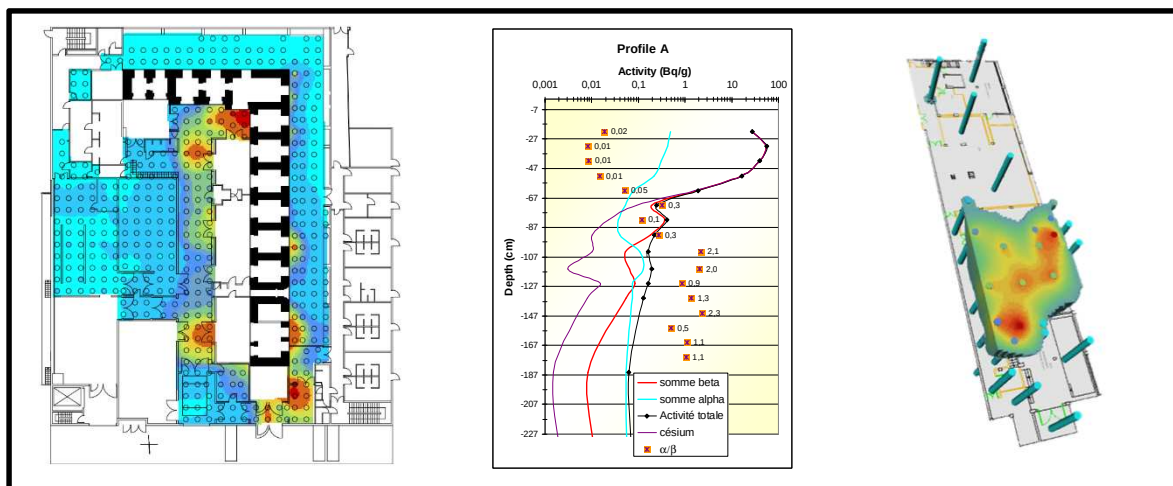


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

# MÉTHODOLOGIE POUR LA CARACTÉRISATION RADIOLOGIQUE ET STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE : DE LA CARACTÉRISATION AUX CONTRÔLES DE FIN D'ASSAINISSEMENT



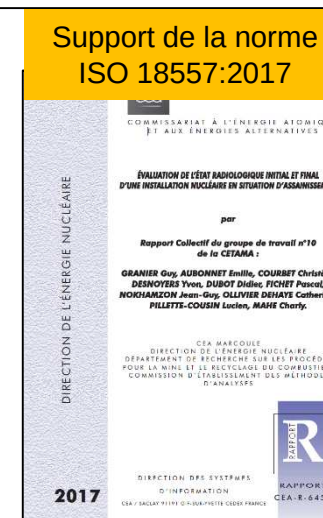
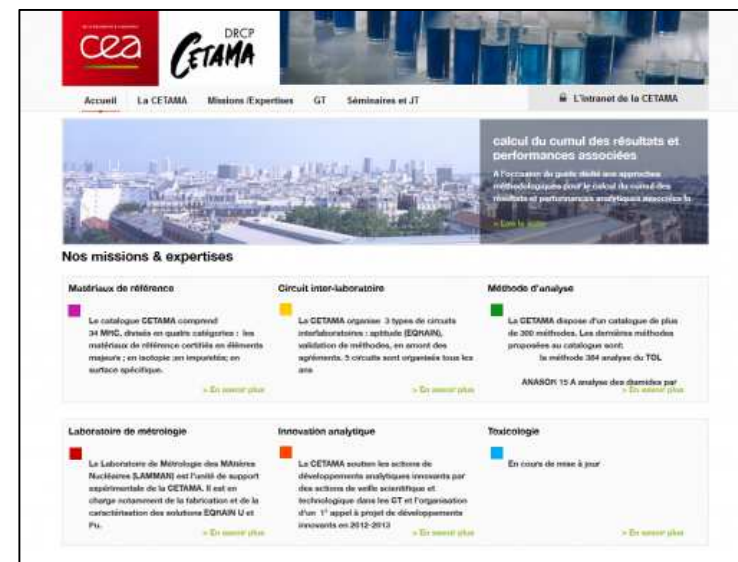
SFRP, Espace Centenaire – Paris XII | Lavielle Marie

06 FÉVRIER 2019

|                                                   |      |
|---------------------------------------------------|------|
| Introduction                                      | P.03 |
| Contexte réglementaire                            | P.04 |
| Rappel de la méthodologie globale                 | P.05 |
| Caractérisation : mesures non destructives        | P.06 |
| Caractérisation : mesures destructives            | P.09 |
| Approche/ Synthèse de stratégie d'échantillonnage | P.10 |
| Analyses statistiques                             | P.13 |
| Analyses géostatistiques                          | P.14 |
| Exemple                                           | P.15 |
| Conclusion                                        | P.17 |

- Création de la CETAMA en 1961
- La CETAMA (Commission d'ETAbblissement des Méthodes d'Analyse) du CEA de Marcoule a pour mission de mener les actions visant à l'amélioration de la qualité des résultats des mesures et analyses.
- Anime un réseau d'analystes, d'experts structuré en groupe thématique (GT)
- GT 10 : définition de méthodes d'échantillonnage pouvant s'appliquer aux déchets, aux sols / structures contaminés mais aussi aux échantillons de laboratoires.
- Rédaction de deux rapports techniques sur le sujet

1. CETAMA working group n°10 (2014) Soil Radiological Characterisation Methodology (CEA-R-6386 | ISSN 0429-3460)
2. CETAMA working group n°10 (2017) Évaluation de l'état radiologique initial et final d'une installation nucléaire en situation d'assainissement (CEA-R-6455 | ISSN 0429-3460)



# CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

1995



2001



Circulaire de la ministre de l'environnement aux Préfets de région et département en date du 8 février 2007

2008



2011

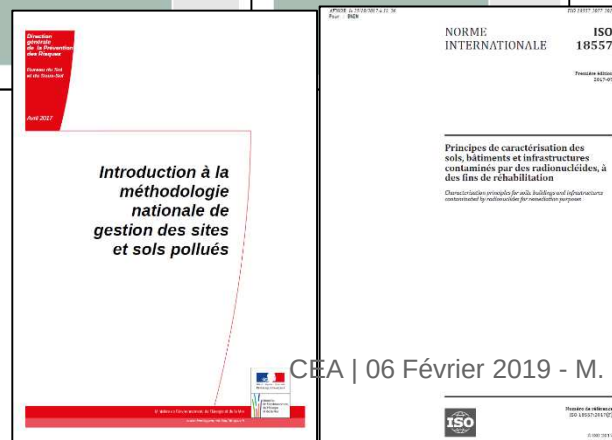


2014



2017

2017



2018

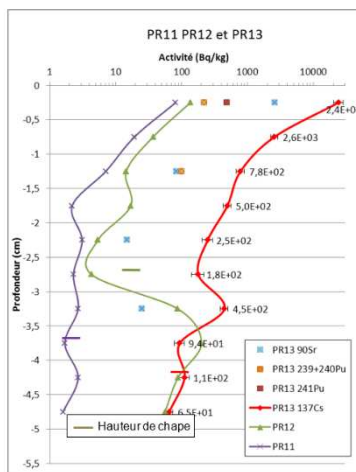
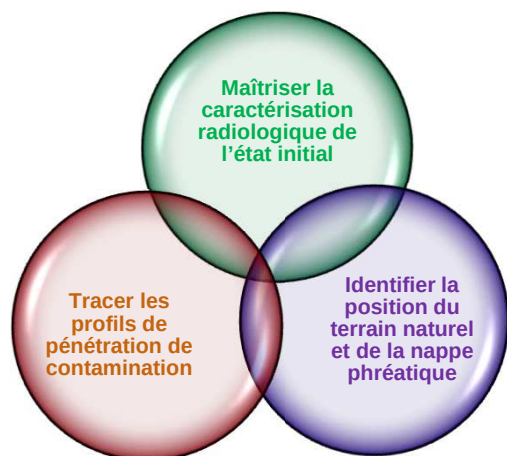
NF X31-620 du 7/12/2018  
« Qualité du sol – Prestations de services relatives aux sites et sols pollués »

## Ministère de la Transition Ecologique et Solidarité

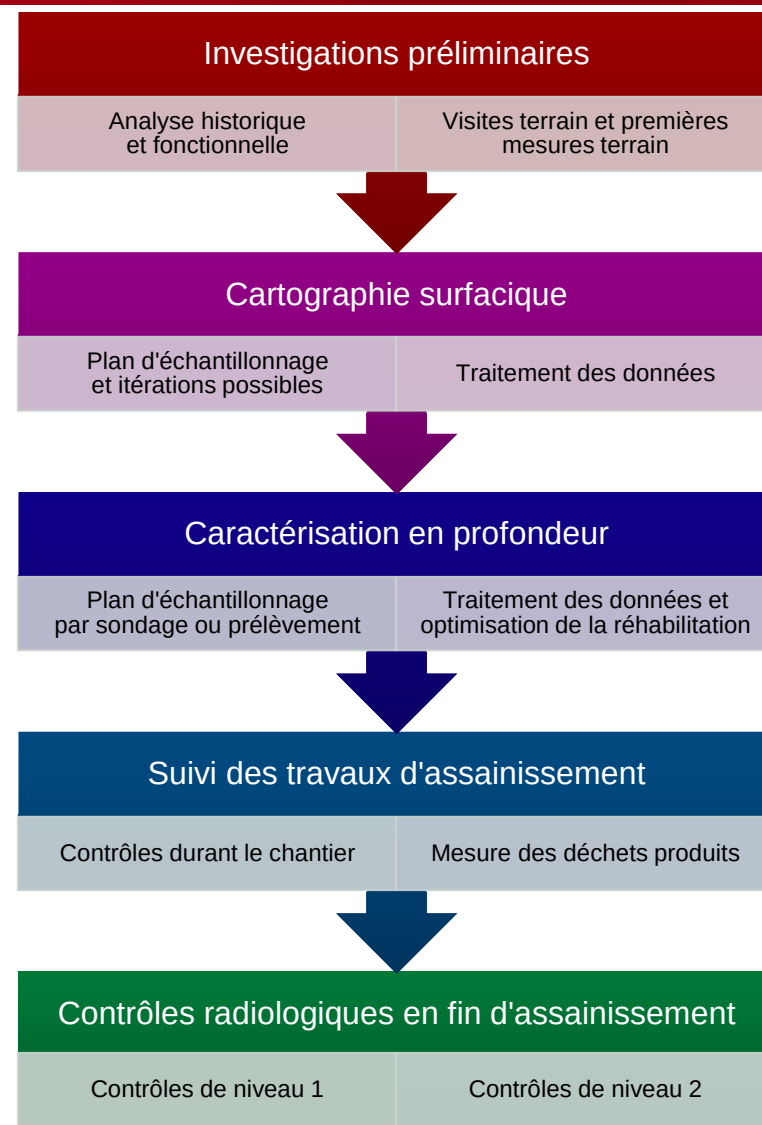
- 1993 : mise en place d'une politique de réhabilitation et traitement des sites pollués (BASIAS)
- 1996 : hiérarchisation et classification des outils
- 1999 : principe de gestion des risques (BASOL)
- 2007 : première refonte de la méthodologie

# RAPPEL DE LA MÉTHODOLOGIE GLOBALE

|                             | Analyse historique et fonctionnelle | Cartographie surfacique           | Investigations en profondeur         |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Nature des données          | Rapports, archives, interviews...   | Débit de dose, mesures in situ... | Prélèvements et analyses laboratoire |
| Qualité et coût des données |                                     |                                   |                                      |
| Quantité de données         |                                     |                                   |                                      |



- Caractérisation radiologique initiale :
  - Mesures ponctuelles, cartographie surfacique
  - Prélèvements destructifs et réalisation des profils de migration
  - Estimation du TS pour établissement des Spectre Type et calculs prévisionnels d'activité moyenne des déchets



## Mesures de débit de dose

- Comptage global de l'ensemble des rayonnements (gamma généralement).
- Avantages : Facilité de mise en œuvre, rapidité d'exécution, estimation des niveaux d'activité si le lien entre l'activité présente et l'irradiation induite est correctement établi. Quantification, en relatif, les évolutions de la contamination.
- Inconvénients : difficulté pour établir cette conversion en présence d'une géométrie complexe, d'une hétérogénéité de la distribution de la contamination en surface ou en profondeur, du niveau du bruit de fond, etc. Elles ne permettent pas non plus d'identifier les radionucléides présents ni leurs quantités respectives.
- De récents développements permettent par exemple de coupler une sonde de mesure avec une caméra permettant d'obtenir, en temps réel, une visualisation sur l'écran vidéo de la contamination (par la mesure de son irradiation) superposée à l'image filmée.





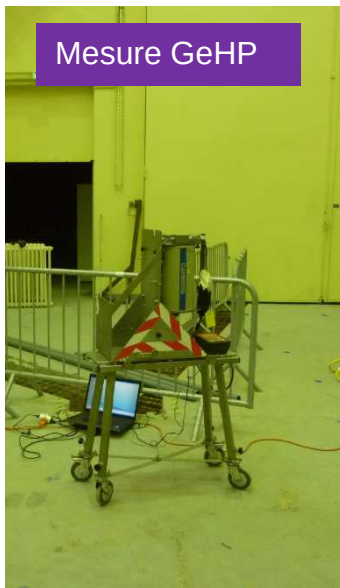
Frottis



## Mesures de contamination surfacique

- Réalisées soit par prélèvements de surface (frottis) ensuite mesurés par des dispositifs adaptés, soit par des mesures directes en tenant le dispositif de mesure (sonde ou contaminamètre) juste au-dessus de la zone à mesurer (généralement quelques dizaines ou centaines de cm<sup>2</sup>).
- Avantages : Contrairement aux mesures d'ambiance, chaque sonde permet de mesurer un type de rayonnement (alpha, bêta, gamma, neutron, X, etc.) et fournit une conversion en activité surfacique dépendant également d'une modélisation (surface, bruit de fond...) et du radionucléide émetteur.
- Inconvénients : Les différents radionucléides ne sont toutefois pas discriminés.

Mesure GeHP



## Mesures par spectrométrie gamma in situ

- Utilisation de sondes un peu plus complexes qui permettent d'obtenir une analyse plus détaillée des radionucléides émetteurs gamma.
- Avantages : Les radionucléides émetteurs gamma présents sont ainsi identifiés ainsi que leurs ratios respectifs. Les mesures in situ par spectrométrie gamma sont largement répandues et fournissent, avec des hypothèses de modélisation de la contamination, des niveaux d'activité massique par radionucléide.
- Comme certains radionucléides rayonnent à différents niveaux d'énergie, des travaux récents tentent de déterminer les caractéristiques de la profondeur de la contamination en s'appuyant sur la différence d'atténuation des différents pics en fonction de l'énergie d'émission.



# CARACTÉRISATION : MESURES DESTRUCTIVES

Du prélèvement ....

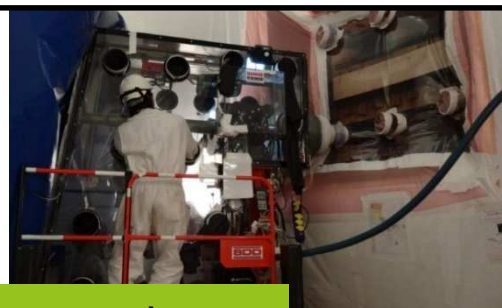
Aux méthodes d'analyses et de mesures



Surfaçage



Tarière manuelle



Sondages soniques



## Quantification des radionucléides:

- Comptage alpha bêta total,
- Scintillation liquide pour la mesure des émetteurs bêta
- ICP-MS pour la mesure des émetteurs bêta purs, bêta, X ou gamma de très faible énergie ou alpha dont la période est supérieure à 300 ans,
- Spectrométrie alpha,
- Spectrométrie gamma.

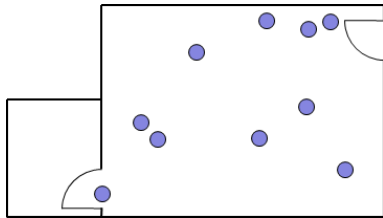
## Pour les éléments non radiologiques :

- Mesures élémentaires, chromatographie (HCT, PCB, BTEX, COHV, anions,...),
- Mesure de complexants organiques,
- Mesures COT (Carbone Organique Total),
- pH, conductivité...

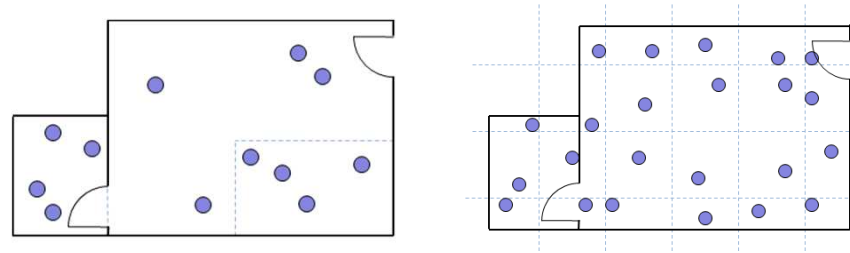
# APPROCHES DE STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

## ■ Stratégie aléatoire :

### ■ Aléatoire pur

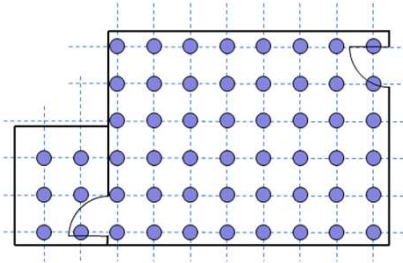


### Aléatoire stratifié.

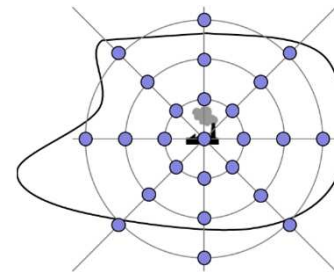


## ■ Stratégie systématique :

### ■ Maille régulière

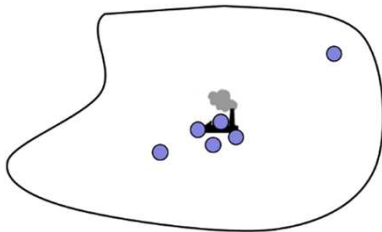


### Grille circulaire.

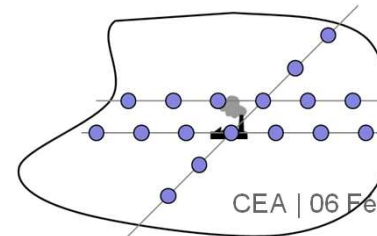


## ■ Stratégie préférentielle :

### ■ Jugement



### Profil.

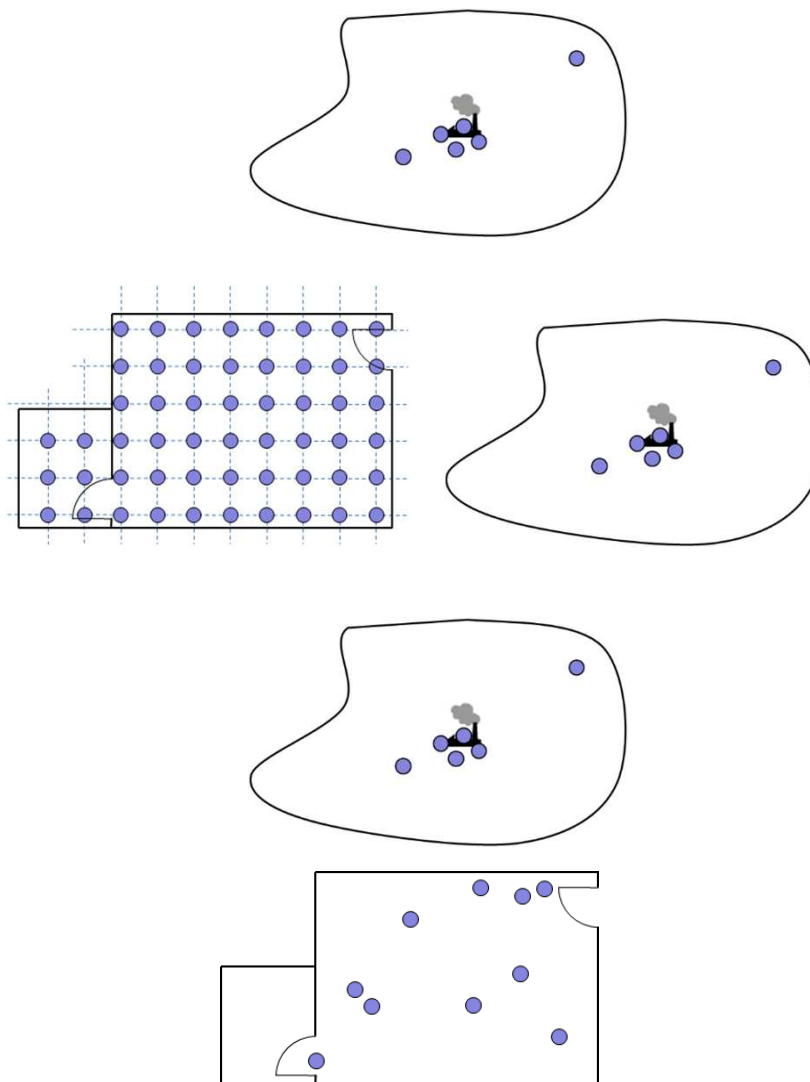
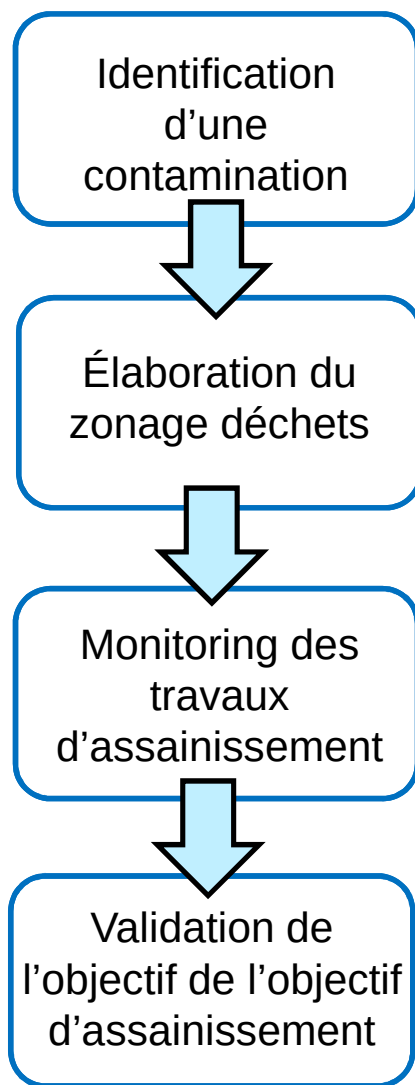


# SYNTHÈSE DES STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE

| Stratégie d'échantillonnage |                     | Utilisation                                                      | Avantages                                                                       | Limitations                                                                       |
|-----------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Approches probabilistes     | Aléatoire           | Zone homogène (pas de contamination, fin d'assainissement)       | Utilisation des statistiques classiques                                         | Deux mesures peuvent être proches, d'autres zones non investiguées                |
|                             | Aléatoire stratifié | Vastes sites avec des aires différenciées (matrice, isotopie...) | Traitement statistique par zones homogènes                                      | Difficultés de mise en œuvre et d'analyse des résultats                           |
|                             | Systématique        | Reconnaissance de site, cartographie de la contamination         | Minimisation du biais et couverture homogène de l'ensemble du site              | Nombre important de mesures                                                       |
| Approches non probabilistes | Jugement            | Levée de doute, évaluation du risque, repérage de sources        | Nombre très restreint de données nécessaires                                    | Biais par la subjectivité du positionnement (déconseillé pour tests statistiques) |
|                             | Circulaire          | Extension autour d'une source                                    | Gradient de diffusion en fonction de la distance à la source                    | Utilisation limitée (configuration spécifique)                                    |
|                             | Profil              | Structures linéaires, sondages                                   | Caractérisation le long de transects <sup>1</sup> , nombre restreint de données | Utilisation limitée (configuration spécifique)                                    |

<sup>1</sup> Un transect est une ligne virtuelle ou physique que l'on met en place pour étudier un phénomène où l'on comptera les occurrences. Cet échantillonnage (systématique ou aléatoire) peut donner lieu à l'utilisation de quadrats. (source Wikipedia)

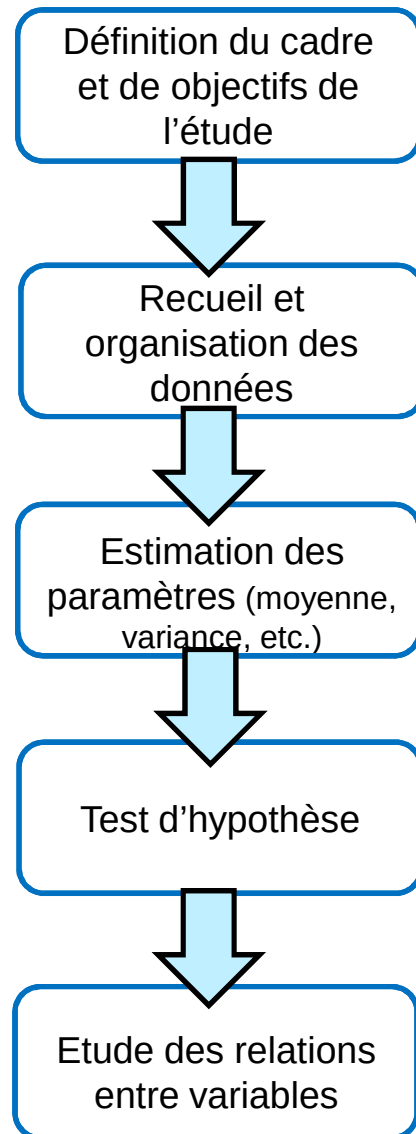
# ADAPTER LA STRATÉGIE D'ÉCHANTILLONNAGE



*Traitement associé des données*

Géostatistique

Statistiques classiques



## Caractérisation finale

### ■ Approche risque : test d'hypothèse

| H <sub>0</sub> : L'activité résiduelle dans la zone réhabilitée est supérieure au critère de réhabilitation |                          |                                                                          |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                             |                          | Décision                                                                 |                                                                         |
|                                                                                                             |                          | Rejette H <sub>0</sub> (est inférieur au critère)                        | Accepte H <sub>0</sub> (dépassé le critère)                             |
| État réel de la zone d'étude                                                                                | Est inférieur au critère | Pas d'erreur                                                             | Non déclassement d'une zone conforme (erreur de 2 <sup>de</sup> espèce) |
|                                                                                                             | Dépasse le critère       | Déclassement d'une zone non conforme (erreur de 1 <sup>ère</sup> espèce) | Pas d'erreur                                                            |

Représentation des erreurs de décision pour un déclassement (Table D.1, MARSSIM)

Erreur de 1<sup>ère</sup> espèce : risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie

Erreur de 2<sup>ème</sup> espèce : risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est fausse

### ■ Test non paramétrique dans MARSIMM

■ Test de « Wilcoxon Rank Sum »

■ Test de « Sign »

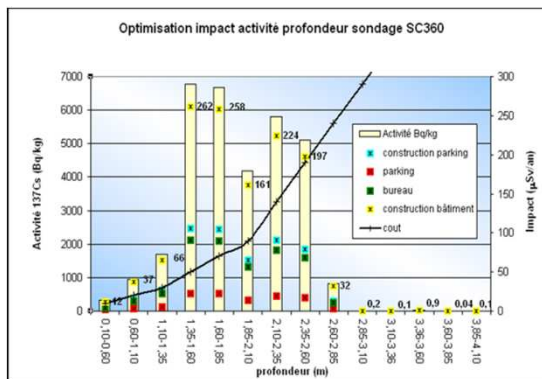
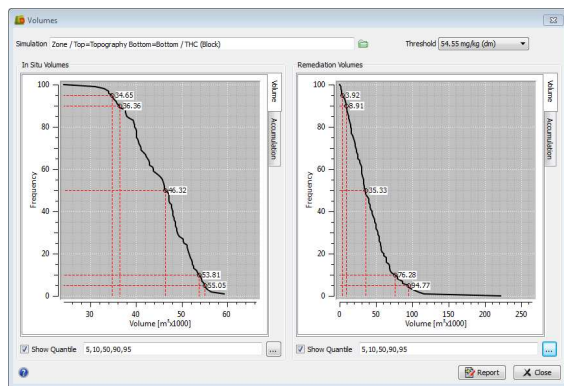
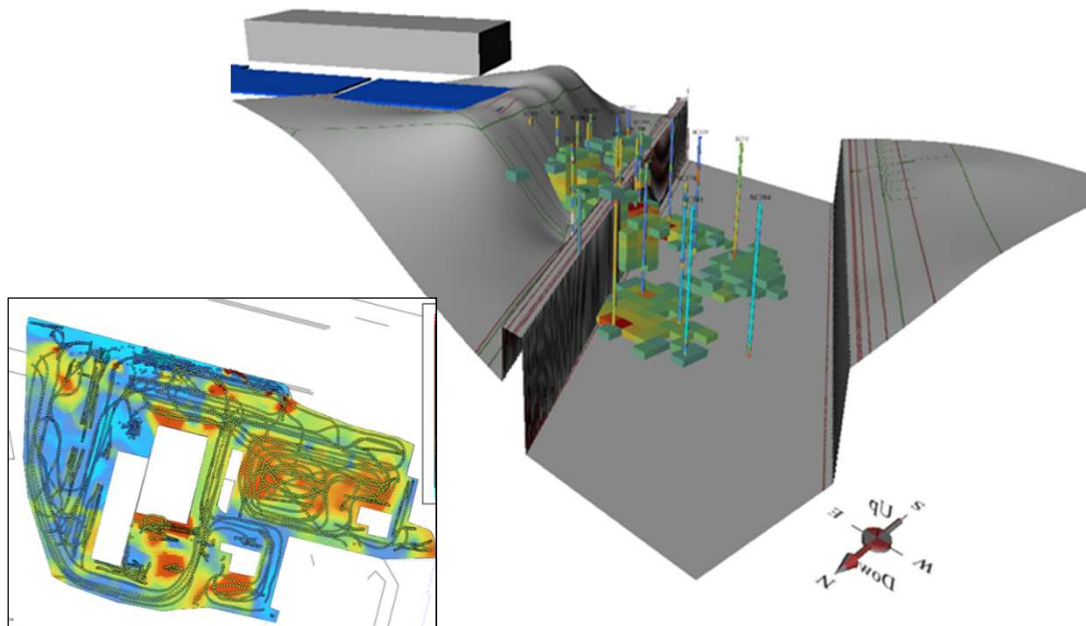
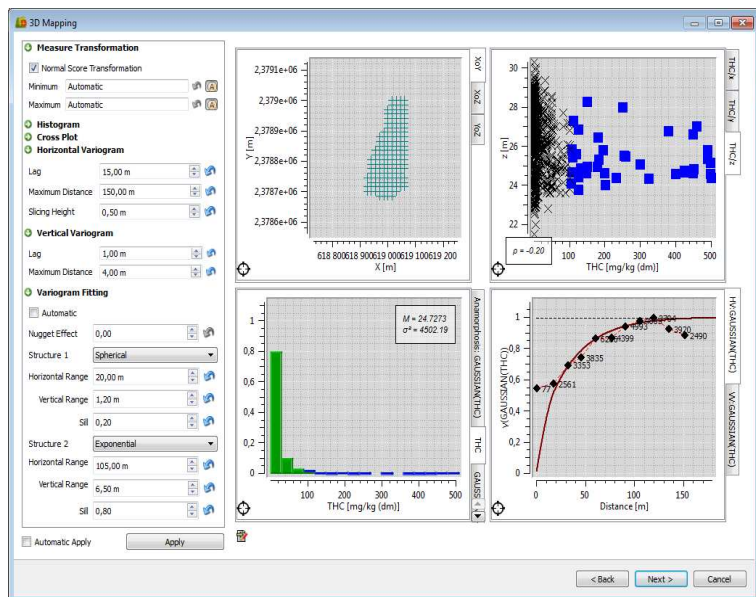
### ■ Formule de Wilks : Définition du nombre de mesures

### ■ Norme ISO/TR 8550 (cité dans guide 14) : Validation de la conformité des surfaces par rapport aux critères de décisions



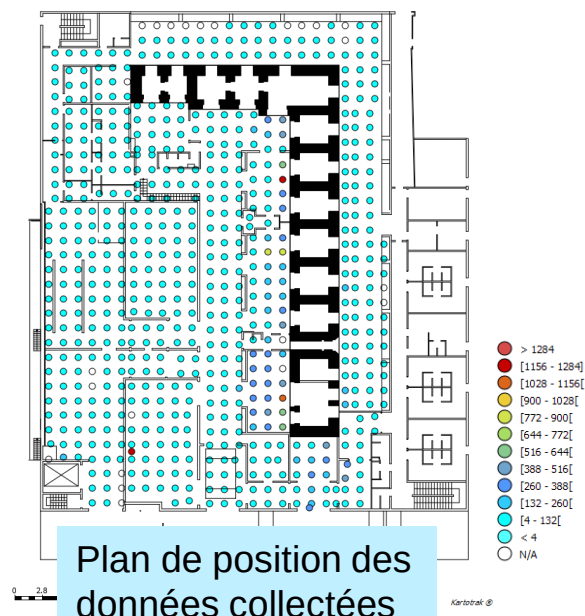
# TRAITEMENT DE DONNÉES PAR GÉOSTATISTIQUE

## Caractérisation initiale

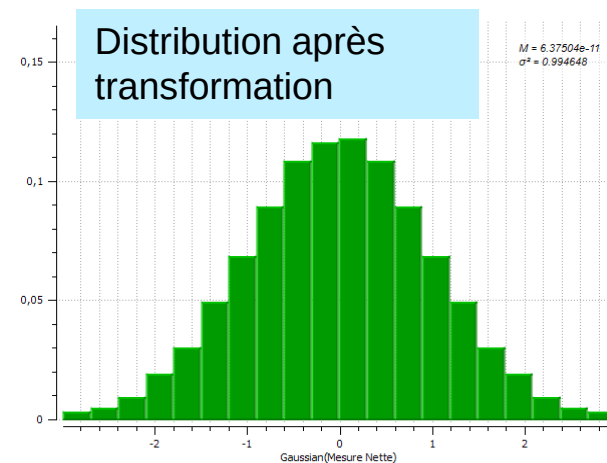
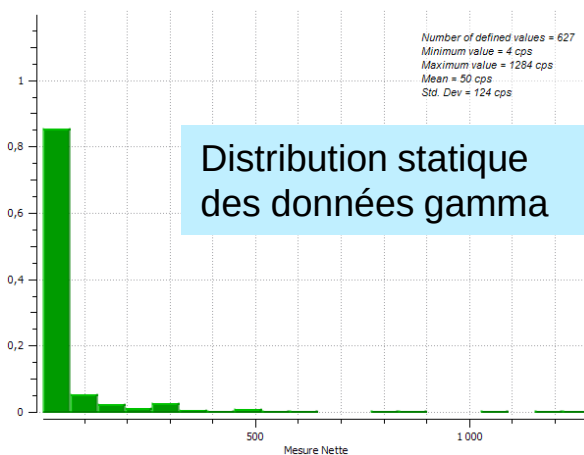


- Probabilité de dépassement de niveau d'activité ou d'impact  
→ Classification des déchets / terres
- Simulations géostatistiques  
→ Calcul de volumes contaminés
- Zonage déchets

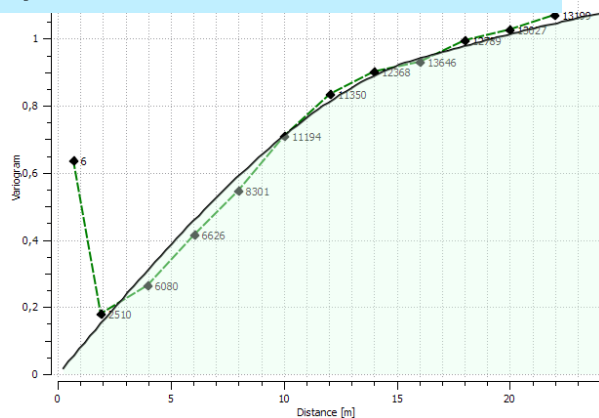
# APPLICATION GEOSTATISTIQUE : DALLE EN BETON BATIMENT 52 AU CEA FONTENAY AUX ROSES



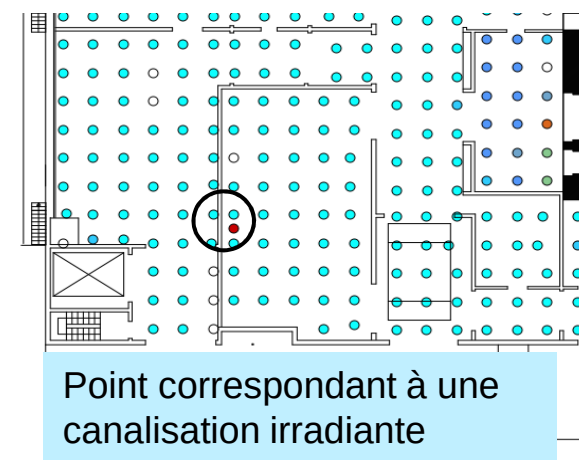
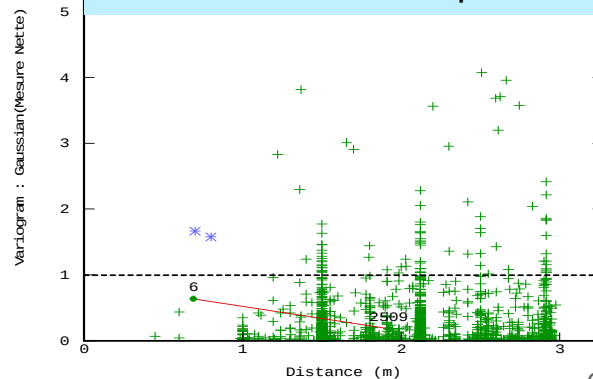
Forte dissymétrie ➡ Transformation gaussienne des valeurs



Variogramme expérimentale et ajustement avec deux modèles

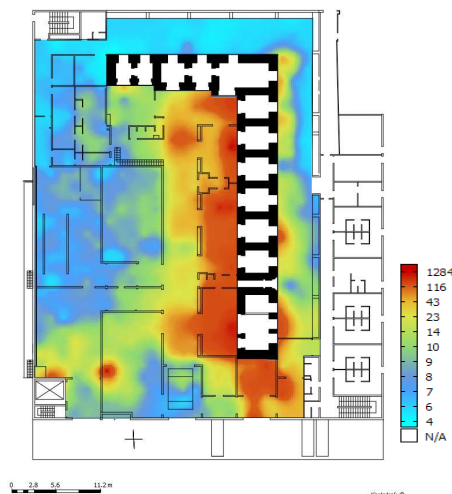


Nuée variographique : mise en évidence de deux paires





# APPLICATION GEOSTATISTIQUE : DALLE EN BETON BATIMENT 52 AU CEA FONTENAY AUX ROSES



Cartographie du comptage gamma par krigeage



Cartographie de l'indicateur de variance associé au krigeage du comptage gamma



Plan de sondages/  
prélèvements

- Variation des coûts (facteur 1 à 100) en fonction de plusieurs critères :
  - Objectif à atteindre,
  - Accessibilité de la zone (mur/plafond, etc.)
  - Les RN recherchés, les matrices à évaluer (gamma, alpha, bêta pur),

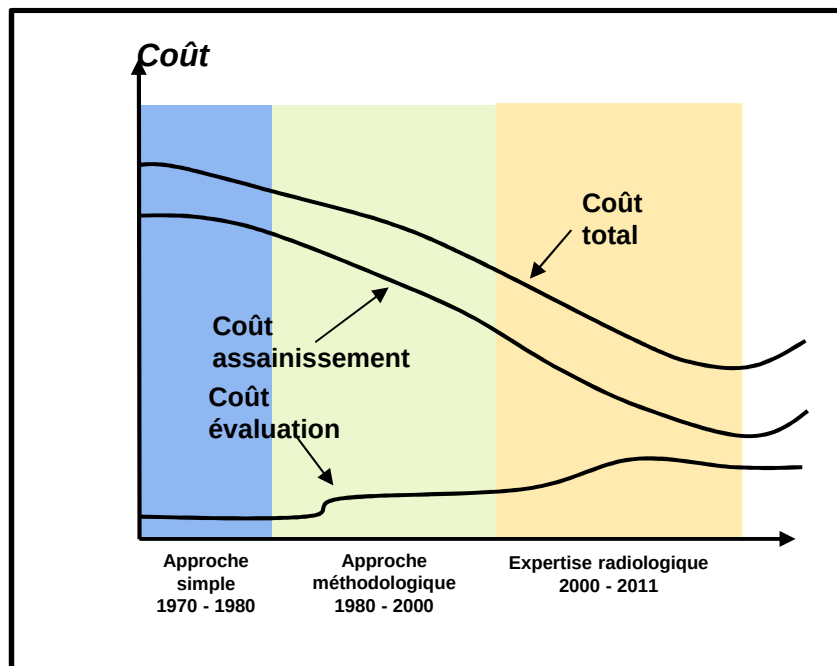


## Caractérisation initiale

- Réalisation de mesures ponctuelles (débit de dose, irradiation, activité massique ou surfacique) dans une problématique de radioprotection et de priorisation des zones à assainir. Cet objectif ponctuel regroupe alors les opérations de levée de doute (détrompage, identification de sources, de points chauds...) et de cartographie surfacique du signal émergent.
- Réalisation de prélèvements destructifs pour établir le zonage déchet opérationnel par des cartographies du risque de dépassement de seuils radiologiques entre différentes catégories de déchets, en tenant compte du support unitaire d'assainissement retenu (surface, profondeur ou passe, lié aux contraintes techniques et financières de l'assainissement envisagé) et des profils de migration.
- L'estimation du terme source intervient également à ce stade par l'établissement des spectres-types et par les calculs prévisionnels d'activité moyenne des différents lots de déchet.

## Caractérisation finale

- Caractérisation radiologique en fin d'assainissement pour valider l'atteinte d'un objectif de propreté (par la mise en œuvre de tests statistiques de conformité), puis utilisation de l'activité moyenne résiduelle pour la réalisation de calculs d'impact sanitaire associé à la réutilisation de la zone.



Objectif  
d'évaluation

Stratégie  
d'échantillonnage

Collecte et  
Interprétation  
des résultats





- Caractérisation de plus de 150 sites avec les outils développés par le CEA utilisant la géostatistique : caractérisation surfacique et en profondeur (3D)
- Caractérisation des déchets avant leur évacuation
- Outils et logiciels efficaces permettant de réaliser des projet d'A&D optimisés
- Maîtrise des coûts et des délais : sols et structures

**La maîtrise de l'état initial (caractérisation radiologique maîtrisée et optimisée) d'une installation (structures / sols) permet une meilleure gestion des opérations dans le respect des coûts et planning.**