

# Défis technologiques pour l'industrie électronucléaire

## INSTRUMENTATION NUCLEAIRE

IMT Atlantique

MEKHALFA Zakkarya  
orano Chimie et Enrichissement

23/02/2021 au 24/02/2021

[zakkarya.mekhalfa@orano.group](mailto:zakkarya.mekhalfa@orano.group)



**orano**

# Informations importantes

## OBJECTIFS

- **Vous donner des outils qui vous aiderons dans vos premiers pas d'ingénieurs**
- **Vous aider à structurer la compréhension et la résolution d'une problématique**
- **Vous sensibiliser sur l'importance d'une bonne appréhension de la problématique avant toute action**

## PAS OBJECTIF

- **De faire de vous des experts du domaine**
- **Que vous appreniez par cœur des informations techniques alors que vous pourriez les retrouver facilement dans ce cours ou dans les annexes ou sur internet**

## MA VISION DU COURS

- **On échange → Vous pouvez poser vos questions au fil de l'avancée du cours**

*NB : il n'y a pas de question bête*

- **Mon habitude du métier risque de me pousser à quelques raccourcis → Ne passer hésiter à me faire passer un peu de temps à recadrer les sujets dans leur contexte**

# Sommaire

## 1. Introduction

- a. Qu'est-ce que l'instrumentation nucléaire et pourquoi l'utiliser ?
- b. Et le nucléaire dans tout ça ?

## 2. Les problématiques rencontrées dans l'industrie

- a. Quelles sont les grandes problématiques de l'industrie nucléaire ?
- b. Comment la mesure nucléaire y répond ?
- c. Quels types d'outils utilise t-on ?

## 3. De la théorie à l'application industrielle

- a. Généralités sur la détection
- b. Les mesures non destructives
- c. Mesures destructives
- d. Généralités sur la mesure

## 4. Comment les mesures sont-elles utilisées dans l'industrie nucléaire

- a. Cartographies (initiales / finale)
- b. Investigations radiologiques
- c. Mesures in-situ
- d. Mesures de colis de déchets
- e. Mesures pour le transport

## 5. Les solutions actuelles

- a. Comment répondre au besoin
- b. Exemples d'approches méthodologies
- c. Atelier par groupes
  - Définition de la problématique
  - Choix du type de détecteur
  - Choix des contraintes de réalisation
  - Exploitation du spectre
  - Modélisation / simulation
  - Calcul de l'activité
  - Test d'un logiciel automatisé

## 6. Les défis de demain

## 7. Des solutions en cours de développement

- a. Mini gamma caméra Nanopix V.2
- b. Imagerie neutron
- c.  $\mu\text{Ge}$
- d. Blindage actif

## 8. Discussion libre

# 01

## Introduction

# Qu'est-ce que l'instrumentation nucléaire?

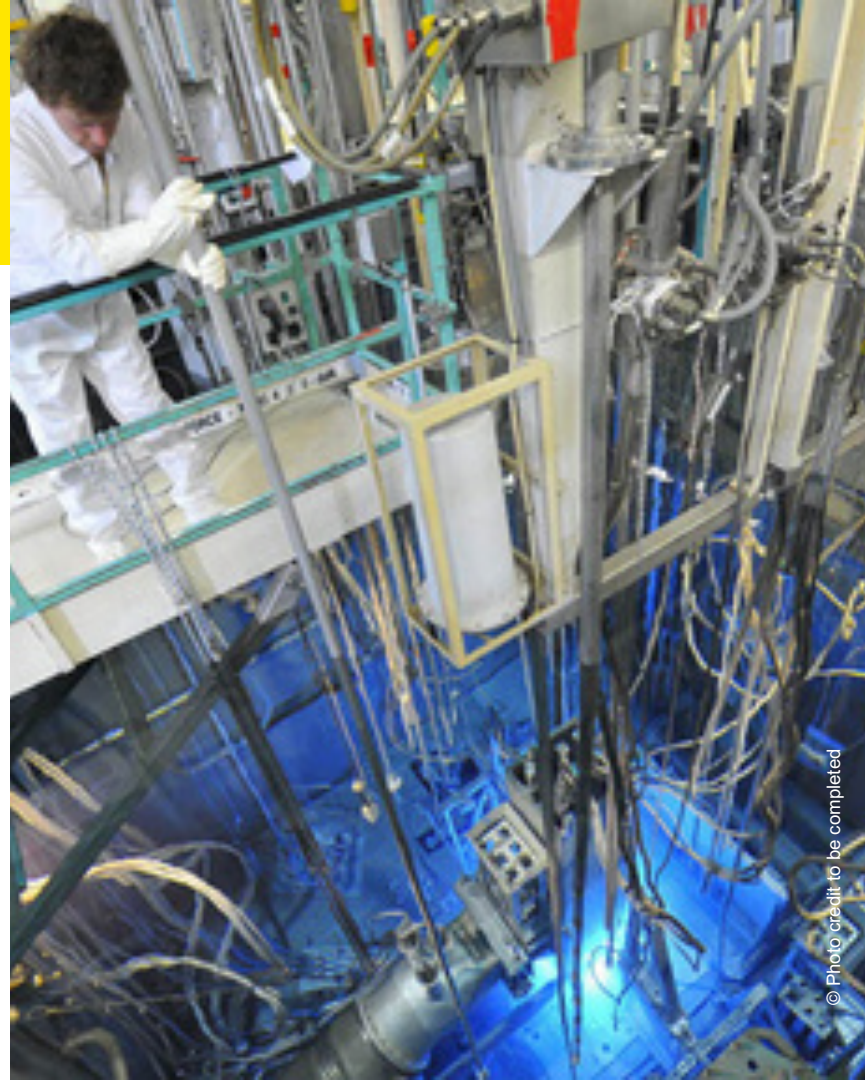
L'instrumentation c'est :

- **Cameras (visibles , IF, ...)**
- **Capteurs de mouvement**
- **Sondes de température (BT, HT)**
- **Sondes de pression**
- **Sondes de débit**
- **Sondes de mesure nucléaire**
- ...



Le tout couplé à des systèmes de régulation ,  
d'alarme, ...

*“ Elle permet de contrôler ou  
surveiller les installation en marche  
ou à l'arrêt ”*



# Et le nucléaire dans tout ça?

On utilise des sondes de mesure radiologique pour :

- **Contrôler la propreté radiologique des installations**
- **Assurer la protection des travailleurs / populations**
- **Assurer la sureté / criticité des installations**
- **Contrôler la qualité des procédés**
- **Contrôler l'activité des déchets**
- **Assurer le suivi de la matière nucléaire vis-à-vis des engagements de non prolifération**
- **Réaliser des investigations en cas d'anomalie / incident**
- ...

*“ Son utilisation est primordiale pour le bon fonctionnement des installations et la protection des travailleurs / populations ”*



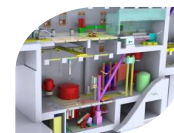
# 02

## **Les problématiques rencontrées dans l'industrie**

# Répondre aux exigences réglementaires, légales et contractuelles

## Sûreté des usines et des transports

- **Contrôle Nucléaire du Procédé (ex : La Hague)**
- **Qualification & validation des emballages**



TCP



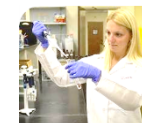
TN 24

## Qualité des produits

- **Pureté**
- **Enrichissement**
- **Colis déchets**



Cylindres 48Y



Pb<sup>212</sup> (Med)



Colis FMA

## Non Prolifération (respect des accords)

## ALARA (surveillance des opérateurs)

## Environnement (rejet, réhabilitation, etc.)



“ La mesure nucléaire est un élément important pour la maîtrise de ces exigences ”



# Réussir le démantèlement des installations en fin de vie

## Assurer la maîtrise des actions

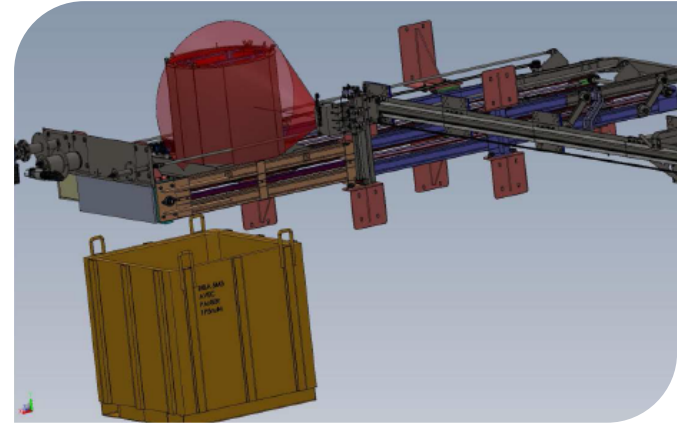
- **Répondre aux difficultés techniques**
- **Optimiser les scénarii de DEM**
- **Protéger les opérateurs / haute activité des cellules**
  - Opération télé-opérées / robotisées
  - Optimisation des temps d'intervention (pre-job briefing, training VR, ...)

## Respecter les délais et optimiser les coûts

- **Prévisionnels insuffisants / contraintes réglementaires**
- **Innover pour faire mieux / plus vite / moins cher**

## Assurer le retour d'expérience

- **Ne pas reproduire les erreurs**
- **Capitaliser le savoir faire**

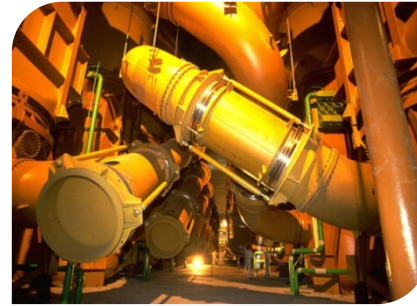


Mesure en ligne des colis de Bugey 1

# Déclasser les millions de mètres carrés des installations démantelées



- **Usine Georges Besse 1 (Eurodif)**
  - Cartographie 100% des surfaces  
> 10 millions de m<sup>2</sup>



- **Usine UDG**
  - Cartographie 100% des surfaces  
> 850 000 m<sup>2</sup>

“ La cartographie grande surface est un enjeu de taille pour le DEM des usines militaires et civiles du Tricastin ”

# Maîtriser les déchets pour leur entreposage temporaire et leur stockage définitif

## • Assurer le conditionnement des déchets historiques

- Caractériser
  - Maîtriser les données
  - Minimiser les incertitudes
- Reconditionner

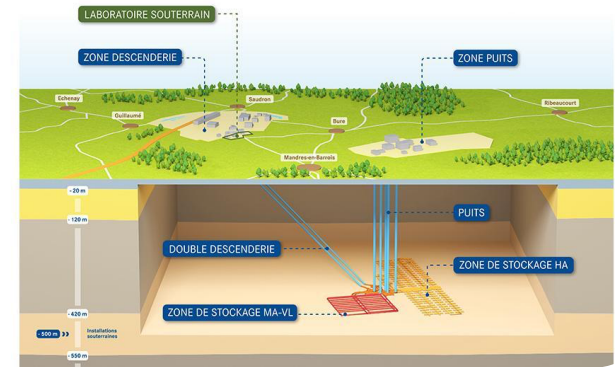
## • Assurer la maîtrise des conditionnements des déchets

- Optimisation des remplissages / taux d'incorporation
- Compactage / fusion (décontaminante) des déchets
- Blocage des déchets (cimentation) dans des matrices spécifiques

## • Maîtriser l'entreposage temporaire et définitif des colis de déchets

- ANDRA centre de l'AUBE
- CIGEO (centre industriel de stockage géologique)

“ La maîtrise technique des déchets est primordiale pour limiter l'impact environnemental et permettre l'acceptation du nucléaire par les populations ”



# Comment la mesure nucléaire y répond ?

- **Réponses aux exigences contractuelles et réglementaires**
  - Maîtrise de l'activité
  - Suivis de l'isotopie (spectre type) des procédés
- **Démantèlement**
  - Investigations préliminaires
  - Pilotage du remplissage (détrompage / suivis VS limites radiologiques des colis)
  - Comptage des colis finaux
  - Utilisation d'outils innovants
- **Déclassement**
  - Cartographie finale 100%
  - Utilisation de la géostatistique
  - Utilisation de capteurs grandes dimensions
  - Utilisation de l'automatisation

“ En permettant une maîtrise technique des déchets et des niveaux d'activité des installations en cours d'utilisation, en fin de vie ou en démantèlement ”

# Quels outils utilise t-on?

- **Les mesures non destructives**

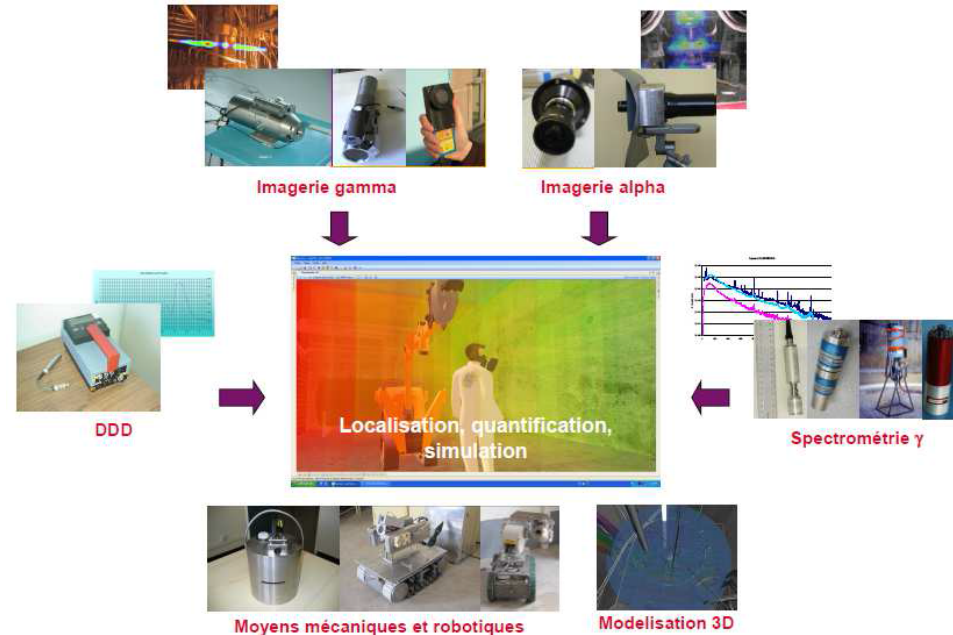
- Mesures gamma
- Mesures Alpha
- Mesures neutroniques
- Imagerie
- Calorimétrie

- **Mesures destructives (laboratoire)**

- Chimie séparative pour la mesure
- Comptage par scintillation liquide
- Spectrométrie de masse
- Spectrométries alpha et gamma

- **Mécatronique**

- Mécanique / automatisme
- Robotique



“ Des outils multiples pouvant être utilisés seuls ou combinés pour se rapprocher de la valeur vraie ”

# 03

**De la théorie à  
l'application industrielle**

# 03

De la théorie à  
l'application industrielle

# a

Généralités sur la détection

# Que veut-on mesurer?

- **Particules chargées légères**

- Électrons :  $e^-$
- Positons :  $e^+$

- **Particules chargées lourdes**

- Protons  $p^+$  / Alpha  ${}^4_2\text{He}$
- Hadrons

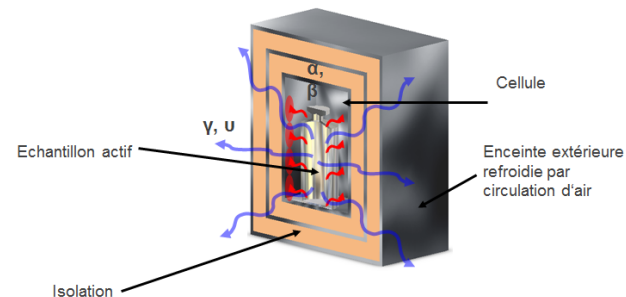
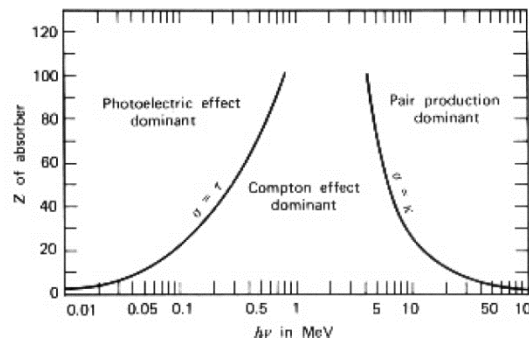
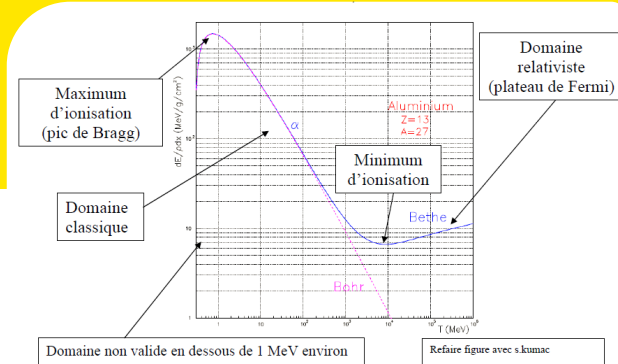
- **Photons**

- Effet Photo-électrique
- Effet Compton
- Création de paires

- **Neutrons**

- Thermiques

- **Puissances thermiques**



“ Des particules, des ondes électromagnétiques ou des puissances thermiques ”



# Qu'est-ce qu'une chaîne de détection?

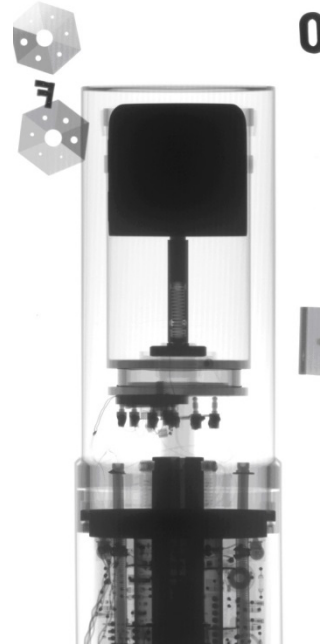
- **Un outil composé**

- D'un milieu de détection (gaz, SC, scintillateur)
- D'un dispositif de conversion du signal physique en signal électrique
- D'un système électronique d'amplification et de traitement de ce signal
- D'un système d'affichage et de sauvegarde (micro-logiciel, logiciel)

- **Un outil qui**

- Compte un nombre de particules (ayant interagît avec le milieu de détection)
  - Contaminamètre
  - Ictomètre
  - neutronique
- Mesure l'énergie déposée dans un milieu
  - Débit de Dose
  - Spectrométrie

“ Un outil qui ne voit pas la radioactivité mais qui mesure des traces laissées par un rayonnement ou une émission ”



# 03

De la théorie à  
l'application industrielle

## b

Les mesures non destructives

# Mesures non destructives

- **Intérêt**
  - Recueillir des données radiologiques sans altérer l'intégrité physique de l'objet à mesurer
- **Plusieurs moyen de réaliser les mesures**
  - Détecteurs à ionisation
  - Détecteurs à Scintillation
  - Détecteurs SC (semi-conducteur)
  - Comptage neutronique
  - Imagerie
  - Calorimétrie
- **But**
  - Obtenir une activité ou des données isotopique

“ Mesure n'altérant pas l'intégrité physique l'objet à mesurer ”

# Détecteurs à ionisation

## Principe de fonctionnement

### • Composition

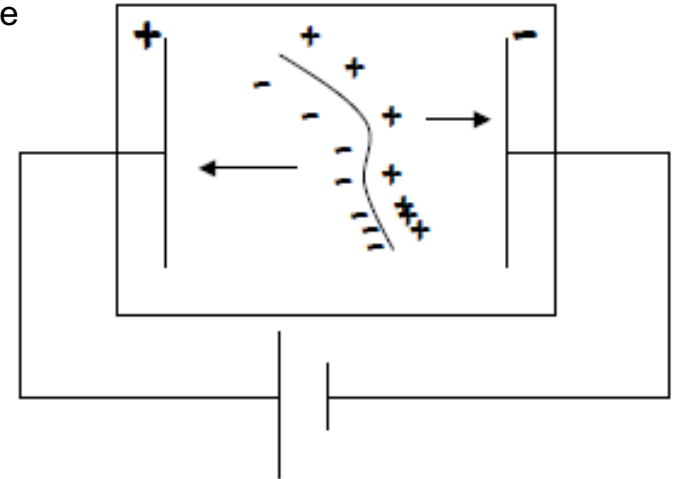
- Le détecteur comporte **une enceinte qui contient un milieu ionisable** (généralement un gaz ou un mélange de gaz)
- **2 électrodes** entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel

### • Principe physique

- Les particules à détecter produisent des ionisations dans le gaz = charges positives (ions) et négatives (électrons).
- Le champ électrique permet de séparer et de collecter les charges → Signal électrique

### • Type

- chambre d'ionisation,
- compteur Geiger-Müller,
- compteur proportionnel,
- chambre proportionnelle
- ,...



# Détecteurs à ionisation

## Ionisation

Le détecteur comporte **une enceinte qui contient un milieu ionisable** (généralement un gaz ou un mélange de gaz)

Le nombre de paires électron-ions créées correspond à l'énergie déposée par la particule divisée par l'énergie moyenne pour créer une paire électron-ion (notée  $W$ ) :

$$n^+ = E/W$$

$W$  est indépendante de l'énergie de la particule et elle est supérieure à l'énergie d'ionisation d'un atome,  $\varepsilon^+$ , car seule une partie de l'énergie est déposée sous forme d'ionisations.

Dans les gaz,  $W$  est de l'ordre de 30 eV

# Détecteurs à ionisation

## Dérive des charges

Sous l'**effet du champ électrique** appliqué entre les électrodes, les charges vont dériver en directions opposées : les électrons vers l'anode, les ions vers la cathode.

La **vitesse de dérive** dépend directement du champ électrique et de la pression du gaz. La vitesse de dérive des électrons est typiquement 1 000 fois supérieure à celle des ions.

Par exemple, dans l'Argon à 1 bar et sous un champ de 1kV/cm,  $\approx 50$  mm/ $\mu$ s  
Au cours de la dérive, une partie des électrons peuvent être captés par des molécules neutres, on parle **d'attachement** des électrons.

Cela pose problème car il y a perte de charge et l'énergie mesurée sera plus faible que l'énergie réellement déposée. Surtout à craindre avec l'oxygène et la vapeur d'eau → **importance de la pureté du gaz**

Les électrons peuvent aussi se **recombinaer** avec les ions positifs. Probabilité plus grande dans les zones à forte densité de charges et lorsque le champ électrique est plus faible.

# Détecteurs à ionisation

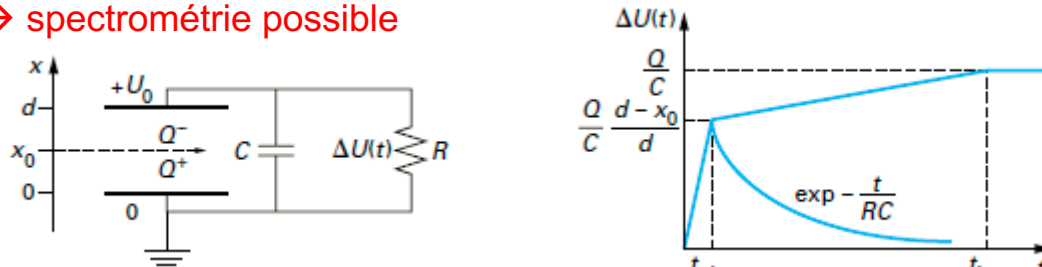
## Courant d'ionisation

Le déplacement des ions et des électrons vers les électrodes donne naissance à un **courant induit** sur les électrodes. Le courant prend naissance dès que les électrons et ions commencent à migrer et s'annule lorsque toutes les charges sont collectées.

**Mode continu** : si une chambre d'ionisation est soumise à une irradiation constante, le taux de création des paires ions-électrons compense exactement le taux d'ions-électrons collectés. **Le courant d'ionisation est alors la mesure directe du taux de création ions-électrons** dans la chambre et donc de l'énergie déposée par unité de temps → **débitmètre**

Toutes les charges contribuent au signal.

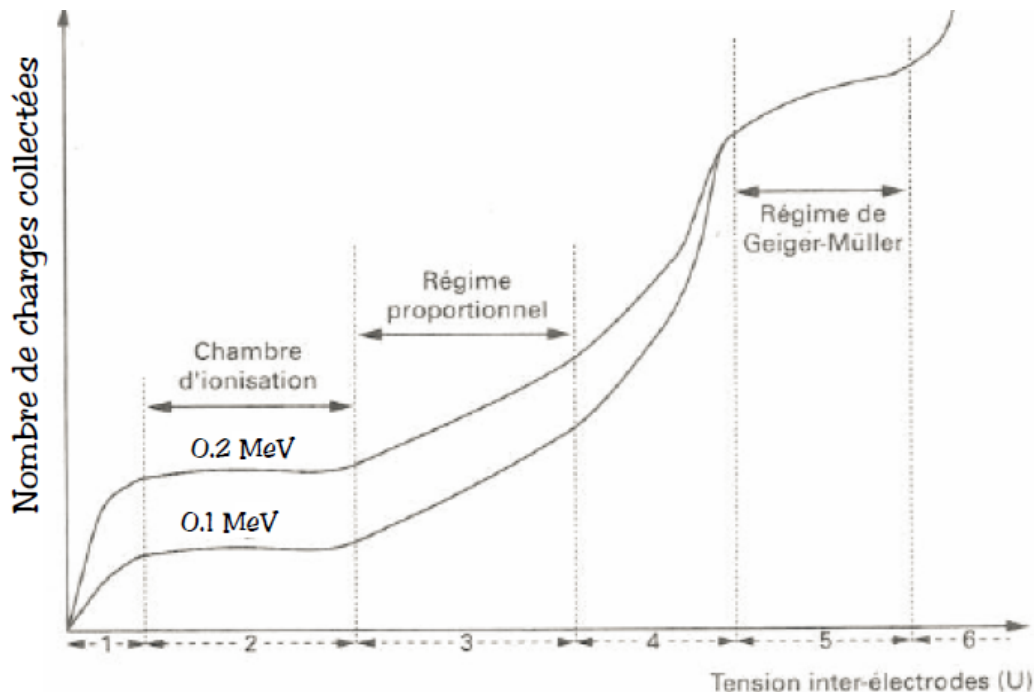
**Mode impulsion** : nécessité d'un temps de réponse rapide, seul les électrons contribuent au signal. S'il n'y a pas de recombinaison, la hauteur des impulsions est proportionnelle à l'énergie déposée → **spectrométrie possible**



# Détecteurs à ionisation

## Amplification

En augmentant la tension appliquée entre les électrodes, il est possible de multiplier le nombre de charges. On parle d'amplification. On peut identifier plusieurs régimes de fonctionnement :





# Détecteurs à ionisation

## Comparatif

Le choix du type de détecteur à ionisation se fait en fonction du besoin

Détecteurs	Particules détectées	Temps mort ( $\mu\text{s}$ )	Taux de comptage maximum conseillé ( $\text{i.s}^{-1}$ )
Chambre d'ionisation	Gamma, X Alpha, Bêta si fenêtres minces	1 à 10	$10^4$ à $10^5$
Compteur proportionnel	Alpha, Bêta, X	1 à 10	$10^4$ à $10^5$
Compteur de Geiger-Müller	Bêta, Gamma, X	100	$10^3$

# Détecteurs à ionisation

## Quelques données pratiques

Type	Principales Caractéristiques	Domaine d'application	Exemples
<b>Chambre d'ionisation</b>	Simplicité Signal faible Volume variable Fonctionnement possible suivant la technologie en modes impulsion, courant ou fluctuation	Radioprotection Dosimétrie Pilotage réacteurs	Balise de surveillance Babyline (débitmètre portable) Chambre X ou $\gamma$ (radiothérapie) Chambre à fission ou dépôt de bore (pilotage réacteurs)
<b>Compteur proportionnel</b>	Bonne sensibilité Signal élevé Souvent en mode impulsion	Radioprotection Spectrométrie X Pilotage réacteurs	Contrôleurs mains-pieds Mesure d'activité d'aérosols Compteur à dépôt de bore ou BF3 ou $^3\text{He}$ Débitmètre neutrons portables BF3
<b>Compteur Geiger-Müller</b>	Tau de comptage limité Pas de spectrométrie Détecteur simple Sensibilité élevée	Radioprotection Prospection d'uranium	Appareils portables d'alerte à seuil réglables Appareils portables de contrôle de contamination (sonde $\beta$ , sonde $\alpha$ )

# Détecteurs à ionisation

## Quelques exemples

**Babyline**  
Chambre d'ionisation



**Radiamètre AD5 6150**  
Geiger-Muller



**Sonde SBM-2D**  
Geiger-Muller



# Détecteurs à scintillation

## Principe de fonctionnement

### • Composition

- Le détecteur comporte **un milieu scintillant** → **C'est le détecteur**
- Un détecteur de photons qui **compte les photons de désexcitation** (souvent un photomultiplicateur)

### • Principe physique

- Les particules à détecter excitent le milieu scintillant qui, en se désexcitant émet un **photon** dont la **longueur d'onde** est **caractéristique** du détecteur.
- On parle de **fluorescence** lorsque l'émission est immédiate ( $< 1 \mu\text{s}$ ) ou de **phosphorescence** lorsqu'elle est retardée ( $> 1 \mu\text{s}$  jusqu'à 1 min)
- Le signal capté par un photomultiplicateur qui transforme le photon en signal électrique
- Le réglage du gain permet de créer une fonction proportionnelle entre l'énergie déposée et le signal de sortie

### • Type

- Inorganique : cristaux (NaI, BGO)
- Organique : cristaux liquides, plastiques (COMO 170, ...)
- Gaz Rares

“ Le rayonnement ionisant excite le scintillateur qui émet un photon transformé par un photomultiplicateur ”

# Détecteurs à scintillation

## Paramètres utiles

- **Energie nécessaire pour créer un photon de scintillation**

- Par exemple, NaI (TI) : 25 eV, anthracène : 60 eV, plastique : 100 eV, BGO : 300 eV ;

- **Rendement de scintillation**

- Rapport de l'énergie émise sous forme de photons de scintillations et de l'énergie absorbée.
- Par exemple, le NaI (TI) a un rendement de scintillation d'environ 13 %,
  - Émission d'environ 43 000 photons de 3 eV par MeV absorbés.

- **Spectre d'émission de lumière**

- Il faut s'assurer que la longueur d'onde d'émission soit adaptée à la fenêtre d'entrée du capteur de la chaîne de mesure

- **temps de décroissance de la scintillation**

- **pouvoir d'absorption des rayonnements**

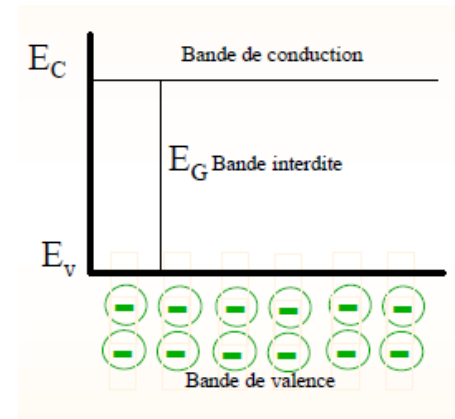
- **transparence à sa propre scintillation**

- En général, la longueur d'onde d'émission est plus longue que la longueur d'onde d'absorption ( décalage de Stokes).

# Détecteurs à scintillation

## Les scintillateurs inorganiques

- Les scintillateurs utilisant des cristaux inorganiques sont parmi les plus répandus et pratiquement les seuls retenus en spectrométrie  $\gamma$ .
- Il s'agit en général de **cristaux d'iodures alcalins**, les plus courants sont l'iodure de sodium (**NaI**) ou bien des composés minéraux comme le germanate de bismuth (**BGO**).
- Le **mécanisme de scintillation** est lié à la **structure cristalline** du milieu.
- Dans un réseau cristallin, les niveaux d'énergie des électrons se distribuent en bandes permises séparées par des bandes «interdites». La dernière bande permise remplie est appelée bande de « valence ». Dans une structure cristalline parfaite, **aucun électron ne peut se placer dans la bande interdite** entre cette bande de valence (électrons liés à un atome du cristal) et la bande de conduction (électrons non liés à un atome en particulier).
- L'énergie apportée par une particule incidente permet aux électrons de la bande de valence d'atteindre la bande de conduction, normalement vide.
- La **différence d'énergie** entre ces deux bandes est typiquement de quelques eV => **photons visibles et UV**



# Détecteurs à scintillation

## Les scintillateurs inorganiques

- **Avantages**
  - densité élevée (bonne absorption des rayonnements) et
  - numéro atomique Z élevé (effet photoélectrique important)
  - Pas besoin de refroidissement
  - Système portable
- **Inconvénients**
  - Résolution de qualité moyenne pour la spectrométrie

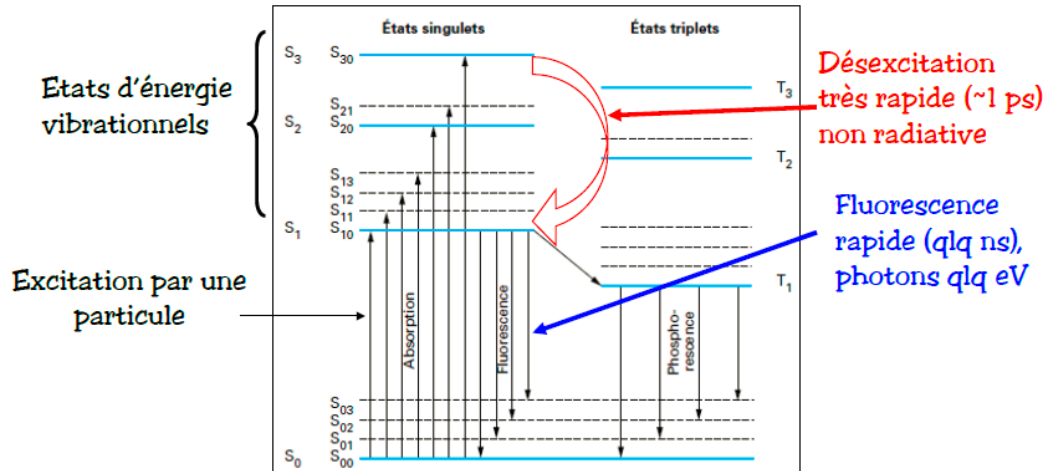


# Détecteurs à scintillation

## Les scintillateurs organiques

### • Généralités

- Ce sont des composés aromatiques (formés à partir du cycle benzénique). Dans ces milieux scintillants, le mécanisme de fluorescence est lié à la structure même des molécules et ne dépend pas de l'état physique du matériau, ce qui est très différent des scintillateurs inorganiques (le NaI ne scintille qu'à l'état cristallin).





# Détecteurs à scintillation

## Les scintillateurs organiques

Avec la plupart des matériaux organiques, l'énergie d'excitation subit de très nombreux transferts d'une molécule à l'autre avant que la désexcitation n'intervienne.

Cela peut être mis à profit en utilisant des mélanges de deux composés où **un matériau scintillant est dissous dans un solvant** qui n'a pas cette propriété.

Parfois un troisième composant est ajouté pour jouer le rôle de « **déplaceur** » de **longueur d'onde (wavelength)**. Il s'agit d'un composé qui réémet de la lumière de longueur d'onde plus grande (énergie plus faible) que celle absorbée. Cela peut être intéressant pour se trouver dans un domaine de longueur d'onde pour lequel le solvant est moins absorbant et pour une meilleure efficacité de détection des photons.

# Détecteurs à scintillation

## Les scintillateurs organiques

Il existe de nombreux types de scintillateurs organiques, solides ou liquides. Essentiellement constitués d'atomes C et H, ils ont une efficacité  $\gamma$  moins bonne (cela dépend du volume utilisé) et sont surtout utilisés pour la détection des particules chargées (en particulier les  $\beta$ ) mais aussi des neutrons. Leur temps de réponse très rapide est bien adapté au mode de fonctionnement en impulsions.

- **Cristaux organiques :**

- l'anthracène et le stilbène sont les deux seuls cristaux utilisés. Ils sont fragiles et les volumes réalisables sont faibles. Ils ne sont plus guère utilisés actuellement.

- **Scintillateurs liquides :**

- ils sont obtenus en dissolvant un scintillateur organique dans un solvant approprié (transfert d'énergie, transparence, coût...) comme le xylène ou le toluène. On peut ainsi obtenir des scintillateurs de très gros volume.

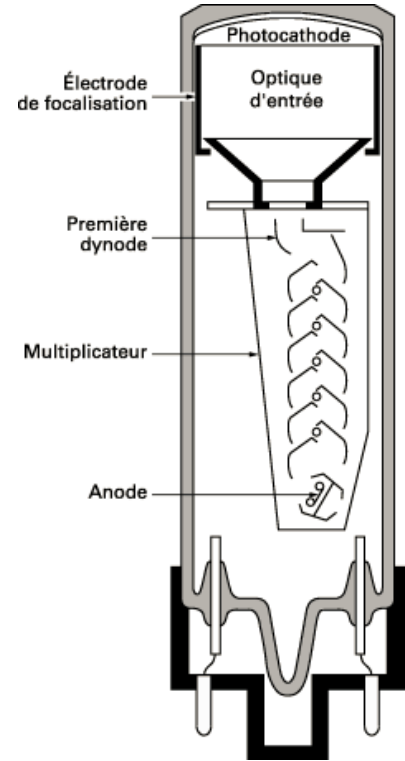
- **Scintillateurs plastiques :**

- si le scintillateur organique est dissous dans un matériau polymérisable (styrène), on peut obtenir des scintillateurs plastiques de forme et de taille quelconque. Ces scintillateurs disponibles pour un faible coût sous forme de barres, de cylindres ou de planches de taille standard sont bien adaptés pour la détection des électrons.

# Détecteurs à scintillation

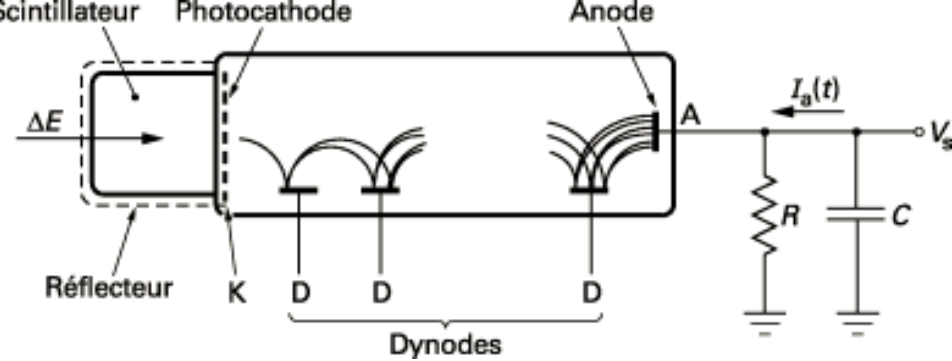
## Le photomultiplicateur (1/2)

- **Le tube photomultiplicateur (PM) est un tube à vide qui comprend :**
  - **Une fenêtre d'entrée** en quartz ou en verre qui laisse passer la lumière
  - **une photocathode** (à un seul métal alcalin oxydé = Cs<sub>3</sub>SbO ou bialcalin : Na<sub>2</sub>K<sub>2</sub>SbCs) déposé sur la face intérieure de la fenêtre d'entrée : les photons de fluorescence émis par le scintillateur lui arrachent des électrons par effet photoélectrique → photoélectron
  - **Une série de dynodes** : électrodes portant un revêtement susceptible d'émettre des électrons et portés à des potentiels croissants. Chaque dynode libère 2 à 3 électrons par électron reçu → multiplication des électrons émis par la photocathode.
  - **Une anode** qui recueille les électrons issus de la dernière dynode = signal électrique proportionnel au nombre de photoélectrons initiaux → impulsion de tension proportionnelle à l'intensité lumineuse de la scintillation .



# Détecteurs à scintillation

## Le photomultiplicateur (2/2)



- **PM couplé optiquement au scintillateur :**

- En général par une plaque de lucite, un film d'huile siliconée, un guide de lumière en quartz ou en plexiglas qui assurent la transmission du signal lumineux sans variation d'indice de réfraction.

- **On caractérise un PM par :**

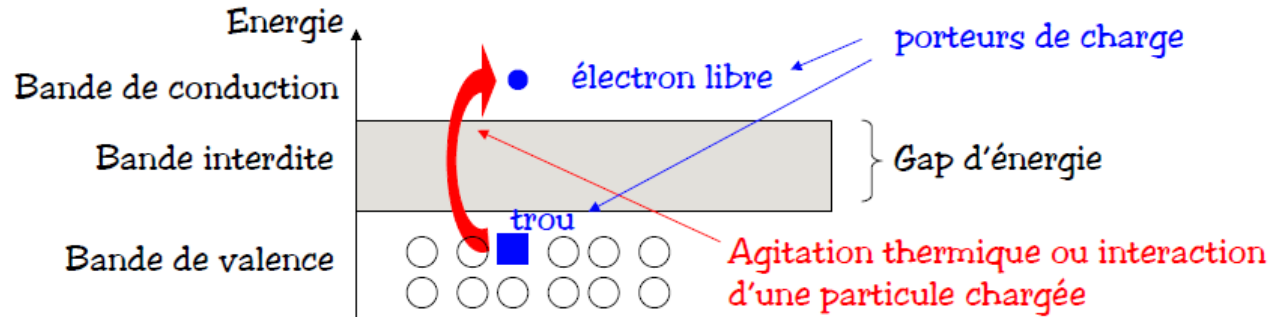
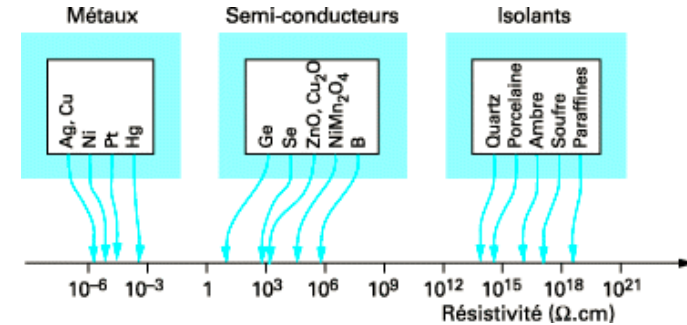
- Sa courbe de réponse spectrale (doit être adaptée à la courbe d'émission de fluorescence du scintillateur);
- Le rendement quantique : rapport du nb d'électrons émis par la photocathode au nb de photons arrivant sur la photocathode. Les rendements quantiques sont généralement compris entre 15 et 25%;
- Le gain : rapport du nb d'électrons collectés au niveau de l'anode au nb d'électrons émis par la photocathode.

# Détecteurs semi conducteur

## Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

- **Le semi-conducteur:**

- Matériaux intermédiaires entre isolant et conducteur
- Si on utilise la représentation de la théorie des bandes d'énergie, l'écart entre la bande de valence et la bande de conduction est suffisamment faible pour que les électrons puissent facilement passer dans la bande de conduction



# Détecteurs semi conducteur

## Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

- **Le semi-conducteur:**

- Les semi-conducteurs les plus utilisés (Si, Ge) sont des éléments tétravalents

Caractéristiques	Si	Ge
Numéro atomique Z	14	32
Nombre de masse A	28,09	72,60
Masse volumique (g.cm <sup>-3</sup> ) à 300 K	2,33	5,32
Constante diélectrique	12	16
Gap en énergie (eV) à 300 K	1,115	0,665
Gap en énergie (eV) à 0 K	1,165	0,746
Densité intrinsèque de porteurs (cm <sup>-3</sup> ) à 300 K	1,5 10 <sup>10</sup>	2,4 10 <sup>13</sup>
Résistivité intrinsèque (Ω.cm) à 300 K	2,3 10 <sup>3</sup>	47
Mobilité des électrons (cm.s <sup>-1</sup> /V.cm <sup>-1</sup> ) à 300 K	1350	3900
Mobilité des trous (cm.s <sup>-1</sup> /V.cm <sup>-1</sup> ) à 300 K	480	1900
Mobilité des électrons (cm.s <sup>-1</sup> /V.cm <sup>-1</sup> ) à 77 K	2,1 10 <sup>4</sup>	3,6 10 <sup>4</sup>
Mobilité des trous (cm.s <sup>-1</sup> /V.cm <sup>-1</sup> ) à 77 K	1,1 10 <sup>4</sup>	4,2 10 <sup>4</sup>
Énergie de création d'une paire électron-trou (eV) à 300 K	3,62	2,80
Énergie de création d'une paire électron-trou (eV) à 77 K	3,76	2,96

- Une particule qui dépose 3 MeV crée  $\sim 1 \times 10^6$  paires électron-trou  
→ **indélectable car négligeable devant la densité intrinsèque de porteurs**

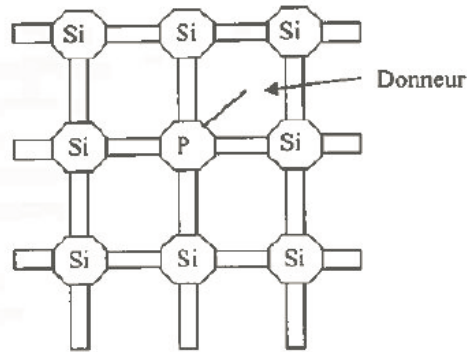
- En présence d'impuretés dans le cristal, le nombre de porteurs est encore plus grand (car le gap en énergie est beaucoup plus faible  $\sim 0.01\text{eV}$  à  $\sim 0.1\text{eV}$ )  
→ **très grande pureté et utilisation des jonctions PN**

# Détecteurs semi conducteur

## Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

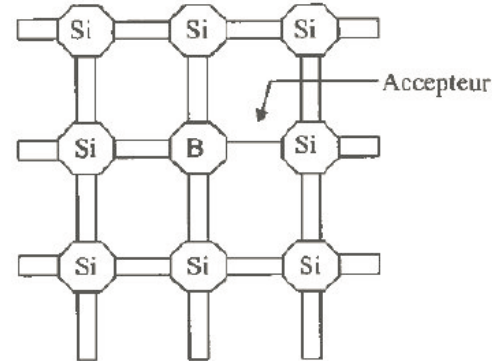
- **Le semi-conducteur:**

- Il est possible d'ajouter volontairement des impuretés dans le semi-conducteur. On parle de «dopage » de type **P** si les impuretés sont trivalentes (elles acceptent un électron et donc créent un trou) et de type **N** lorsqu'elles sont pentavalentes (apportent un électron).



Cristal Si ou Ge @ Atome Pentavalent (P,Ar)

Conductibilité due aux électrons. S.C. de type N



Cristal Si ou Ge @ Atome Trivalent (Al,B)

Conductibilité due aux Trous. S.C. de type P.

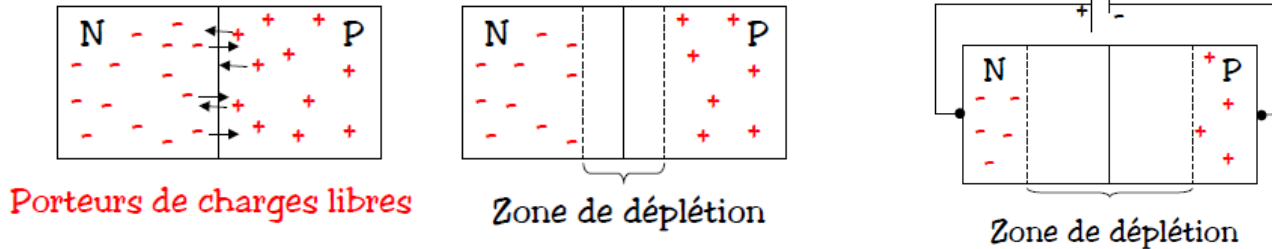
**N.B.** : Un semi-conducteur peut être globalement neutre et contenir des porteurs de charge libres (électrons dans la zone de conduction et trous dans la bande de valence)

# Détecteurs semi conducteur

## Qu'est-ce qu'un semi-conducteur ?

### • Les jonctions PN:

- Si on met en contact un semi-conducteur de type P et un de type N, les électrons libres situés du côté N migrent vers la zone P (et inversement pour les trous) => il se crée à la frontière une **zone de déplétion** (= une zone désertée par les porteurs de charge libres).
- On parle parfois de zone de charge d'espace car elle est constituée de deux zones chargées électriquement (contrairement au reste du semi-conducteur N et du P qui sont globalement neutre).



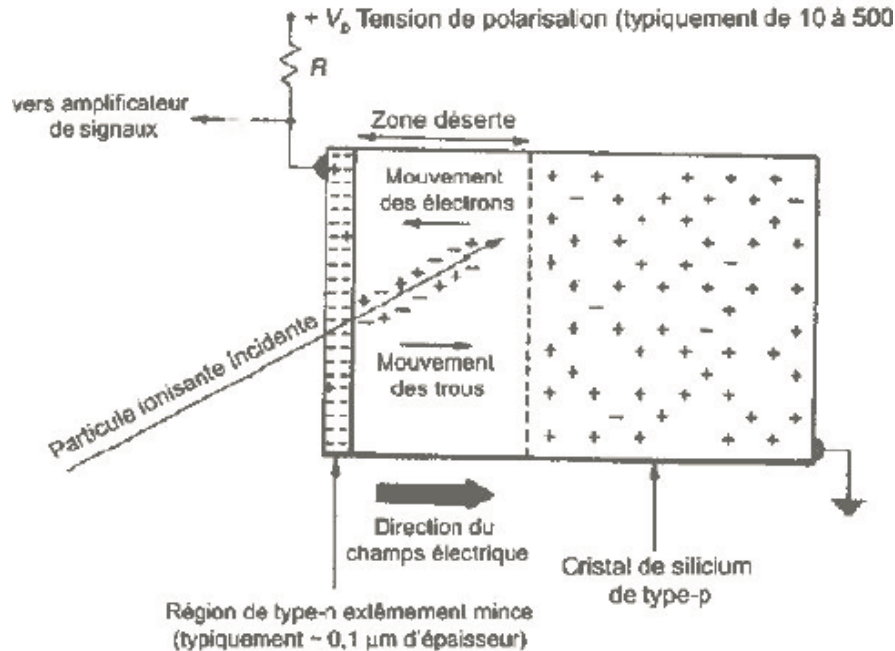
- Si on polarise la jonction PN en inverse, on agrandit la zone de déplétion (principe de la diode) qui agit comme un isolant (courant de fuite faible).
- Il existe différents types de jonction PN : jonction à barrière de surface, jonction diffusée, implantation ionique, jonction à compensation totale.



# Détecteurs semi conducteur

## Détection de particules

Un détecteur à semi-conducteur s'apparente à une chambre d'ionisation solide : les charges créées dans la zone de déplétion par un rayonnement ionisant sont séparées sous l'action d'un champ électrique et le courant induit est mesuré.



L'amplitude du courant est relié au nombre de paires électron-trou créées et donc à l'énergie

→ Spectrométrie possible

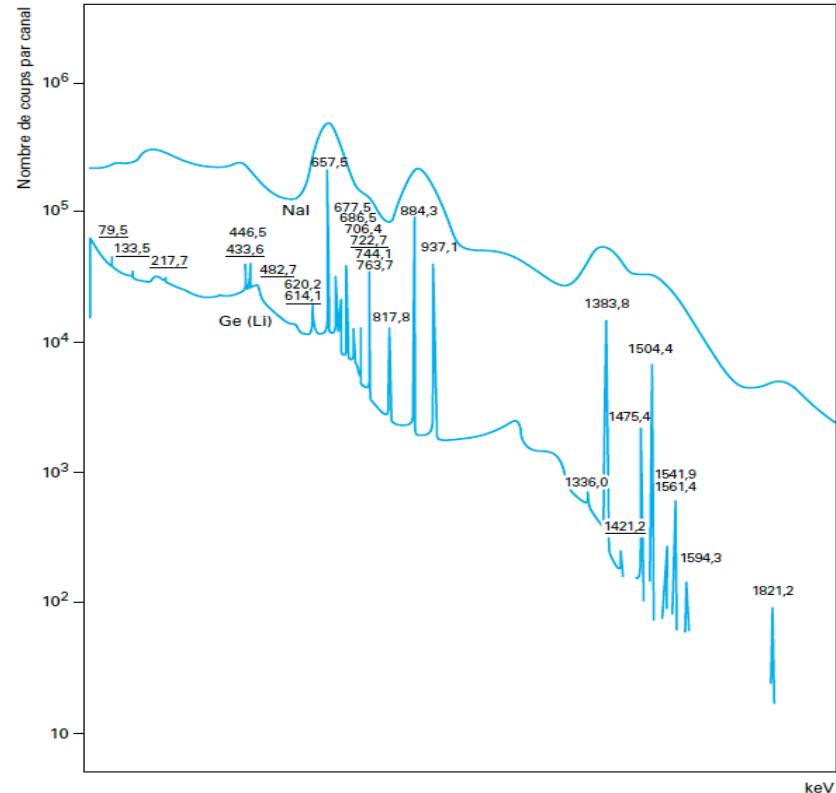
# Détecteurs semi conducteur

## Résolution en énergie

La **résolution en énergie** est nettement meilleure que celle d'une chambre à ionisation ou celle d'un scintillateur.

Cela vient du fait que l'énergie nécessaire pour la création d'une paire électron-trou est nettement plus faible

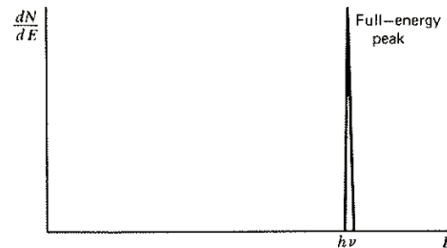
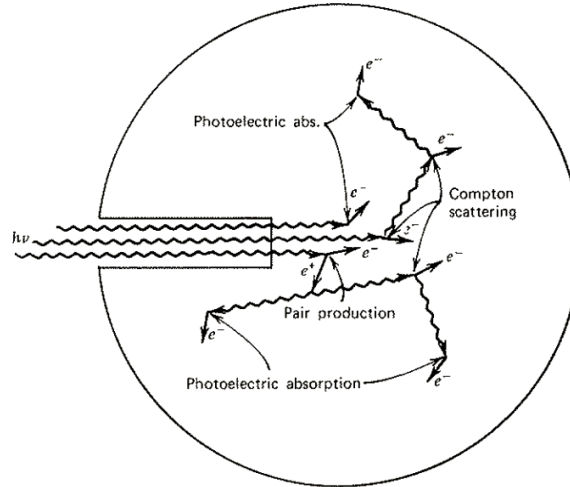
→ Pour une énergie donnée, un plus grand nombre de paires est créé



# Détecteurs semi conducteur

## Influence de la taille du détecteur

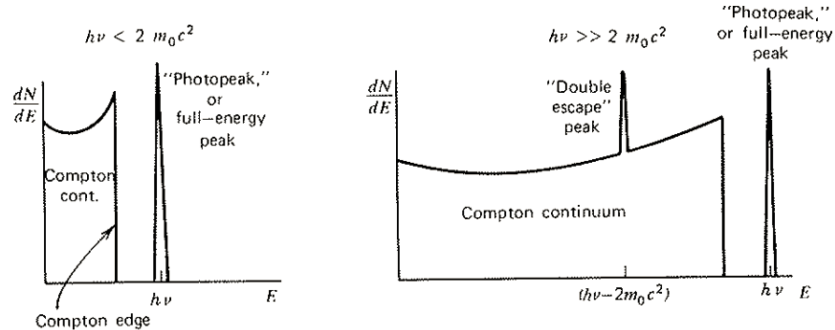
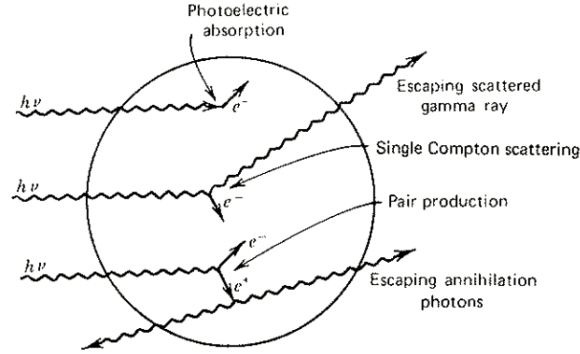
- **Grand détecteur**



# Détecteurs semi conducteur

## Influence de la taille du détecteur

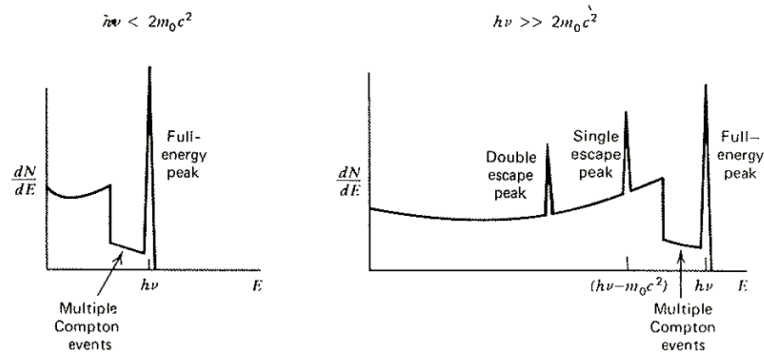
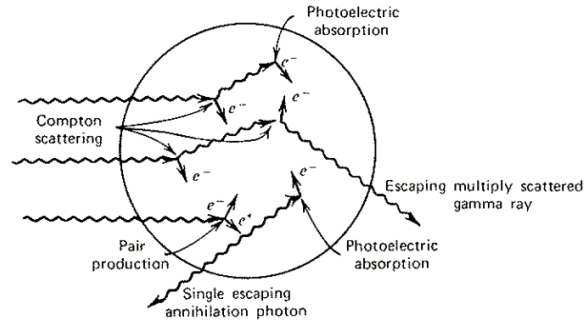
- **Petit détecteur**



# Détecteurs semi conducteur

## Influence de la taille du détecteur

- **Moyen détecteur**



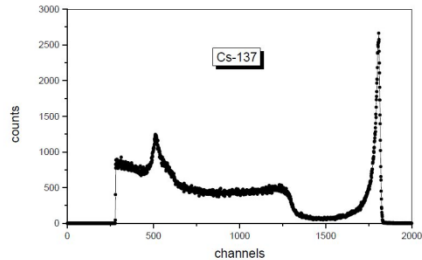
# Détecteurs semi conducteur



## Exemples

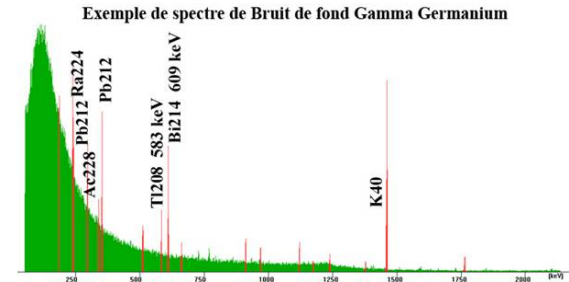
### ● Détecteur CdZnTe

- Tellure de cadmium dopé au zinc
- Semi conducteur utilisé pour la spectrométrie
- Résolution de l'ordre de 2%
- Traine spécifique due au retard sur la collecte des charges
- Utilisation à température ambiante



### ● Détecteur GeHP

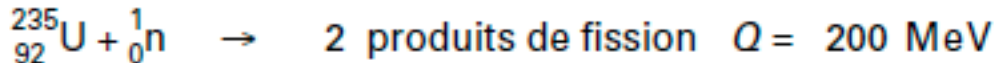
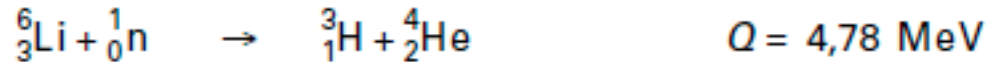
- Germanium HyperPur
- Semi conducteur utilisé pour la spectrométrie
- Résolution de l'ordre de 0,2%
- Utilisation refroidi idéalement à 77K
  - Pourquoi ? Indice : gap entre bande de valence et conduction très faible < 3eV



# Neutronique

- **Principe général**

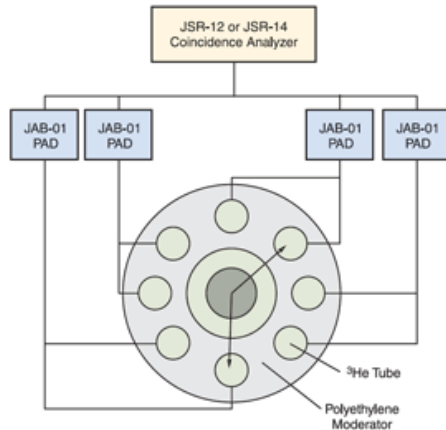
- Les neutrons étant neutres, ils ne sont pas directement ionisants.
- Les neutrons thermiques interagissent avec les noyaux du milieu soit par diffusion élastique, soit par capture.
- Il n'est pas possible de les détecter via les diffusions élastiques car l'énergie transmise aux noyaux est alors trop faible. On utilise donc la capture du neutron, sur différents noyaux cibles, qui conduit au recul des produits de réaction (= proton ou noyaux plus lourds) qui ont suffisamment d'énergie pour être détectés.
- Les principales réactions utilisées sont :



# Neutronique

- **Type de mesures**

- Comptage total
  - Étalonnage en fonction des masses dans une configuration donnée
  - Mesure de colis de déchets
  - Mesure de débit de dose neutron
- Comptage en coïncidence (avec carte de datation)
  - Comptage des réactions en multiplicité pour éliminer les parasites
  - Technique complexe
- Mesure neutronique active INA



Poste de mesure  
avec tubes  $^3\text{H}$

CRAMAL mesure de  
DdD neutron

■ CRAMAL





# Imagerie $\gamma$

... un enjeu pour de nombreuses applications !



**Radioprotection  
opérationnelle**



**Démantèlement &  
Assainissement**



**Gestion des déchets**



**Situations  
accidentelles**



**Sécurité Intérieure**



**Contrôles aux  
frontières**

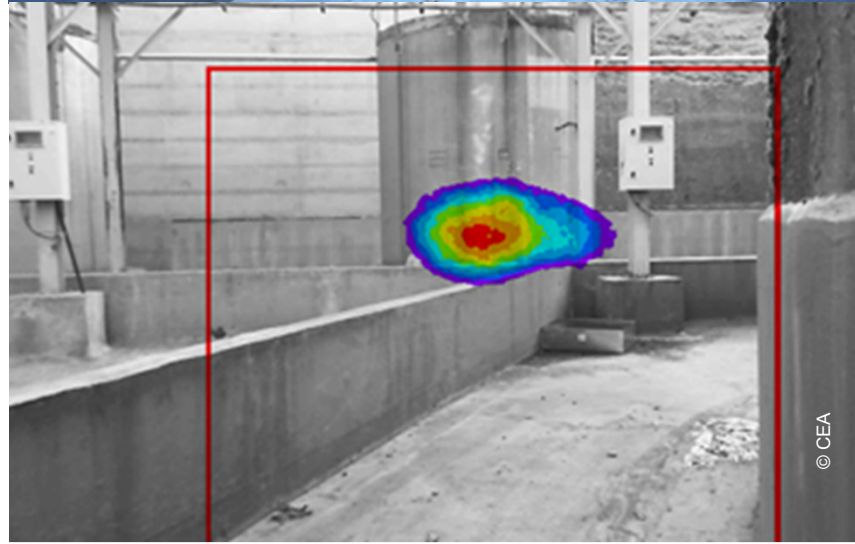


**Radiophysique  
médicale**

# Imagerie $\gamma$

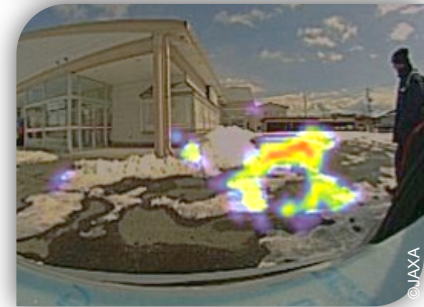
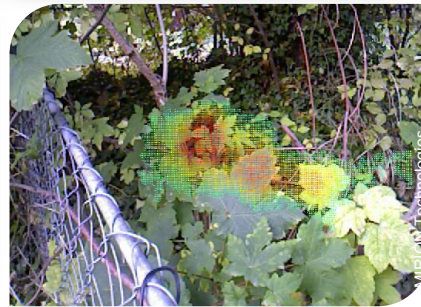
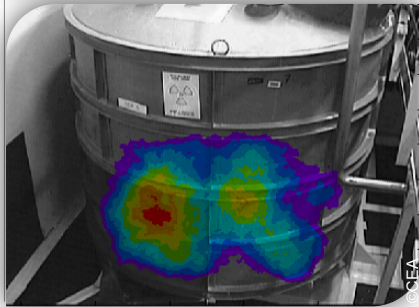
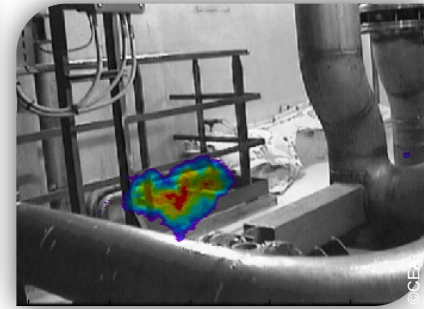
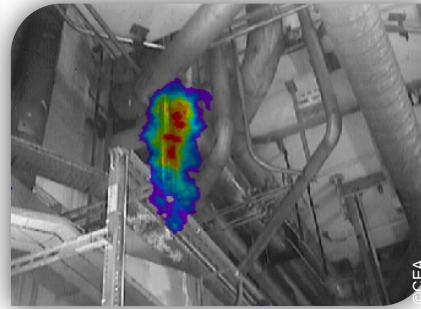
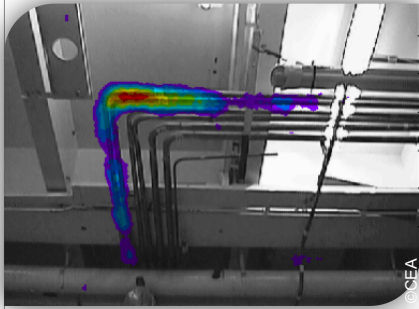
## ... le principe de l'imagerie gamma

- Superposition d'une **image visible** et d'une **image gamma**
- Visualisation **à distance** des points chauds
- Information sur leur **intensité**



# Imagerie $\gamma$

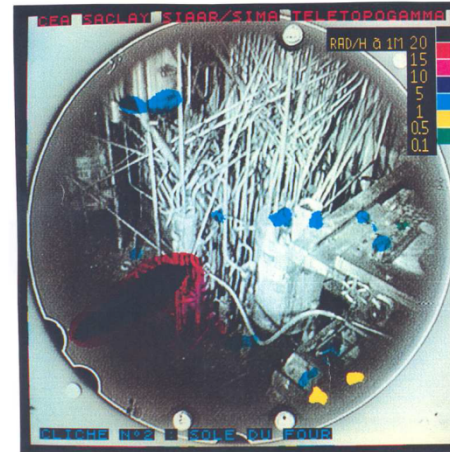
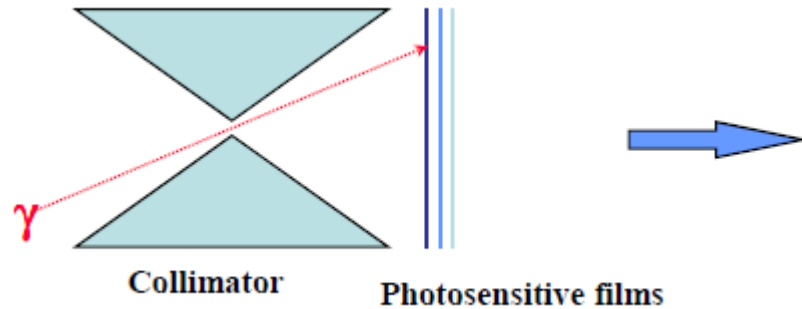
... une méthode validée en situation réelle



# 30 ans d'imagerie $\gamma$

## Les débuts de l'imagerie gamma dans les années 80

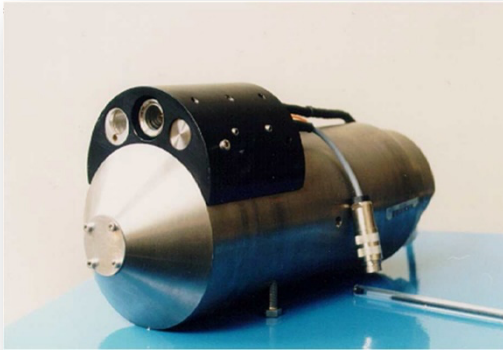
- **Objectif : Eliminer les points chauds en cellules blindées**



CEA Saclay  
SIAAR/SIMAA

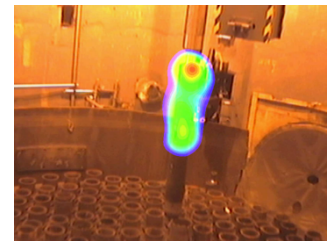
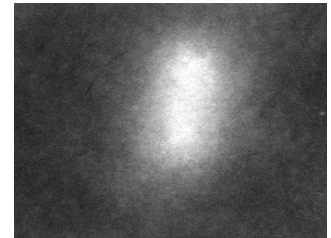
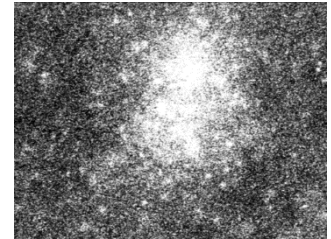
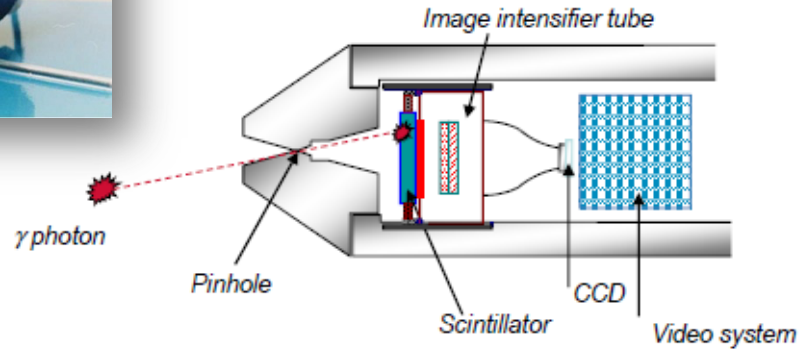
# 30 ans d'imagerie $\gamma$

## ALADIN, l'arrivée du « temps réel »



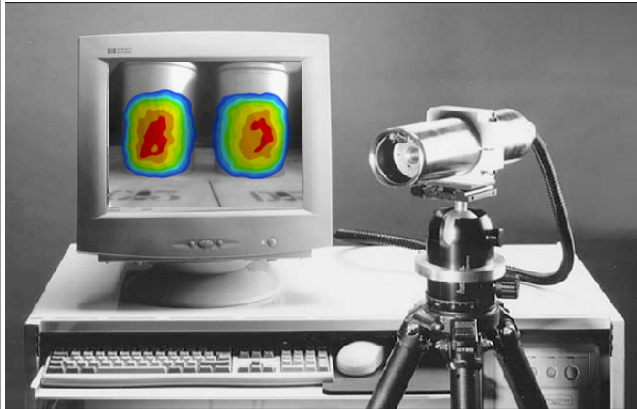
- **Développée au CEA Marcoule**

- Scintillateur
- Sténopé
- CCD



# 30 ans d'imagerie $\gamma$

## CARTOGAM, la première génération industrielle



*O. Gal et al., Nucl. Instr. and Meth A 460 (2001) 138*

- **Transfert industriel à**



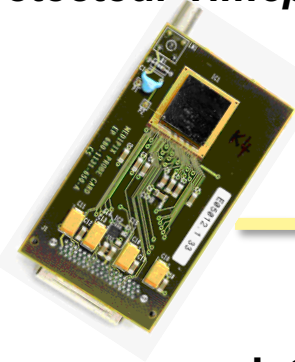
- **Au catalogue au début des années 2000**



# 30 ans d'imagerie $\gamma$

## GAMPIX, la rupture technologique

Détecteur *Timepix*

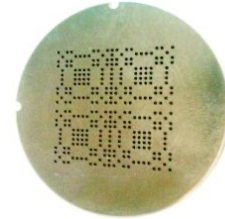


Interface USB



*Prototype CEA*

Masque codé

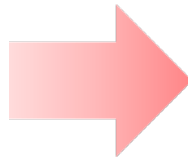


Caméra visible



# 30 ans d'imagerie $\gamma$

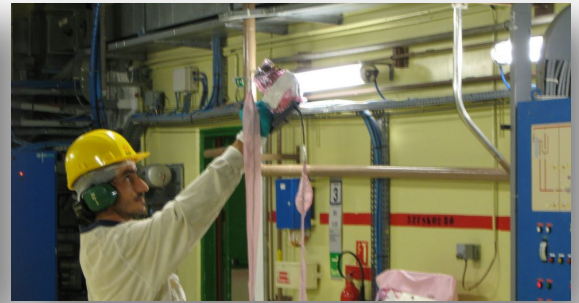
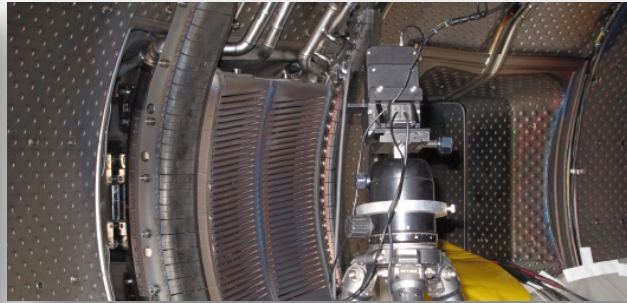
iPIX™, un produit pionnier





# 30 ans d'imagerie $\gamma$

De bonnes occasions d'éprouver les systèmes



# NanoPix, Vers la plus petite caméra gamma du monde

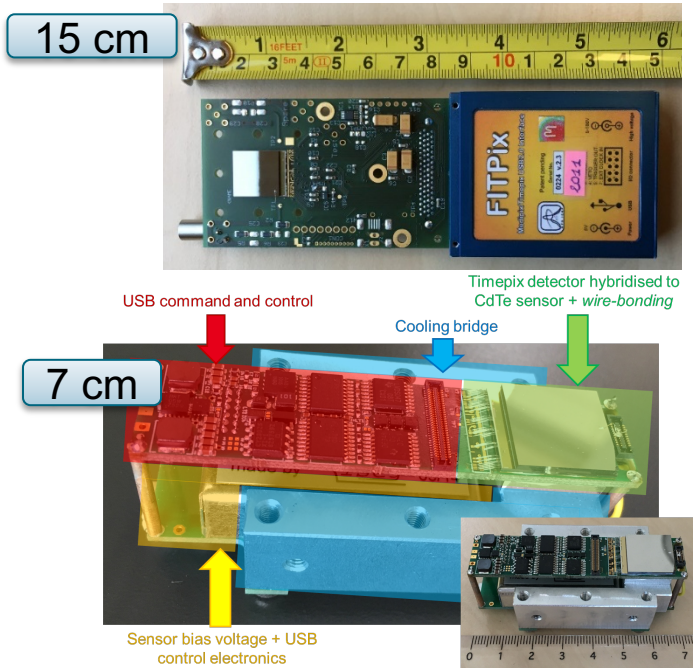
## Un besoin de terrain!

- Dimension compatible avec les passages d'instrumentation à La Hague
- Doit s'inscrire dans un diamètre de 8 cm



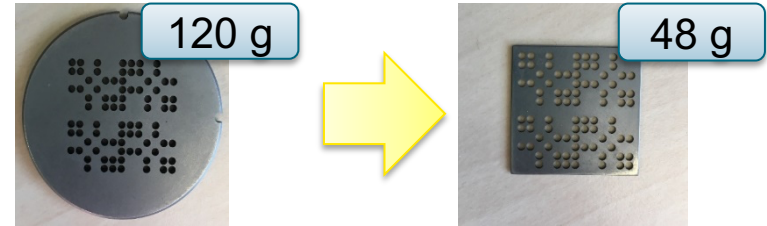
# NanoPix, Vers la plus petite caméra gamma du monde

## Miniaturisation du détecteur

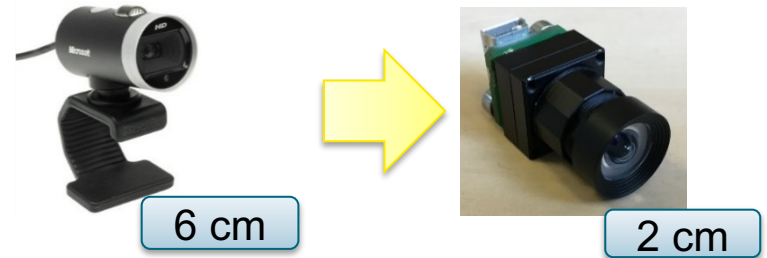


## Miniaturisation des autres briques

### • Collimateur

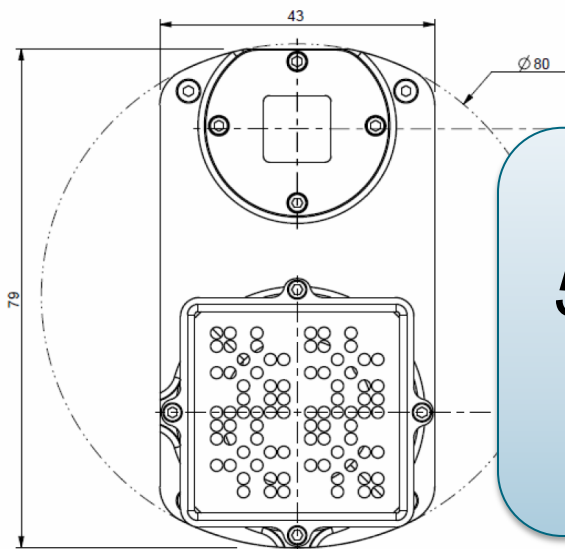


### • Caméra visible

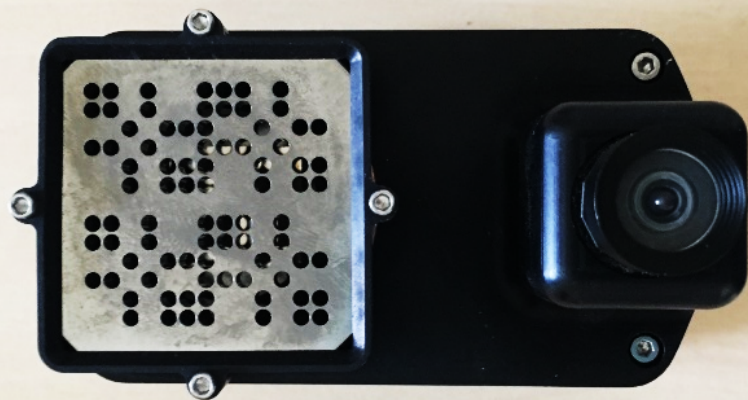


# NanoPix, Vers la plus petite caméra gamma du monde

Un design mécanique ultra-compact



8 cm x  
5,1 cm x  
4,3 cm  
268 g!



# NanoPix, Vers la plus petite caméra gamma du monde

## Une caractérisation fine en laboratoire



Résolution angulaire : **6°**

RN	Activité	Sensibilité @ 1 m
$^{241}\text{Am}$	74 MBq	< 1s
$^{137}\text{Cs}$	33 MBq	60 s
$^{60}\text{Co}$	4,6 MBq	1200 s



Champ de vue : **50°**

Technologie similaire  
à GAMPIX



**PERFORMANCES  
EQUIVALENTES**

# Calorimétrie, un argument de poids

- **Principe**

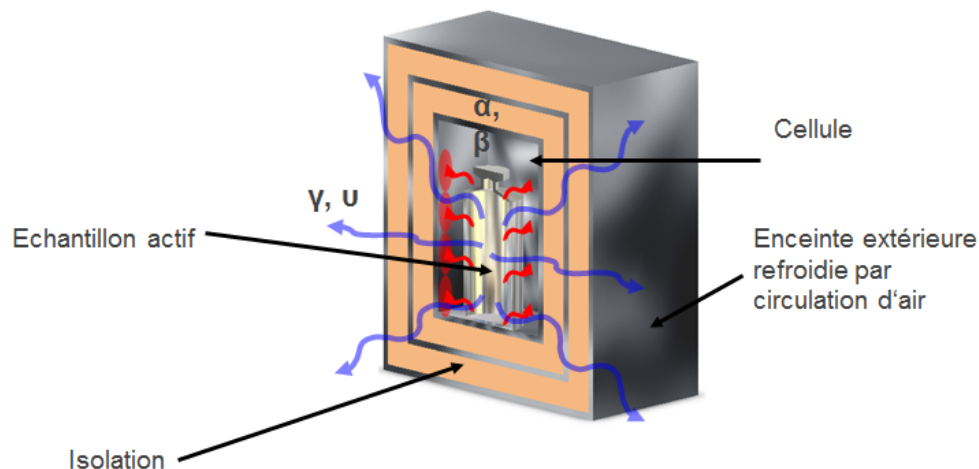
- Mesure de la PUISSANCE THERMIQUE provenant des rayonnements issus de la désintégration des radioéléments

- **Avantages**

- Méthode non destructive (pas de production de déchets)
- Méthode très précise (1% d'incertitude)
- Possibilité d'analyser des échantillons massifs (adapté à la caractérisation de déchets)
- Mesure indépendante de la matrice (réduction des incertitudes et fiabilité du résultat)

- **Inconvénients**

- Volumineux
- Temps de mesure long (plusieurs heures)



“Une incertitude de l'ordre de 1%”

# Calorimétrie, un argument de poids

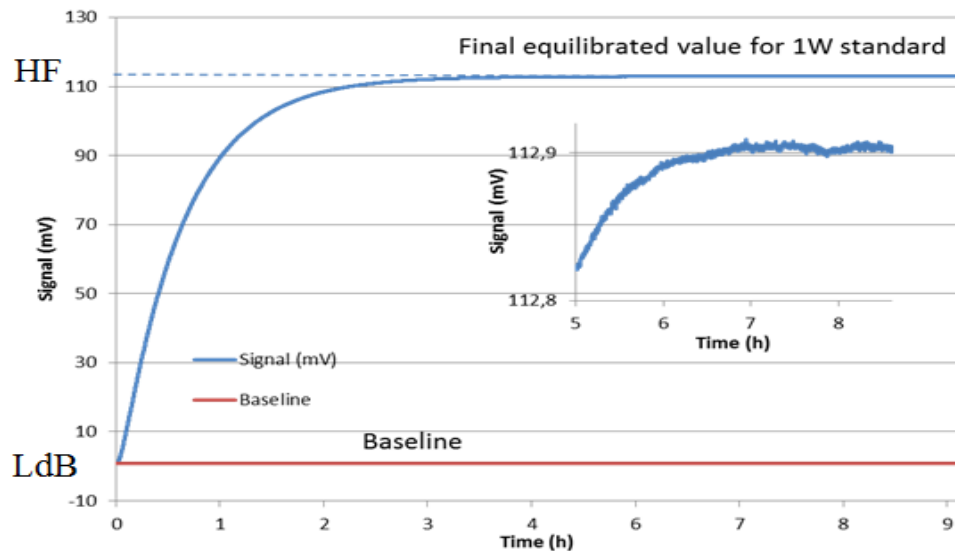
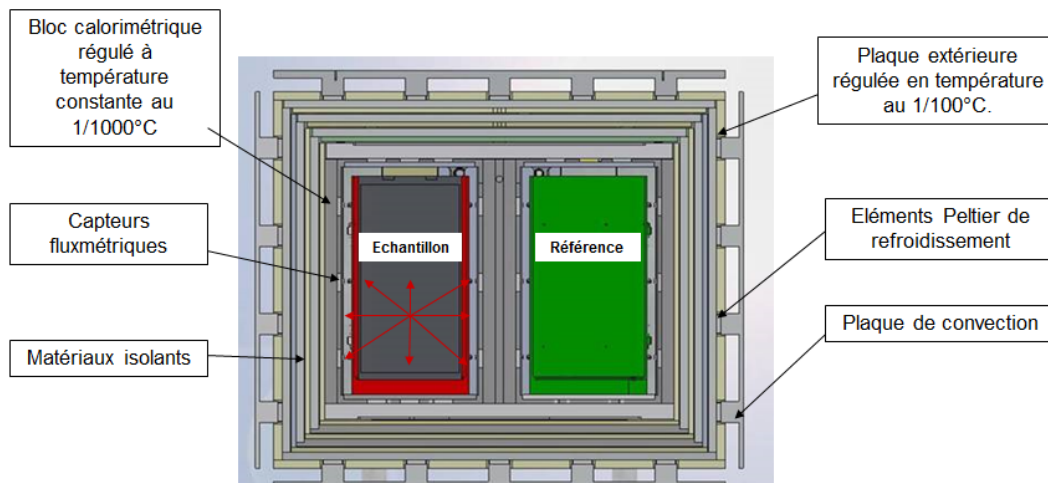
## • Principe physique

- Chaque RN d'un élément chimique possède une puissance thermique spécifique en mW/g
- Ces radionucléides émettent donc une puissance et donc une chaleur
- On cherche à mesurer cette chaleur pour estimer de masse de matière et donc une activité

*Nota : Il est impératif de connaître les ratios entre les radionucléides afin de calculer la bonne activité. Pourquoi ?*

## • Fonctionnement

- Une chambre échantillon
- Une chambre référence
- Conditions identiques entre les chambres
- Attente de l'équilibre thermique
- Comparaison des tensions mesurées entre les deux chambres

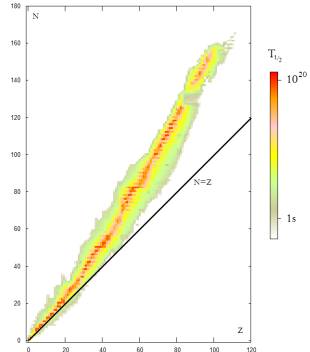


# Calorimétrie, un argument de poids

## • Pourquoi ?

- Chaque RN d'un élément chimique possède une puissance thermique spécifique en mW/g
- Un élément chimique peut exister sous différentes formes avec plus ou moins de neutrons : *les radionucléides*
- Les radionucléides ont tous les mêmes propriétés chimiques
- Les radionucléides n'ont pas les mêmes propriétés radiatives; elles ont des Activités spécifiques  $A_s$  ( $Bq.g^{-1}$ ) différentes (voir base de donnée JEFF)

<b>Pu238f</b>	94	Pu	238	f	8,77E+01	6,3E+11
<b>Pu239f</b>	94	Pu	239	f	2,41E+04	2,3E+09
<b>Pu240f</b>	94	Pu	240	f	6,56E+03	8,4E+09
<b>Pu241f</b>	94	Pu	241	f	1,44E+01	3,8E+12



## • Calcul isotopique

- La masse (m) de Pu et 241Am est calculée à partir de la mesure de puissance thermique de l'échantillon (item) ( $W_{item}$ ) en utilisant la relation suivante:

$$m = \frac{W_{item}}{\sum P_i \times R_i}$$

- $P_i$  est la puissance spécifique de chaque isotope (plutonium et américium)
- $R_i$  est le taux de chaque isotope déterminé par spectrométrie gamma
- La masse  $m_i$  du ième isotope est  $m_i = m \times R_i$



# 03

De la théorie à  
l'application industrielle

## C

**Méthodes destructives**

# Mesures destructives

- **Intérêt**

- Recueillir des données radiologiques précise (5 à 10% d'incertitude) en détruisant partiellement ou totalement de l'échantillon à mesurer

- **Avant tout un peu de chimie séparative**

- Echantillonnage
- Broyage (forme poudre)
- Attaque acide
- ...



- **Mesure**

- Comptage Alpha / Beta
- Spectrométrie Alpha / Gamma
- Scintillation liquide
- Spectrométrie de masse

“ Mesures de précision nécessitant la destruction partielle ou totale de l'échantillon radioactif ”

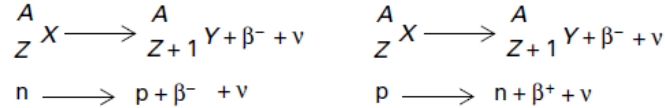
# Scintillation liquide

## • Utilisation

- Mesure des émission  $\beta^+$  et  $\beta^-$ 
  - Séparation chimique
  - Mise en solution
  - Mélange avec un liquide scintillant
  - Mesure

## • Principe physique

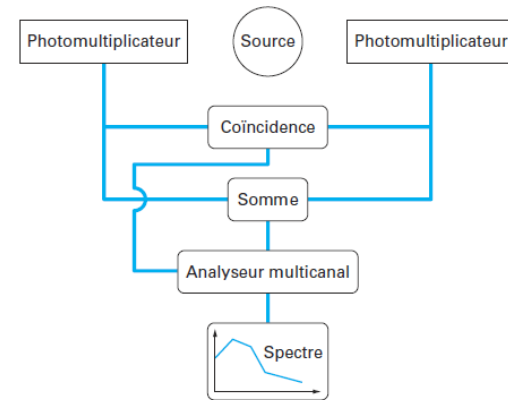
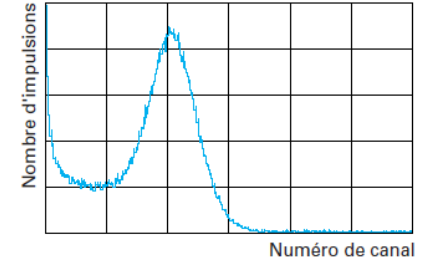
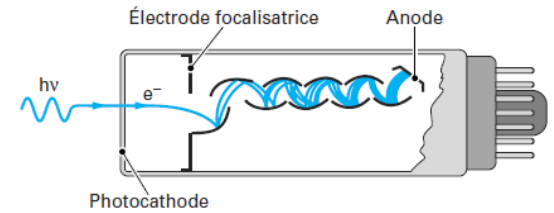
- Les émetteurs  $\beta$  :



- Excitation  $\rightarrow$  Désexcitation (quelques ns)  $\rightarrow$  photons

## • Détecteur

- Scintillateur  $4\pi$
- Efficacité dépend du quenching (mélange chimique permettant de désexciter les molécules avant qu'elles n'interagissent avec le liquide scintillant) : pourquoi ?



# Spectrométrie de masse par ablation laser ICMPS

## • Rappels physiques

- Chaque élément chimique est défini par trois grandeurs :

- X : le nom de l'élément chimique
- Z : le nombre de protons
- A : le nombre de masse : Nombre de protons + électrons



- Les masses des protons et neutrons sont les suivantes :

- Neutron :  $939,565\ 379\ \text{MeV}/c^2$  ou  $1,675 \times 10^{-27}\ \text{kg}$
- Proton :  $938,2720\ \text{MeV}/c^2$  ou  $1,672\ 62 \times 10^{-27}\ \text{kg}$
- La masse de l'élément est donc :  $Zx m_p + (A - Z)x m_n$

## • Spectrométrie de masse

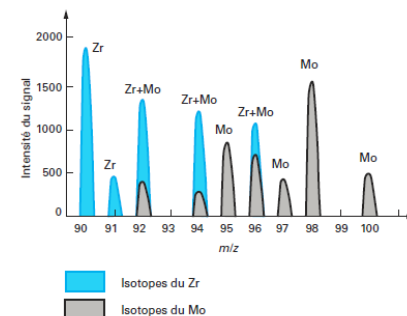
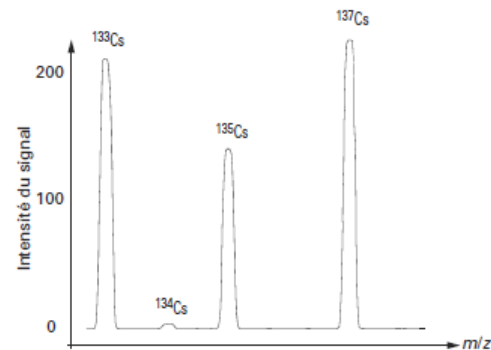
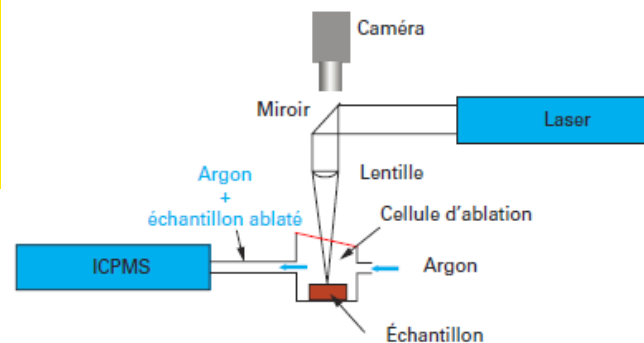
- Production d'ions par bombardement électronique
- Séparation des faisceaux d'ions en fonction de leur rapport Masse / charge

## • Utilisation

- Mesure de la masse de chaque élément chimique dans un échantillon ou un rapport de masse isotopique

## • Difficultés

- Interférences liées à la résolution pour l'isotope



# 04

**Comment les mesures  
sont-elles utilisées dans  
l'industrie nucléaire ?**

# 04

Comment les mesures  
sont-elles utilisées dans  
l'industrie nucléaire ?

# a

**Cartographies**

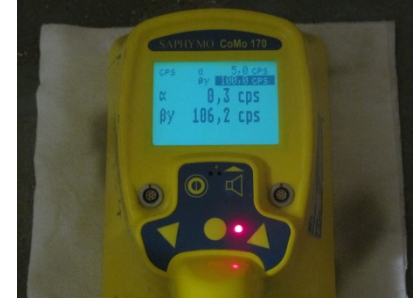
# Cartographies Initiales / Finales

- **But:**

- Faire un état des lieux au début des travaux
- Faire un état des lieux en fin de chantier
  - Fin de chantier
  - Déclassement (  $<0,4 \text{ Bq.cm}^{-2}$  en  $\beta/\gamma$ ,  $<0,04 \text{ Bq.cm}^{-2}$  en  $\alpha$  )
- Contrôles de routines (fréquence dépend su chantier)

- **Matériel utilisé :**

- Contaminamètre
- Radiamètre
- Les modèles utilisés dépendent des besoins installation
  - Gamme en énergie
  - Dynamique de mesure
  - Type de rayonnement mesuré
  - ...

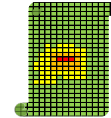
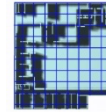


# Cartographies Initiales / Finales

La démarche actuelle consiste à mesurer 100% des surfaces :

• **Les étapes nécessaires sont :**

- montage des échafaudages (>10m de hauteur)
- maillage des surfaces (peinture, cordeaux)
- mesures au contact :
  - 100% des surfaces + recoupement
  - mesures directes des surfaces non planes
  - frottis et mesures
- prises de notes
- scan des notes
- reprise des informations sur Excel
- rédaction des rapports de fin d'intervention



“ Des milliers d’heures pour réaliser des cartographies en désaccord avec les planning chantier ”

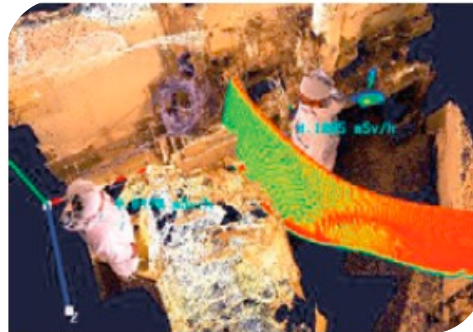


# Cartographies

## Des nouveaux outils avancés

- **Manuela**

- Reconstruction 3D de l'environnement avec la lumière structurée
- Mesure de DdD en même temps
- Cartographie 3D en sortie

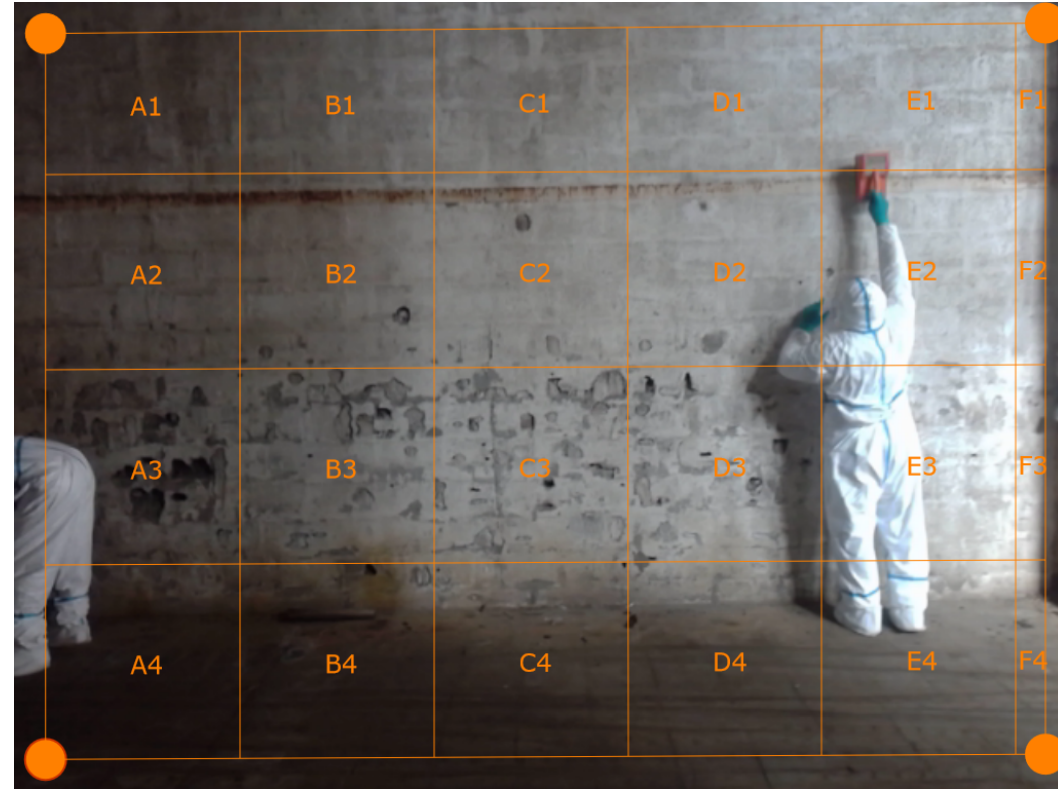


# Cartographies

## Des nouveaux outils avancés

- **Mara**

- Tracé des mailles par réalité augmentée
- Utilisation d'un écran de report poigné pour visualiser les mailles
- Ecriture des résultats de mesures sur puce NFC (traçabilité)



# 04

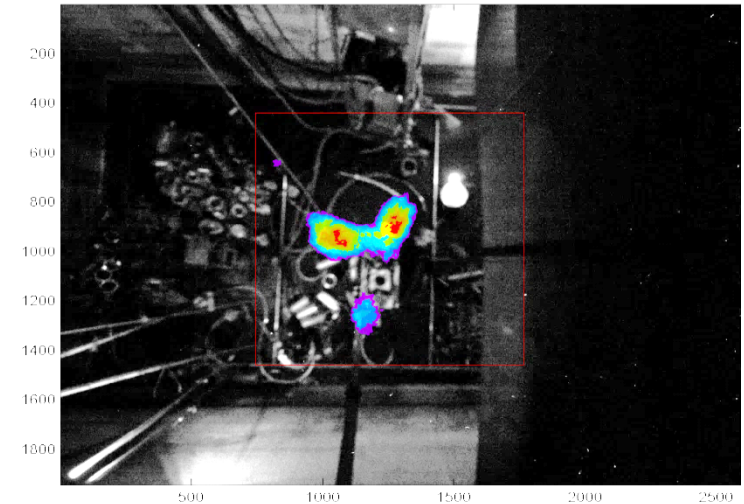
Comment les mesures  
sont-elles utilisées dans  
l'industrie nucléaire ?

# b

Investigations radiologiques

# Investigations radiologiques

- **But:**
  - Identifier les points d'irradiation particulier (point chaud)
  - Mesurer des débits de dose
  - Mesurer le niveau de contamination surfaciques et volumiques
  - Mesurer des équipements spécifiques
  - Etablir un prévisionnel déchets
- **Combinaison de mesure pour atteindre le but**
  - Imagerie  $\gamma$
  - Mesures de DdD
  - Mesures de spectrométrie
  - Mesure de contamination
  - Parfois ... mesures neutroniques
- **En complément des investigations physiques**



# Investigations radiologiques

## Quelques moyens spécifiques pour les cas complexes

- **DORICA**

- Drone d'investigation
- Equipé de sondes d'une DdD



- **RIANA**

- Robot autonome d'investigation
- Equipé
  - De sondes interchangeables
  - Préleveur d'échantillons
  - D'une pince multi-usages



# 04

Comment les mesures  
sont-elles utilisées dans  
l'industrie nucléaire ?

# C

Mesures in-situ

# Mesures in-situ

- **But:**
  - Evaluer l'activité des déchets pour optimiser les colis de déchets
  - Assurer le régime sous-critique d'un équipement avant découpe
- **Combinaison de mesure pour atteindre le but**
  - Spectrométrie gamma
    - GeHP
    - CZT
    - NaI / Labr<sub>3</sub>
  - Comptage ictomètre
  - Mesures de DdD
- **Interprétation avec des logiciels**
  - Traitement de spectre
    - GENIE 2000, Visu Gamma, Interwinner
  - Calcul d'isotopie
    - MGA, IGA, PC-FRAM



# Mesures in-situ

## Evaluation de l'activité d'un équipement à caractériser

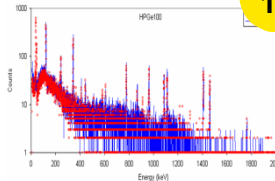
- **Mesurer l'objet** → spectre ou cps
- **Simuler la scène de mesure**
  - Objet : géométrie
  - Type de matériaux
  - Energies d'émission

$$A(Bq) = \frac{M(cps)}{I_E(\%) \cdot \epsilon_{geom}(\gamma/Bq) \cdot \epsilon_{det}(cps/\gamma)}$$



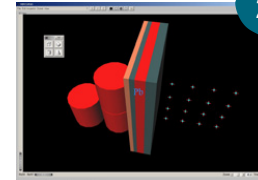
A (Bq) déchets

=



Mesure

/



Modélisation/simulation

“La simulation est la composante de l'incertitude la plus importantes puisqu'elle concentre toutes les hypothèses”



# Mesures in-situ



- **Codes Monte Carlo**

- Code de références
- Calcul au plus proche de la réalité
- Temps de modélisation long
- Calcul long
- Temps de formation long
- Exemples :
  - MCNP
  - TRIPOLI
  - GEANT 4
  - ROOT
  - RayXpert



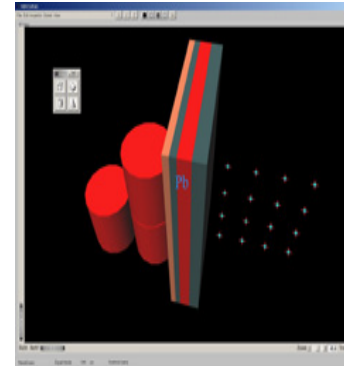
## MCNP

```
*****
1: C *****
2: C *****
3: C *****
4: C *****
5: C *****
6: C *****
7: C *****
8: 1000 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Imp:p=0 $ exterieur domaine calcul
9: 1 -0.001000 -1 2 3 4 5 6 7 8 9 Imp:p=1 $ volume int
10: 2 -7.800000 -2 3 4 5 6 7 8 9 Imp:p=1 $ acter caisson
11: 3 -0.800000 -3 4 5 6 7 8 9 Imp:p=1 $ acter du fcc
12: 4 -1.300000 -4 5 6 7 8 9 Imp:p=1 $ PAC de cylindre
13: 5 -0.003000 -5 6 7 8 9 Imp:p=1 $ conducteur au acter
14: 6 -1.300000 -6 7 8 9 Imp:p=1 $ source
15: 7 3 -2.300000 -8 Imp:p=1 $DET1
16: 8 3 -2.300000 -8 Imp:p=1 $DET2
17: 9 3 -2.300000 -9 Imp:p=1 $DET3
18: C *****
19: C *****
20: C *****
21: C *****
22: C *****
23: C *****
24: 1 rpp -500 500 500 100 -500 500 $ volume ambiant global
25: 2 rpp -24.3 24.3 -24.3 24.3 -41.8 41.8 $ container ext acier
26: 3 rpp -24 24 -24 24 -41.5 41.5 $ container int air
27: 4 rcc 0 0 -41.5 0 0 87 4.9 $ cylindre ext PVC
28: 5 rcc 0 0 -41.5 0 0 87 4.9 $ cylindre int air
29: 6 rcc 0 -0.1 0 0 1 0 2 $ source
30: 7 rcc 0 44.1 0 0 1 0 2 $ DET1
31: 8 rcc 0 124.3 0 0 1 0 2 $ DET2
32: 9 rcc 0 274.3 0 0 1 0 2 $ DET3
33: C *****
34: C *****
35: C *****
36: C *****
37: C *****
38: C *****
39: C *****
40: C *****
41: C *****
42: C *****
43: self g0s=0 -0.5 0 erf=0.662 EXT=02 RAD=D3 part=2
44: C $1 2 1
45: C $2 0 1
46: C $3 0 1
47: C $4 -1 1
48: C *****
49: C *****
```

- **Codes déterministes**

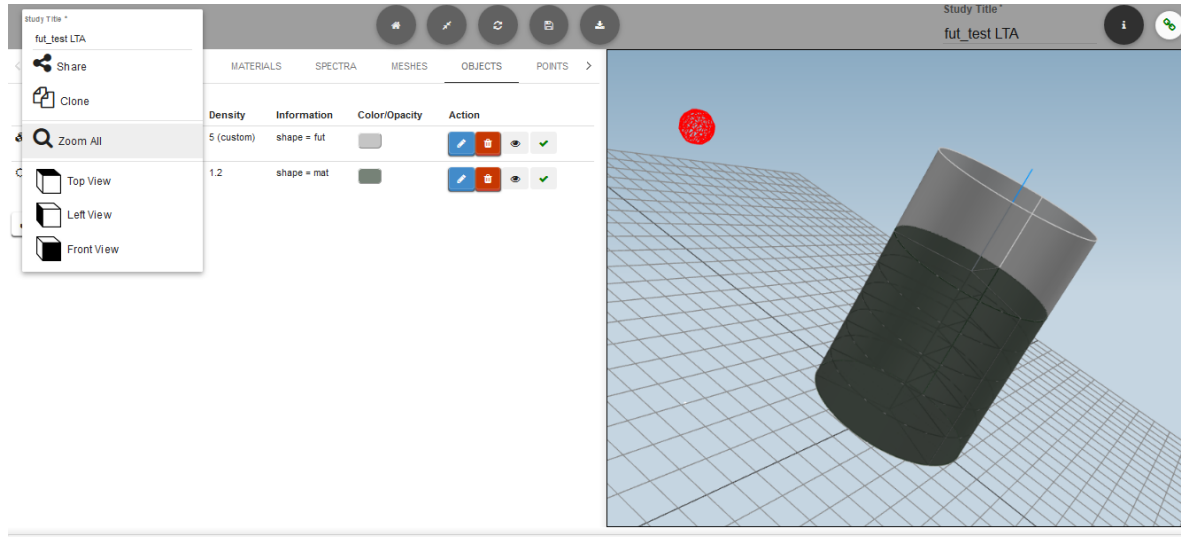
- Calcul simplifié
- Résultats rapide
- IHM simple
- Fonctions limitées
- Exemples :
  - MERCURAD
  - μShield
  - MATRICE

## Mercurad



# Mesures in-situ

- **Orano a créé CartoOnline pour les simulations**
  - Multicodes de calculs qualifié (NARMER, TRIPOLI, RayXpert)
  - Géométries paramétrables
  - Dernières technologies 3Dweb et cloud sécurisé



# Mesures in-situ

- **Calcul de l'activité**

- Activité du traceur avec la formule ci-dessous
- Activité des autres radionucléides à l'aide du spectre type
- Si activité en limite de détection, calcul de celle-ci à l'aide des formules
  - du GTN5,
  - méthode Curie
  - norme 11929

$$A(Bq) = \frac{M(cps)}{I_E(\%) \cdot \epsilon_{geom}(\gamma/Bq) \cdot \epsilon_{det}(cps/\gamma)}$$

- $A(Bq)$  : m'activité en Becquerel
- $M(cps)$ : le nombre de coup dans le pic photo-électrique (aire nette du pic) /s
- $I_E(\%)$ : l'intensité d'émission du radionucléide à cette énergie
- $\epsilon_{geom}(\gamma/Bq)$  : l'efficacité géométrique provenant de la simulation
- $\epsilon_{det}(cps/\gamma)$  : l'efficacité intrinsèque du détecteur

# 04

Comment les mesures  
sont-elles utilisées dans  
l'industrie nucléaire ?

## d

Mesures de colis de déchets

# Mesures de colis de déchets

- **But:**
  - Evaluer l'activité des colis de déchets pour l'envoi vers le bon exutoire
- **Type de mesure le plus répandu**
  - Spectrométrie gamma
    - GeHP
    - CZT
    - NaI / Labr<sub>3</sub>
  - Mesures de DdD (généralement chez EDF)
- **Méthodologie d'estimation d'activité**
  - Identique aux mesures in-situ
  - Poste de mesure généralement fixe



# 04

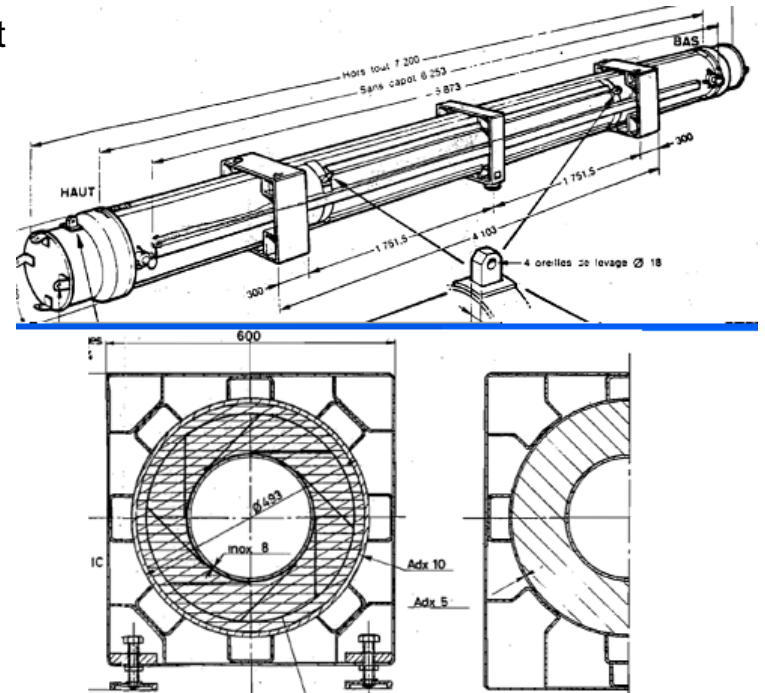
Comment les mesures  
sont-elles utilisées dans  
l'industrie nucléaire ?

# e

**Mesures pour le transport  
nucléaire**

# Mesures pour le transport nucléaire

- **But:**
  - Mesures d'emballages pour assurer leur transport
  - Calcul des nombres IRAS et SCO
- **Combinaison de mesure pour atteindre le but**
  - Spectrométrie gamma
  - Comptage ictomètre
  - Mesures de DdD
- **Interprétation avec des logiciels**
  - Traitement de spectre
    - GENIE 2000, Visu Gamma, Interwinner
  - Calcul d'isotopie
    - MGA, IGA, FRAM
- **Calcul spécifique pour diminuer l'incertitude**
  - Résolution de matrices inverses



# 05

## **Les solutions actuelles intégrées**



# 05

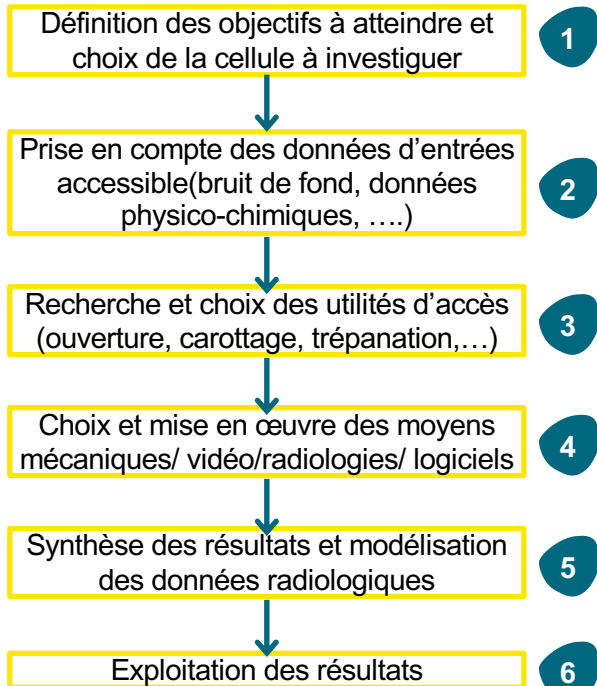
Les solutions actuelles

# a

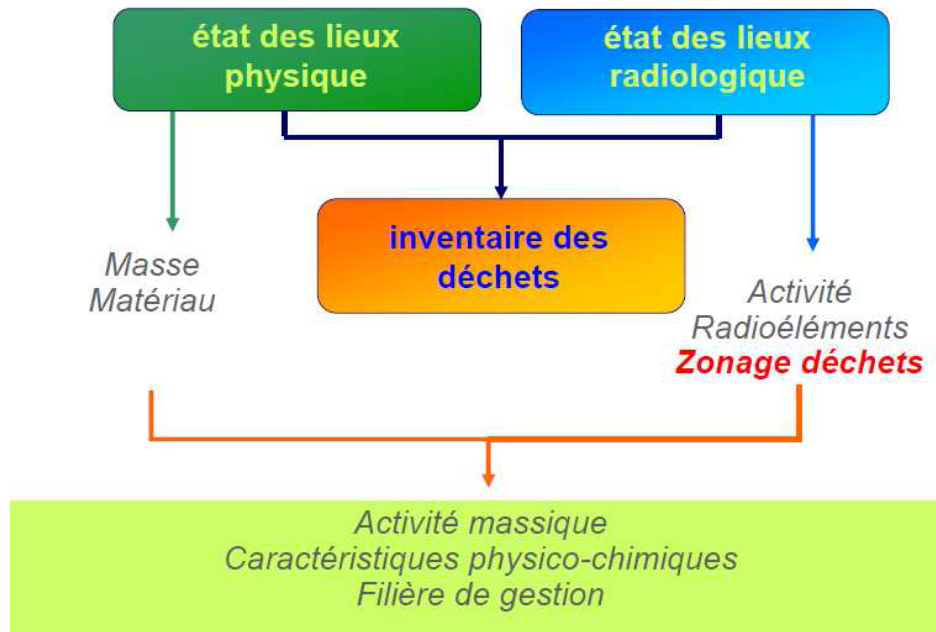
Comment répondre au besoin ?

# Analyse de la problématique

## • Investigations



## • Caractérisation des déchets



# Analyse et choix des méthodes de mesure

- **Analyser la demande:**

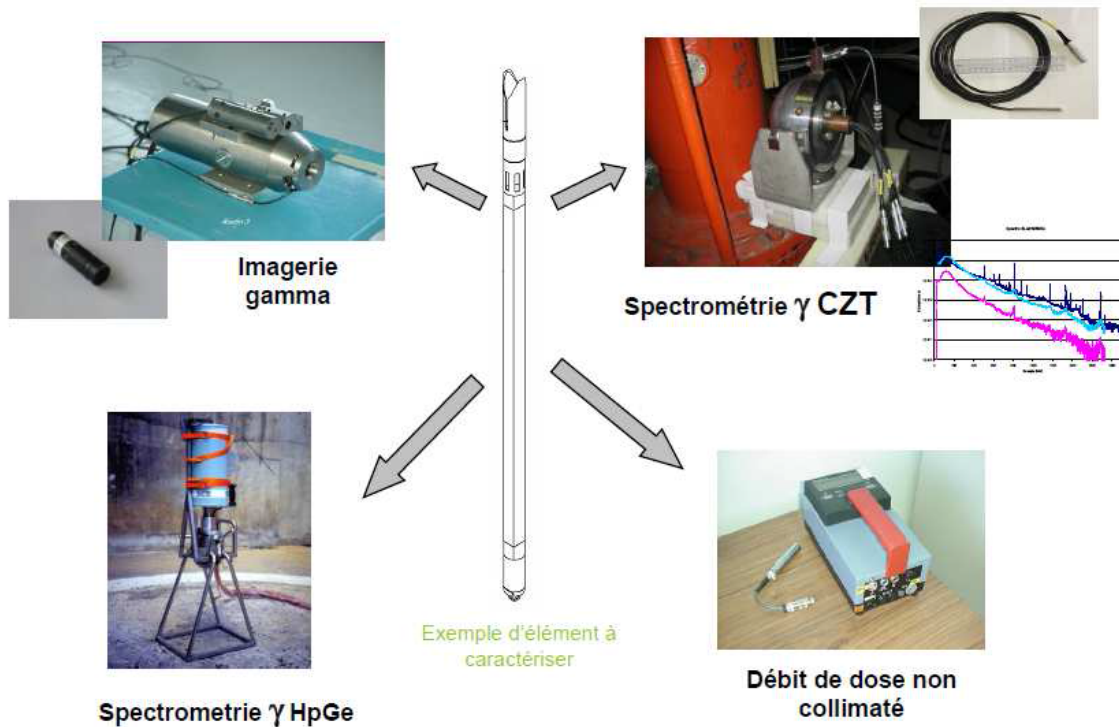
- Le besoin est il :
  - En pré assainissement
  - En cours d'assainissement
  - En post-assainissement
- Le besoin porte il sur :
  - Des évaluations de données d'entrée radiologique
  - Du suivi réglementaire du chantier
  - Le respect de valeurs normatives de radioprotection en fin de chantier
  - Le respect d'exigence déchet des exutoires
- Le résultat attendu est il:
  - Un DeD
  - Une activité surfacique
  - Une activité totale volumique
  - Une identification de RN
  - Un spectre type
  - Une activité par RN
  - Une masse de RN, une isotopie
  - ...

# Analyse des méthodes de mesure

- **Qu'est ce qu'un spectre type / isotopique**
  - Une liste des RN présents dans une zone, une cellule, une installation
  - Un ratio d'activité / massique entre ces différents RN
- **Comment caractériser une cellule, une installation, un colis de déchet, ...?**
  - Approche 1
    - En caractérisant de manière exhaustive chaque élément unitaire (RN + Activité)
  - Approche 2
    - En réalisant un spectre type à partir d'un nombre représentatif de prélèvement(s)
    - En mesurant un traceur facilement mesurable sur des colis ou des zones composées de plusieurs éléments unitaires
- **Choix de l'appareil de mesure adapté**
  - Fonction du résultat des choix précédents
  - Fonction des émissions des RN attendus dans l'installation
  - Fonction de la résolution de l'appareil
  - Fonction des DdD (saturation)

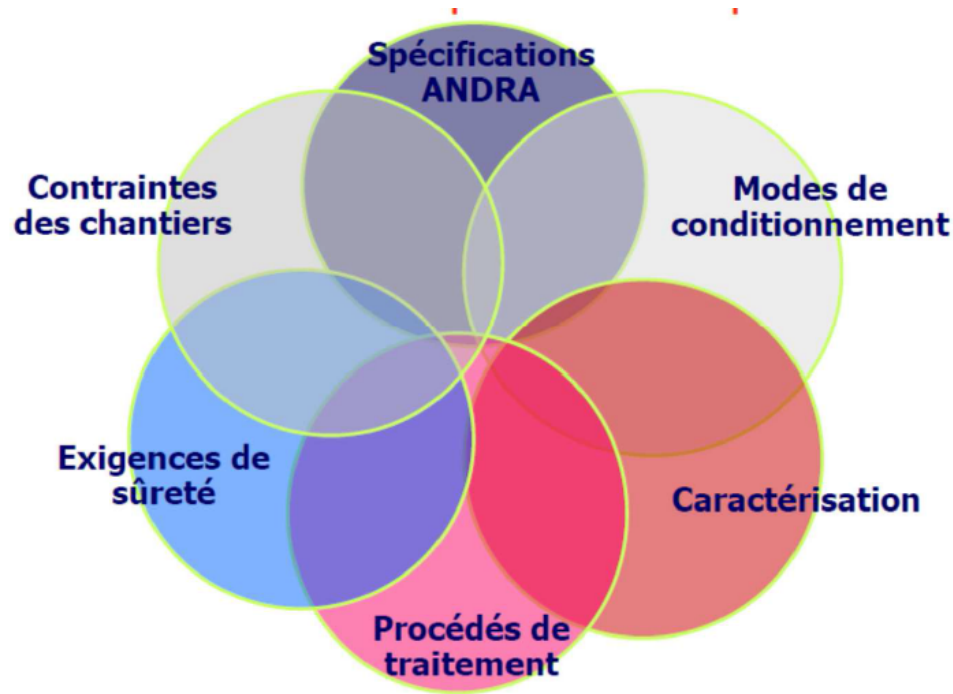
# Analyse des méthodes de mesure

- Exemple



# Analyse projet multicritères

- **Toujours garder en tête qu'il faut trouver le meilleur compromis**



# Analyse projet multicritères

- **Analyse sur le choix du/ des détecteur**

Détecteur	Ge(HP)	LaBr3(Ce)
résolution	++	+
Temps de comptage	+	+
Maniabilité	-	++
Contraintes de mise en œuvre	-	+
Sécurité	-	++
Conclusion	-	+

# Analyse projet multicritères

- **Analyse sur les scénarii d'utilisation**

- Utilisation des utilités (pont, ...)
- Aménagements à réaliser (carottage, installations électriques, ...)
- Collimation
- ...

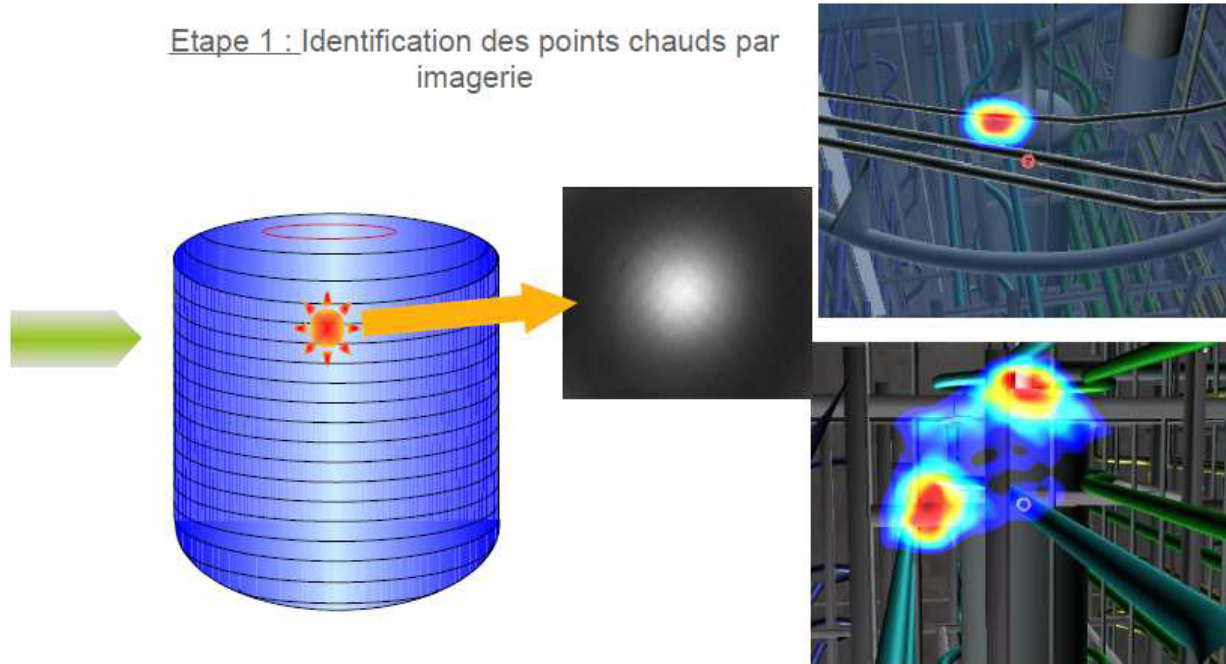
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Technique	+	+	#	--	+
Coût	--	#	+	++	--
Radioprotection	-	-	+	+	#
Planning	-	-	#	+	#
Global	-3	-1	+2	+2	-1

Eliminatoire	--	-2
Lacune	-	-1
Neutre	#	0
Avantageux	+	+1
Très Avantageux	++	+2



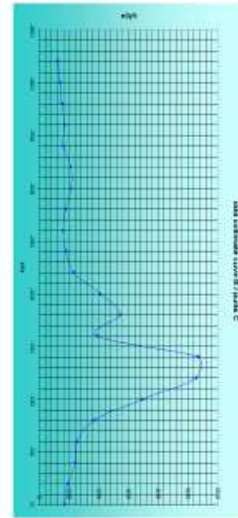
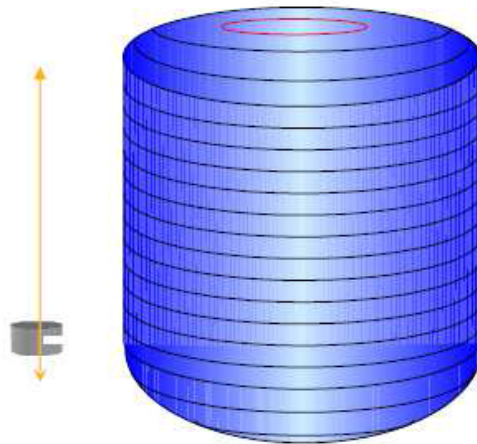
# Exemple (1/4): caractérisation de cuves PF

Etape 1 : Identification des points chauds par imagerie



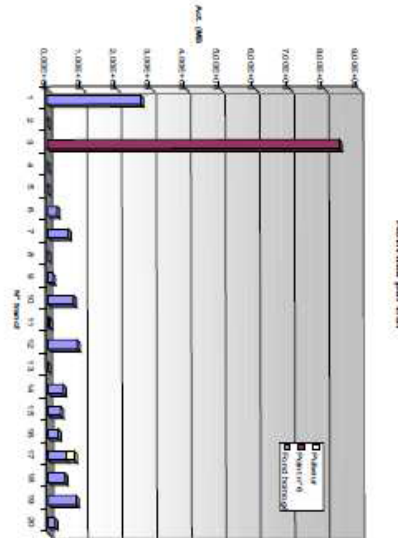
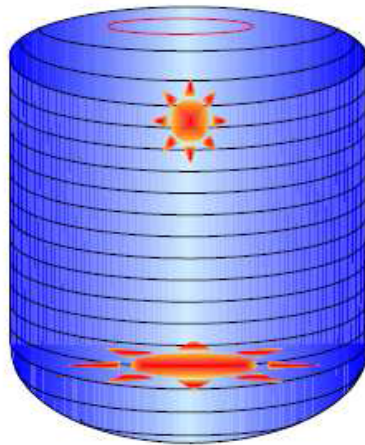
# Exemple (2/4) : caractérisation de cuves PF

Etape 2 : Profil de débit de fluence collimaté ou de débit de dose collimaté



# Exemple (3/4) : caractérisation de cuves PF

Etape 3 : Calcul de l'activité des points chauds  $A_k$  et de l'activité du « fond homogène »  $A_i$  (modélisation d'une matrice de transfert sous MERCURE)

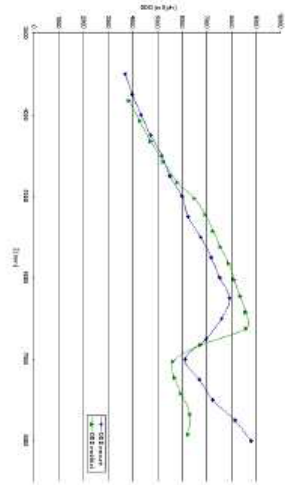
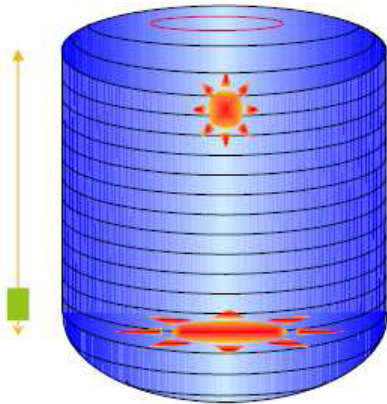


Calcul de l'activité tranche à tranche et de l'activité totale :

$$A_{\text{totale}} = \sum_k A_k + \sum_i A_i$$

# Exemple (4/4) : caractérisation de cuves PF

Etape 4 : Vérification du calcul par un modèle « inversé » et comparaison au DDD ambiant



Si écart type < critère (ex.10%) → validation des modélisations

# 05

Les solutions actuelles

## b

Exemples d'approches  
méthodologies

# Exemples d'approches / méthodologie

- **Exploitation de chaîne de mesure**
  - Exemple Exploitation de chaînes de mesure ATPu Cadarache
- **Investigation Radiologique**
  - Détermination de l'état radiologique d'installations
  - Détermination de l'état radiologique de procédés
- **Caractérisation Radiologique**
  - Colis de déchets
  - Objets complexes

# Exemples d'approches / méthodologie

- **Installation**

- ATPu Cadarache

- **Besoin**

- Exploitation de chaînes de spectrométrie gamma et neutronique passive
- Déclaration de l'activité et de la masse de matière fissile



- **Enjeux réglementaires**

- Assurer la sûreté de l'installation lors du démantèlement
- Assurer la protection des travailleurs contre le risque de criticité

- **Enjeux Techniques**

- Mesurer les colis de déchets
- Corréler les investigations et la déclaration finale



# Exemples d'approches / méthodologie

- **Exploitation de chaîne de mesure**
  - Exemple Exploitation de chaînes de mesure ATPu Cadarache
- **Investigation Radiologique**
  - Détermination de l'état radiologique d'installations
  - Détermination de l'état radiologique de procédés
- **Caractérisation Radiologique**
  - Colis de déchets
  - Objets complexes



# Exemples d'approches / méthodologie

- **Installation**

- Sites EDF / Mission EMECC
- Donneur d'ordre CEA

- **Besoin**

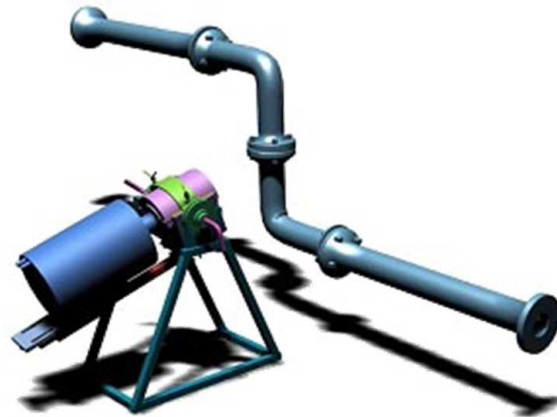
- Estimer les niveaux de corrosion des tuyauteries des GV lors des arrêts de tranche

- **Enjeux réglementaires**

- Vérifier le bon état des tuyauteries (corrosion)

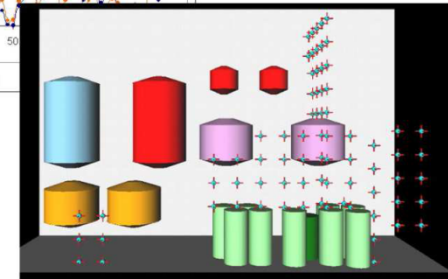
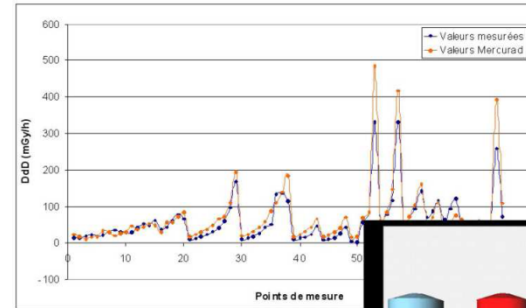
- **Enjeux Techniques**

- Précision du positionnement du détecteur
- Rapidité d'exécution (limitation de la dose opérateur)
- Estimer les niveaux de corrosions des tuyauteries



# Exemples d'approches / méthodologie

- **Installation**
  - Bâtiment 11 de l'APM Marcoule
  - Donneur d'ordre CEA
- **Besoin**
  - Investigations dans cellules HA aveugles
- **Enjeux Techniques**
  - Utilisation de Carottages traversant pour insertion des matériels investigations visuelles et radiologiques
- **Moyens de mesure**
  - camera CARTOGAM ( Localisation des termes sources)
  - Spectrométries  $\gamma$  : Détecteurs Ge NaI, LaBr, CdTe
  - Mesures de DeD : AD5/6 + AD15/18, IF104 + SHI/SHF, GM
  - Logiciels de spectrométrie gamma Génie 2000 et Interwinner
  - Codes de calculs MCNPX, Microshield, MERCURAD



# Exemples d'approches / méthodologie

- **Exploitation de chaîne de mesure**
  - Exemple Exploitation de chaînes de mesure ATPu Cadarache
- **Investigation Radiologique**
  - Détermination de l'état radiologique d'installations
  - Détermination de l'état radiologique de procédés
- **Caractérisation Radiologique**
  - Colis de déchets
  - Objets complexes

# Exemples d'approches / méthodologie

- **Installation**

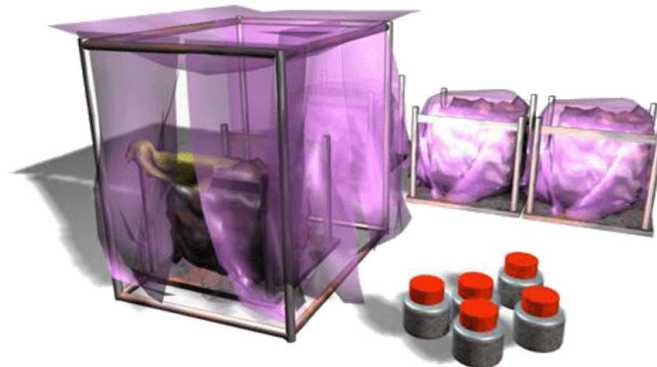
- Multi

- **Besoin**

- Caractériser des colis TFA /FA de sources inconnues
- Colis de types BigBag (GRVS), futs 200L, ...
- Déclaration de l'activité des radionucléides mesurés

- **Enjeux Techniques**

- Mesures par spectrométries gamma
- Utilisation de SAS à montage rapide
- Gérer le refroidissement de la chaîne de spectrométrie pour multiplier les campagnes de mesures



# Exemples d'approches / méthodologie

- **Installation**

- LPC Cadarache

- **Besoin**

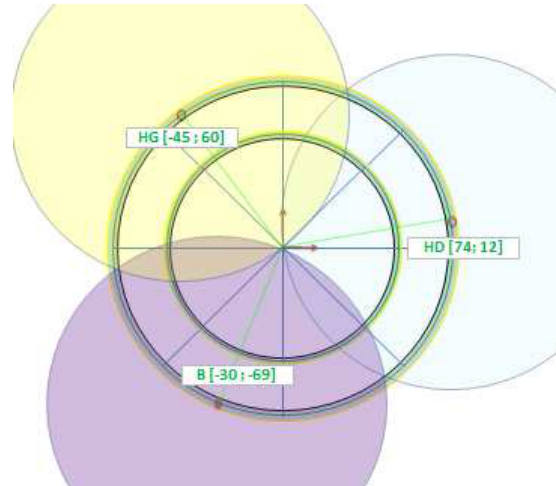
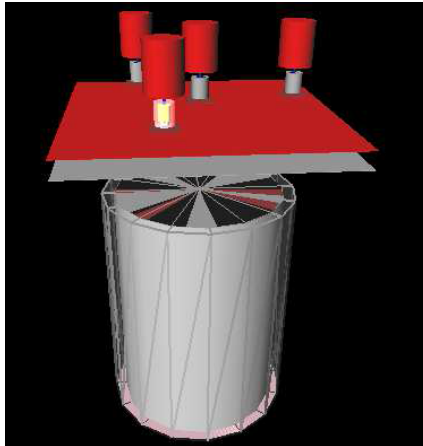
- Mesurer la quantité de matière fissile résiduelle avant démantèlement

- **Enjeux réglementaires**

- S'assurer que la masse de Pu est  $< 200\text{g}$  (**enjeux sureté**) : pourquoi ?

- **Enjeux Techniques**

- Mesures par spectrométries gamma au dessus des cuves
- Multiplication des mesures
- Place limitée au dessus des cuves
- Etude de sensibilité (incertitude longue et complexe)
- Résultat impact le scenario de DEM



# 05

Les solutions actuelles

# C

Exercice en équipe

# Mesurer un colis de déchet historique

- **Données de base**

- Masse : 148kg
- Tare : 19 kg
- Rayon : 27,75 cm
- Hauteur fut : 91 cm
- Hauteur remplissage : 80 cm
- Ep : 0,15 cm
- Matrice : 90% Acier + 10 % PVC (en volume)
- Spectre type fourni (affiché au tableau)

- **Attendu**

- Choisir le détecteur
- Trouver les données manquantes
- Traiter le spectre et trouver les RN
- Calculer l'activité des RN

- **Outils**

- Mesure : ?
- Logiciel de mesure et analyse : GENIE 2000
- Modélisation : CartoOnline
- Données nucléaires : laraweb :  
<http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>

“ Vous avez ... minutes ”

# 06

## Les défis de demain



# La mesure de demain sera composée

- **de nouveaux porteurs (miniaturisés, volants, franchiseurs, équipés...)**
- **de sondes intelligentes (capables par exemple de faire de la géostatique en direct sur les mesures)**
- **de sondes miniaturisées (pour réaliser des mesures avec certains types de détecteurs incompatibles avec leur taille actuelle)**
- **de systèmes de connexion et de retranscription des informations sans fil, en continu et fiables**
- **de systèmes de traçabilité des informations accrues via des bases de données ou des serveurs**
- **d'outils permettant de limiter les incertitudes sur les fonctions de transfert**
- **de logiciels orientés opérateurs pour simplifier la mesure de colis de déchets, ...**
- **De méthodes ou procédés permettant une diminution des incertitudes**

“ D’outils 4.0 performants, miniatures, autonomes et fiables ”

# 07

**Les solutions en cours de développement**

# 07

Les solutions en cours  
de développement

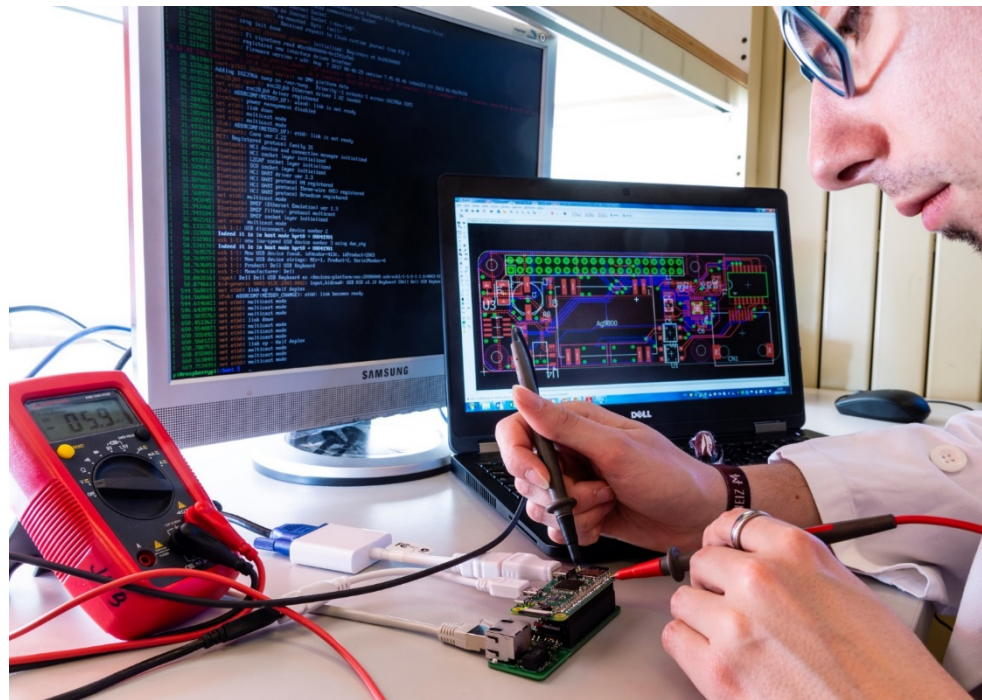
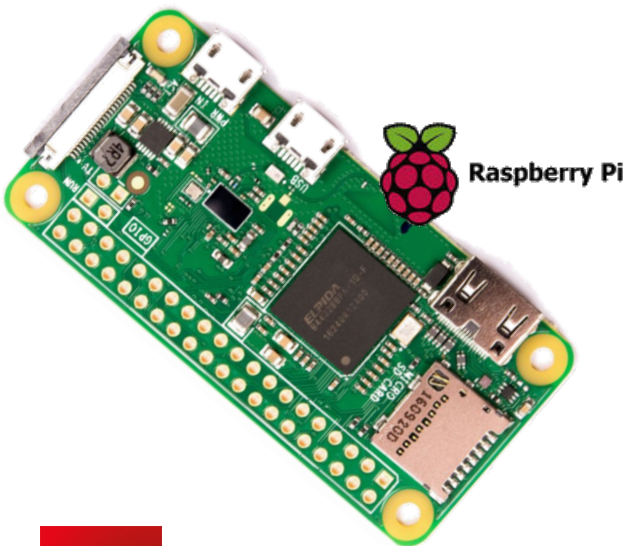
# a



**NanoPix V.2 : un concentré  
d'intelligence**

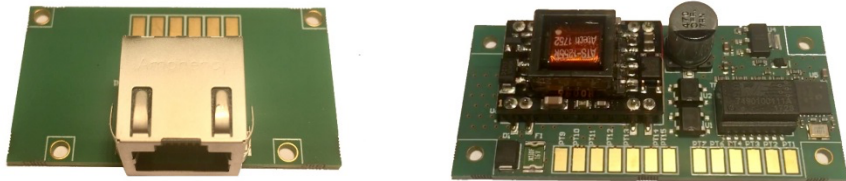
# NanoPix v.2, *Un concentré d'intelligence*

Intégration d'intelligence  
« Proche Capteur »

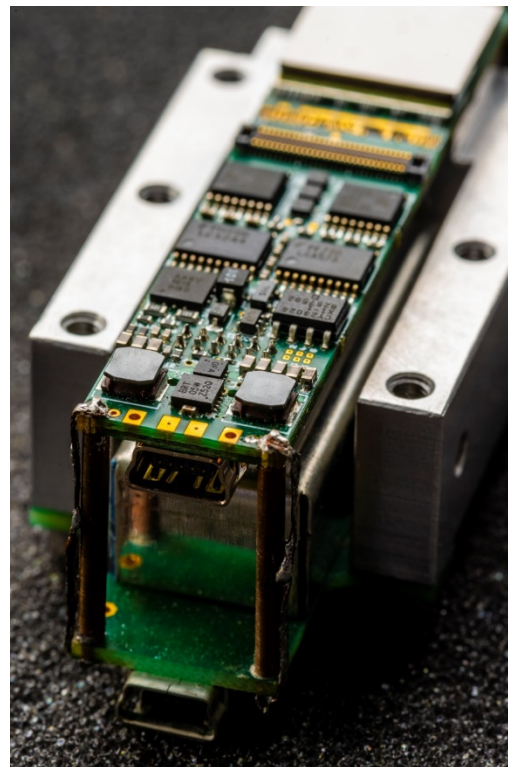
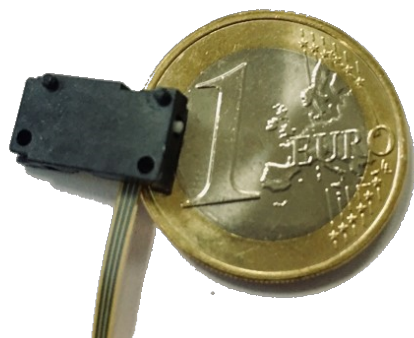


# NanoPix v.2, *Un concentré d'intelligence*

Design d'une électronique avancée  
d'alimentation et de communication PoE



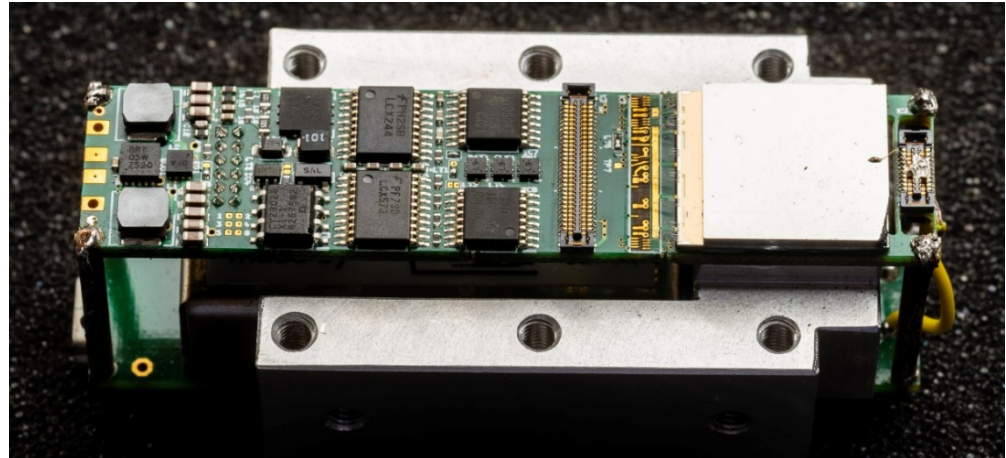
Intégration d'un nanomoteur piézoélectrique



# NanoPix v.2, *Un concentré d'intelligence*



Paramétrage fin du détecteur et  
calibration sur sources métrologiques

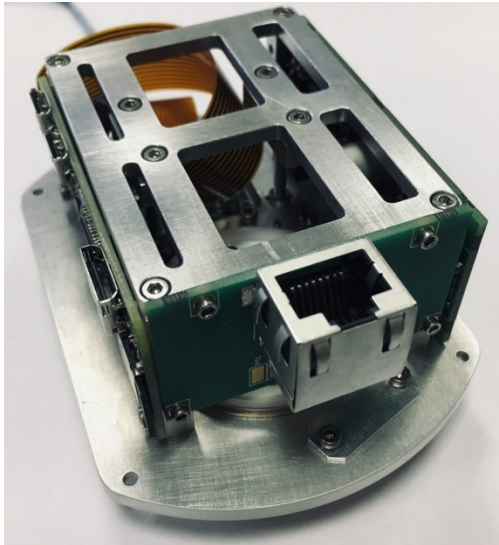


© P. STROPPA / CEA

# NanoPix v.2,

*Un concentré d'intelligence*

Design mécanique optimisé



L'intelligence  
embarquée  
permet d'envisager  
l'intégration  
sur vecteur  
robotique



# 07

Les solutions en cours  
de développement

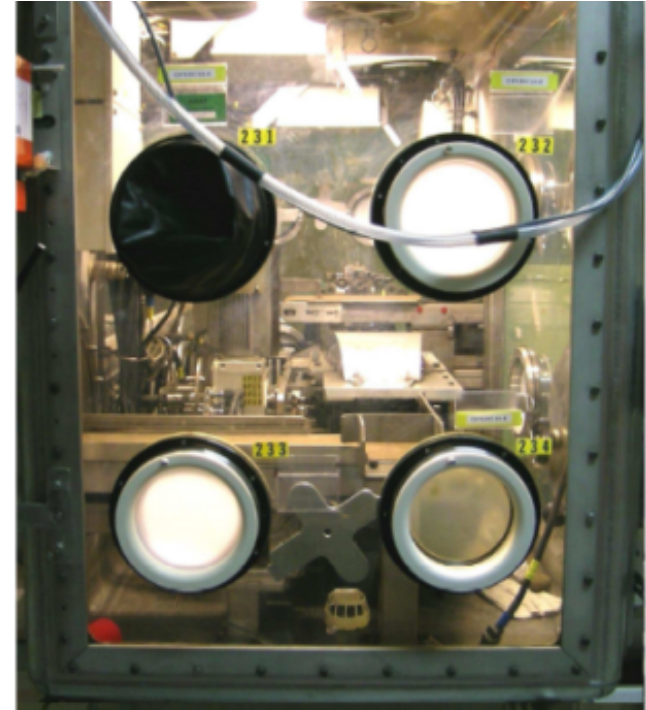
# b

**Imagerie neutron, un pas vers la  
localisation**

# Imagerie Neutron, un pas vers la localisation

## Objectif et Principe

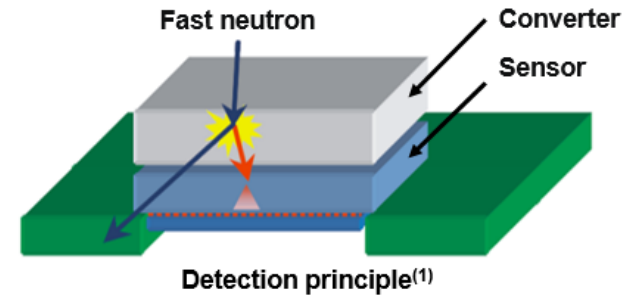
- **Objectif : pallier les limitations de l'imagerie gamma**
  - Mesures sur BaGs blindées
  - Mesures spécifiques La Hague,
  - ...
- **Localisation des radionucléides d'intérêt (ex : plutonium) via l'utilisation de la signature neutronique**
- **Principe suivi : imagerie à masque codé**
  - Rappelez-vous du principe de Nanopix
  - Quelques différences tout de même



# Imagerie Neutron, un pas vers la localisation

## Prototype : deux briques technologiques essentielles

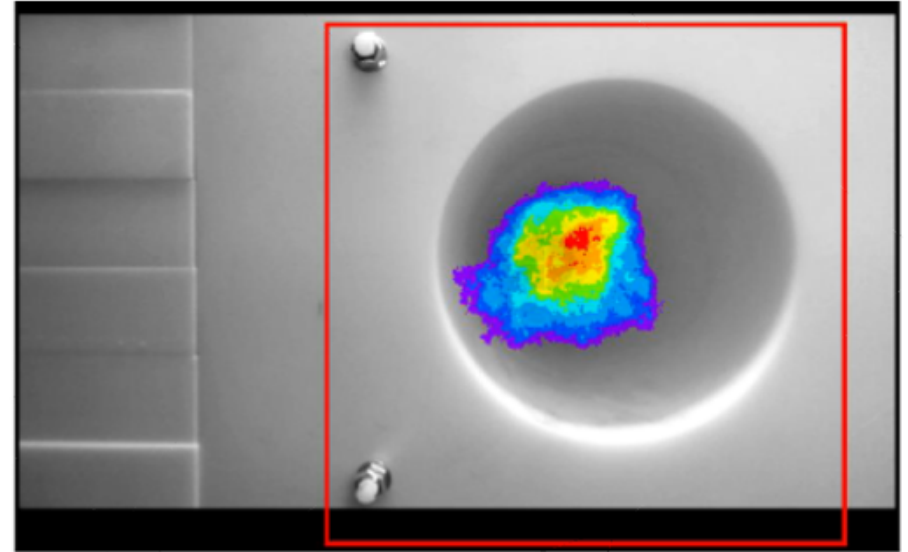
- **Détecteur sensible à la position (Timepix)**  
+ **convertisseur neutron (CH<sub>2</sub>, LiF)**
  - Détecteur pixellisé
  - Le convertisseur permet de ralentir les neutrons afin qu'ils interagissent avec le détecteur
- **Masque codé (ex : motif MURA)**
  - Masque codé sous le même principe que pour l'imagerie gamma à masque codé (TimePix)



# Imagerie Neutron, un pas vers la localisation

## Résultats expérimentaux

- **Première validation expérimentale sur générateur neutrons d-t (neutrons 14 MeV)**
- **C. Lynde et al., accepted for publication in Nucl. Instr. and Meth. A, 2018.**



# 07

Les solutions en cours  
de développement

# C

$\mu$ Ge : détecteur GeHp qui tient  
dans la main

# $\mu$ Ge, un détecteur GeHP qui tient dans la main

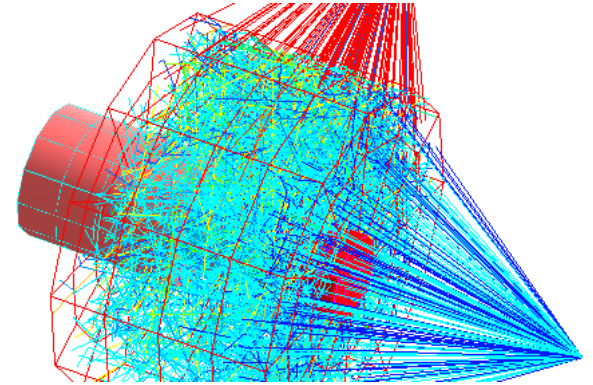
- **Objectif :**
  - Miniaturiser une chaîne de mesure GeHP pour mesurer avec une excellente résolution les termes sources
    - Difficilement accessibles
    - Fortement irradiant
  - Avoir un système utilisable avec nos contraintes chantier (t°, accessibilité, ...)
  - Avoir un système compatible avec les changements de cellule successifs (maintient en froid)
- **Principe suivi :**
  - Intégrer le cristal, le préampli et le système de refroidissement dans le détecteur
  - Refroidissement électrique (cryo-puls)
  - De nombreuses innovations (mécaniques, électroniques) qu'on ne détaillera pas dans ce cours
- **Résultat**
  - Un outil très performant
  - Malheureusement le maintien en froid se perd à cause de dissipations thermiques
    - Nouveau design mécanique
    - Tests en cours



Specifications	
Size	∅ 5 cm x L 25 cm
Weight	1,5 kg
Power	7 W
Detector	HPGe 0,1%
Energy resolutions	0,8 keV @ 122 keV 1,6 keV @ 662 keV 2,3 keV @ 1332 keV
Count rate	> 10 <sup>5</sup> counts per sec
Cooling time	< 20 min
Aquisition station	Power supply Canberra MCA DSA-LX (optional)

# 07

Les solutions en cours  
de développement



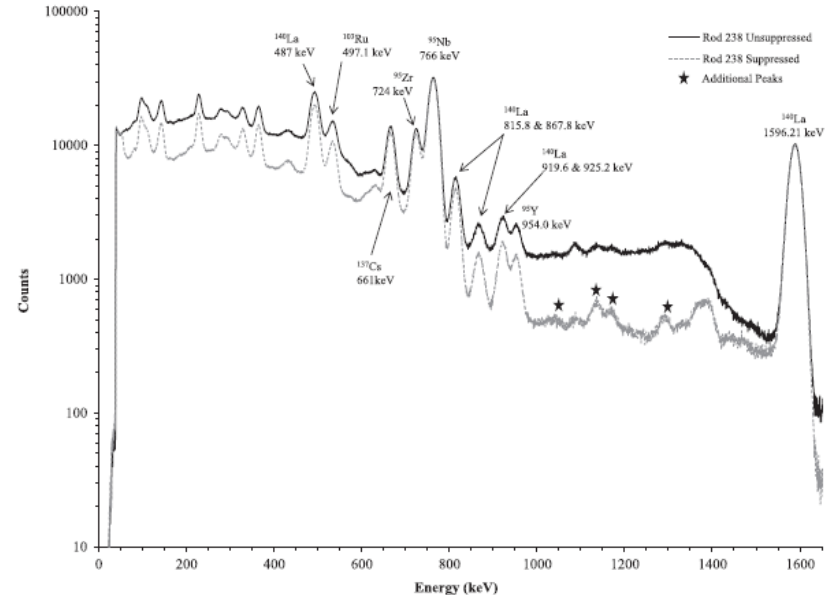
# d

**Blindage actif, la coïncidence  
pour limiter l'impact du BDF**

# Blindage actif, la coïncidence pour limiter l'impact du BDF

## Objectif et Principe

- **Objectif :**
  - Limiter les collimateurs lourds et difficilement transportables
  - Diminuer les limites de détection en diminuant le fond Compton lié au bruit de fond
  - ...
- **Principe suivi : mesure en anti-coïncidence**
  - Utilisation d'un détecteur principal  $\text{LaBr}_3$
  - Ajout d'une couronne de scintillateurs plastiques
  - Traitement des données coïncidentes et anti-coïncidentes pour déterminer si
    - Le signal mesuré provient de la source
    - Le signal mesuré provient du bruit de fond



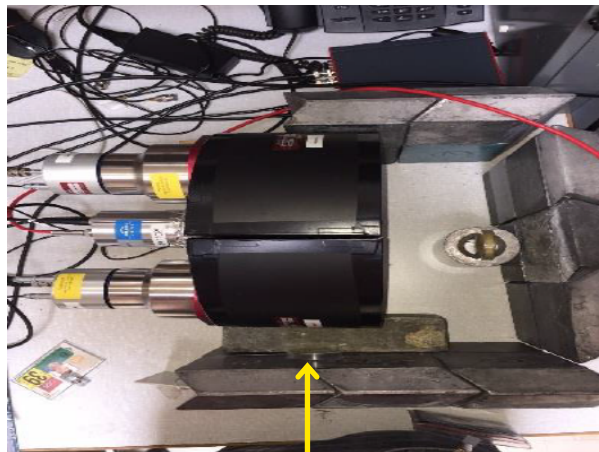


# Blindage actif, la coïncidence pour limiter l'impact du BDF

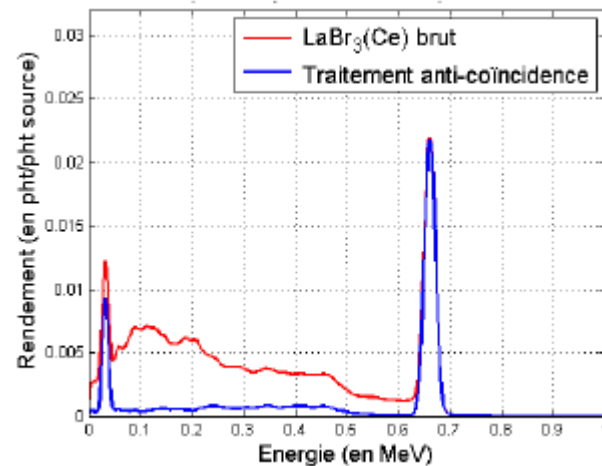
## Système lors des tests Labo



Face arrière



En cour de tests avec une source parasite



Premiers résultats

# Blindage actif, la coïncidence pour limiter l'impact du BDF

## Premiers essais terrain

- **Outil transportable**
- **Résultats convaincants**
  - Diminution du fond d'un facteur 4
  - Diminution de la limite de détection
  - Utilisable dans 90% de nos applications envisagées
- **Malgré tout**
  - La limite de détection n'atteint pas la LD attendue pour un cas spécifique
- **Nouveaux développements**
  - Ge
  - BGO



# 07

Les solutions en cours  
de développement

e

SpectroK

# Spectro K : la spectrométrie portable en ligne

- **Spectrométrie CZT portable**
- **Boîtier intégré avec carte électronique spécifique avec écran tactile**
- **Facile à utiliser**
  - Affichage simplifié des DdD et doses intégrées
  - Reconnaissance automatique des radionucléides
  - Bibliothèques de géométries paramétrables pour la fonction de transfert
  - Calcul automatisé de l'activité



# 08

**Discussion libre**



**orano**

Giving nuclear energy its full value