



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



8 et 9 octobre
2014

www.cea.fr

Didier DUBOT, Expert Sénior,
Charly MAHE, Expert,

SCIENCE DU DÉMANTÈLEMENT INSTALLATION NUCLÉAIRE



De l'Historique du Site à sa Reconnaissance Radiologique

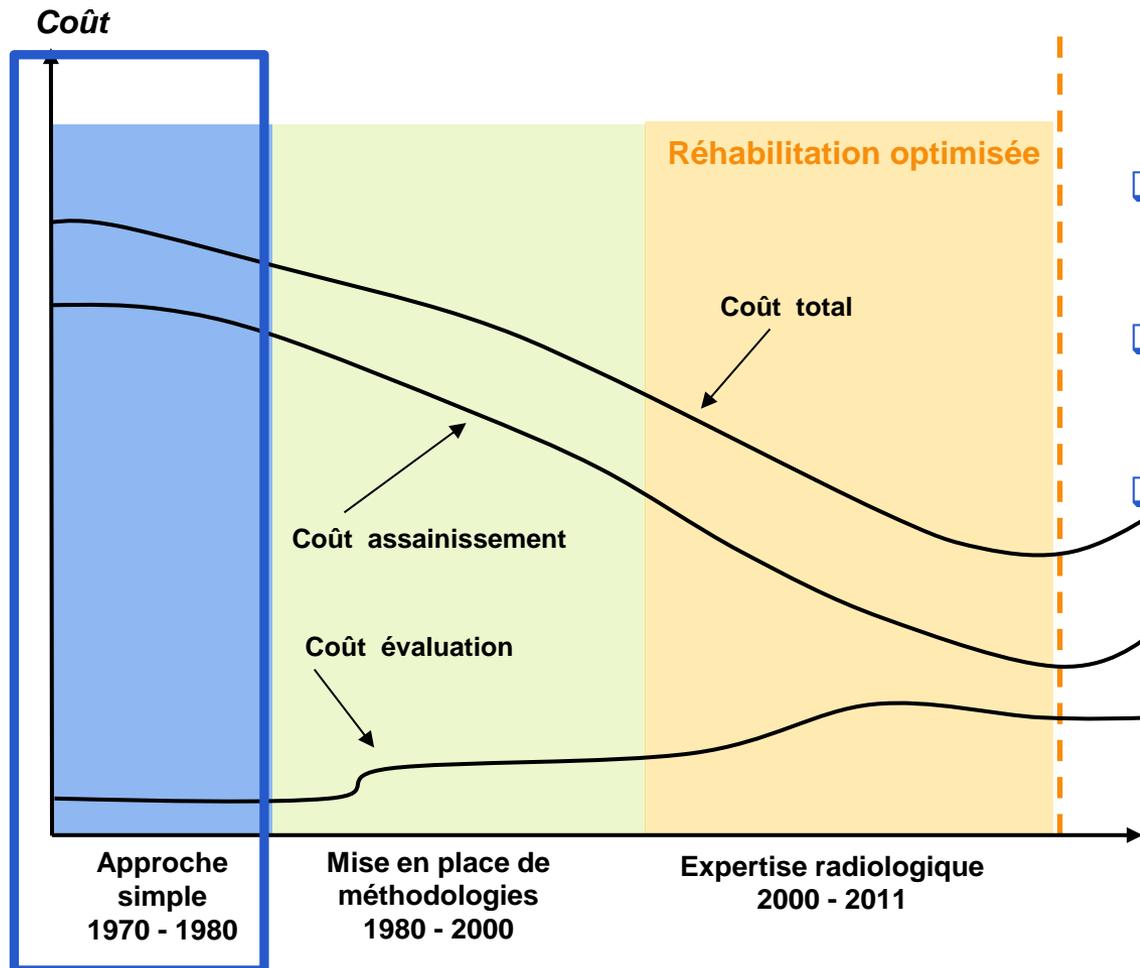
Chef de la Section Assainissement du Site de FAR, didier.dubot@cea.fr
Chef de projet « Caractérisation des Installations et des Sols »,
charly.mahe@cea.fr

- **Contexte**
- **Etat des lieux – Etude Historique**
- **Approche globale pour caractériser**
- **Différents dispositifs de détection usuels et innovants**
- **Traitement de données par géostatistique**
- **Les applications existantes**
- **Conclusion**

- **Accroissement des besoins en caractérisation radiologique**
(proportionnel au développement de la filière nucléaire dans le monde)
 - Mise en place des filières de déchets nucléaires en France
 - Déclassement de trois générations d'installations et de sites miniers
 - Evolution considérable des appareils de mesures et de l'informatique associée
- **Prise de conscience des opérateurs de la sphère du nucléaire de disposer d'études historiques et d'analyses fonctionnelles**
- **Etre en mesure de garantir et démontrer la qualité et la représentativité du phénomène étudié**
- **Evoluer vers une meilleure maîtrise des assainissements** *(coûts et plannings)*
- **La caractérisation initiale conditionne les options possibles et impacte l'ensemble du processus d'assainissement**



REX : ASSAINISSEMENT des SOLS à FAR

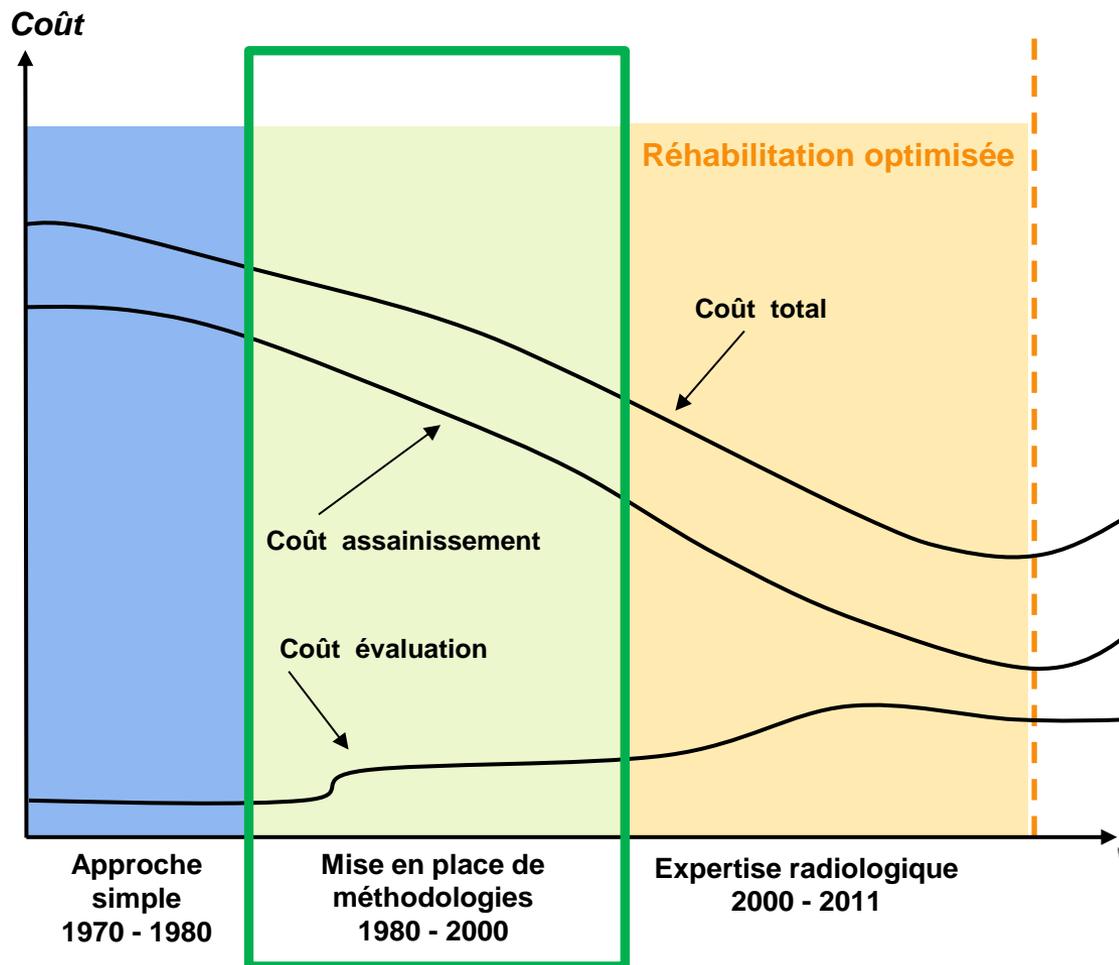


Approche simple

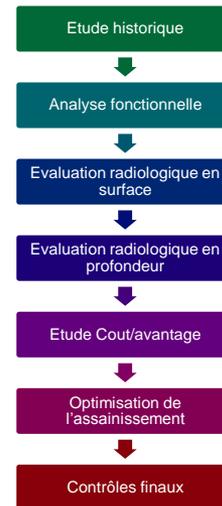
- Pilotage des assainissements à la « mesure »
- Peu de maîtrise des coûts et des délais
- Difficultés pour finaliser les réhabilitations



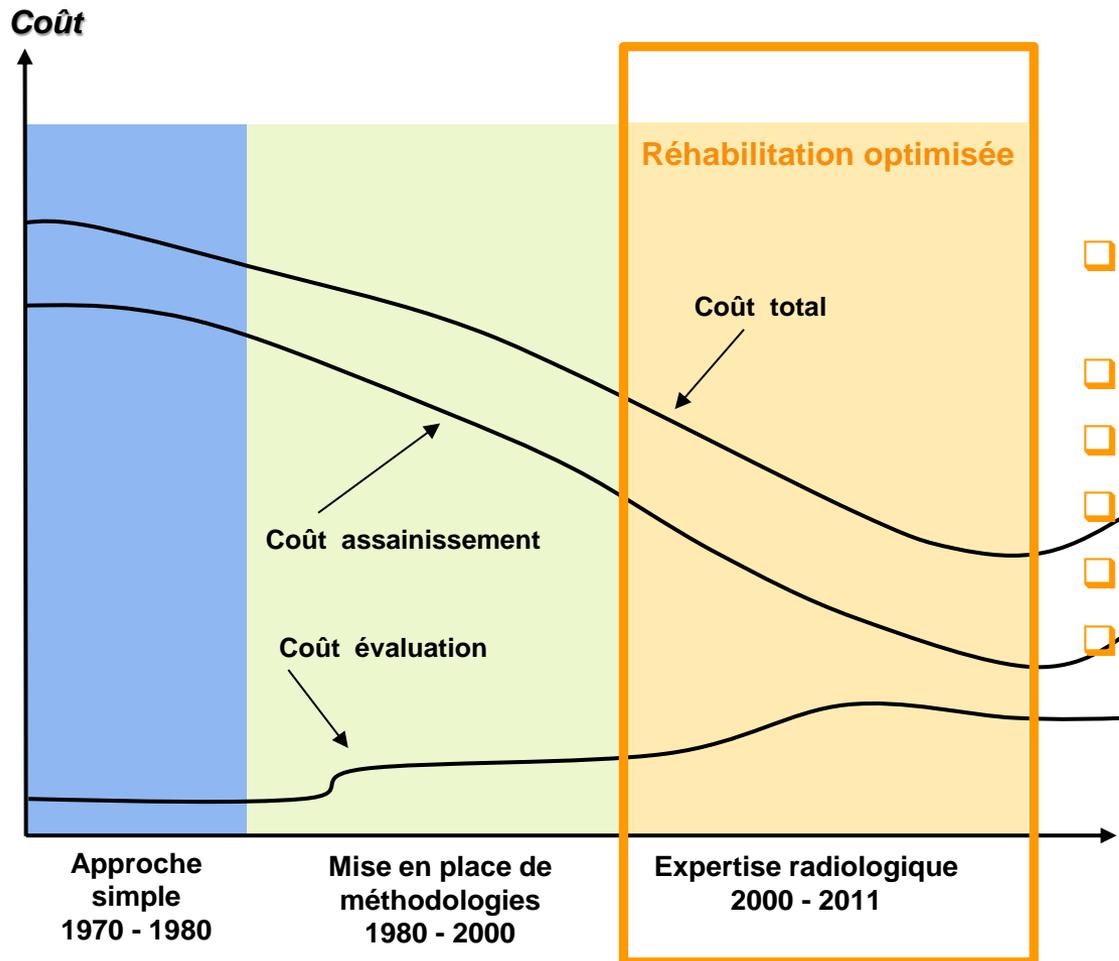
MISE EN PLACE DE LA METHODOLOGIE D'ASSAINISSEMENT



- ❑ Mise en place progressive de méthodologie et de méthodes d'assainissement
- ❑ Evaluation des sols avant début des assainissements
- ❑ Coûts et délais maîtrisés



EXPERTISE RADIOLOGIQUE



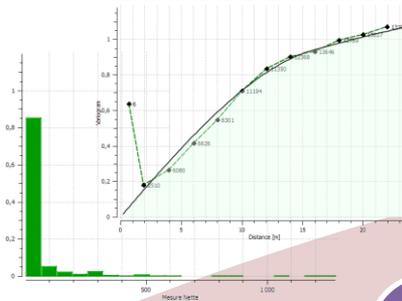
- Maitrise de l'historique et de l'analyse fonctionnelle
- Développement solutions logicielles
- Traitement des données
- Optimisation des coûts et délais
- Economies importantes**
- Industrialisation d'une solution logicielle



APPROCHE GLOBALE POUR CARACTÉRISER : KARTOTRAK

Interpréter

- Analyse et valorisation des données
- Cartographie précise en temps réel de la contamination

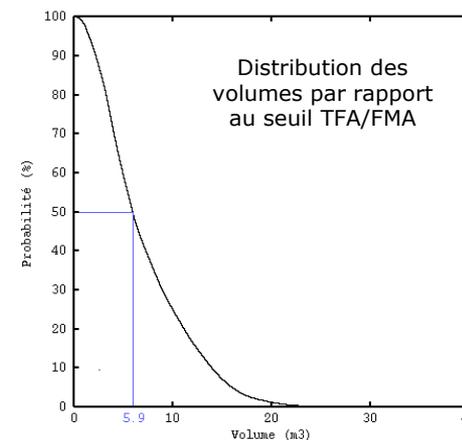
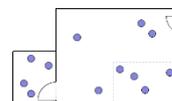
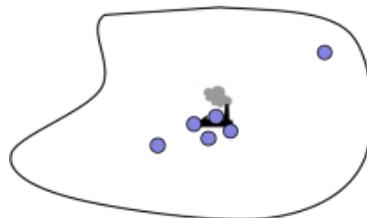
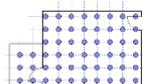
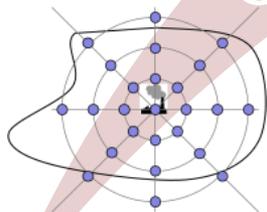


Décider

- Evaluation des risques et quantification des incertitudes
- Amélioration du processus de décision

Collecter

- Objectif d'évaluation et stratégie d'échantillonnage adaptée
- Optimisation des différentes campagnes d'investigation



- La plupart des sites et sols pollués ou des structures de génie civil contiennent des radionucléides (émetteurs α , β et/ou γ)
- Un nombre important de ces radionucléides est émetteur de **photons**
- Les dispositifs usuels détectent les rayonnements α , β et γ

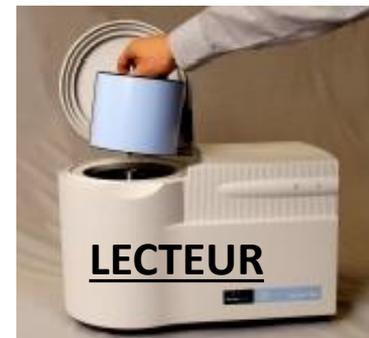
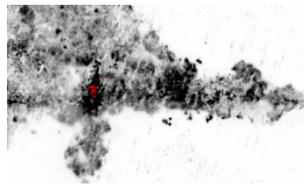
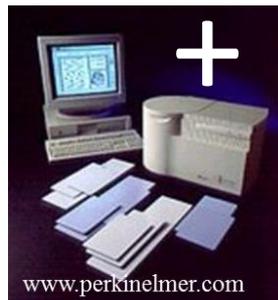


Principe



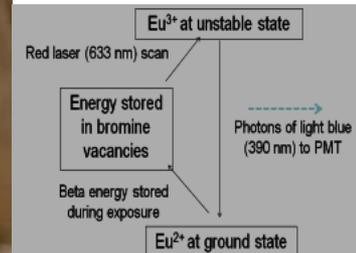
(800 € soit 0,8€ la mesure)

- Dimension 20 x 12 cm²
- Réutilisable jusqu'à 1000 fois
- Surface plane ou courbe



(25 000 €)

- Dimensions 28 x 45 x 27 cm³
- 17 Kg



Tache sombre → Radioactivité

Sensibilité décroissante dans l'ordre : $\alpha > \beta > \gamma$
Sélectivité accrue en disposant 2 films l'un sur l'autre
Dynamique = 5 ordres de grandeur
Peu couteux

Technique très utilisée en biologie → Développement d'une méthodologie pour étudier des locaux de grandes surfaces dans l'objectif de localiser les taches de radioactivité et d'en évaluer le niveau d'activité

Cartographie radiologique des installations en démantèlement

1 - Acquisition des données

Préparation

Echantillonnage
Jeu de 20 à 40 films

Cycle de dépôt/reprise/lecture/
Réinitialisation et réutilisation

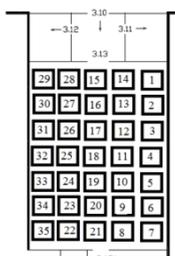
Autant d'images que
de films déposés

Jusqu'à 2000 films
par chantier

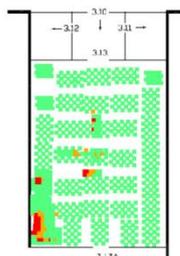
2 - Traitement des données

Interprétation des données

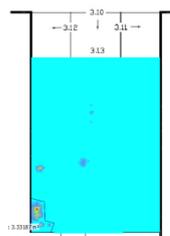
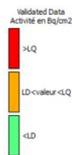
Etalonnage, ajustement de la résolution spatiale, prise en compte du bruit de fond...



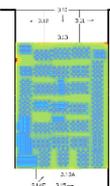
Géoréférencement
au télémètre laser
des 35 zones dans
ce cas



Cartographie
des mesures
réalisées



Géostatistique :
Extrapolation aux
zones sans mesure



Indicateur
de
variance
du résultat

Construction d'une image des
niveaux d'activités présents
à petite échelle → grande échelle

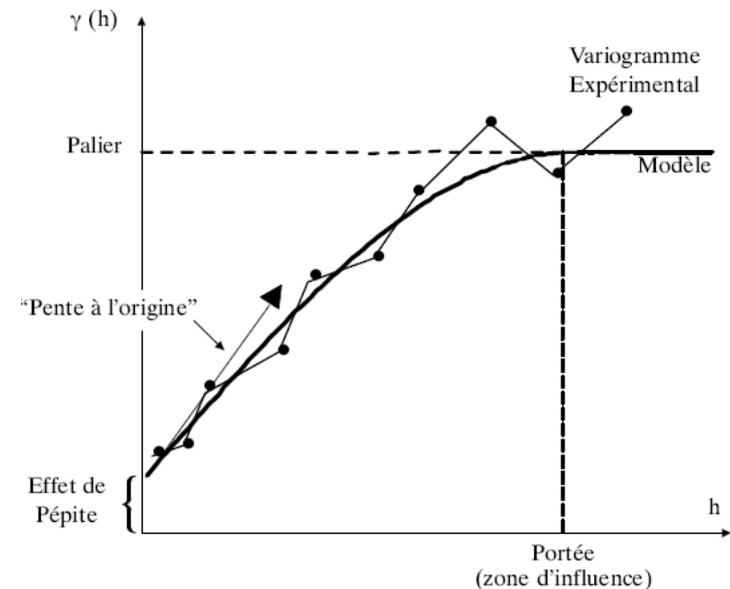
- Localisation de la contamination
- Interprétation des données par la géostatistique

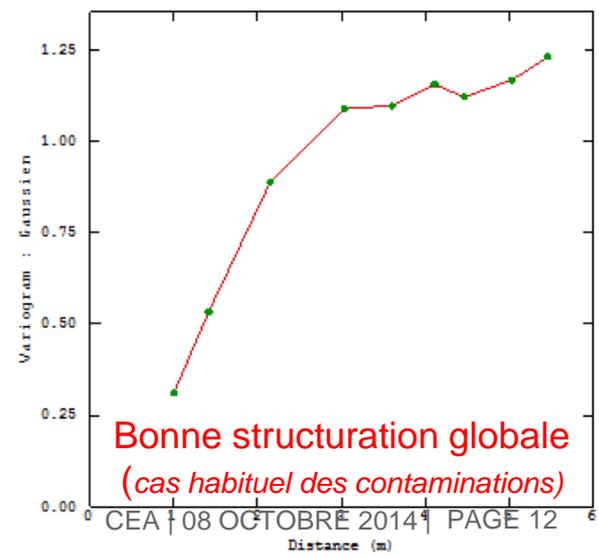
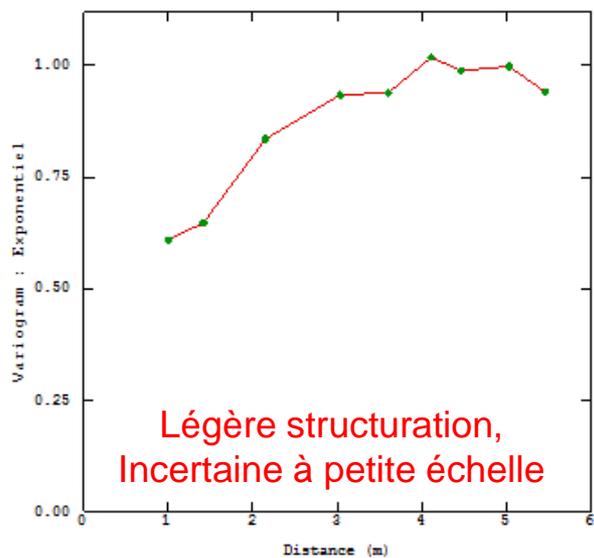
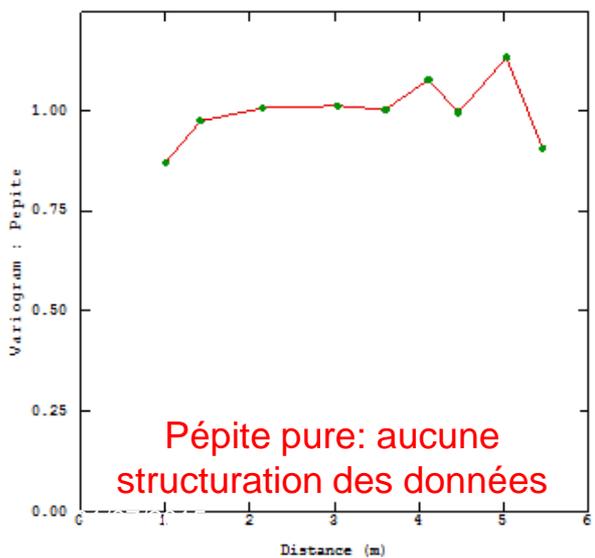
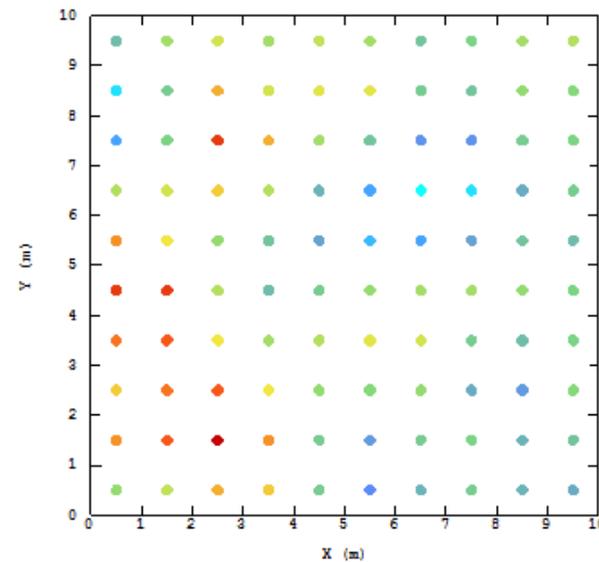
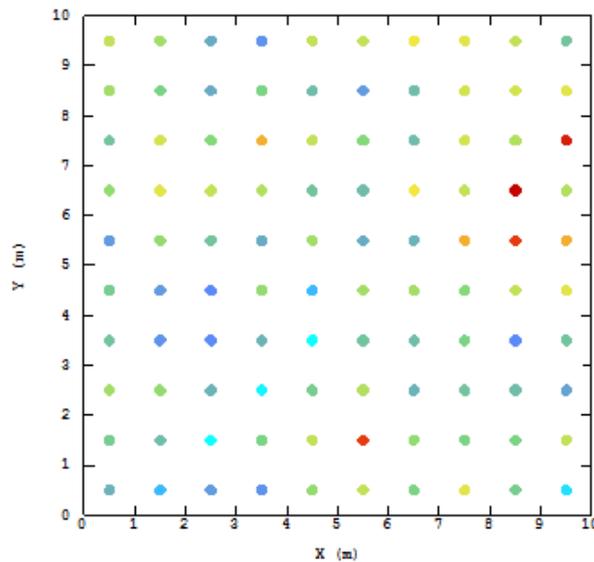
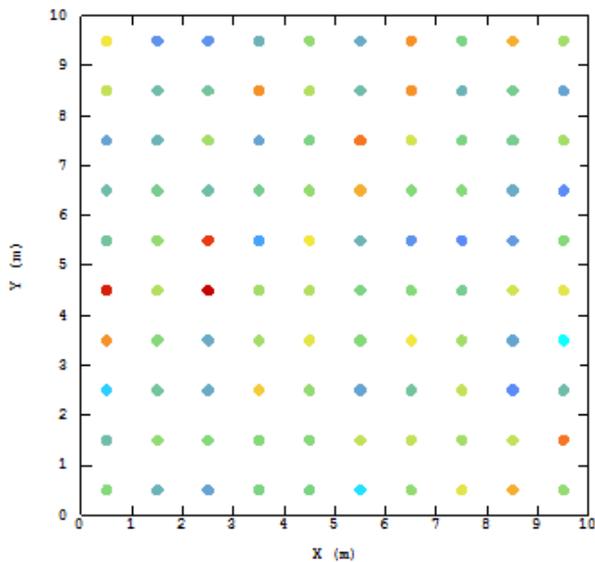
○ Outil fondamental de l'analyse géostatistique : le variogramme

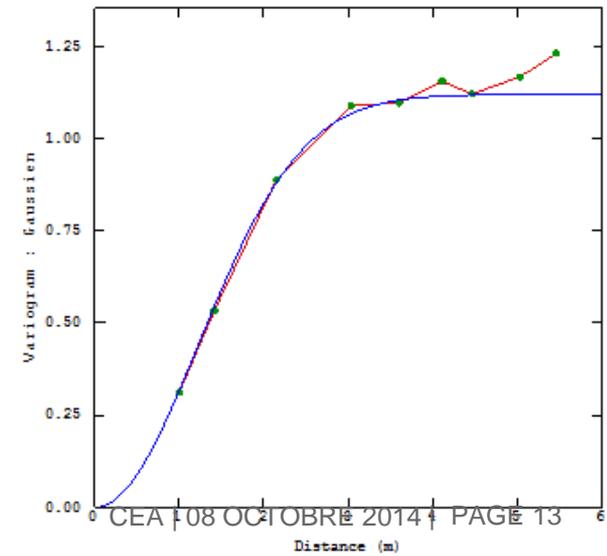
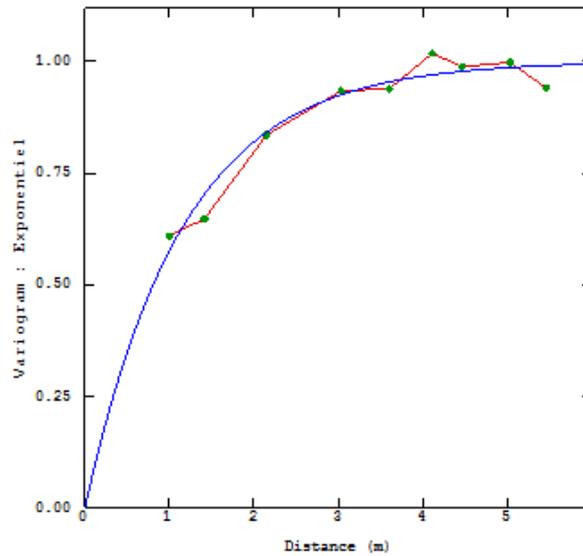
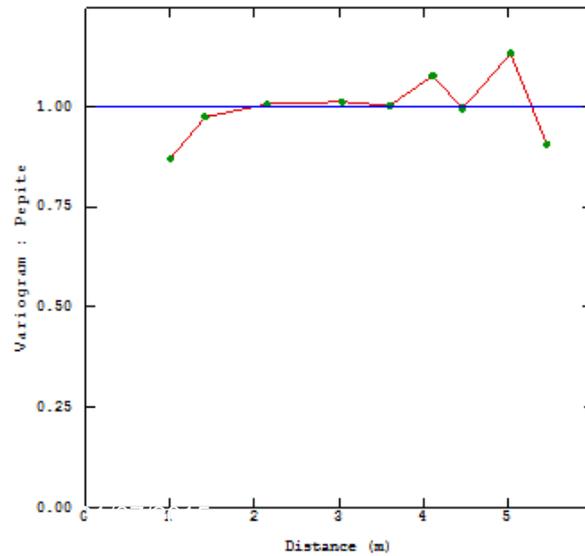
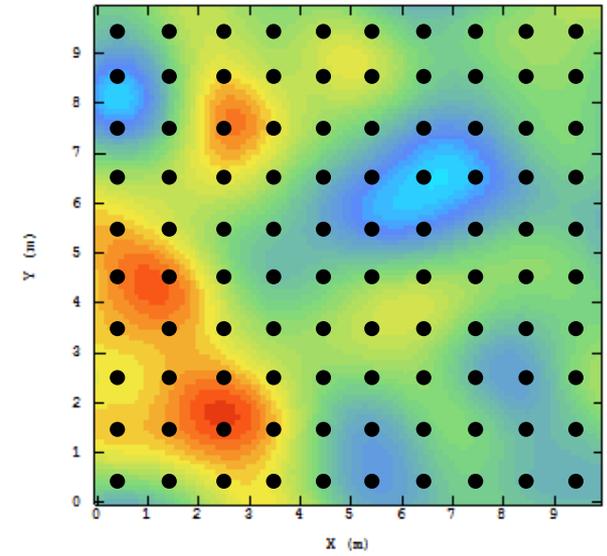
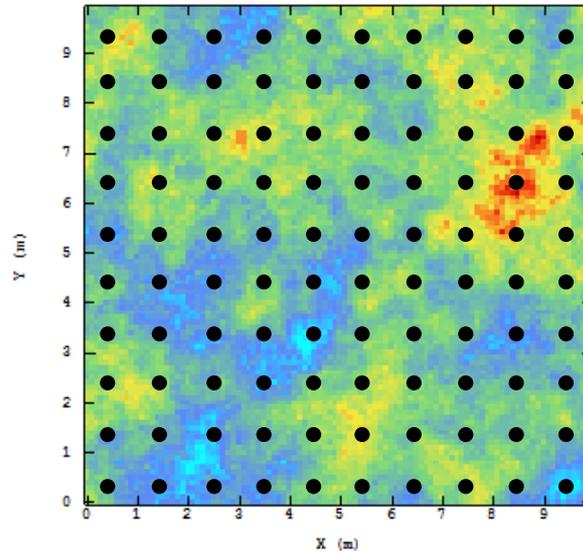
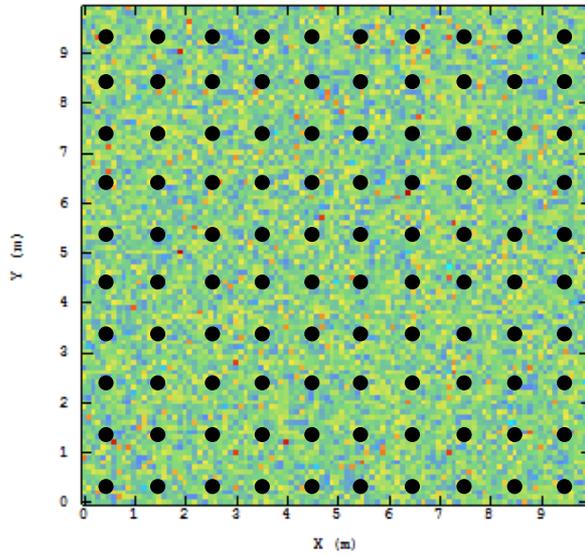
- en moyenne l'écart entre deux mesures PROCHES est PETIT
- en moyenne l'écart entre deux mesures ELOIGNEES est GRAND

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

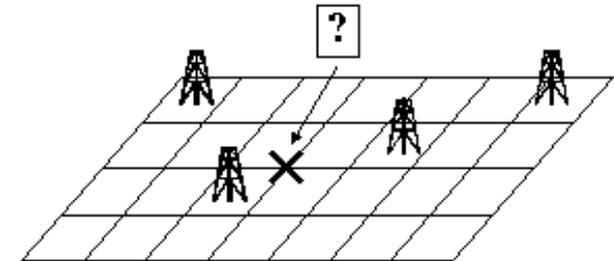
- ## ○ La façon dont le variogramme varie avec la distance est liée à la continuité spatiale du phénomène



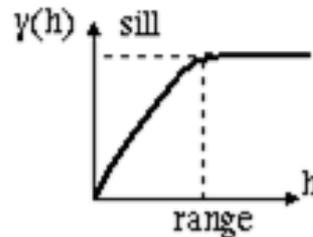
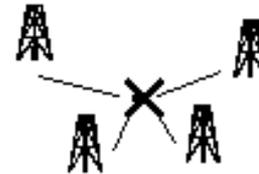
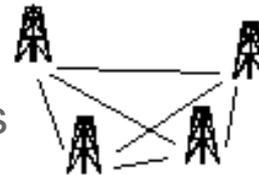




- D'une information dispersée,
- Le krigage est une combinaison des données tenant compte :



- Des distances entre les données
- Des distances entre les données et la cible
- De la structure spatiale



$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0$$

$$\text{Var}[Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h)$$

$$\begin{cases} -\sum_{\beta} \lambda_{\beta} \gamma_{\alpha\beta} + \mu = -\gamma_{\alpha 0} & \forall \alpha \\ \sum \lambda_{\alpha} = 1, & (\text{universalité}) \end{cases}$$

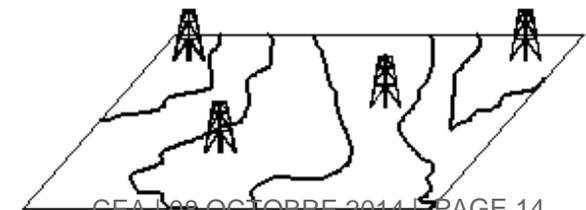
... amenant à une grille de résultats

$$Z^*(x_0) = \sum \lambda_{\alpha} Z(x_{\alpha})$$

(estimation)

$$\sigma^2 = \sum \lambda_{\alpha} \gamma_{\alpha 0} - \mu$$

(incertitude)



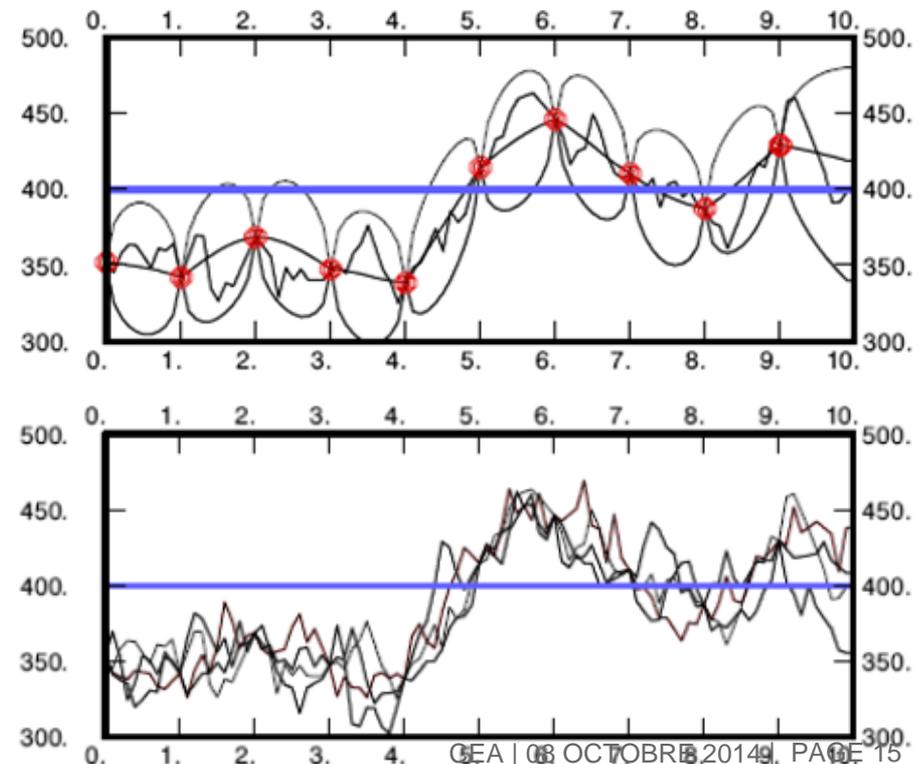
- **Le krigeage doit être accompagné de son incertitude !**

Minimisation de l'erreur d'estimation \neq Erreur d'estimation nulle

- **Analyse de risque par simulations géostatistiques**

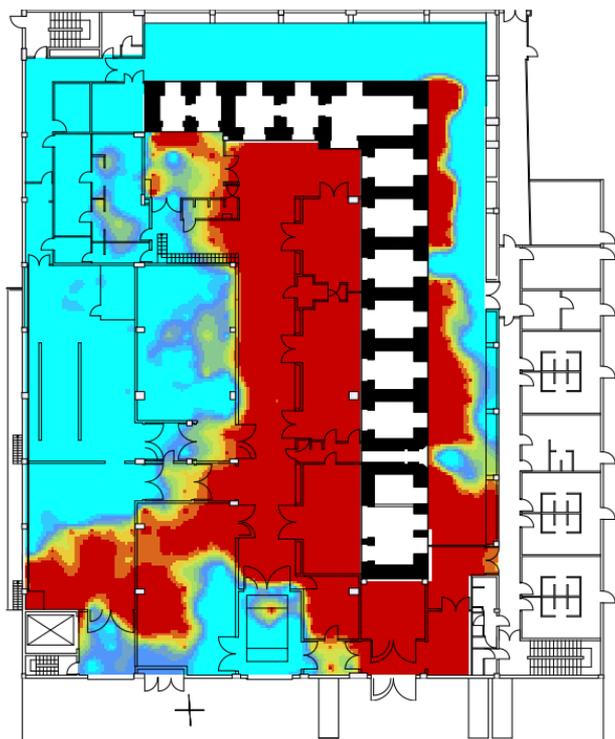
Reproduction de la variabilité réelle
(réalisations équiprobables respectant
les données et la structure spatiale)

Prise de décision par rapport à un seuil
pour classification des déchets
(opérateurs non linéaires)

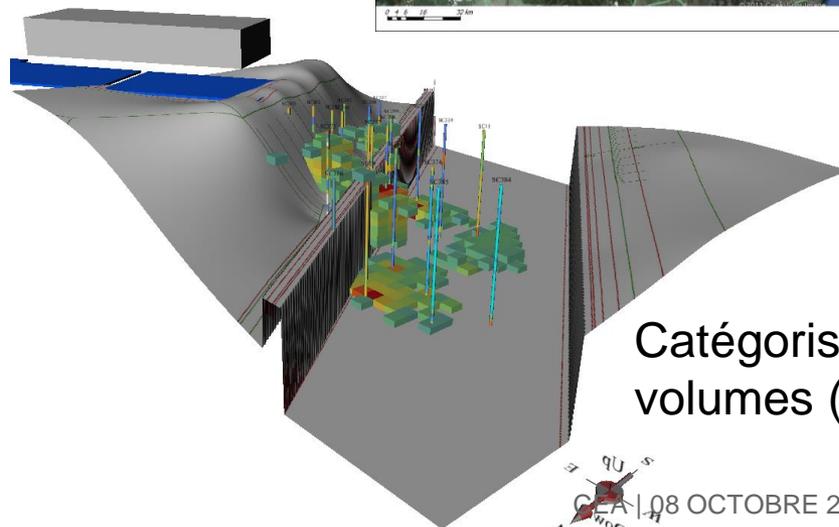
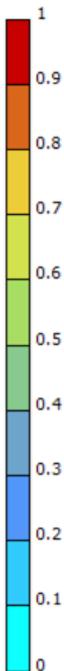


○ Cartographies et estimations 2D et 3D

- A l'échelle d'un pays
- A l'échelle d'une parcelle de sol ou d'un Site
- A l'échelle d'une installation (*bâtiment, SNLE...*)

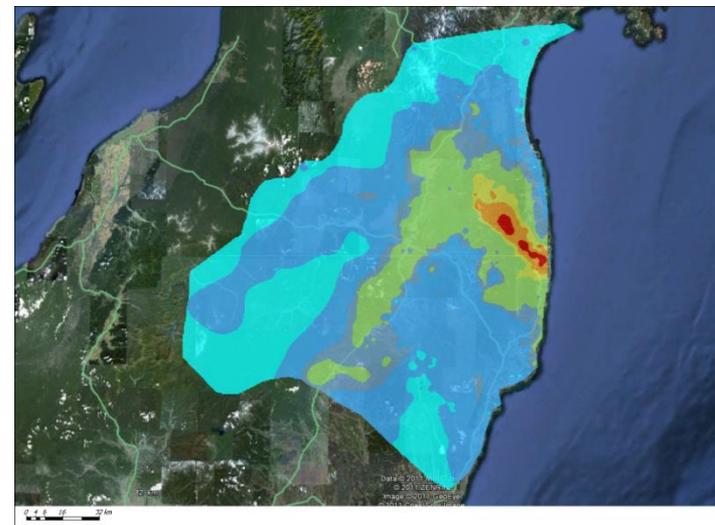


Classification des surfaces



Catégorisation des volumes (seuils)

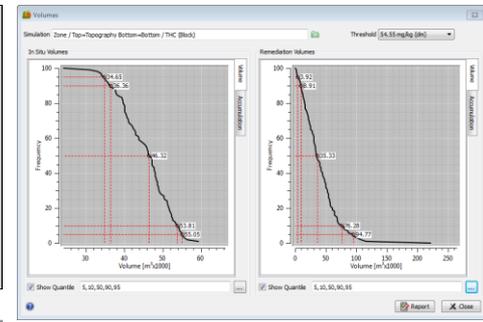
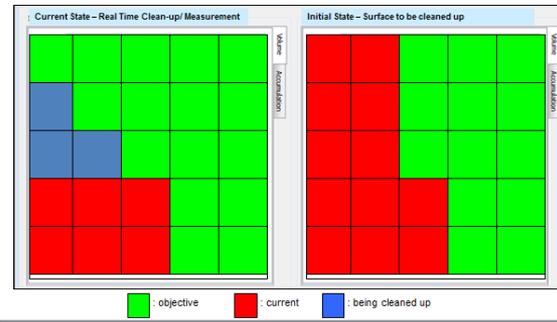
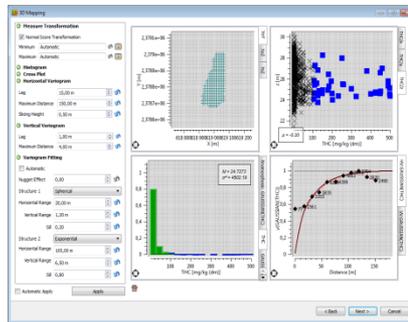
Impact sanitaire (dose)



- Le traitement des données par géostatistique est incontournable :
 - Prendre en compte les données de l'historique et de l'analyse fonctionnelles
 - Exploiter les mesures in situ et/ou d'échantillons en rationalisant les campagnes d'investigations
 - Quantifier les incertitudes et obtenir des cartographies réalistes
 - Prise de décision et maîtrise des coûts et délais dans les projets

- Dans un avenir proche la seule solution pour dimensionner de façon optimale les démantèlements tout en quantifiant et en maîtrisant l'activité résiduelle dans les sols et les structures de génie civil

- Envisager le « Pilotage » des assainissements avec mise à jour des cartographies radiologiques en temps réel (mesures et traitements de données associés à la robotique)



Merci à toute l'équipe :

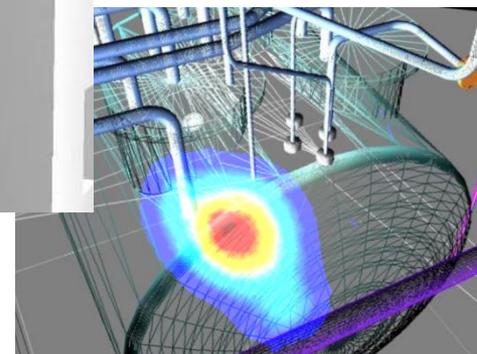
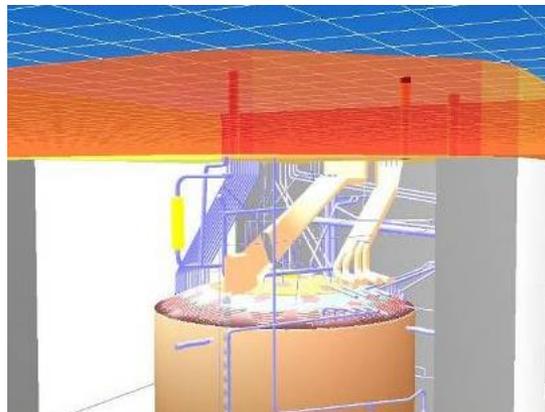
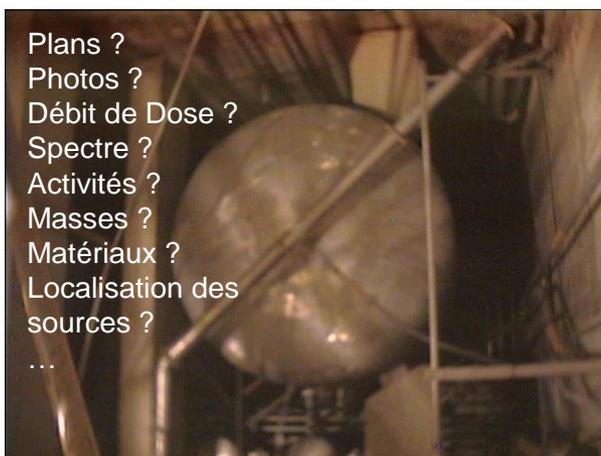
- Yvon Desnoyers,
- Noémie Galet
- Julien Attiogbe
- Emilie Aubonnet
- Jean-Yves Lalanne
- Vincent Goudeau
- Andrée Daniellou

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Fontenay-aux-Roses | 92265 – FONTENAY-aux-ROSES Cedex
T. +33 (0)1 46 54 82 94 | F. +33 (0)1 46 54 99 42

Etablissement public à caractère industriel et commercial | R.C.S Paris B 775 685 019

DSV/FAR/USLT/SPRE/SAS

Connaître l'état radiologique d'une installation nucléaire avant, pendant et à la fin des opérations de démantèlement est **nécessaire et complexe**

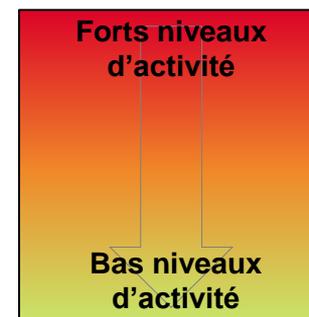


Plusieurs étapes

Bilan radiologique initial (chaque local doit être caractérisé)

Suivi d'opérations d'assainissement (états radiologiques amont/aval)

Contrôle final (garantir l'état de propreté radiologique)



Type d'activité et spectres variables selon le type d'installation

Usines d'enrichissement de l'U, Installations de retraitement du combustible, Réacteurs expérimentaux, Réacteurs de production, etc ...

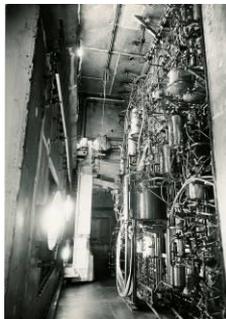
Plusieurs types de mesures

Mesures de terrain ou « in situ » (*Forte irradiation ambiante, accessibilité limitée, travail en aveugle et à distance*)

Mesures de déchets (*Géométries définies, locaux dédiés bas bruit, maîtrise des incertitudes*)

Mesures en laboratoire sur échantillons prélevés (*Très bonnes performances (LD), y compris sur radioéléments non mesurables in situ, problème de représentativité des échantillons*)

Plusieurs configurations de mesures



Tuyaux, cuves, fût,
BàG, cellules chaudes

...

Structures de génie
civil
Bétons, aciers ...



Divers déchets
et équipements

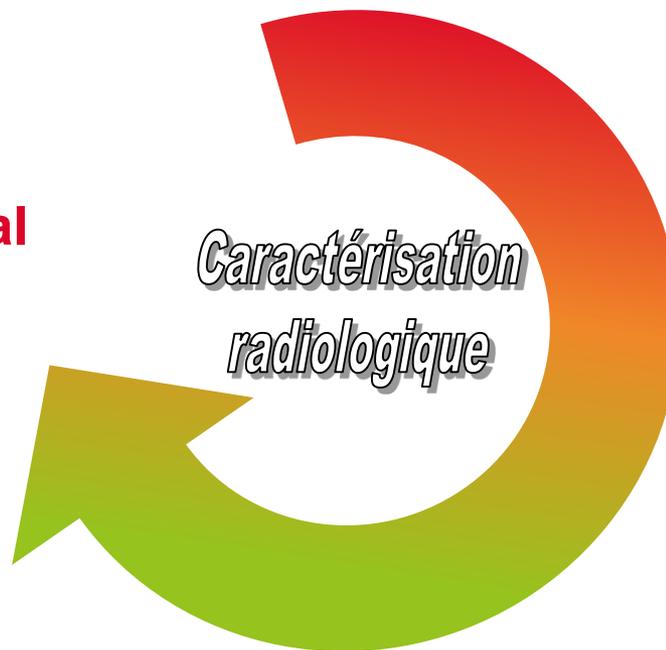


Inventaire initial

Imagerie gamma
Imagerie alpha
Spectrométrie gamma (CdZnTe,...)
Débits de dose
Cartographies, gamma scanning
Modélisation radiologique
Scénarios de démantèlement

Assainissement final

Spectrométrie gamma
(HpGe, LaBr₃, NaI)
Mesures surfaciques
Béton
Modélisation
Critères de décision
Limite de détection

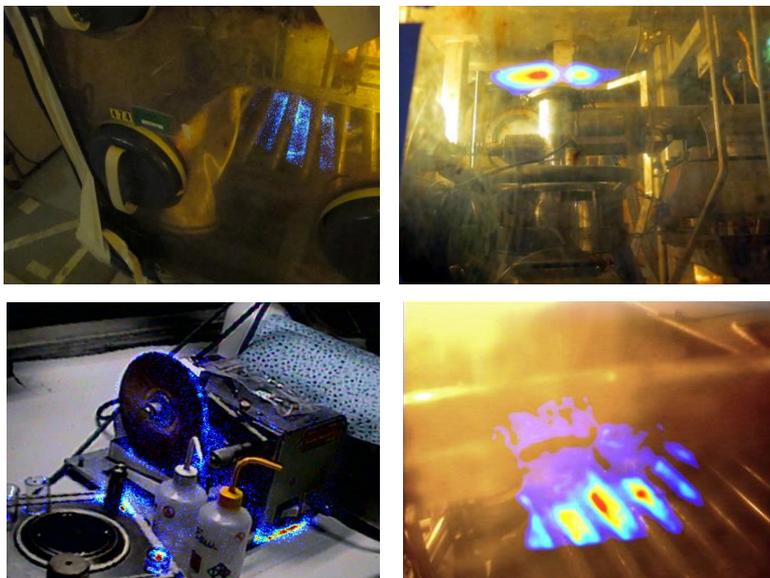


Suivi des opérations d'assainissement

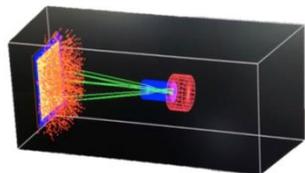
Imagerie gamma, alpha
Spectrométrie gamma
(CdZnTe, NaI, LaBr₃, HpGe)
Débits de dose
Temps réel
Modélisation radiologique
Déchets
Mesures neutroniques

Alpha Caméra

Localisation de zone de contamination alpha
Mesure à distance et à travers matériaux translucides
Système portable et compact (< 2kg)



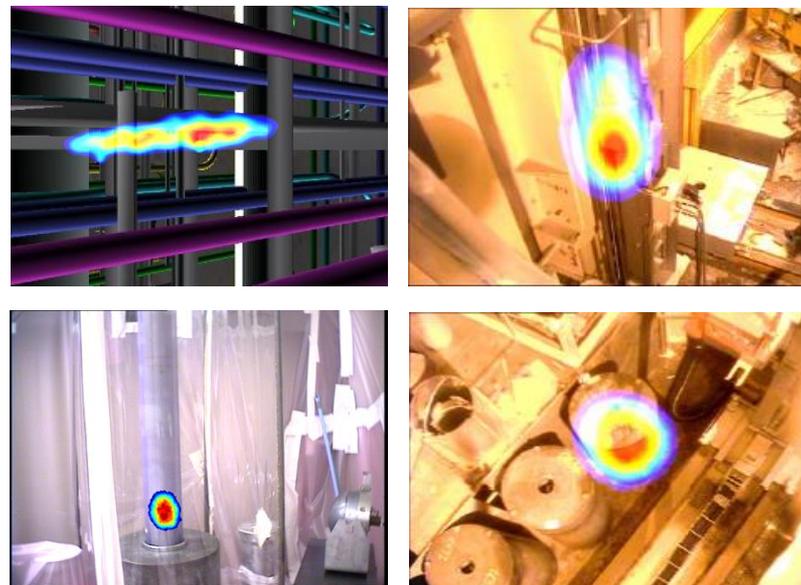
Cartographies initiales (ex. Boîte à gants)
Suivi de décontamination



Localisation et
quantification de l'activité
surfactive

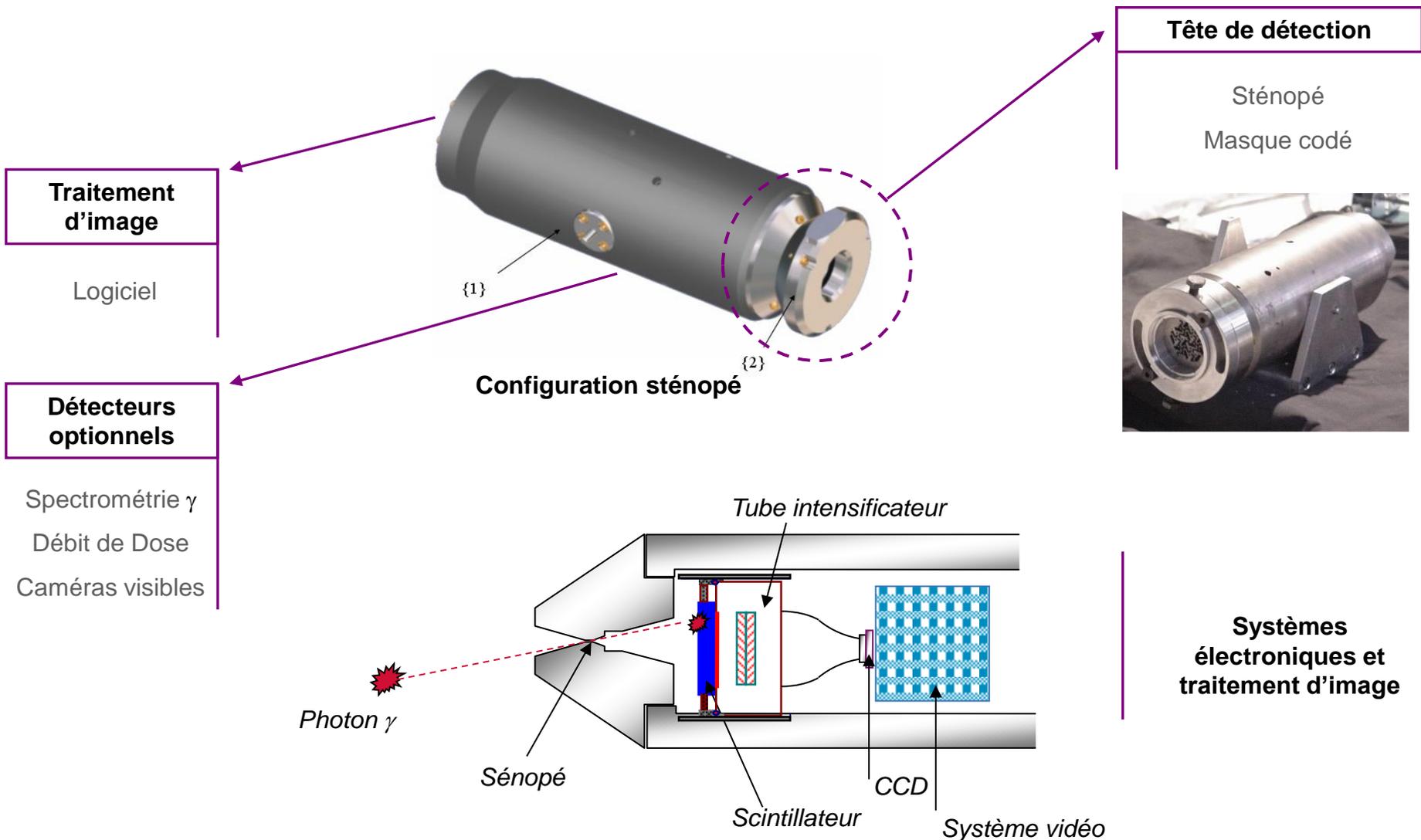
Gamma Caméra

Localisation de points chauds irradiants gamma
Mesure à distance
Système portable de poids variable (blindage)



Cartographies initiales
Suivi d'assainissement
Maintenance

Localisation et quantification de l'activité du point chaud
Couplage à la spectrométrie gamma collimatée + laser pour
l'identification des radioéléments



Traitement d'image

Logiciel

Détecteurs optionnels

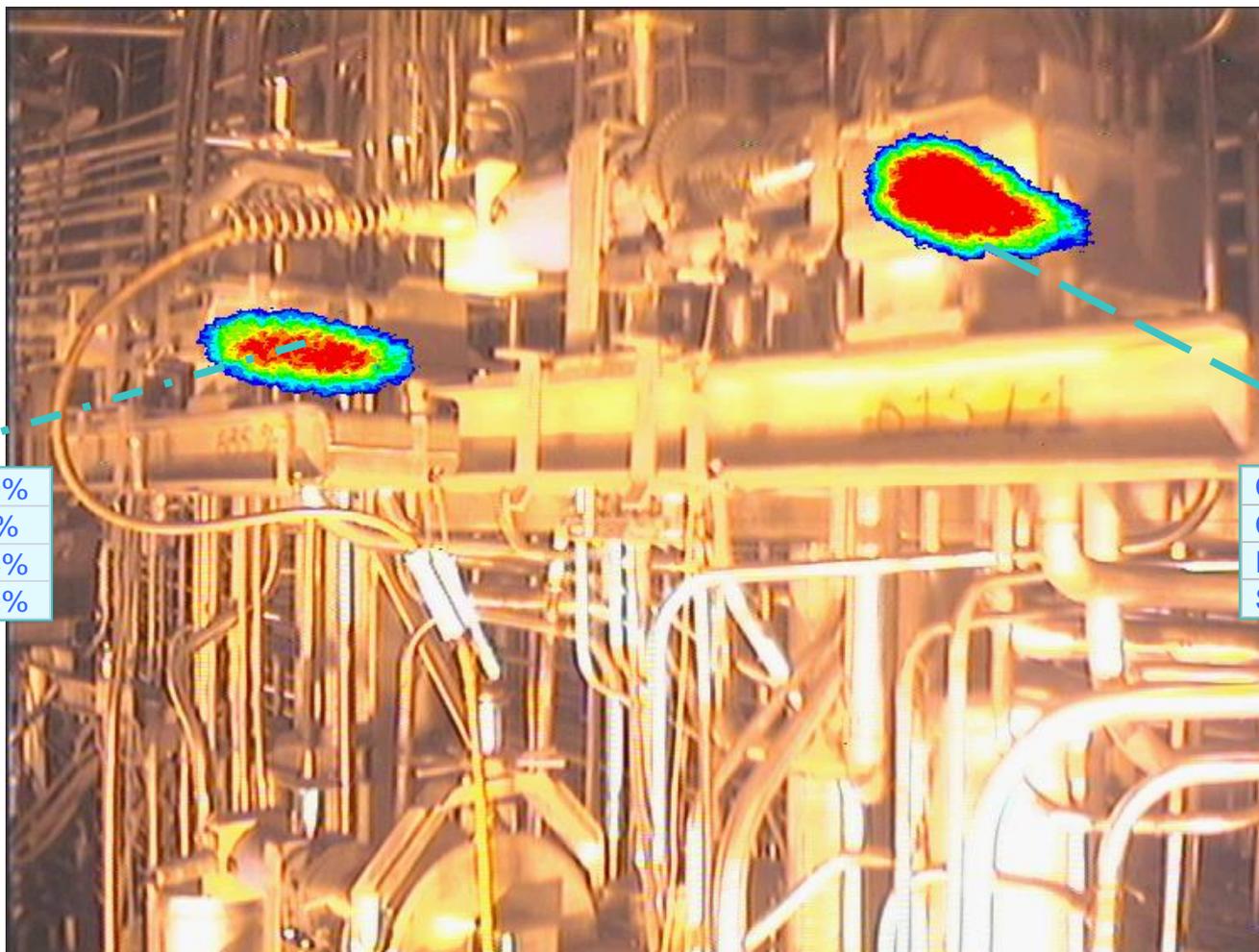
Spectrométrie γ
Débit de Dose
Caméras visibles

Tête de détection

Sténopé
Masque codé



Systèmes électroniques et traitement d'image

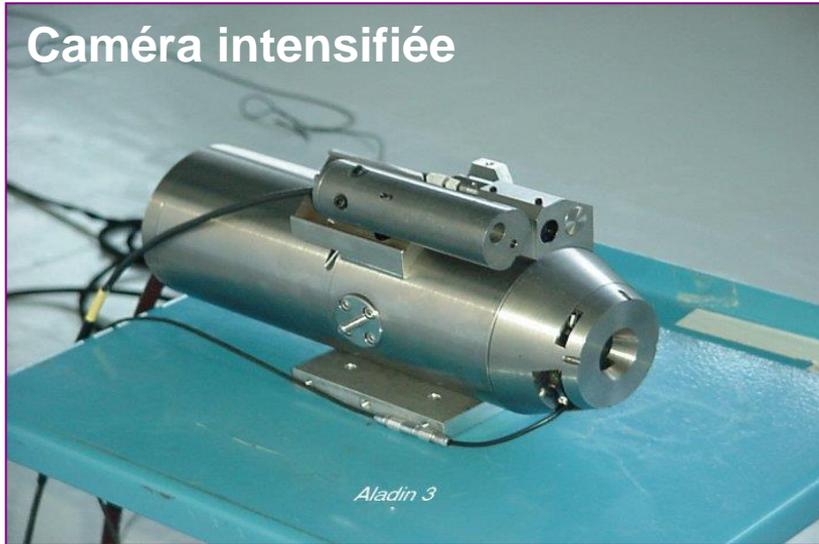


| | |
|--------|-------|
| Cs 137 | 41.9% |
| Cs 134 | 6.6% |
| Rh 106 | 27.6% |
| Sb 125 | 23.9% |

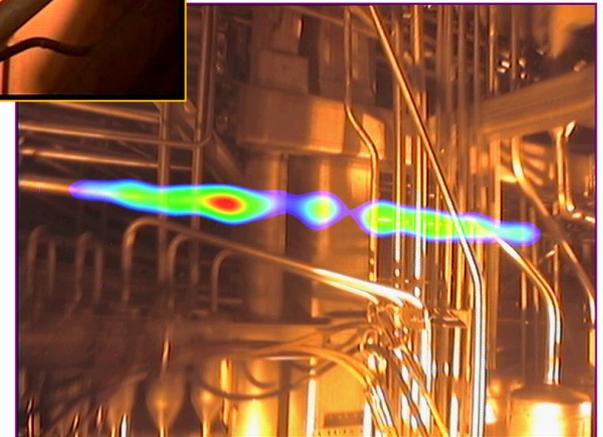
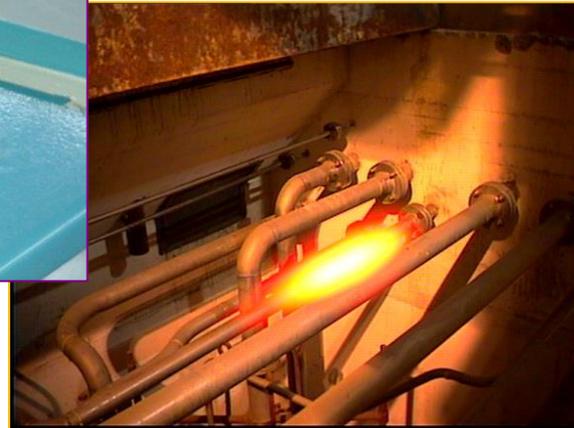
| | |
|--------|--------|
| Cs 137 | 37.1% |
| Cs 134 | 4.3% |
| Rh 106 | 17.6% |
| Sb 125 | 41,00% |

Exemple de mesure en cellule de retraitement (Atelier Pilote de Marcoule)

Caméra intensifiée



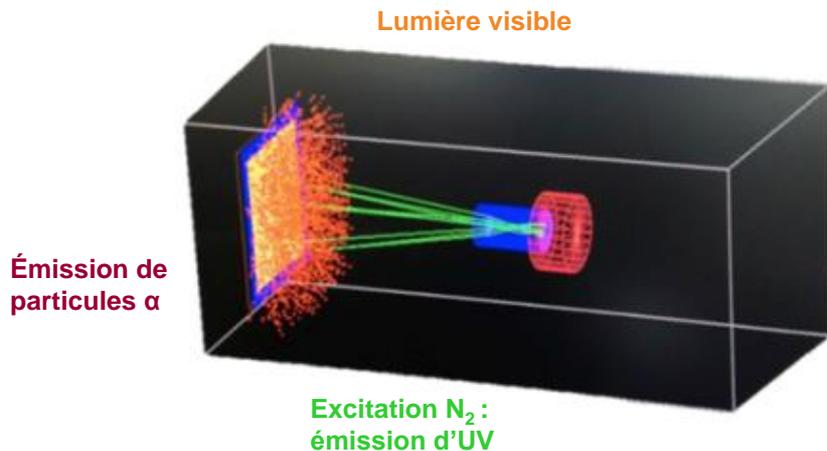
Objectif : Localisation de points chauds à distance, quantification du débit de dose, superposition à l'image visible



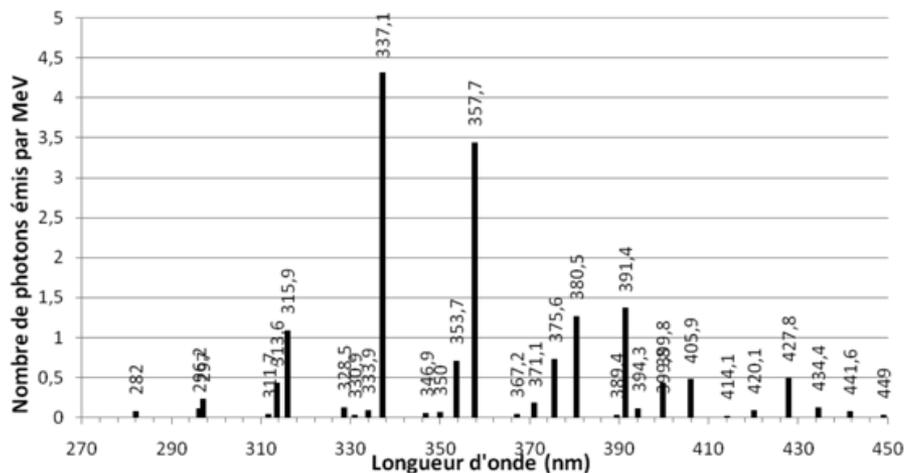
IPix™ (CEA/CANBERRA)

Nouvelle technologie de
gamma caméra portable
CdZnTe

Principe de fonctionnement : radio luminescence de l'azote



Camera UV intensifiée



λ des raies prépondérantes comprise entre
280 nm et 390 nm

Objectif : Localisation de sources
de contamination alpha à distance
et quantification de l'activité
surfactive déposée

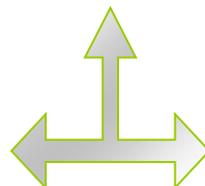
➤ Mise en œuvre sur Boîtes à Gants



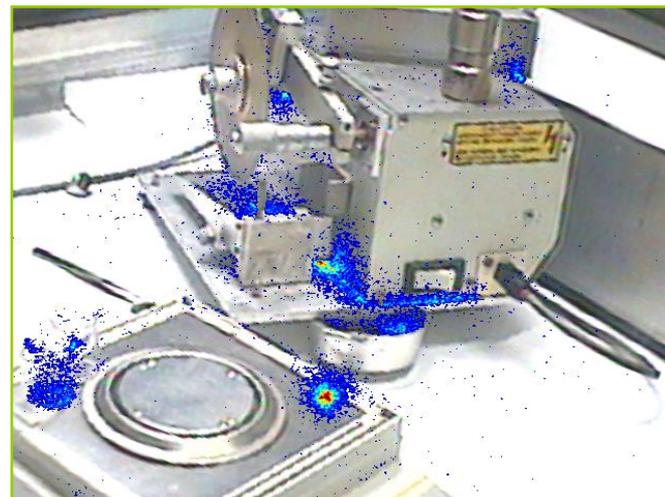
Atalante
(2009)



- Localisation des points chauds α
- Radionucléides : U / ^{241}Am / Pu
- Temps d'acquisition rapides



Résultat après
seuillage,
colorisation et
superposition



- Mesures à distance,
à travers vitre triplex (1,3 cm)
et verre au plomb (1,5 cm à 6 cm)

➤ Mise en œuvre sur Boîtes à Gants : Suivi d'assainissement

Avant



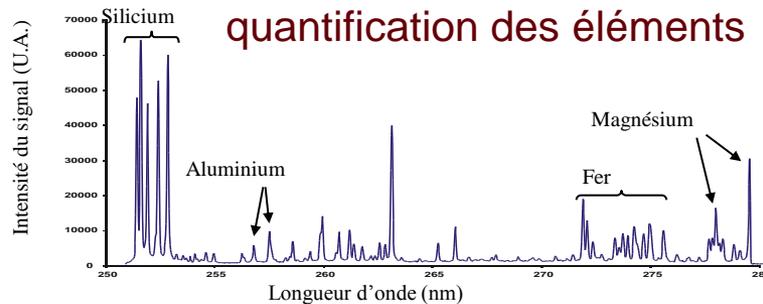
Après



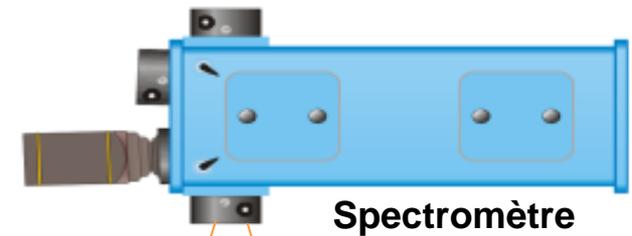
Temps d'acquisition des images ~ 2min

Durée totale de l'opération (Imagerie + assainissement) ~ 10min

4. Identification et quantification des éléments

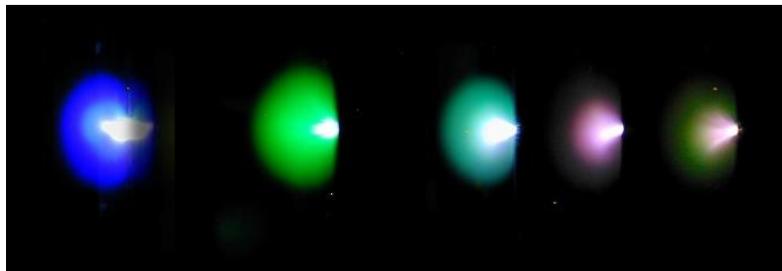


3. Enregistrement du spectre d'émission du plasma



1. Focalisation pour concentrer l'énergie du rayonnement (> GW/cm²)

2. Vaporisation et formation d'un plasma (vapeur d'atomes excités, d'ions et d'électrons)



Exemple de plasmas formés sur différents matériaux

- Analyse élémentaire :

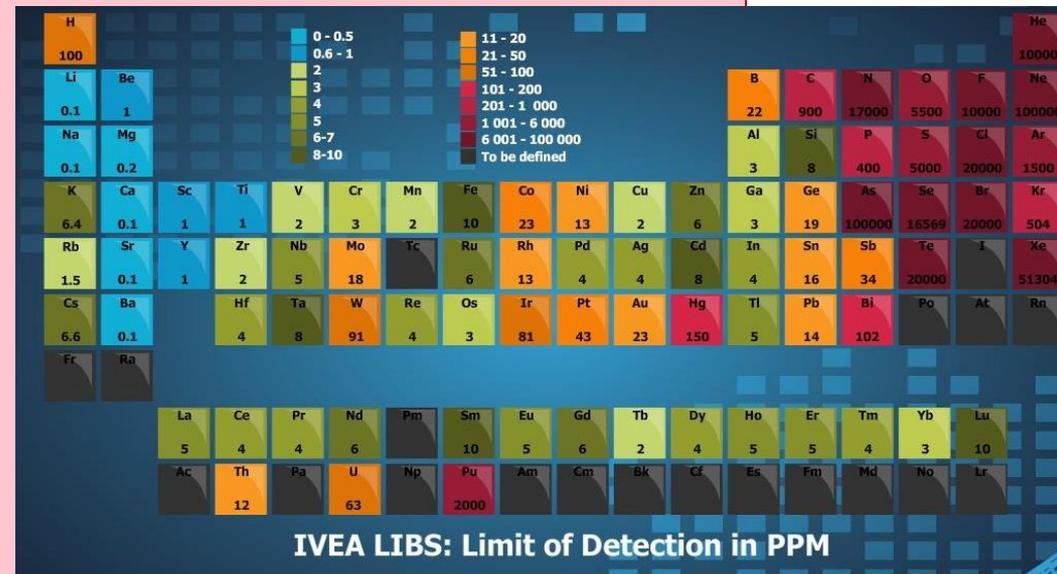
- Détection des raies atomiques et ioniques entre (200nm et 900nm)
- Tous les éléments
- Analyse isotopique seulement pour H, D, T

- Sensibilité

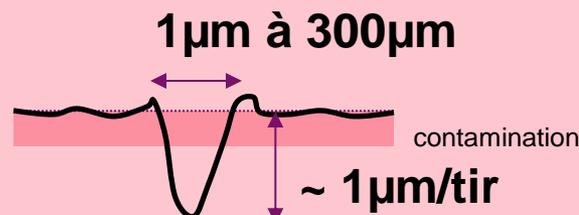
- Jusqu'à 0,5ppm

- Matériaux analysables : Tout

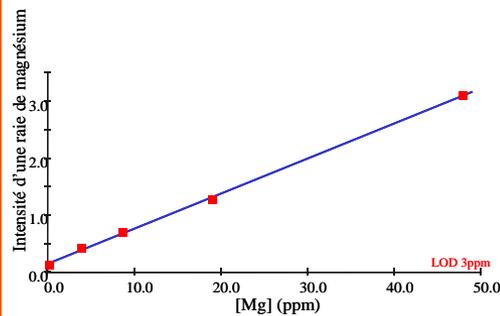
- Solide, liquide, gaz
- Conducteur et isolant



- Analyse de surface

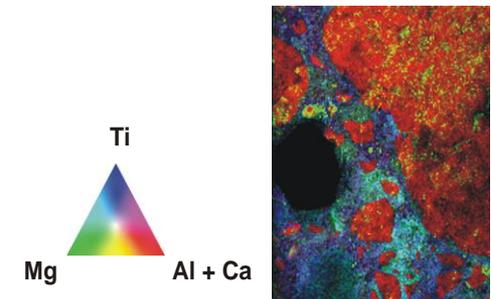


Analyse quantitative



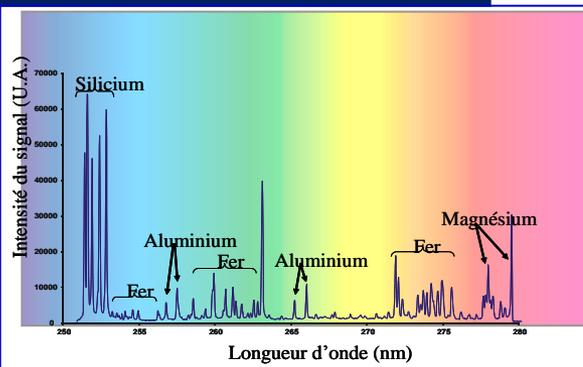
➤ Quantification à l'aide d'étalonnages

Cartographie



➤ Cartographie à l'échelle du μm

Reconnaissance de matériaux



➤ Identification par mesure de composition élémentaire

➤ Analyse discriminante (par chimiométrie)
(une signature spectrale propre à chaque matériau)



Mise en place d'une stratégie d'échantillonnage en fonction des besoins



choix des échantillons
représentatifs pour envoi
en laboratoire



Ex: Spectre type
déchets
Mesure de RNs
particuliers
Nécessite un échantillon
avec de l'ACTIVITE

Mesure In-Situ

Localisation des points chauds
Réponse immédiate

Laboratoire

Analyse complète
(large spectre)

- Apport de la mesure LABO : Analyse des beta purs, émetteurs alpha, incertitude de mesure plus faibles, très faible LD

MAIS

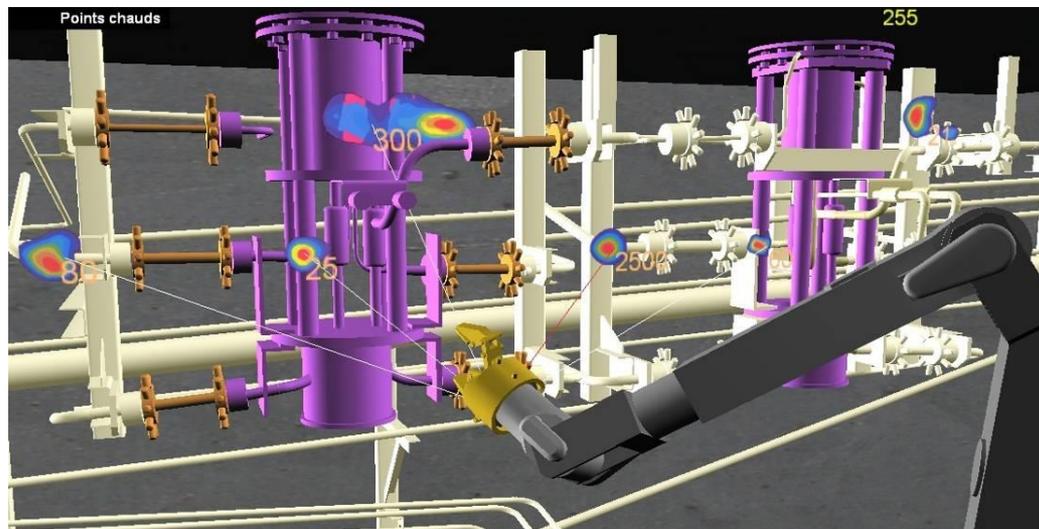
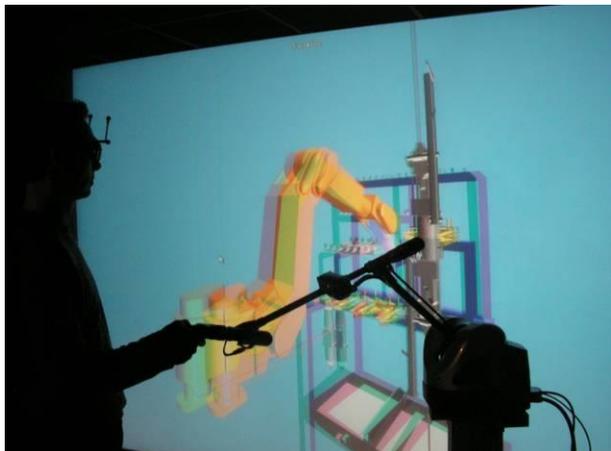
coûts & délais élevés et peu d'échantillons traités

MEB de table

- Développements: intérêts de l'utilisation de techniques analytiques peu coûteuses et plus compactes : Fluo X, DRX, MEB, IR



LIEN AVEC LA REALITE VIRTUELLE

**Objectif :**

Utiliser la **simulation** pour préparer les interventions en milieu actif en tenant compte des différentes contraintes (conception, maintenance, démantèlement)

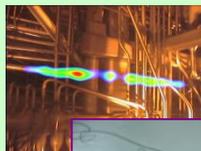
Simulation en temps réel de la dose opérateur.

Nécessite une bonne connaissance de l'état radiologique de l'installation.



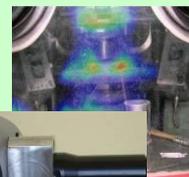
Salle immersive au CEA Marcoule

Localisation de points
chauds γ
Spectrométrie gamma



Imagerie Gamma

Localisation de
zone de
contamination
alpha



Imagerie alpha

Préparation et validation



Débit de dose



Localisation
Quantification
Anticipation



Mesures surfiques

Activité surfique: $Bq.cm^{-2}$
Discrimination α, β, γ



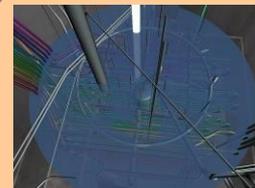
spectrometrie γ

Estimation d'activités
(HA \rightarrow TFA)

Ex. Mesure de la pénétration
de la contamination des
bétons



Outils robotiques



Modélisation 3D

Merci à toute l'équipe :

- Mehdi Ben Mosbah
- Nadine Coulon
- Olivier Dugne
- Pascal Fichet
- Florence Goutelard
- Daniel L'Hermitte
- Julien Venara

Merci pour votre attention

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Marcoule | DTEC/SDTC/LSTD | Bt 217
BP 17171 | 30207 Bagnols-sur-Cèze cedex
T. +33 (0)4 66 79 17 41 | F. +33 (0)4 66 79 66 25

Direction de l'Energie Nucléaire
Département de technologie du cycle du combustible
Service de Développement des Technologies du Cycle
Laboratoire de la Simulation et des Techniques de
Démantèlement