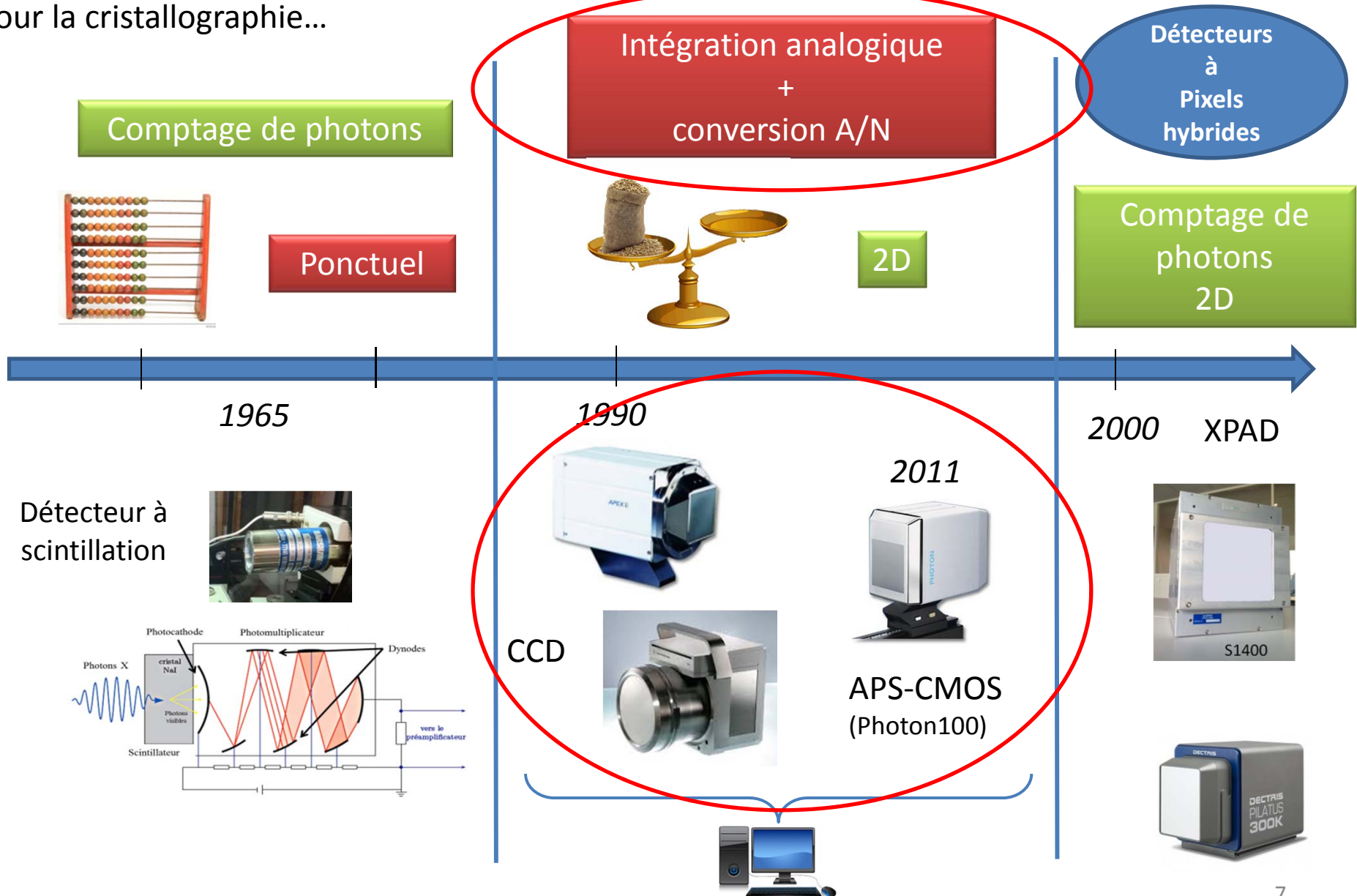
Pour la cristallographie...



# 1. Détecteurs de rayons X

- *Intérêt des détecteurs pixels*

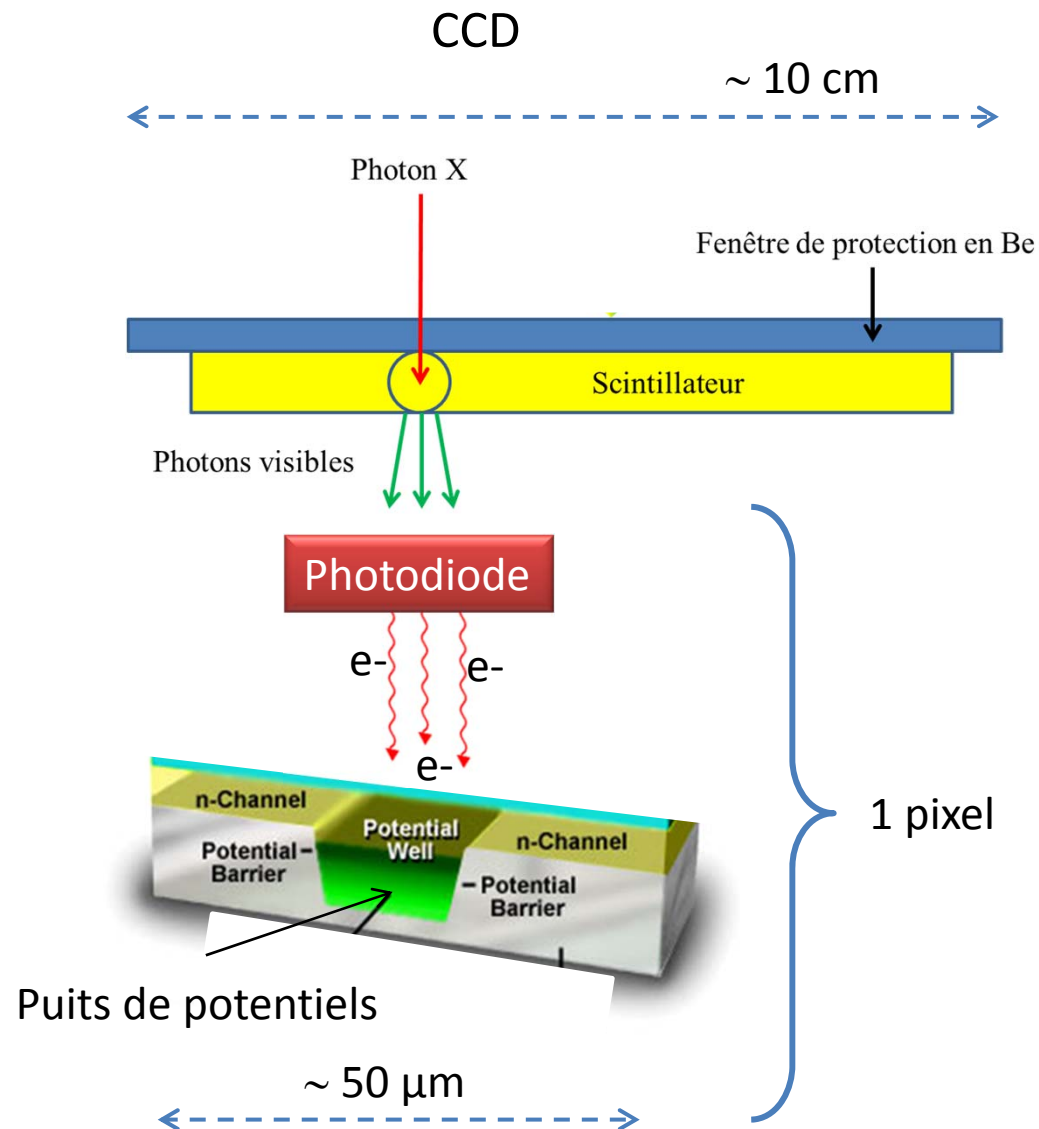
Pour la cristallographie...





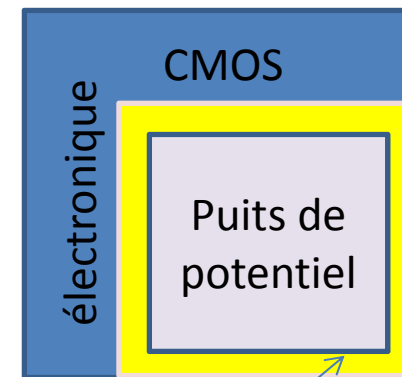
# 1. Détecteurs de rayons X

- *Scintillateur*  
+ *Imageurs photodiodes*



Bruker 'CMOS'  
PHOTON100 / PHOTON II

1 pixel APS  
(**Active Pixel Sensor**)



Anneau de garde autour du pixel

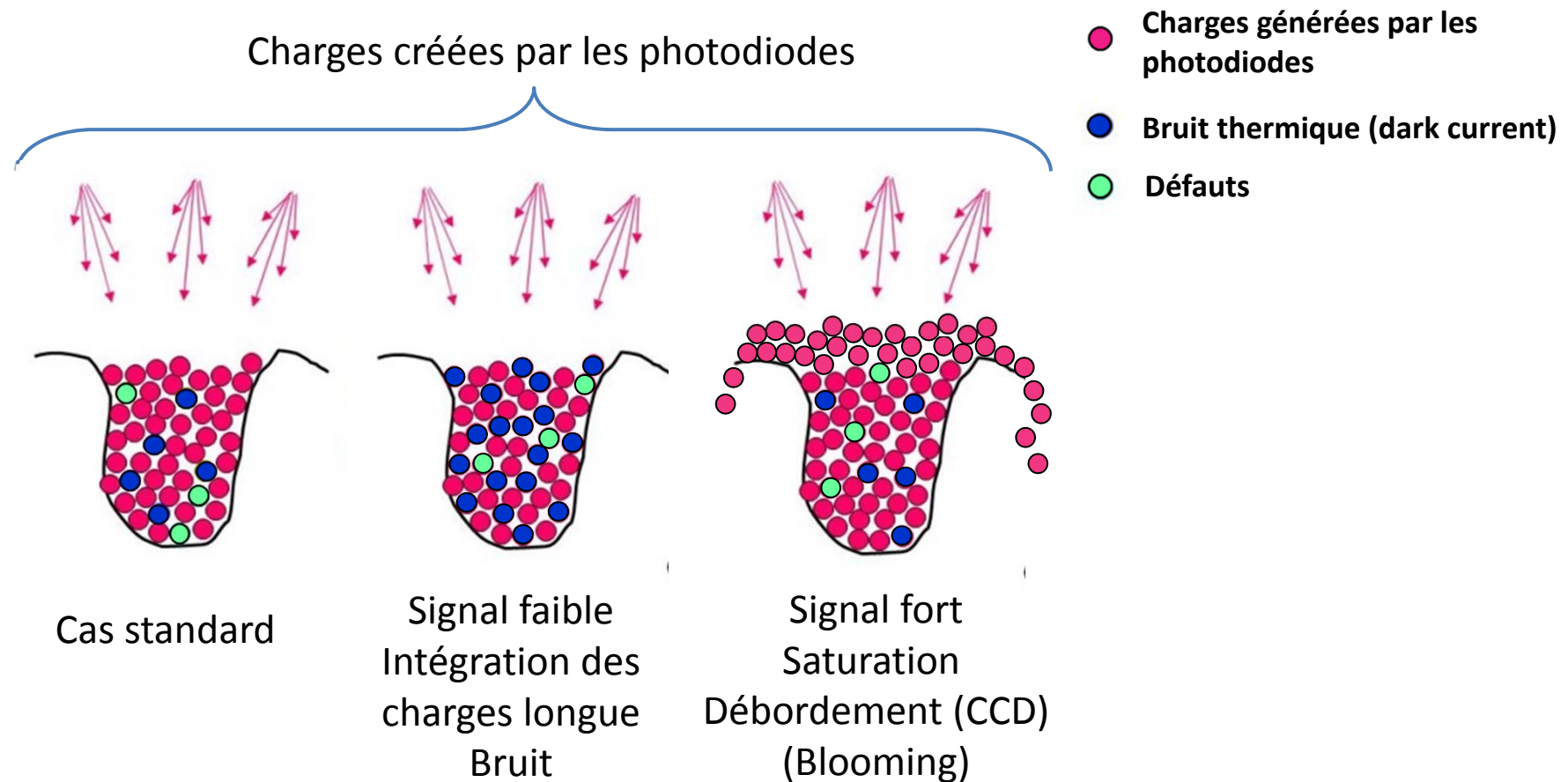
Electronique CMOS :

- Amplification du signal
- Adressage des pixels pour la lecture

# 1. Détecteurs de rayons X

- *Puits de potentiels*

Accumulation de charges dans des puits de potentiels  
(Intégration analogique)

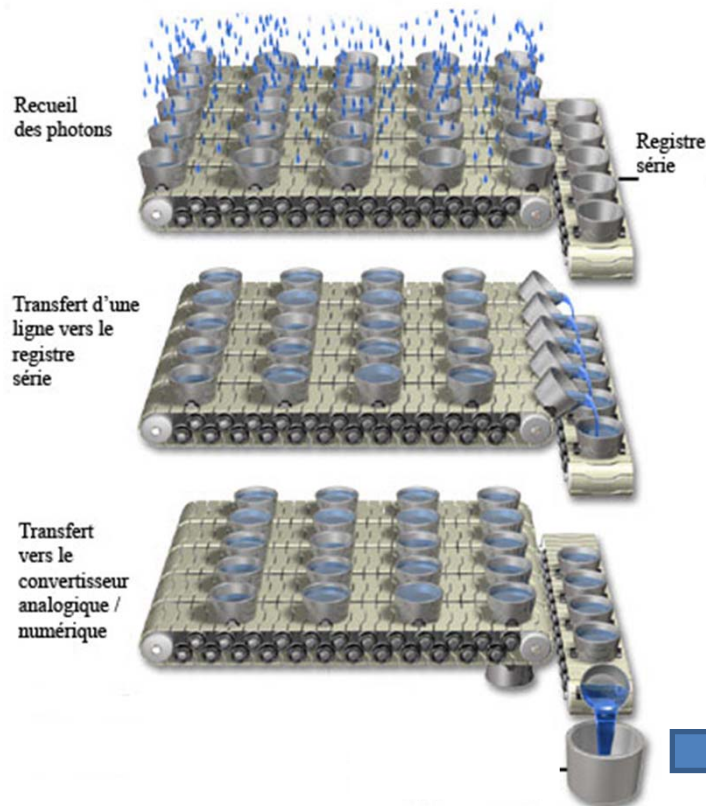


# 1. Détecteurs de rayons X

- *Lecture/Numérisation*

## CCD (Atlas, ApexII, etc.)

CCD = dispositif à transfert de charges



Obturbateur mécanique obligatoire

## APS CMOS (PHOTON100)

Adressage de chaque pixel  
=  
Pas de transferts de charges

Lecture classique  
Image complète  
Avec shutter  
mécanique

Lecture ligne par ligne  
⇒ Plus rapide  
⇒ Sans shutter  
Mode *shutterless*

Convertisseur A/N

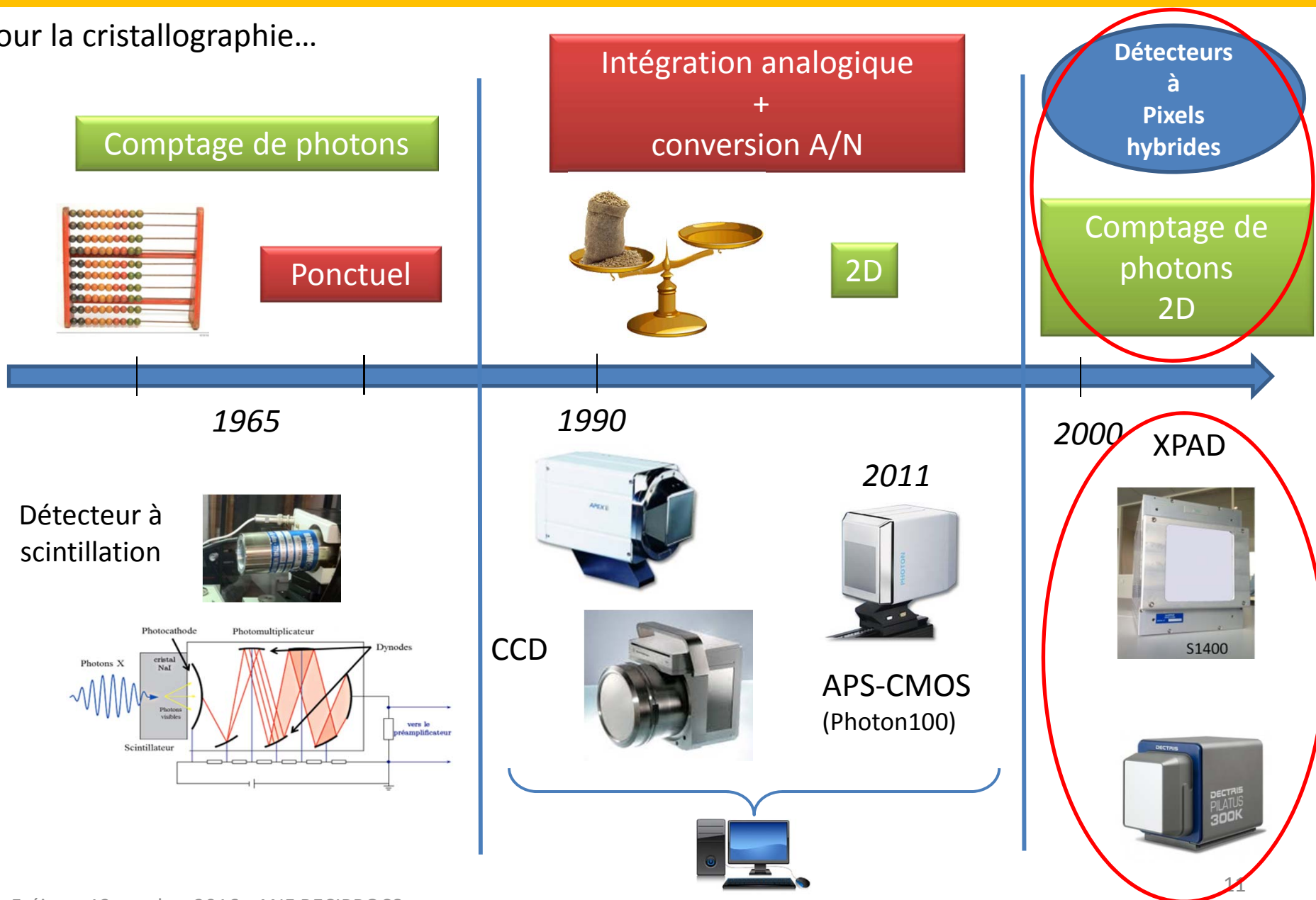
Limitations :

- ✓ Temps de lecture = transfert + conversion
- ✓ Dynamique détecteur = Capa. puits + CAN

# 1. Détecteurs de rayons X

- *Intérêt des détecteurs pixels*

Pour la cristallographie...





# 1. Détecteurs de rayons X • *Comptage de photons*

## Détecteur à pixels hybrides

Détecteur imageur dédié dès le départ aux rayons X et fonctionnant sur le principe de comptage de photons

Chaque pixel fonctionne comme un détecteur ponctuel

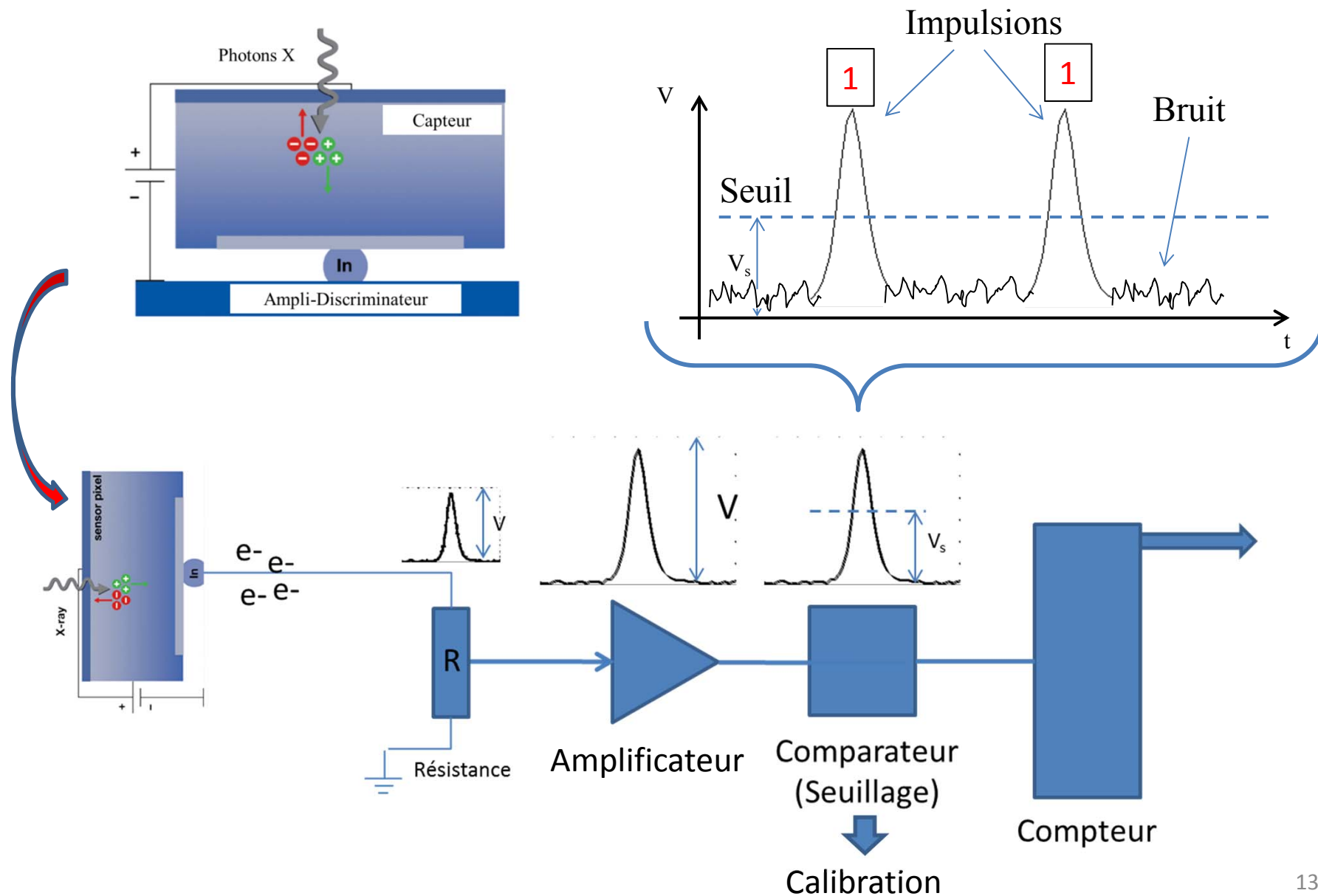


Matrice de centaines de milliers de détecteurs ponctuels



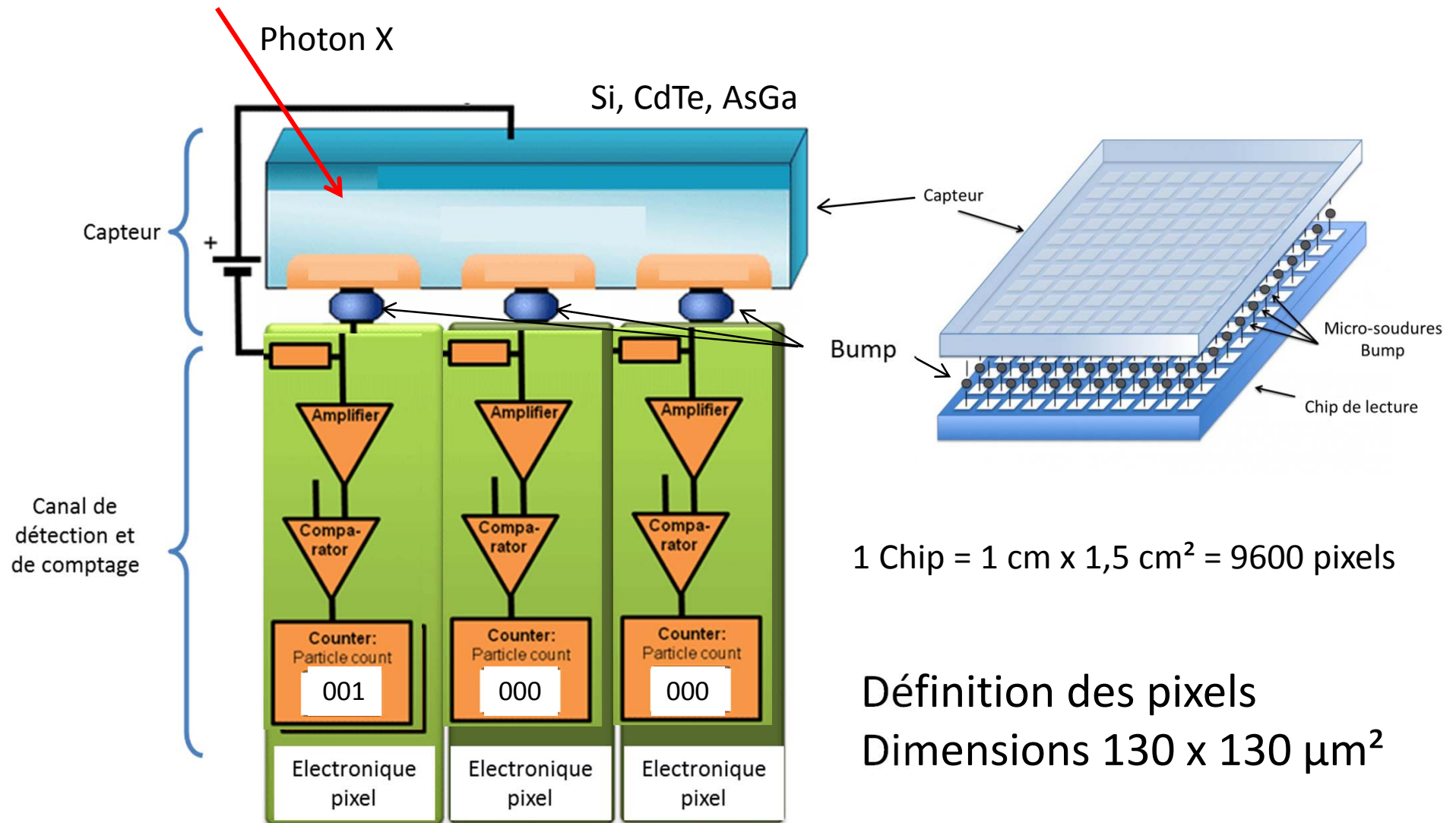
Obtention d'une image dont la valeur d'intensité de chaque pixel correspond exactement au nombre de photons X détectés dans le pixel

# 1. Détecteurs de rayons X • *Détection/comptage*



# 1. Détecteurs de rayons X

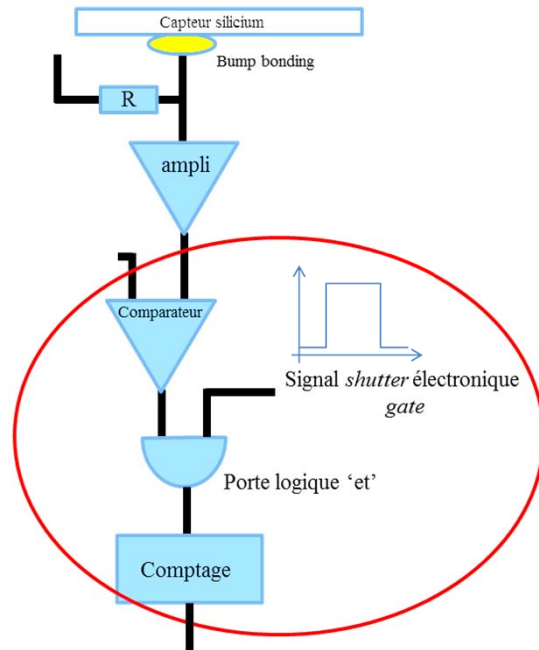
- *hybridation*



# 1. Détecteurs de rayons X

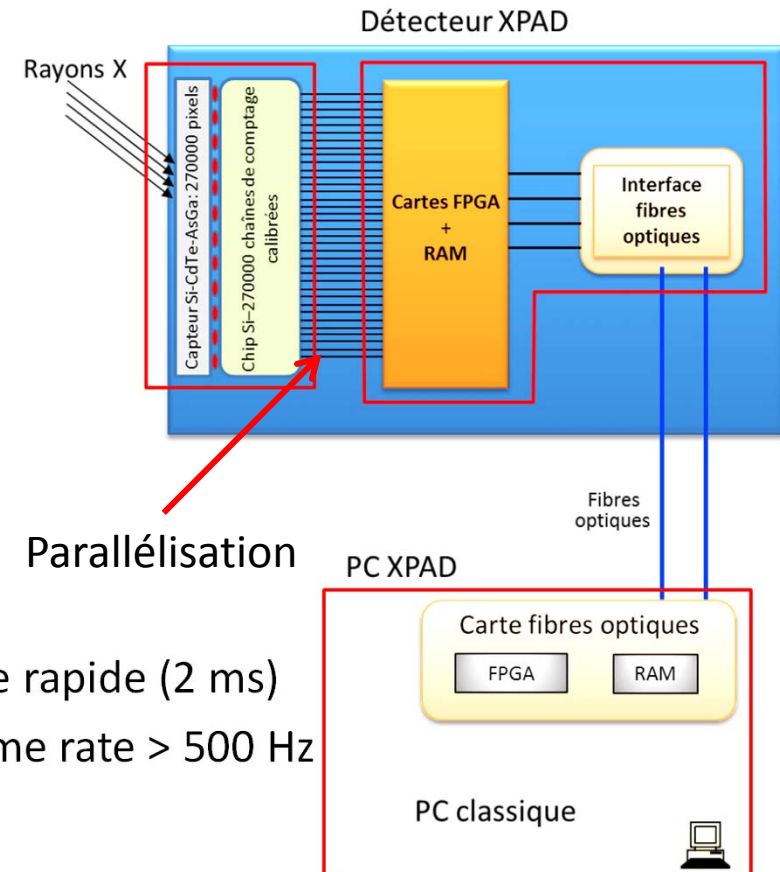
- *Shutter/lecture*

## Shutter électronique



- Très rapide : ~150 ns donc très précis sur les temps de poses de quelques secondes
- Synchronisation facile avec les contraintes appliquée sur l'échantillon

## Lecture rapide



Lecture rapide (2 ms)  
=> Frame rate > 500 Hz

Temps résolu

Paul Allé (CRM<sup>2</sup>)



# 1. Détecteurs de rayons X

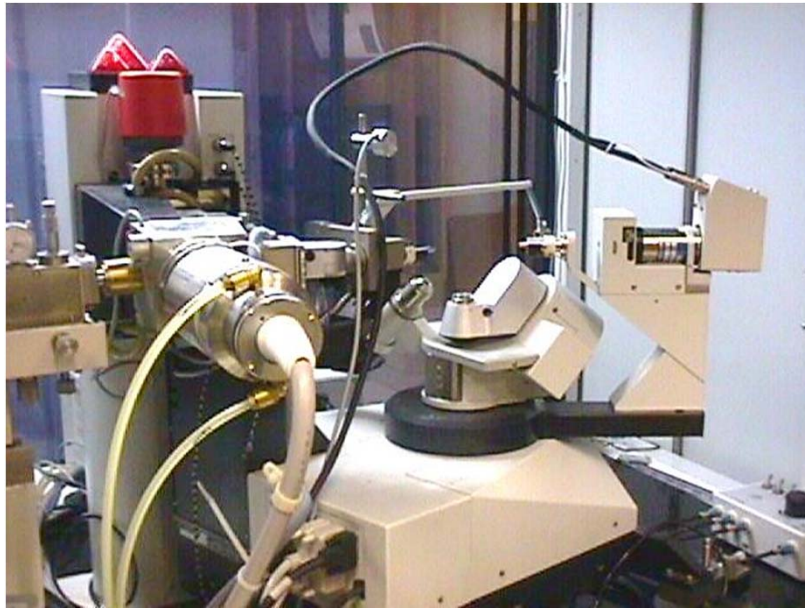
- *Vue d'ensemble*

|                                                | CCD     | CMOS       | Pixels hybrides |
|------------------------------------------------|---------|------------|-----------------|
| <b>Intégration analogique</b>                  | ✓       | ✓          | -               |
| <b>Saturation</b>                              | Oui     | Oui        | Non             |
| <b>Comptage de photons</b>                     | Non     | Non        | ✓               |
| <b>Limitation du taux de comptage</b>          | Non     | Non        | Oui             |
| <b>Dynamique</b>                               | limitée | limitée    | « infinie »     |
| <b>Bruit</b>                                   | Oui     | Oui        | ~ 0             |
| <b>Mode Shutterless</b>                        | Non     | ✓ (pseudo) | ✓               |
| <b>Temps résolu<br/>(shutter électronique)</b> | Non     | Non        | ✓               |

## Deuxième partie

### Détecteur XPAD

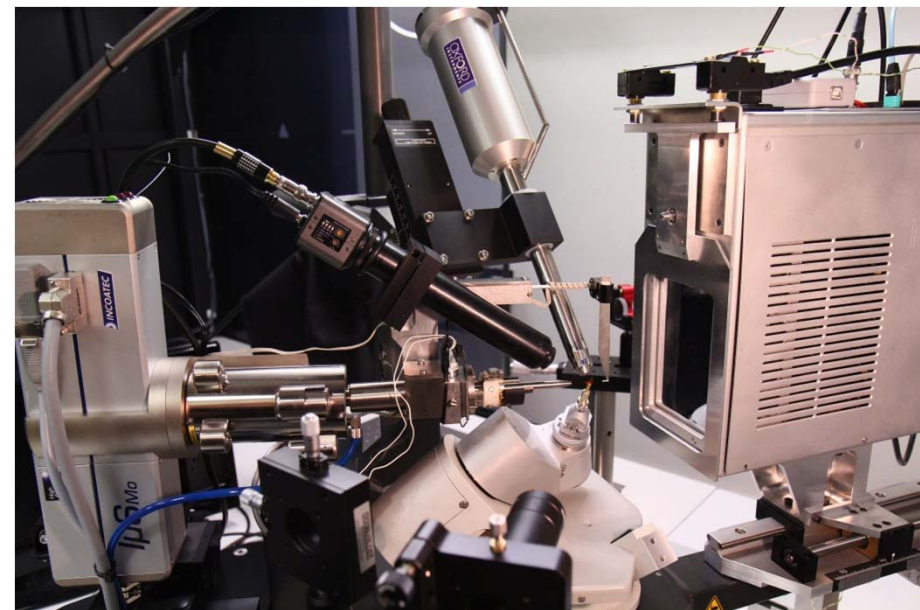
## 2. Diffractomètre avec XPAD au CRM<sup>2</sup>



Avant

Bruker Nonius Mach3

ANR Piezocrist



Après

- Mesures classiques
- Temps résolu en différentiel :  
LASER / CHAMP E

## 2. Collecte des images

*La cristallo, ce n'est pas (que) de la radio !*

### Première étape : interfaçage

#### = > **Synchronisation:**

- Source RX (shutter) - goniomètre – détecteur XPAD
- Champ électrique pour mesures en temps résolu

#### = > **Automatisation de l'ensemble**

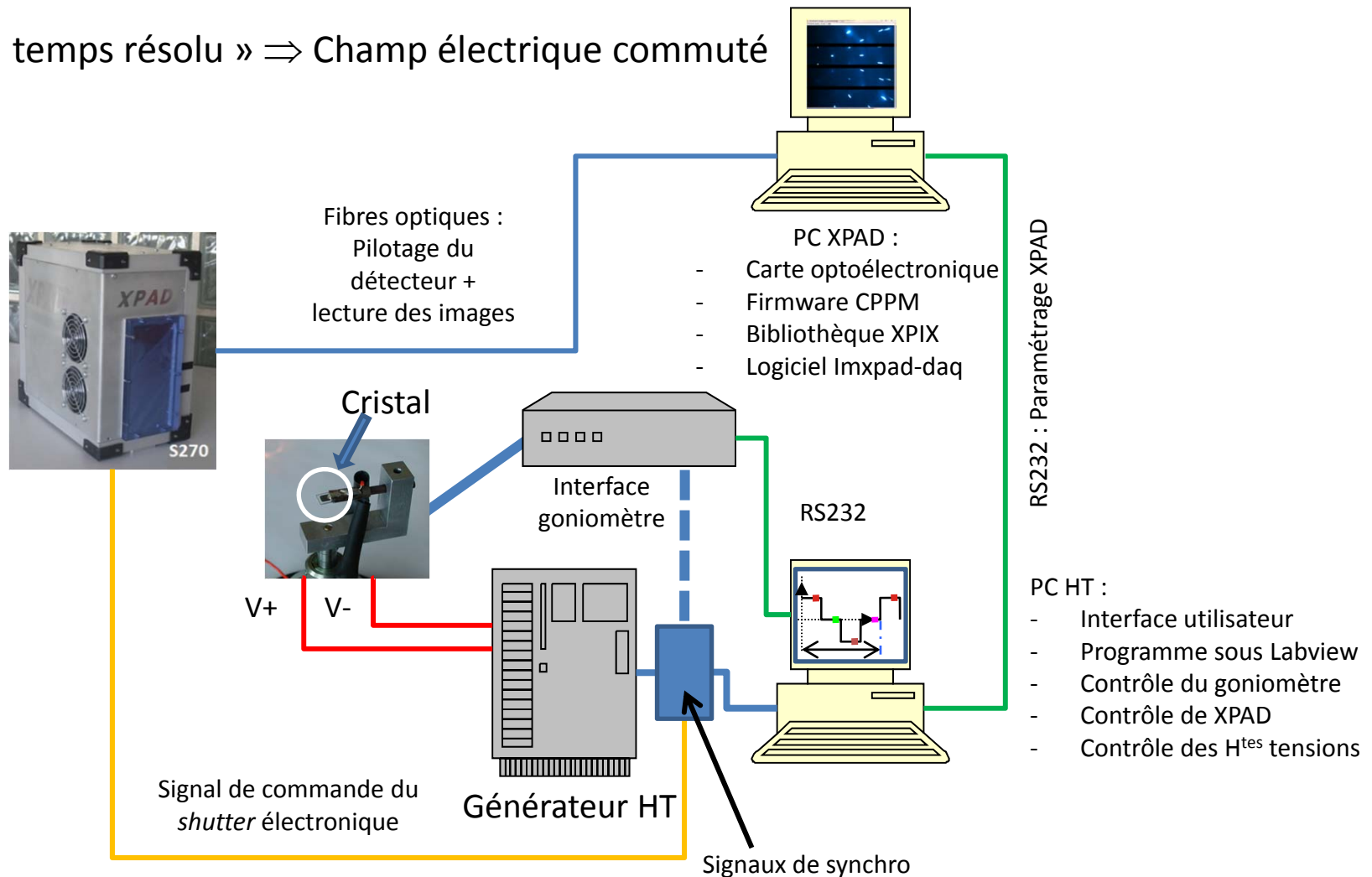
- Programmes de pilotage du goniomètre et d'XPAD
- Plusieurs centaines voire plusieurs milliers d'images



**Performance diffracto ↔ Intégration du détecteur**

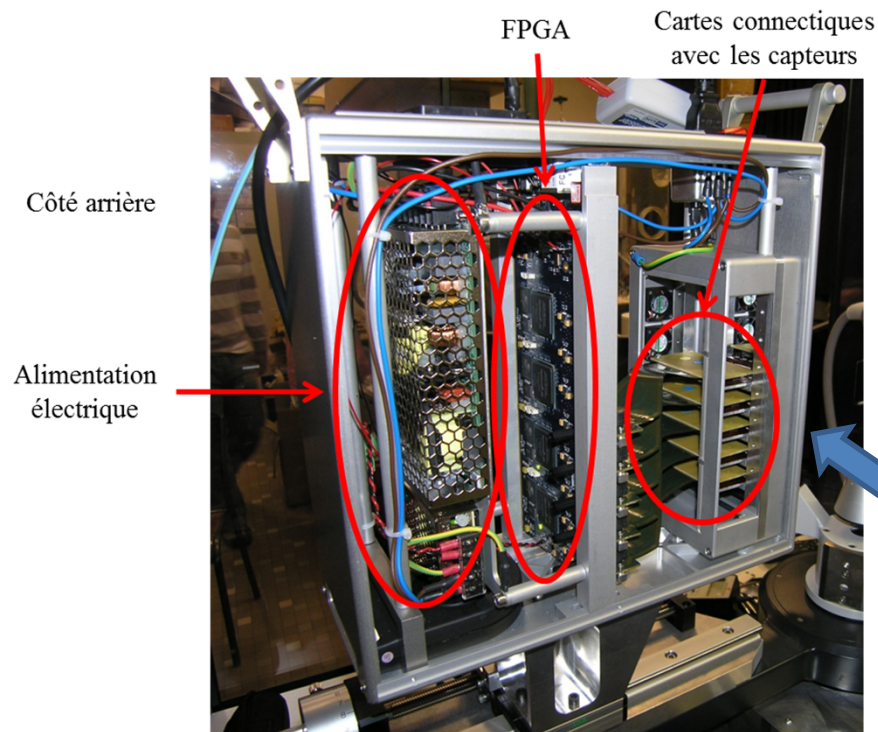
## 2. Montage expérience en temps résolu

1. Mode « classique »  $\Rightarrow$  collecte jeu de données complet du cristal en état stationnaire
2. Mode « temps résolu »  $\Rightarrow$  Champ électrique commuté

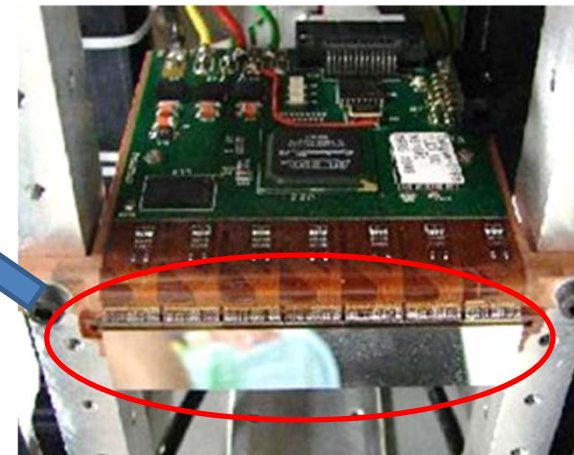




## 2. Détecteurs XPAD3.2 S270



4 modules de détection  
Montage parallèle



Surface totale =  $75 \times 73 \text{ mm}^2$

560 x 480 pixels

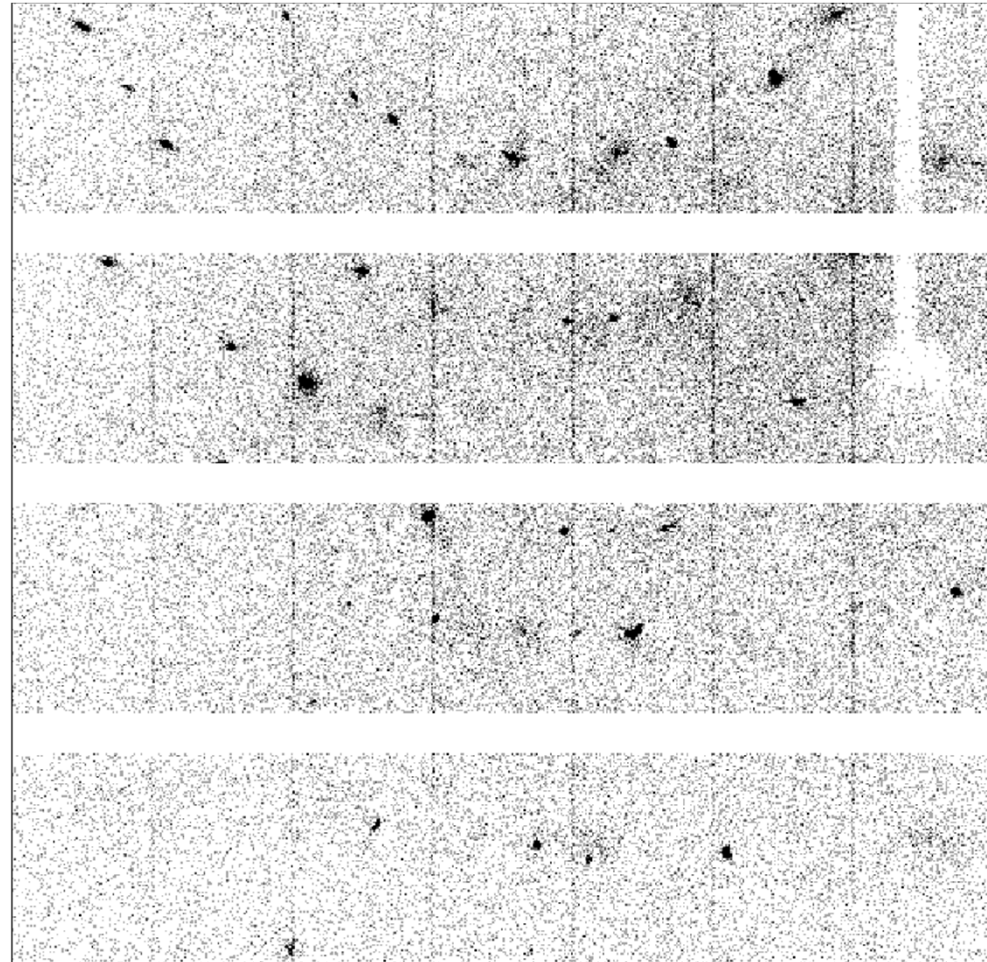
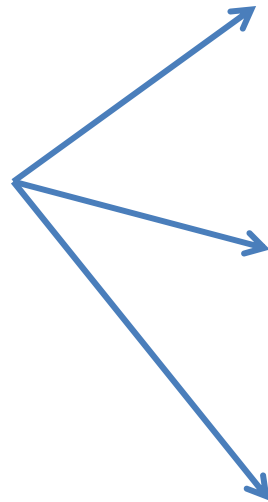
Silicium  
Épaisseur 300  $\mu\text{m}$   
560 x 120 pixels

## 2. Collecte des images

- *Zones aveugles*

*Talon d'Achille  
des HPAD*

Intermodules  
27 pixels  
3,64 mm



Important :

- Pour la collecte
- Pour l'intégration des intensités

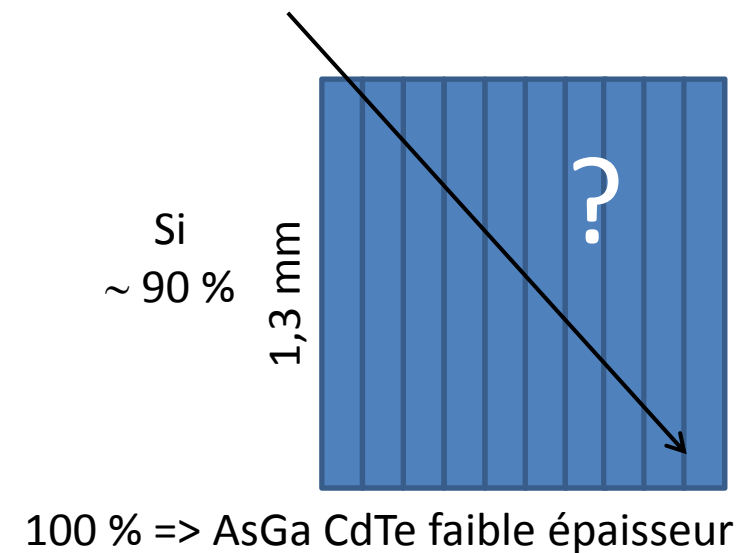
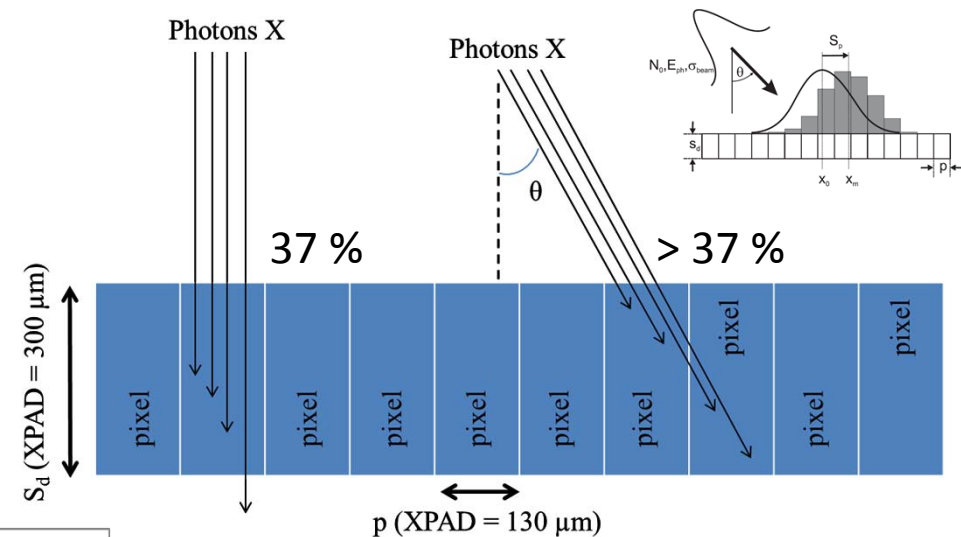
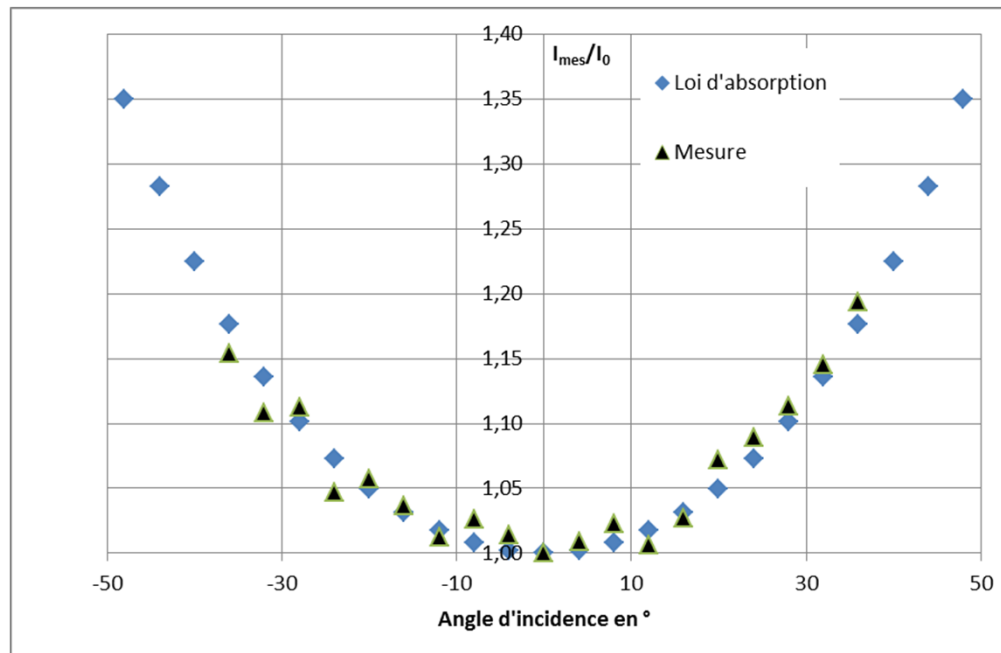
## 2. Détecteurs XPAD3.2 S270

### • Angle d'incidence

Efficacité du capteur (Si)

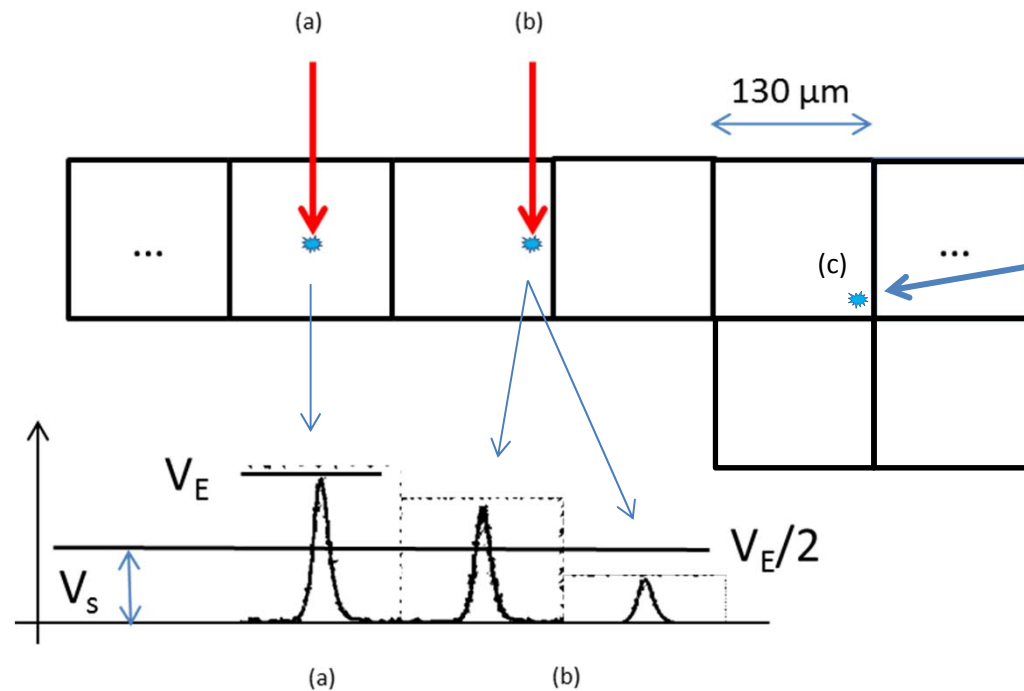
| Energie photons X | Epaisseur en $\mu\text{m}$ |      |
|-------------------|----------------------------|------|
|                   | 300                        | 1000 |
| 8,0 keV (Cu)      | 98 %                       | 96 % |
| 17,5 keV (Mo)     | 37 %                       | 76 % |
| 22,2 keV (Ag)     | 20 %                       | 50 % |

- Augmentation de l'efficacité de détection
- Déplacement de la position de détection



## 2. Détecteurs XPAD3.2 S270

- *Calibrations*



⇒ Problème de partage de charges si taille pic  $\ll$  taille du pixel



⇒ Nécessité de calibrer à  $E/2$  :

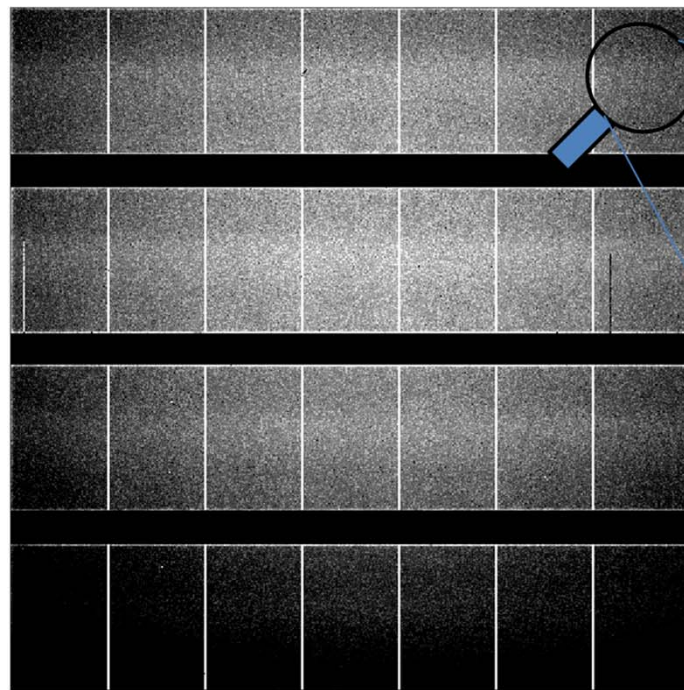
- soit sous faisceau réel : synchrotron
- soit par pulses internes

Conséquences sur les données synchrotron

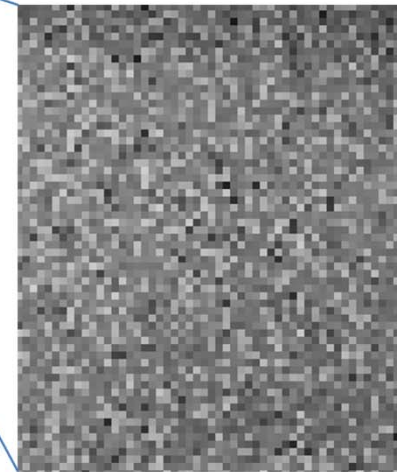


## 2. Détecteurs XPAD3.2 S270 • *Champ plats mesuré*

Finesse de réglage des seuils trop grossière car miniaturisation de l'électronique  
=> réponse non homogène



Eclairage homogène avec un diffuseur  $Y_2O_3$



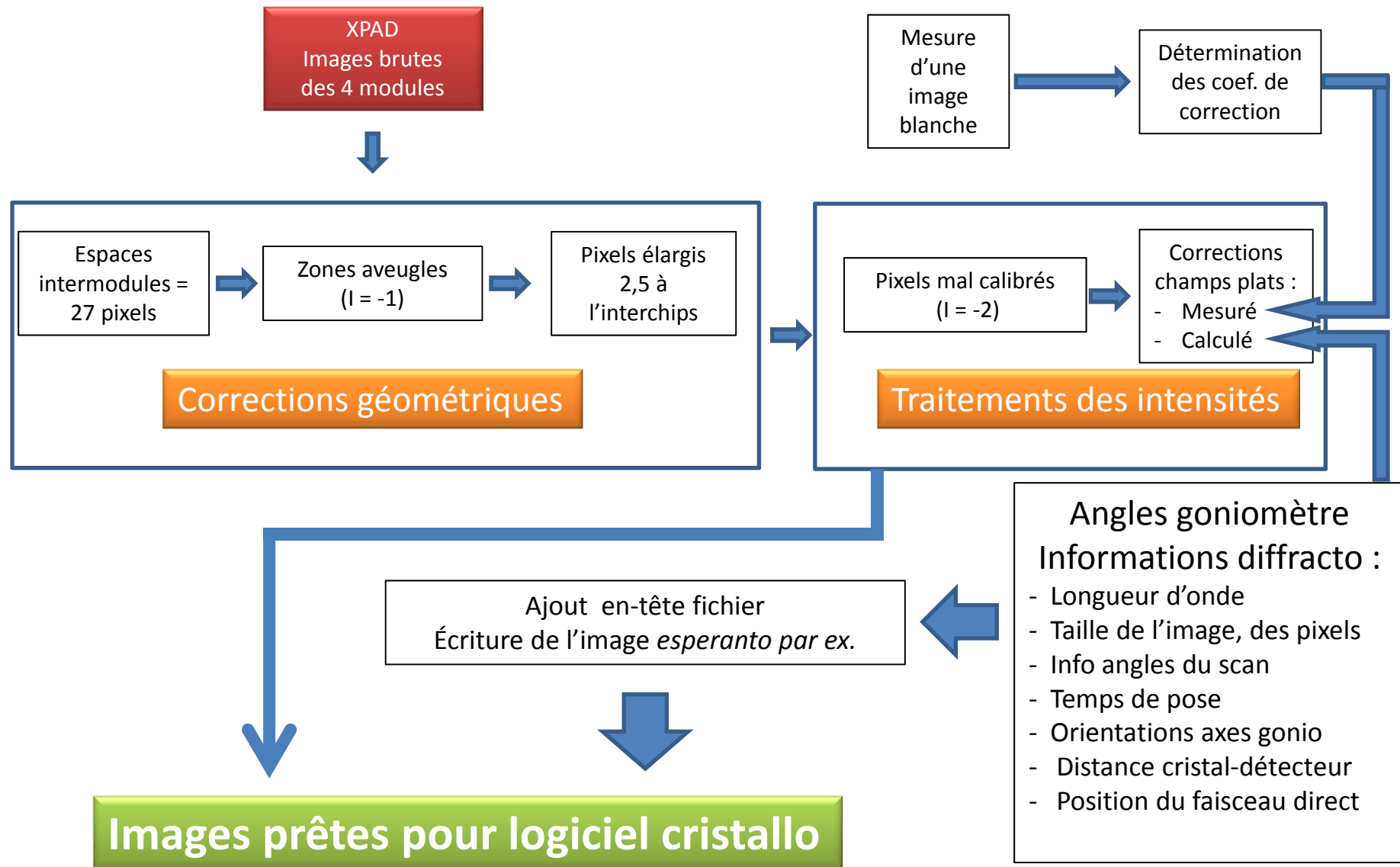
Granulométrie locale visible  
Quelques % de dispersion

=> Corrections de champ plat très importantes



## 2. Détecteurs XPAD3.2 S270

### • Corrections des images



## 2. Intégration des images • *Intégration des images*

### Deuxième étape : Traitement des images

- Choix du programme d'intégration
  - Programmes existants pour les détecteurs pixels , XDS (Bio, synchrotron,? ...)
  - Pour détecteur 2D : APEX (SAINT) ou CrysAlisPRO, ...
  - CrysAlisPRO :
    - Permet facilement l'importation par le format libre esperanto
    - Nombreux outils flexibles pour un diffractomètre prototype
  - Certainement beaucoup d'amélioration possible :  
partage d'expérience nécessaire RECIPROCS ?

## 2. Intégration des images

- *erreurs sur I*

Estimation des erreurs sur les intensités

Pour les CCD (CMOS ?) :

$$\sigma^2(I) = \underbrace{A_1 \cdot \sigma^2(I_{\text{raw}})}_{\text{Erreur sur les } I \text{ mesurées}} + \underbrace{A_2 \cdot \sigma^2(I_{\text{back}})}_{\text{Bruit détecteur:}} + B \cdot \langle I \rangle^2$$

- Dark current
- Lecture

Pour les détecteurs à comptage, XPAD:

$$\sigma^2(I) = A \cdot \sigma^2(I_{\text{count}}) + B \cdot \langle I \rangle^2$$

Statistique  
Comptage-  
Poisson

McCandlish, et al. (1975b).  
*Acta Cryst.* . A. **31**, 245–249.

Instabilités  
instrument

A discuter...

## 2. Détecteurs

- *Vue d'ensemble*

|                                  | CCD             | CMOS                    | Pixels hybrides |
|----------------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| <b>Problèmes zones aveugles</b>  | Aucun           | Aucun                   | Oui             |
| <b>Problèmes coin des pixels</b> | Capteur continu | Capteur continu         | Synchrotron ?   |
| <b>Problème d'incidence</b>      | Très faible     | Très faible             | A corriger      |
| <b>Collecte des données</b>      | ?               | Evolution - shutterless | Evolution       |
| <b>Traitement des données</b>    | Aboutis         | Evolution               | En cours...     |



Atlas S2



PHOTON II

## 2. De la technique à la pratique

Les HPAD tiennent-ils leurs promesses ?



## 2. XPAD :

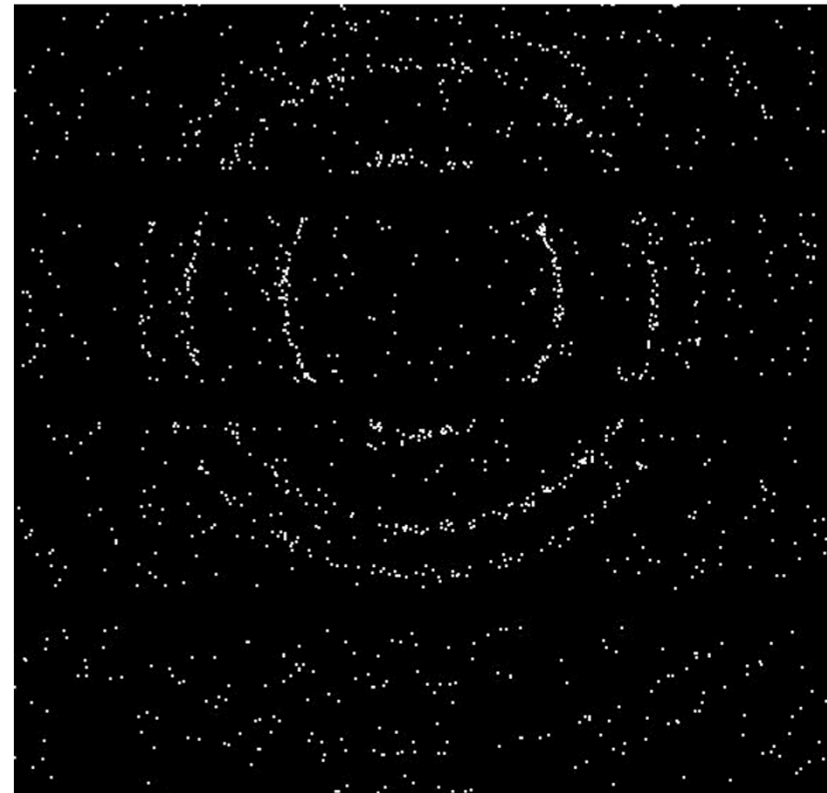
## *Détection/comptage*

Bruit  $\sim 10^{-5}$  photon/pixel/s



Image sans RX, 10 secondes

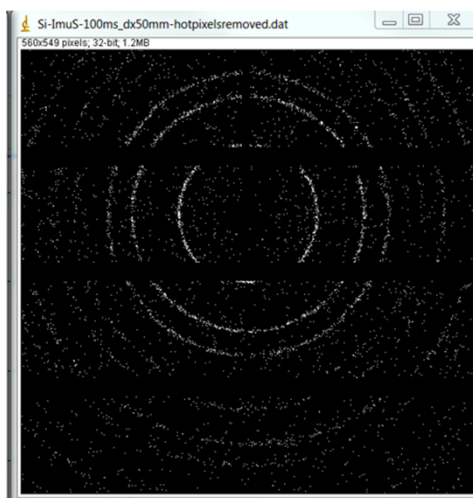
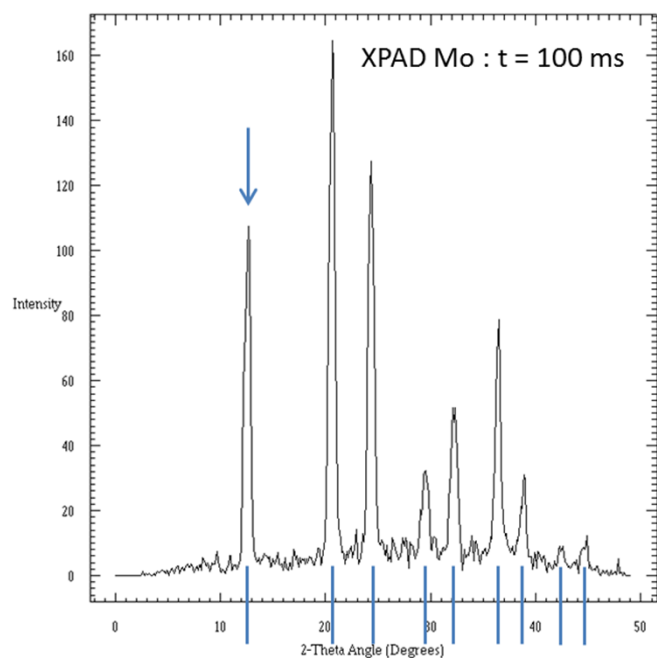
Comptage de photon unique  
1 pixel blanc = 1 coup



Poudre de silicium 10 ms

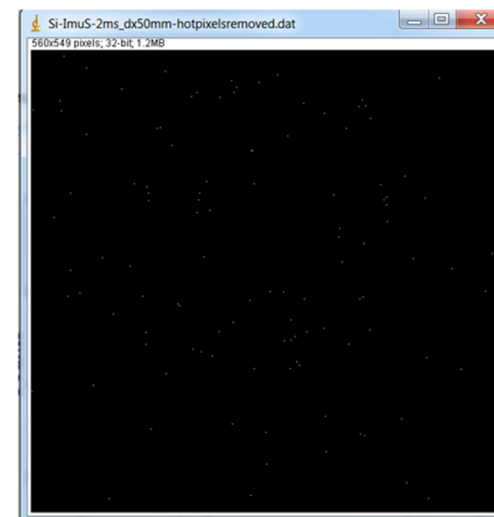
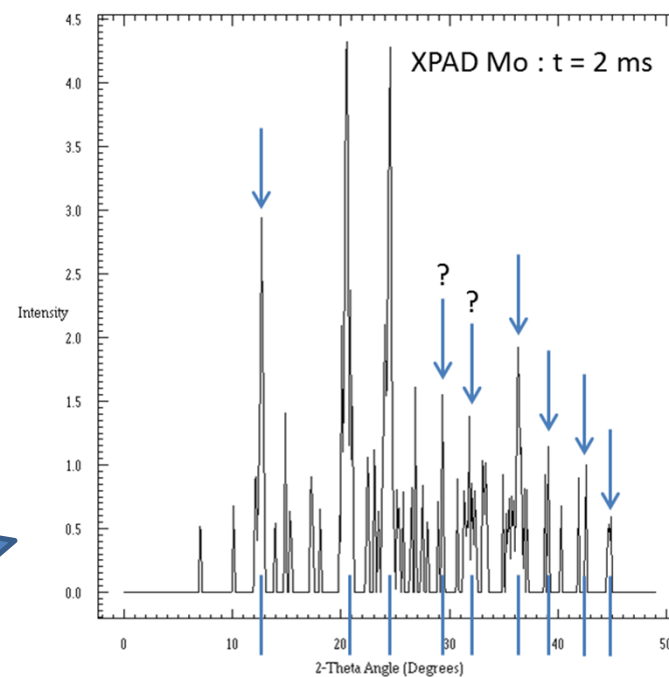
## 2. XPAD :

## *Sensibilité/rapidité*



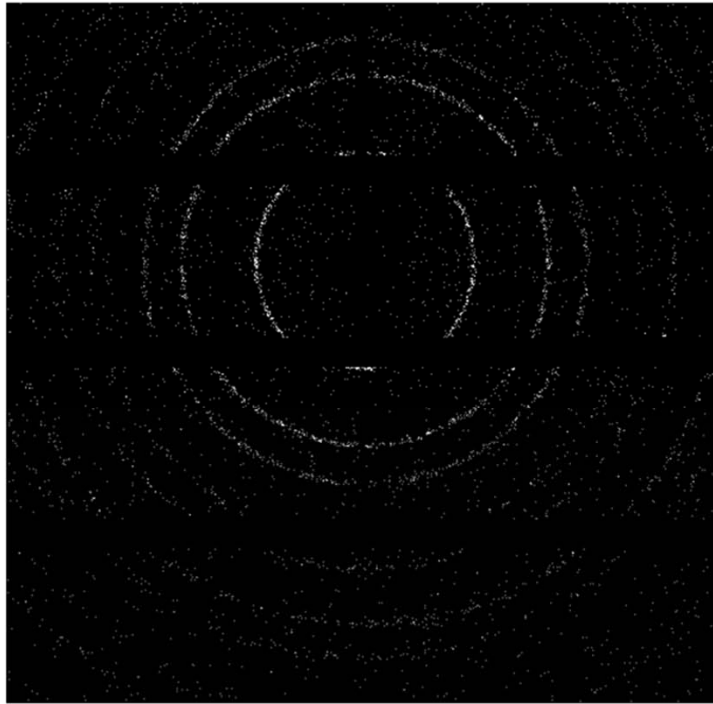
Capillaire Si  
300  $\mu$ m  
I $\mu$ S Mo 50W

*Intégration  
des anneaux  
FIT2D*



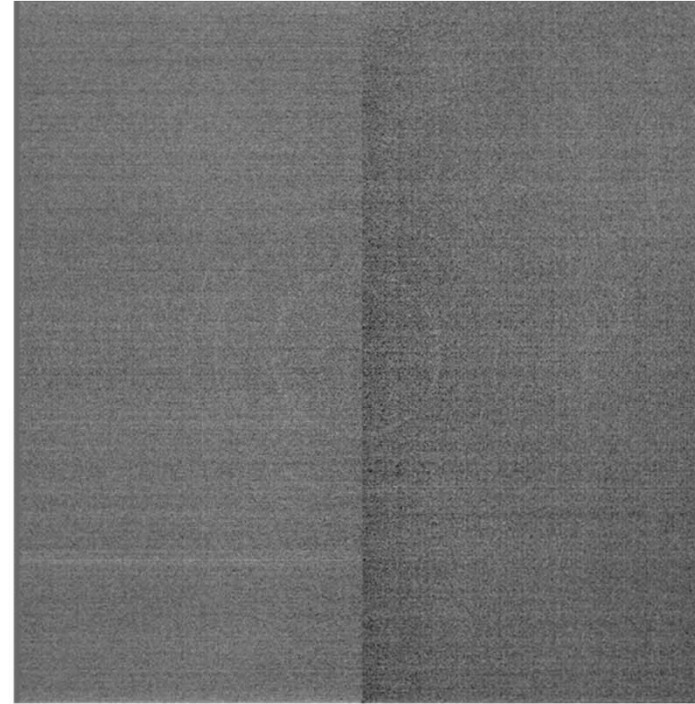
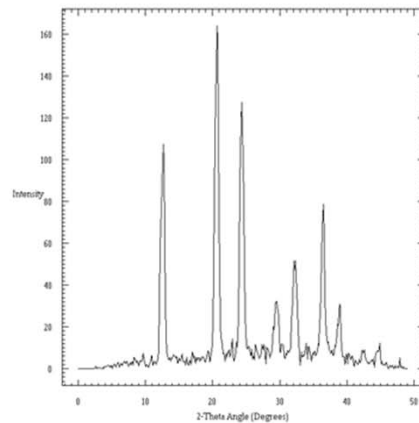
## 2. XPAD :

## *Bruit*



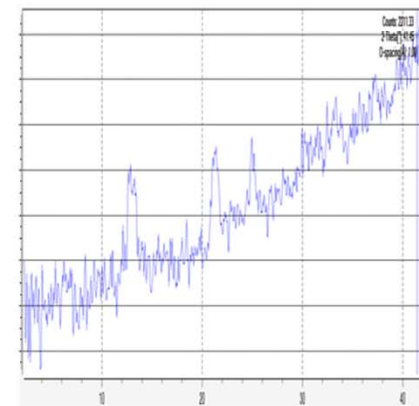
XPAD Incoatec I $\mu$ S Mo source

t = 100 ms



PHOTON100 Incoatec I $\mu$ S Mo source

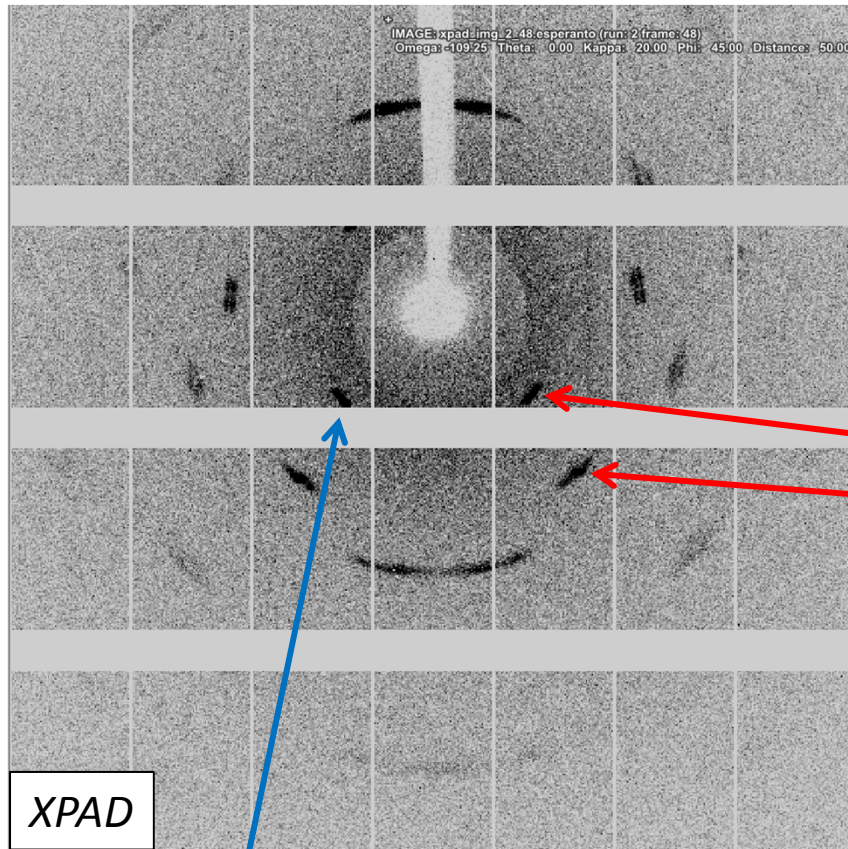
t = 155 ms



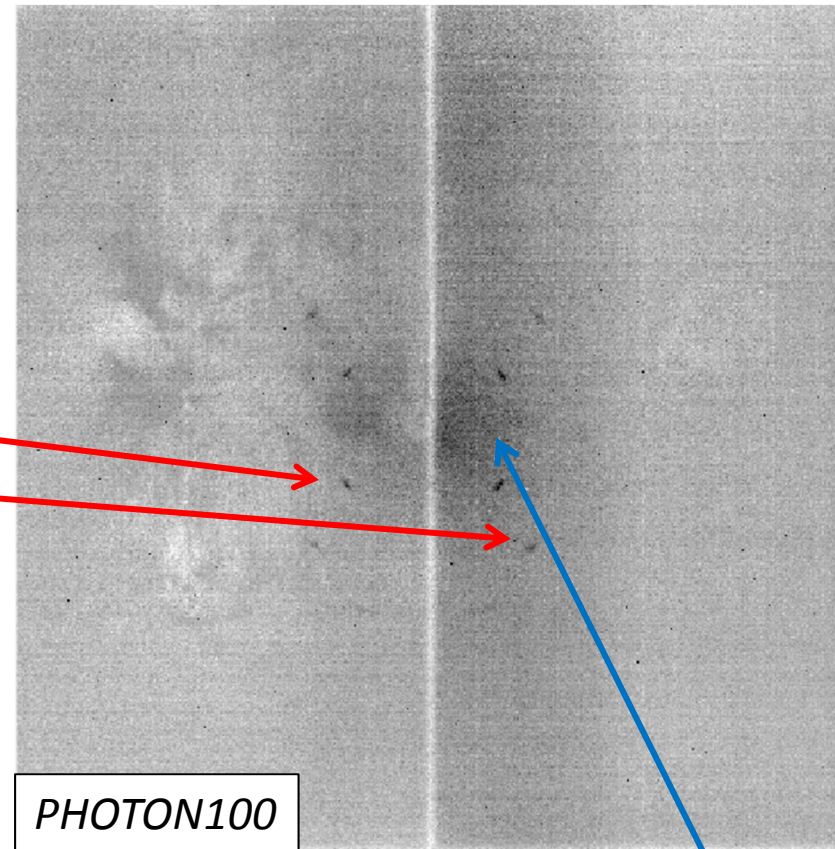
## 2. XPAD :

## Bruit – expositions longues

*Signaux faibles et durées d'accumulation longues : cylindre GaAs*



*Fond continu ~ 10 cps max*



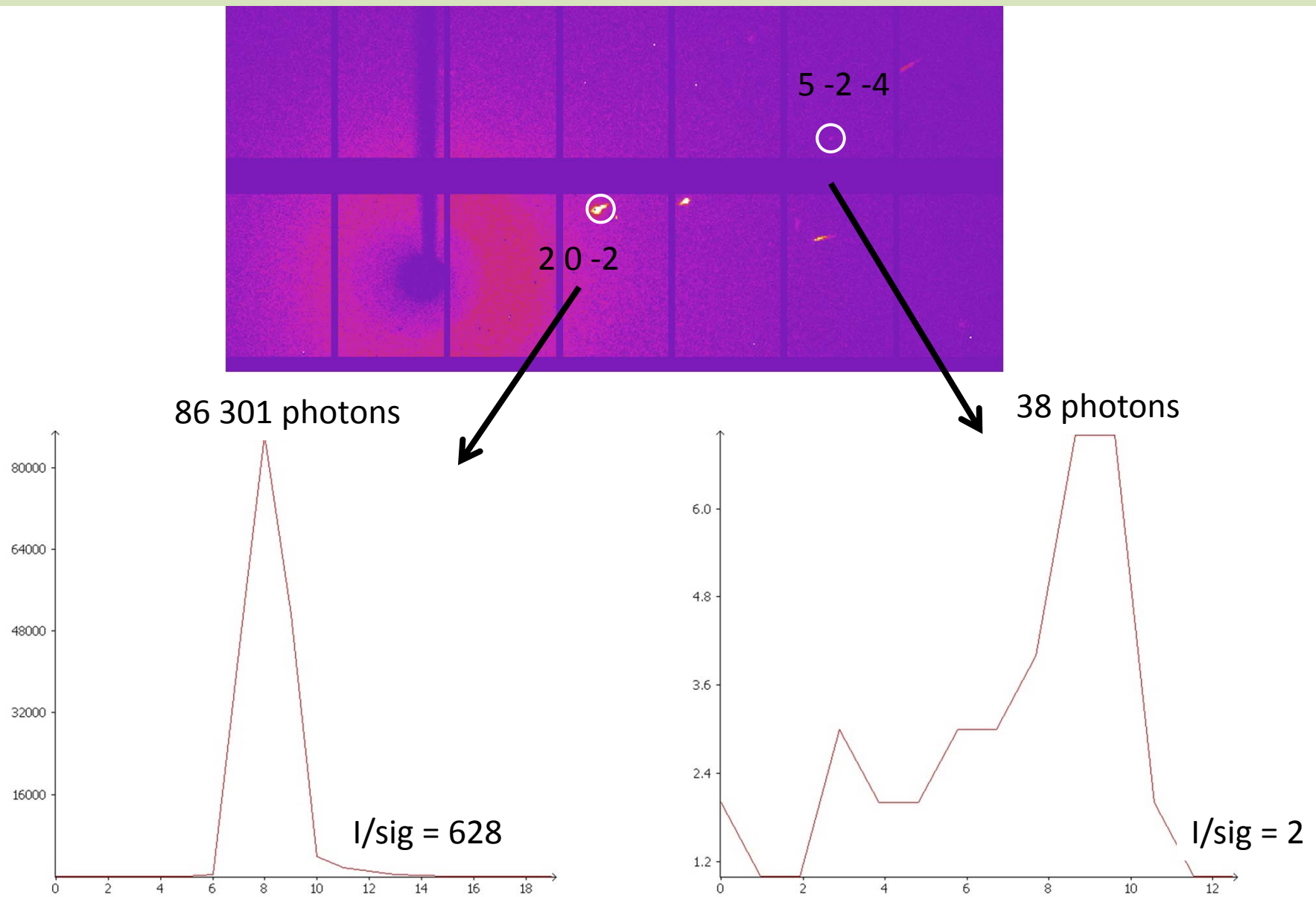
*Fond continu ~ 1000 cps max*

*t = 10 minutes*



## 2. XPAD :

*Dynamique*

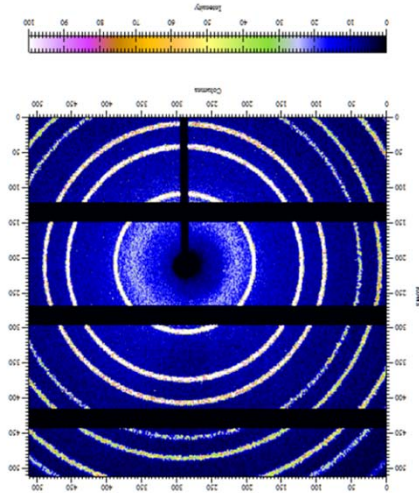


## 2. Collectes sur monocristaux

### Alignement du diffractomètre

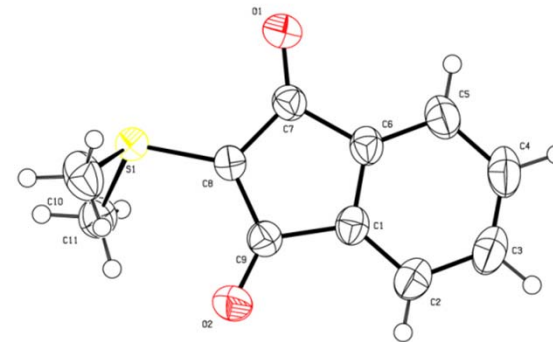
#### Anneau d'une poudre de silicium :

- ✓ Orientation du détecteur
- ✓ Distance cristal-détecteur
- ✓ Position du centre



#### Structure de Ylid : validation

- ✓ Collecte automatique
- ✓ Indexation, raccord des scans
- ✓ Affinements des paramètres instrumentaux
- ✓ Intégration avec CrysAlis
- ✓ Affinements d'un modèle sphérique



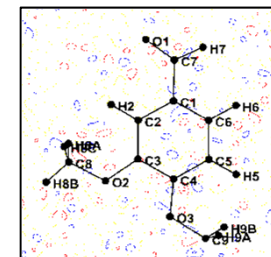
$R_{\text{int}} = 2,91 \%$  (18 729 réflexions)  
 $R_1 = 2,87 \%$  pour 2798 réflexions  
Complétude = 98,5 %  
 $(\sin \theta_{\text{max}})/\lambda = 0,7 \text{ \AA}^{-1}$





## Troisième partie

3. Mesures précises à haute résolution :  
=> modélisation de la densité électronique



## 3.1 Applications : Mesures à haute résolution

Question du choix d'une méthode et d'un composé pour éprouver le détecteur ?

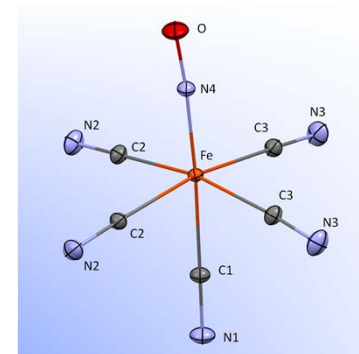
**Méthode** : mesure poussée pour aller jusqu'à la modélisation de la densité électronique

**Composé** : connu pour comparaison avec la littérature

Pressprich et al. (1994). *J. Am. Chem. Soc.* **116**

Nelyubina et al. (2008). *J. Phys. Chem. A.* **112**

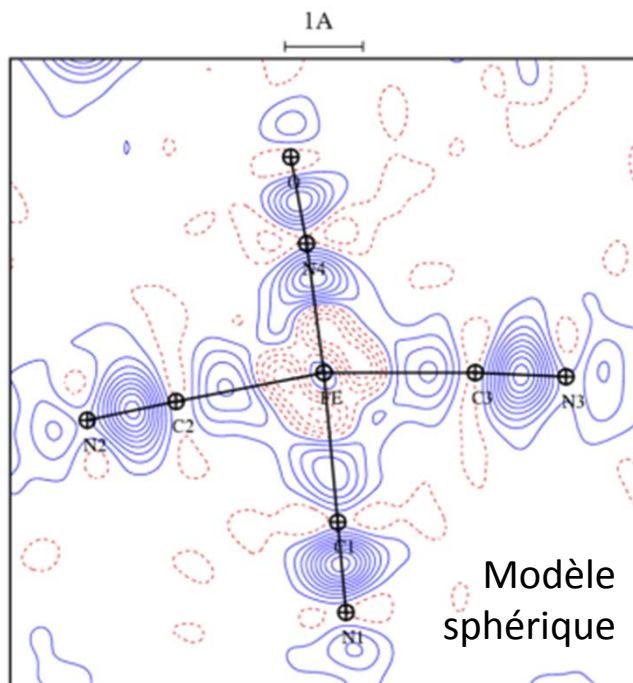
Nitroprussiate de sodium (SNP) ➡



## 3.2 Mesures à haute résolution : Première étude

### Nitroprussiate de sodium

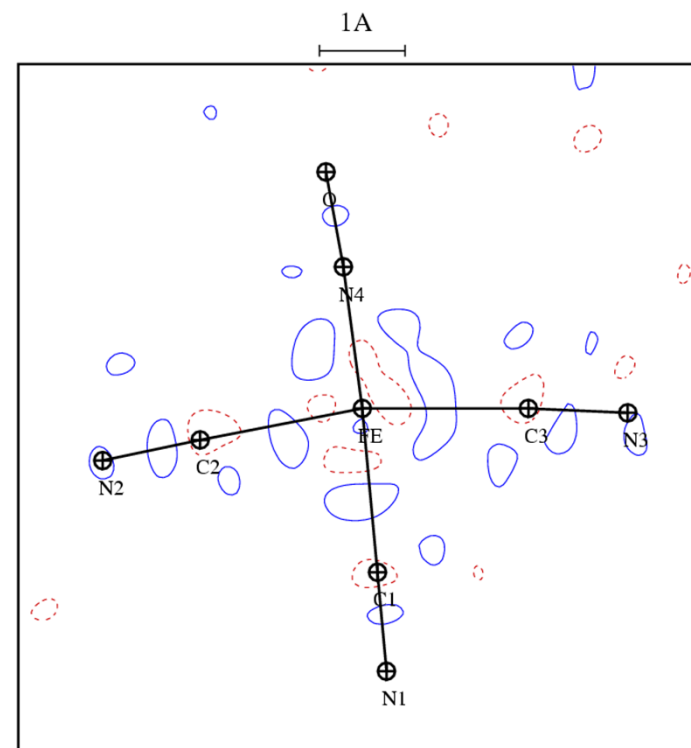
- Temps d'exposition : de 40 à 120 s
- Nombre total d'images : 6 814
- 213 934 total réflexions
- 5 528 uniques réflexions ( $I > 3\sigma(I)$ )
- $R_{\text{int}} = 3,41 \%$



Carte de déformation

Après affinement multipolaire  
Modèle Hansen/Coppens, MoPro

C.Jelsch & al. (2005). *J. Appl. Cryst.* 38, 38.



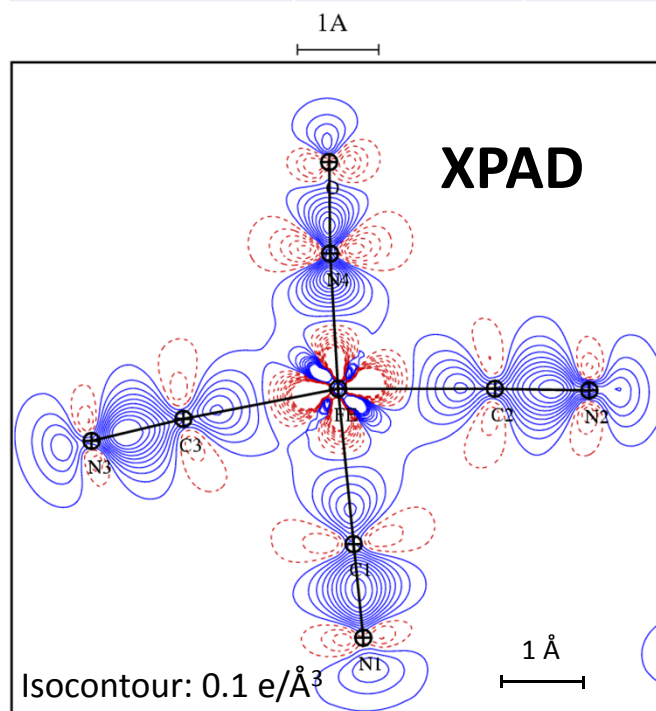
Carte de Fourier résiduelle pour  $R < 0.9 \text{ \AA}^{-1}$  and  $I > 3\sigma(I)$   
Isocontour :  $0.1 \text{ e/\AA}^3$

Premiers résultats avec XPAD

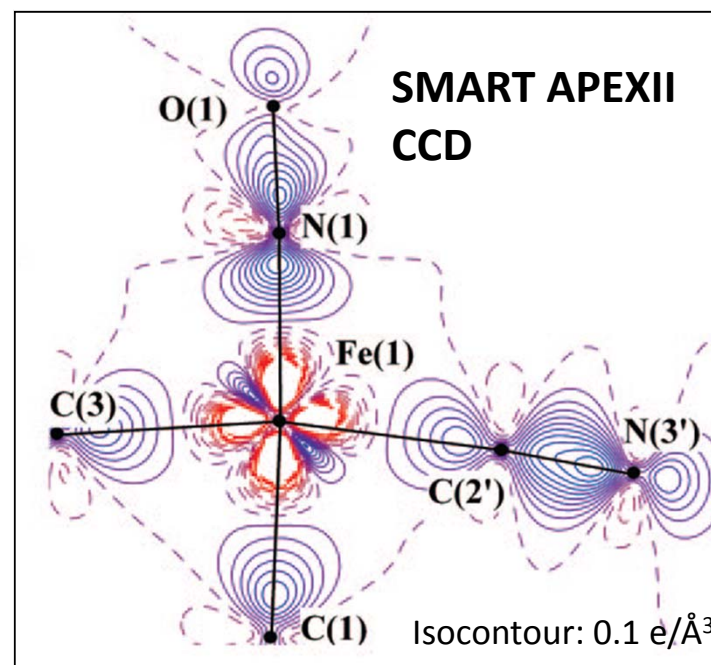
## 3.2 Mesures à haute résolution : Première étude

### Nitroprussiate de sodium

|             | Reflexions<br>uniques | R <sub>int</sub> | R/R <sub>w</sub> | Max res.             |
|-------------|-----------------------|------------------|------------------|----------------------|
| Xpad data   | 5 528                 | 3,41 %           | 1,58/1,70 %      | 1,21 Å <sup>-1</sup> |
| ApexII data | 5 022                 | 4,98 %           | 1,59/1,32 %      | 1,19 Å <sup>-1</sup> |



Wenger et al.  
*Acta Cryst B* 70, 783-791, 2014



Yulia V. Nelyubina et al.  
*J. Phys. Chem. A* 2008, 112, 8790–8796

## 3.1 Applications : Mesures à haute résolution

Question du choix d'une méthode et d'un composé pour éprouver le détecteur ?

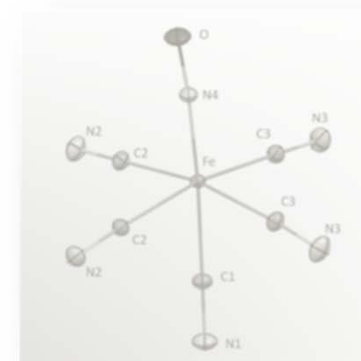
**Méthode** : mesure poussée pour aller jusqu'à la modélisation de la densité électronique

**Composé** : connu pour comparaison avec la littérature

Pressprich et al. (1994). *J. Am. Chem. Soc.* **116**

Nelyubina et al. (2008). *J. Phys. Chem. A.* **112**

Nitroprussiate de sodium (SNP) →



Deuxième phase :

Comparaison de modèles de densité électronique obtenus à partir de 3 détecteurs RX

Oxford Diffraction Atlas



ImXPAD XPAD3.2 S270



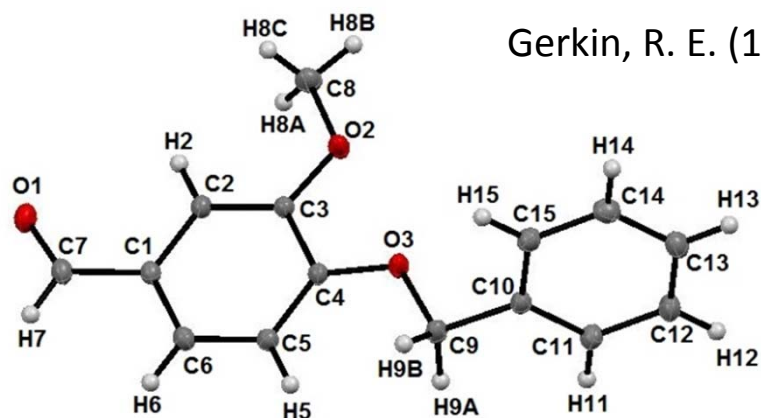
Bruker PHOTON100





## 3.2 Mesures à haute résolution

Composé choisi = un cristal de 4-benzyloxy-3-methoxybenzaldehyde.



Gerkin, R. E. (1999). *Acta Crystallogr. C* **55**, 2140–2142.

$a = 12,5674(1) \text{ \AA}$   
 $b = 11,5582(1) \text{ \AA}$   
 $c = 8,6220(1) \text{ \AA}$   
 $\gamma = 96,943(1)^\circ$   
 $\text{Vol.} = 1243,21(2) \text{ \AA}^3$   
 $P2_1/c$

- ✓ Composé purement organique :
  - Corrections d'absorption empirique suffisantes
  - Modèle densité électronique assez simple à établir
- ✓ Éléments légers et faible pouvoir diffractant => temps d'exposition longs  
Un bon challenge pour une mesure avec une source de RX de laboratoire

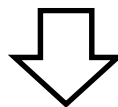
## 3.1 Mesures à haute résolution

Agilent SuperNova  
CCD Atlas (2008)

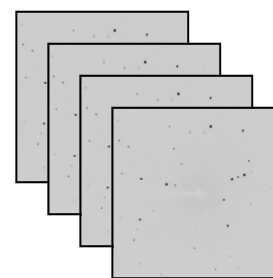
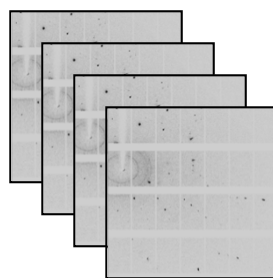
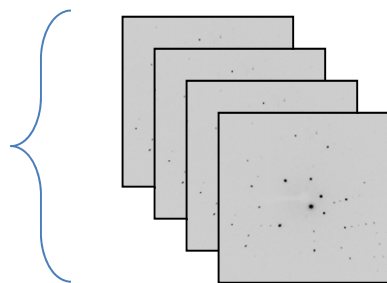
Prototype  
XPAD (2011)

Bruker D8 Venture  
APS PHOTON100 (2015)

- Même cristal
- Même stratégie de mesure,  $((\sin \theta)/\lambda)_{\max} = 0,96 \text{ \AA}^{-1}$
- Basse température  $\sim 100 \text{ K}$



3 ensembles  
d'images  
 $\sim 8\,000$



Intégration CrysAlis

Intégration APEX Suite

3 fichiers HKL



SORTAV

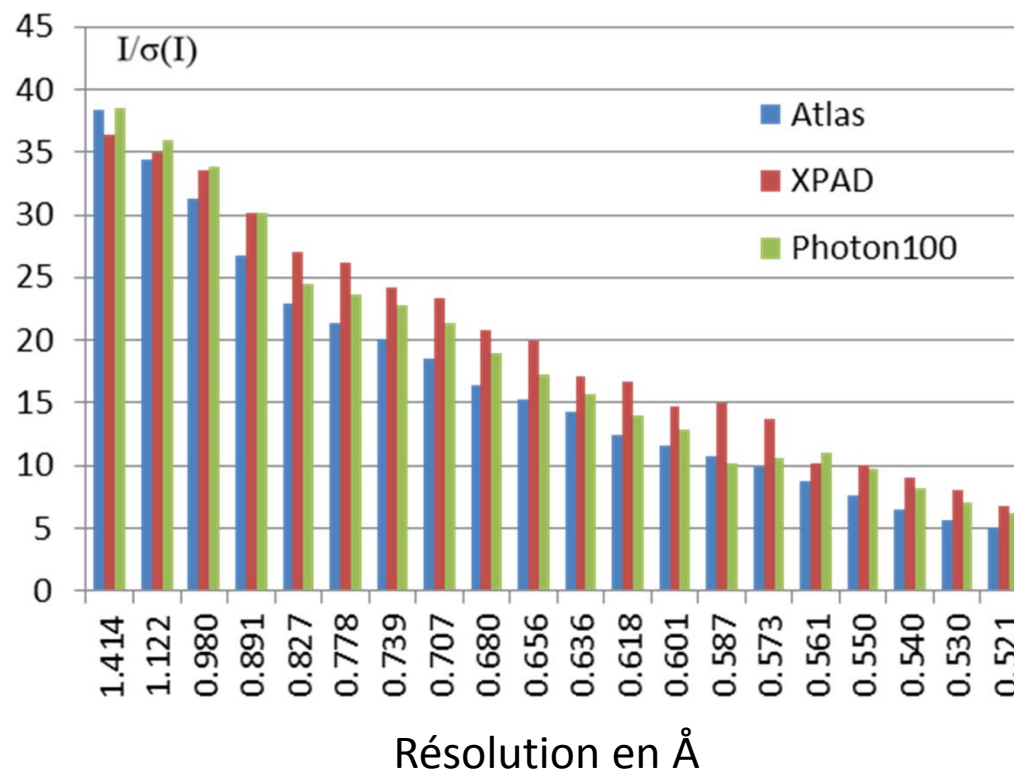
# 3.1 Mesures à haute résolution

## • Données

Analyse statistique des données  
de diffraction collectées

|                                        | Atlas (CCD) | XPAD           | PHOTON100<br>(CMOS) |
|----------------------------------------|-------------|----------------|---------------------|
| Total des<br>reflections<br>collectées | 239 475     | <b>175 895</b> | 230 132             |
| Redondance                             | 26,0        | 19,1           | 25,0                |
| Complétude                             | 100 %       | 99,8 %         | 100 %               |
| Nombre total<br>d'observées<br>$I > 0$ | 8 520       | <b>8 956</b>   | 8 508               |
| $I/\sigma(I)$ moyen                    | 16,9        | <b>19,9</b>    | 16,3                |
| $R_1$ (Sortav) %                       | 5,21        | <b>4,94</b>    | 5,82                |

Rapport signal/bruit



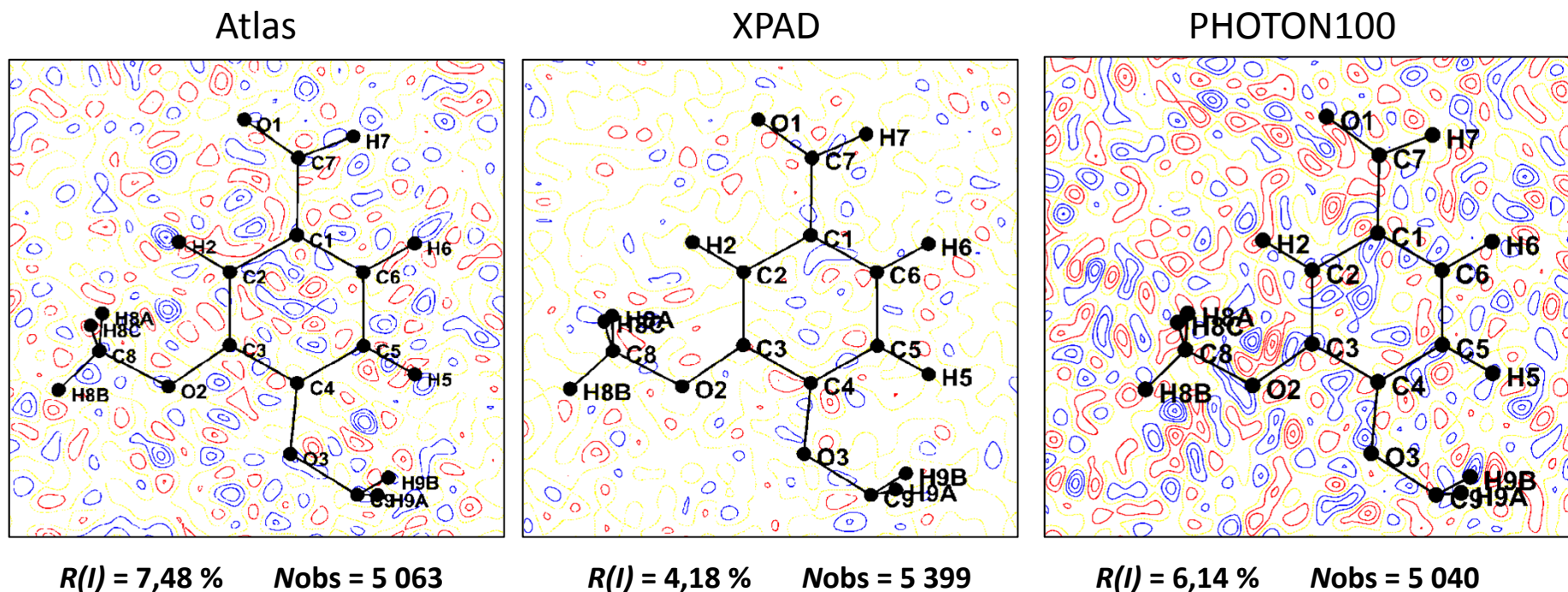
$$((\sin \theta)/\lambda)_{\max} = 0,96 \text{ \AA}^{-1}$$

**XPAD**

- ✓ Davantage de réflexions observées avec  $I > 0$
- ✓  $I/\sigma(I)$  moyen plus haut, notamment à haute résolution

# 3.1 Mesures à haute résolution

Cartes de densité électronique résiduelle pour les données haut angle  $((\sin \theta)/\lambda)_{\max} > 0,7 \text{ \AA}^{-1}$



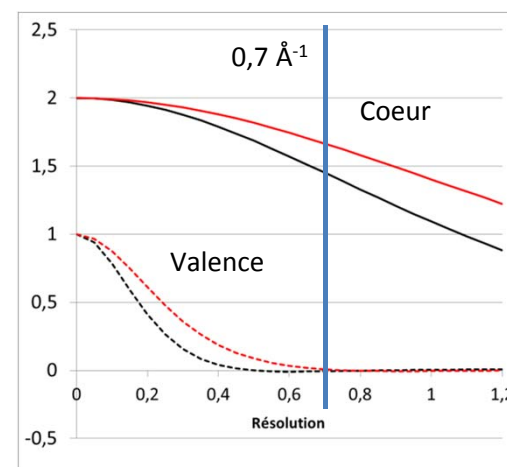
Paramètres affinés :

- Facteur d'échelle k
- Positions : x, y, z
- Agitation thermique :  $U_{ij}$

*Isocontours* =  $0,05 e/\text{\AA}^3$



Très peu de résidus  
Répartition aléatoire





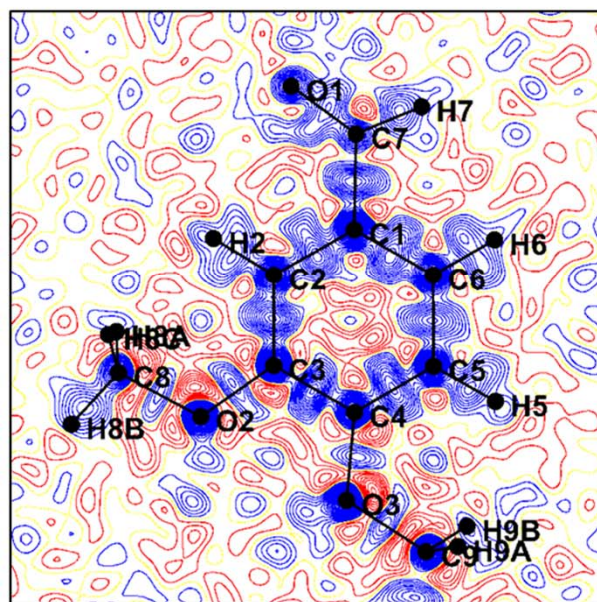
# 3.1 Mesures à haute résolution

Cartes de densité électronique de déformation expérimentale  
avec toutes les données

$$((\sin \theta)/\lambda)_{\max} = 0,96 \text{ \AA}^{-1}$$

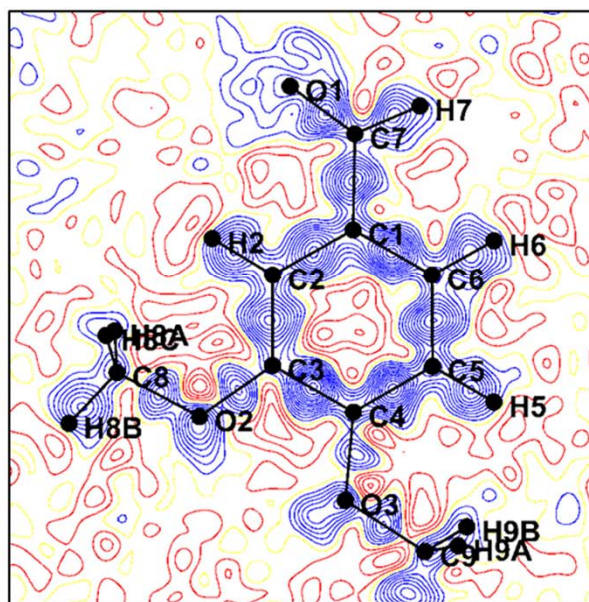
Affinement de  $k$  uniquement

Atlas



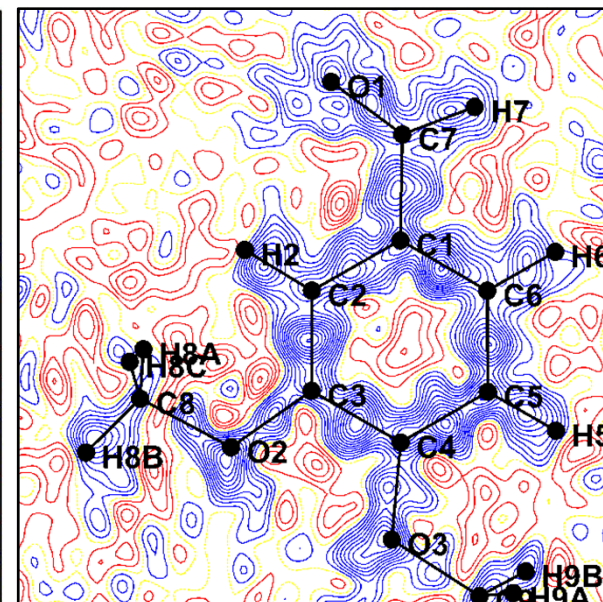
$R(I) = 7,93 \%$   $N_{\text{obs}} = 8\,520$

XPAD



$R(I) = 6,67 \%$   $N_{\text{obs}} = 8\,956$

PHOTON100



$R(I) = 7,54 \%$   $N_{\text{obs}} = 8\,508$

$\text{Isocontours} = 0,05 \text{ e/\AA}^3$

$$\Delta\rho_{\text{exp}}(\vec{r}) = \frac{1}{V} \sum_{\vec{H}} \left( \frac{1}{K} |F_{\text{obs}}(\vec{H})| e^{i\varphi_{\text{mul}}} - |F_{\text{sph}}(\vec{H})| e^{i\varphi_{\text{sph}}} \right) e^{-2\pi i \vec{H} \cdot \vec{r}}$$



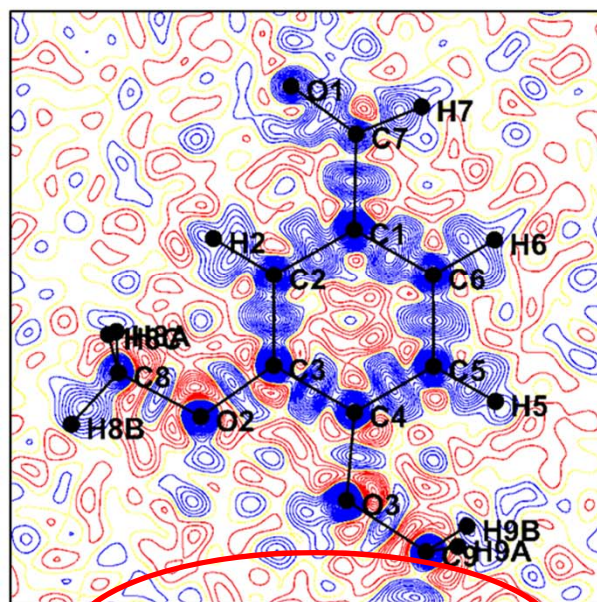
# 3.1 Mesures à haute résolution

Cartes de densité électronique de déformation expérimentale avec toutes les données

$$((\sin \theta)/\lambda)_{\max} = 0,96 \text{ \AA}^{-1}$$

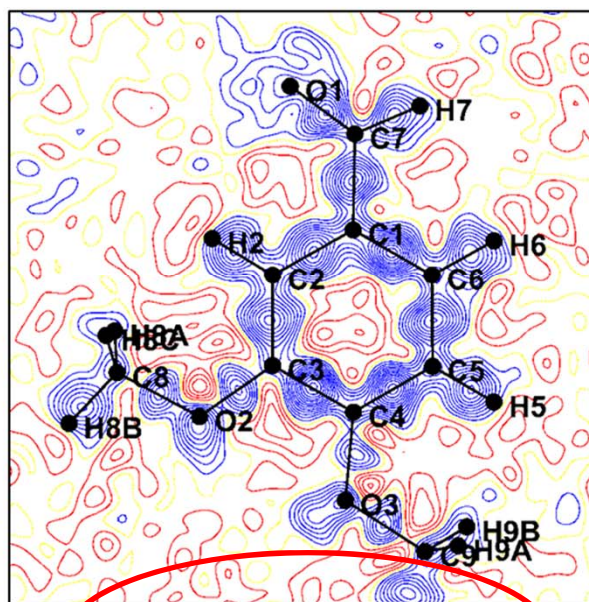
Affinement de  $k$  uniquement

Atlas



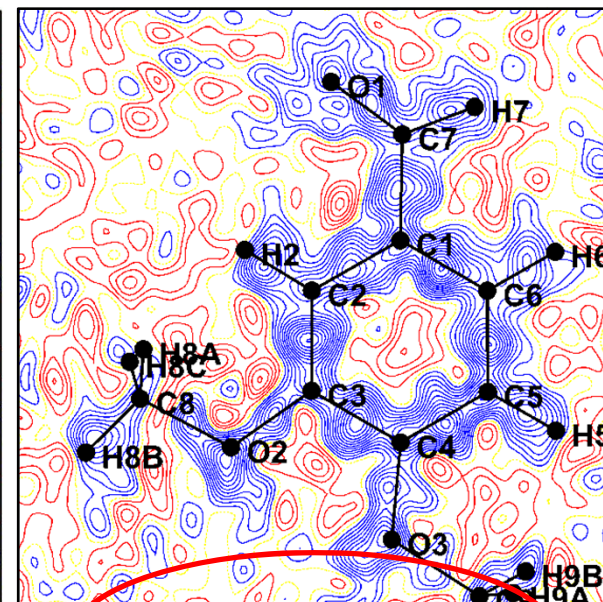
$R(I) = 7,93 \%$      $N_{\text{obs}} = 8\,520$

XPAD



$R(I) = 6,67 \%$      $N_{\text{obs}} = 8\,956$

PHOTON100



$R(I) = 7,54 \%$      $N_{\text{obs}} = 8\,508$

$$\Delta\rho_{\text{exp}}(\vec{r}) = \frac{1}{V} \sum_{\vec{H}} \left( \frac{1}{K} |F_{\text{obs}}(\vec{H})| e^{i\varphi_{\text{mul}}} - |F_{\text{sph}}(\vec{H})| e^{i\varphi_{\text{sph}}} \right) e^{-2\pi i \vec{H} \cdot \vec{r}}$$

$\text{Isocontours} = 0,05 \text{ e/\AA}^3$



## 3.1 Mesures à haute résolution • Affinements multipolaires

### Affinements des modèles multipolaires

Avec le logiciel MOPRO

- Stratégies d'affinement exactement identiques avec les 3 jeux de données
- Contraintes et restrictions identiques pour les 3 modèles
- Nombre de paramètres affinés = 354

Facteurs d'accord après affinement  
avec toutes les données

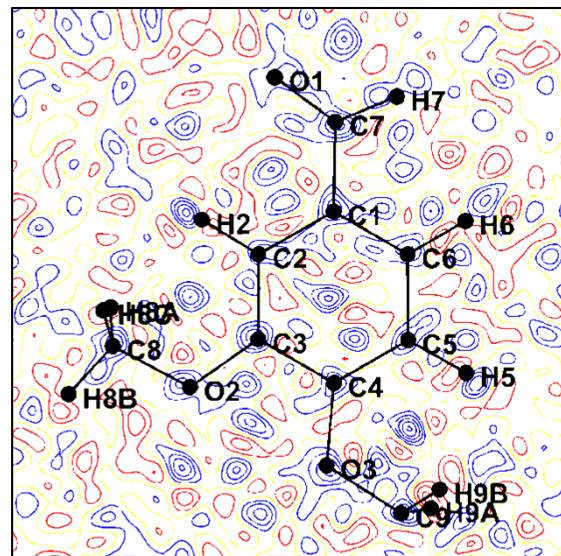
|             | Atlas (CCD) | XPAD         | Photon100<br>(CMOS) |
|-------------|-------------|--------------|---------------------|
| N observées | 8 514       | <b>8 956</b> | 8 510               |
| $R_1(I)$ %  | 3,41        | <b>2,63</b>  | 2,56                |
| wR(I) %     | 7,37        | <b>4,66</b>  | 4,41                |
| GOF         | 1,69        | <b>1,29</b>  | 1,15                |



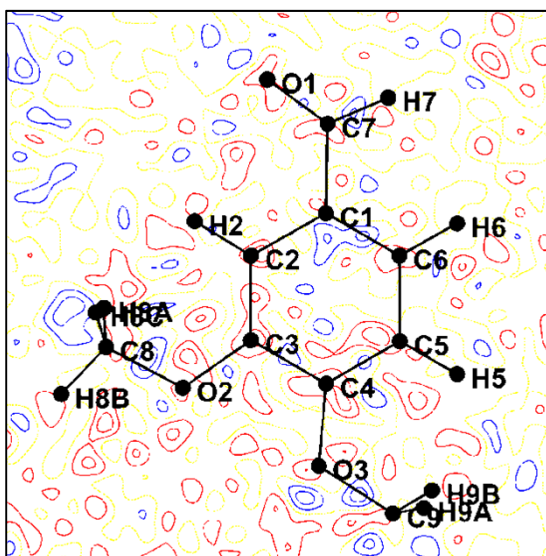
Variances affectées aux intensités correctes

## 3.2 Mesures à haute résolution

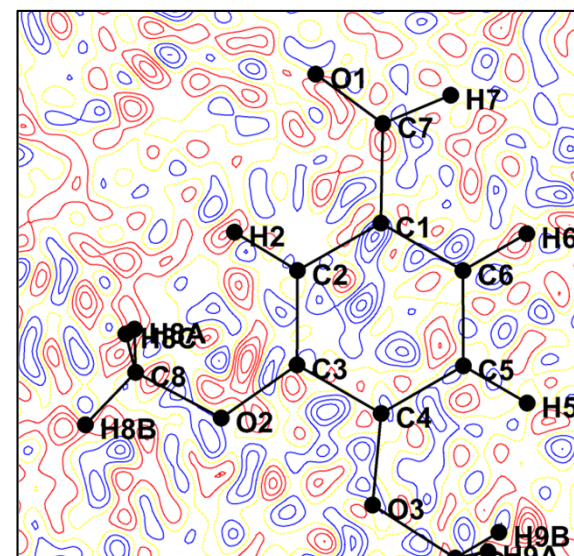
Cartes de densité électronique résiduelle après affinement multipolaire. *Isocontours* = 0,05 e/Å<sup>3</sup>



Atlas



XPAD



PHOTON100

$$\Delta\rho_{res}(\vec{r}) = \frac{1}{V} \sum_{\vec{H}} \left( \frac{1}{K} |F_{obs}(\vec{H})| - |F_{mul}(\vec{H})| \right) e^{i\varphi_{mul}} e^{-2\pi i \vec{H} \cdot \vec{r}}$$



Bruit plus faible  
Répartition aléatoire

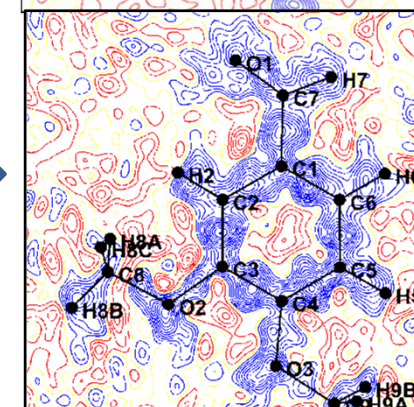
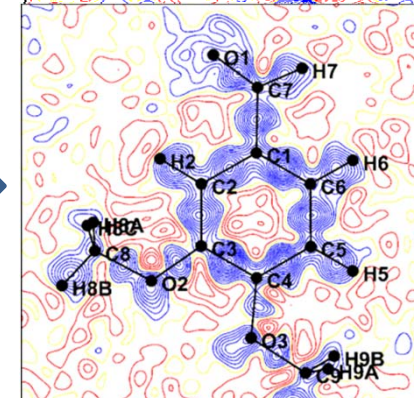
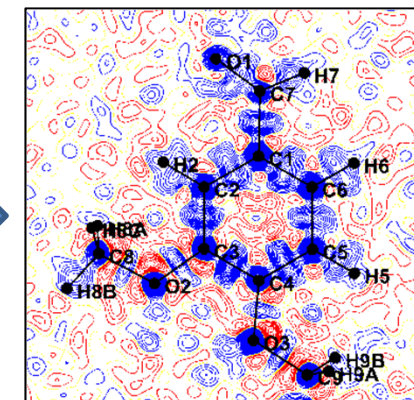
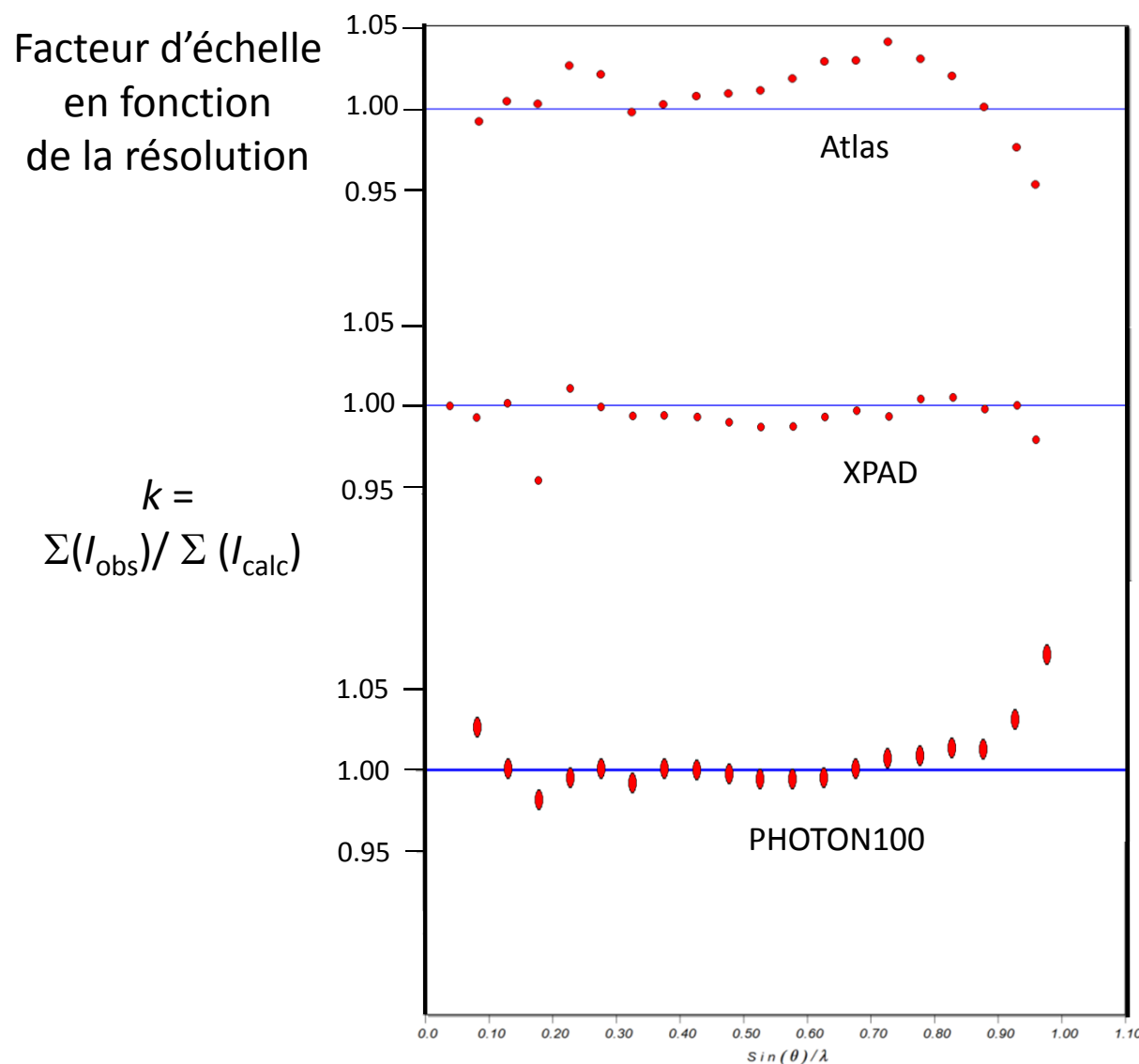
Erreur estimée sur les cartes  
de densité électronique

Rees, B. (1976). *Acta Crystallogr. Sect. A*. **32**, 483–488.

|                                                        | Atlas  | XPAD          | PHOTON100 |
|--------------------------------------------------------|--------|---------------|-----------|
| $\sigma(\Delta\rho)$ (e <sup>-</sup> /Å <sup>3</sup> ) | 0,0497 | <b>0,0381</b> | 0,0574    |

$$\sigma(\Delta\rho) = \frac{\sqrt{2 \sum k(F_o - F_c)^2}}{V}$$

## 3.2 Mesures à haute résolution



Pinkerton et al. (2008) *J. Appl. Cryst.* 41, 2

## 4.1 Conclusions générales

### **Comparison of CCD, CMOS and Hybrid Pixel x-ray detectors: detection principle and data quality**

*Physica Scripta* Mai 2016

P Allé<sup>1,2</sup>, E Wenger<sup>1</sup>, S Dahaoui<sup>1</sup>, D Schaniel<sup>1</sup> and C Lecomte<sup>1</sup>

- ✓ Les détecteurs HPAD => un réel tournant technologique pour la détection des RX 2D
- ✓ Les détecteurs HPAD => mieux comprendre les détecteurs, notamment CCD/CMOS
- ✓ Les détecteurs HPAD => ils repoussent les limites de détection en labo
- ✓ Les détecteurs HPAD (XPAD) ouvrent les possibilités des mesures DRX en temps résolu à l'échelle de la milliseconde y compris en laboratoire

## 4.2 Perspectives

### 1. Collectes et traitements des données

- Développer l'utilisation du shutter électronique d'XPAD : mode shutterless
  - ⇒ Test du *fine slicing* avec XPAD (prometteur avec PHOTON100)
  - ⇒ Indispensable avec les HPAD pour traiter les problèmes de temps mort
- Traitement des données :
  - ⇒ Quelle est la meilleure méthode d'intégration pour les images HPAD ?

### 2. Efficacité de détection : capteurs en CdTe ou AsGa

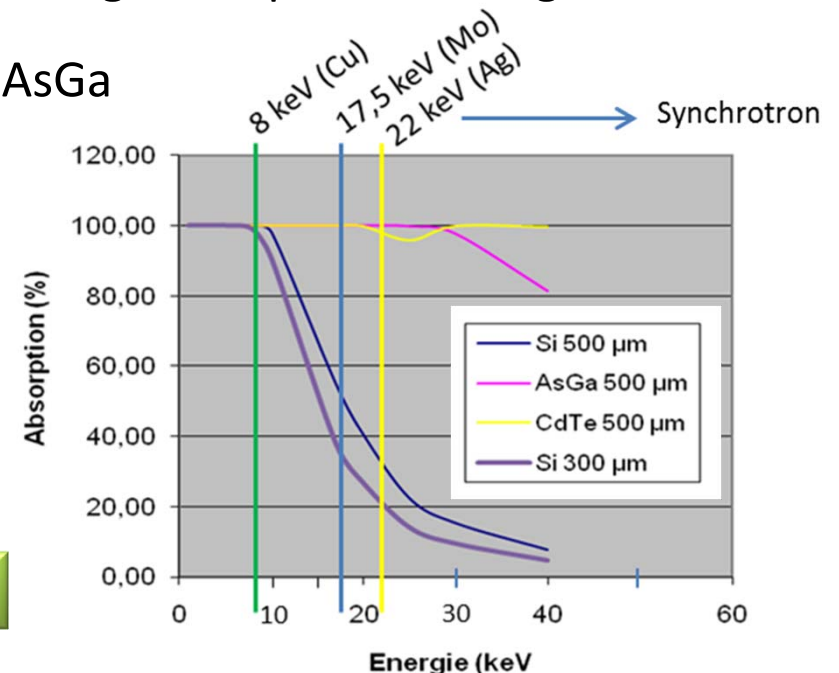
Pour des longueurs d'ondes plus courtes :

- 100% d'efficacité de détection
- Capteurs fins



Démonstrateur AsGa au laboratoire

Pour le Mo => Efficacité (AsGa) = 2,5 X Efficacité(Si)





## Détecteurs CCD-CMOS



## Détecteurs Pixels hybrides

Qualités :

- ✓ Détecteurs 2D grande taille
- ✓ Plus rapides que Image Plate
- ✓ Très aboutis - très bons !
- ✓ PHOTON100-PHOTONII prometteurs
- ✓ CCD Atlas S2 pas mal non plus !
- ✓ Prix



Mais :

- ✓ Non dédiés au départ aux rayons X
- ✓ Bruit thermique, électronique
- ✓ Dynamique limitée
- ✓ Vitesse de lecture faible
- ✓ Beaucoup de traitement du signal nécessaire
- ✓ Perte du lien entre la grandeur numérique et le photon



Qualités :

- ✓ Dédiés à la détection des rayons X
- ✓ Très grande sensibilité (photon unique)
- ✓ Pas de bruit
- ✓ Dynamique quasi illimitée : comptage de photons



Mais :

- ✓ Problème des partages de charges
- ✓ Calibration délicate
- ✓ Efficacité à haute énergie
- ✓ Bruit à basse énergie (cuivre)
- ✓ Surface de détection non continue
- ✓ Encore des questions sur le traitement des données (statistiques...)
- ✓ Prix



