

Conférence UCIE du 2 octobre 2009

La part de l'incertitude dans les études de pollution : définition, estimation et impacts financiers

Nicolas Jeannée – Jean-Jacques Péraudin

Contact: peraudin@geovariances.fr
01.60.74.90.99 / 06.07.05.96.69



Geovariances
Where no one has gone before

Plan

- Introduction
- Méthodologie géostatistique : étapes clés
- Exemple sur un site TOTAL
- Autres exemples
- Conclusions (avantages/limites)

Introduction

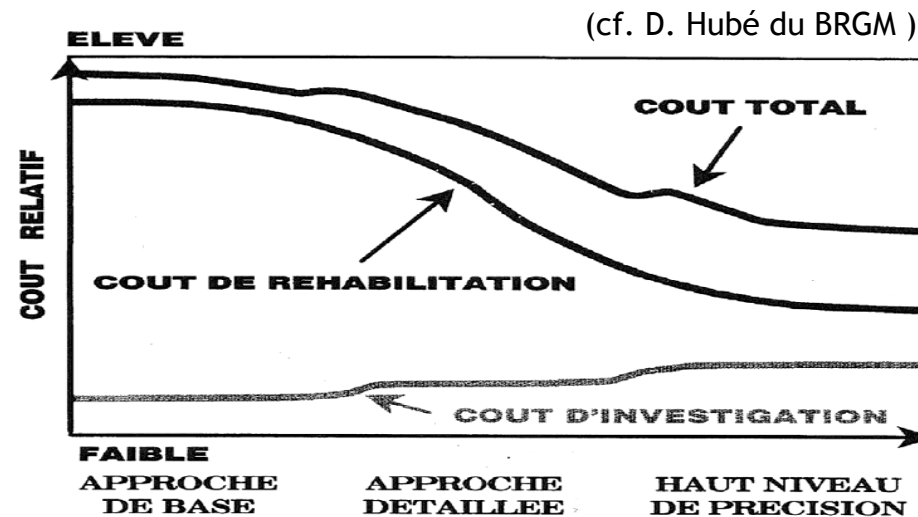
Il est certain que nous vivons dans un monde incertain

- Présence inéluctable d'incertitudes lors des diagnostics : historique, nature et propriétés du sous-sol (lithologie), mesure, ...
- Ordres de grandeurs des incertitudes financières :
 - Pollution métallique :
Différentes études déterministes avaient chiffrés pour un projet immobilier un coût de réhabilitation entre 1 MEur et 100 MEur... Comment décider ???
 - Pollution organique :
Coûts à la tonne entre un CET3 et un CET1 justifie largement quelques analyses de plus en préventif afin d'affiner l'orientation des terres.
 - Pollution radiologique :
Coûts de traitements (hors transport) à la tonne varient entre 700 € et plus de 15000 €...

Introduction

- Importance du diagnostic :

Investigation détaillée et valorisation des données \Rightarrow estimation fiable du coût de dépollution probable et des incertitudes associées.



- Pertinence de la géostatistique :

Depuis les années 50, la **quantification** des incertitudes est un problème connu (cas de l'exploration minière et pétrolière) : conséquences opérationnelles très coûteuses.



Geovariances
Where no one has gone before

Introduction

- Quelques dates :

- Depuis plus de 15 ans : **applications** aux problèmes de pollution
- Réflexion méthodologique à travers plusieurs thèses :
 - Nicolas Jeannée (2001)
 - Hélène Demougeot-Renard (2002) échantillonnage liés aux objectifs
- 2004 : **Création de l'association GEOSIPOL** www.geosipol.org
- 2005 : **Application** à des sites industriels (Total, GDFSuez, EDF, Cea, communes)

Introduction

- Promotion par les institutions

- (2002 & 2006 & 2009) **Journées** ADEME
Rencontres Industrie-Recherche
- 2007-2008-2009 : **Journées** SSP MEEDDAT
Nouveaux textes méthodologiques : **privilégier la mesure !**

Présentation déjà réalisée conjointement avec le BRGM lors de la :

Troisième Journée Technique d'information et de retour d'expérience
de la gestion des sols pollués MEDDAT
Les Diagnostics - Objectifs, enjeux & moyens
Paris, Vendredi 19 septembre 2008

Etapes clés en géostatistique

- Un exemple simple :
 - Contamination en HCT
 - Seuil considéré HCT : 2000 mg/kg
 - Maillage systématique 15m x 15m
- Questions posées :
 - Comment sélectionner les mailles saines/contaminées ?
 - Quelles sont les incertitudes associées ?



Etapes clés en géostatistique

- L'approche déterministe classique :
 - Comparaison résultats analytiques vs seuil.
 - Calcul du volume contaminé.
- **Avantage** : simplicité
- **Inconvénients**
 - **Hypothèses** :
 - indépendant du contexte
 - pas d'erreur de mesure
 - maille = échantillon
 - effet de support ignoré
 - Pas de quantification de **l'incertitude ...**



Etapes clés en géostatistique

- 1ère Etape : Analyse spatialisée des données

- Evaluer la cohérence spatiale entre les mesures de concentrations
- Calcul du variogramme et d'un effet de pépité (incertitude sur les mesures, variabilité de la contamination à petite échelle)



Variabilité des teneurs

Distance (m)



Geovariances
Where no one has gone before

Conférence UCIE du 2 octobre 2009

Etapes clés en géostatistique

- 2ème Etape : Cartographie de la pollution par krigeage
 - Estimer les concentrations moyennes pour chaque maille (Krigage)
 - Calculer la répartition spatiale des incertitudes (écart-type krigage)

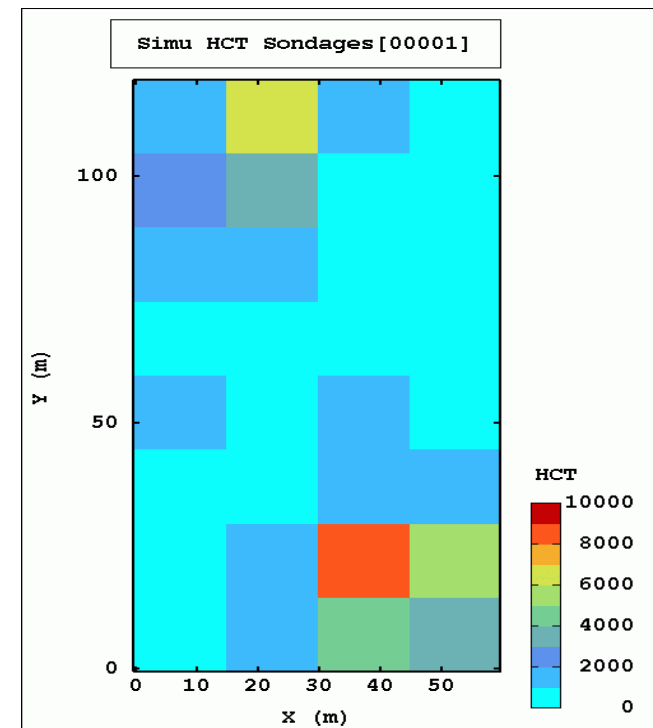
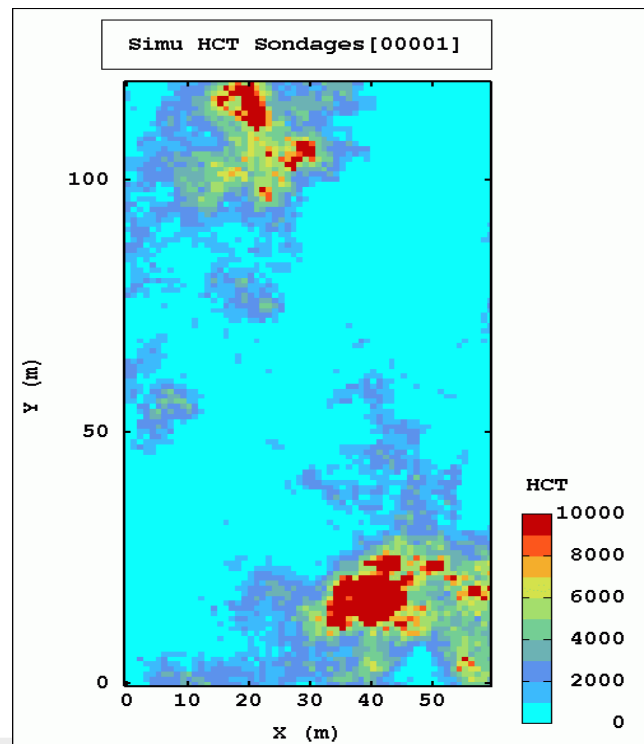


Etapes clés en géostatistique

- Les 2 premières étapes (variogramme et krigeage) permettent :
 - D'évaluer la **cohérence spatiale** entre les mesures
 - De la décrire par le calcul du variogramme
 - **D'estimer** par krigeage les concentrations moyennes pour chaque maille
 - De calculer la répartition spatiale des incertitudes
- Avantages :
 - Prise en compte de la variabilité spatiale de la pollution
 - Distinction entre **support** d'échantillonnage et de dépollution
 - **1ère quantification du niveau d'incertitude**
- Limites :
 - Considérer le krigeage seul conduit à lisser la variabilité réelle et à négliger **l'incertitude** associée.

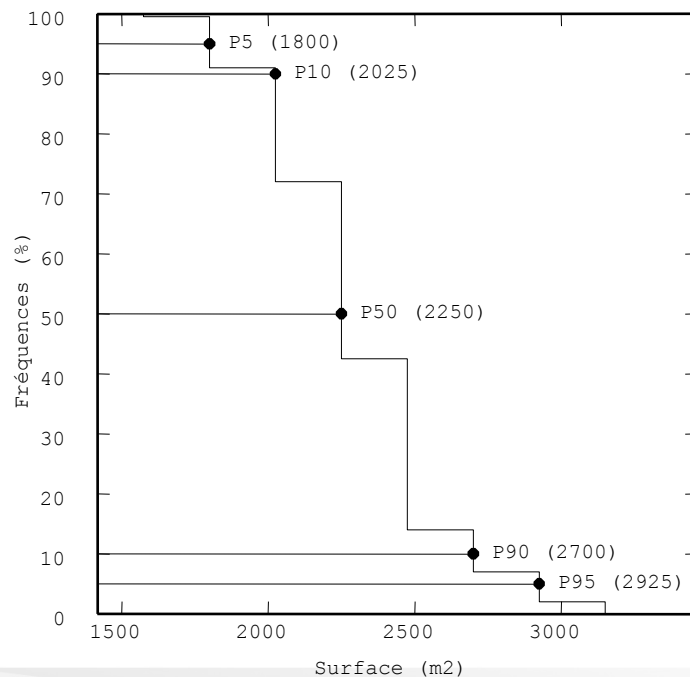
Etapes clés en géostatistique

- 3ème étape : calcul de simulations stochastiques
 - Reproduire la variabilité locale à la fois **ponctuellement** et en **moyenne pour chaque maille**.



Etapes clés en géostatistique

- Calcul probabiliste des volumes contaminés :
 - Globalement, par comparaison de chaque simulation avec le seuil, on déduit la **distribution des volumes contaminés**.



Volume contaminé :

- Optimiste (P5) : 1800 m²
- Probable (P50) : 2250 m²
- Pessimiste (P95) : 2925 m²

Pour mémoire :

- Déterministe : 2475 m²
- Krigage : 2250 m²



Geovariances
Where no one has gone before

Etapes clés en géostatistique

- Calcul probabiliste des volumes contaminés :
 - Localement, on évalue pour chaque maille le risque de dépasser le seuil de 2000 mg/kg, contrairement aux approches précédentes...



Etapes clés en géostatistique

- Calcul probabiliste des volumes contaminés :
 - Localement, on évalue pour chaque maille le risque de dépasser le seuil de 2000 mg/kg, contrairement aux approches précédentes...
 - Le volume de terres dont on envisage l'excavation dépend du risque que l'on accepte de laisser en place des sols potentiellement contaminés !
 - Exemples :



Geovariances
Where no one has gone before

Risque autorisé

10%
25%
50%
90%

Volume à excaver

3 150 m²
2 925 m²
2 250 m²
1 575 m²



Application à un cas réel

- Contexte et objectifs
- Analyse exploratoire des données
- Cartographie des teneurs en HydroCarbures Totaux (HCT)
- Estimation des volumes contaminés
- Premières conclusions



Geovariances
Where no one has gone before



Conférence UCIE du 2 octobre 2009

Application à un cas réel

- Contexte

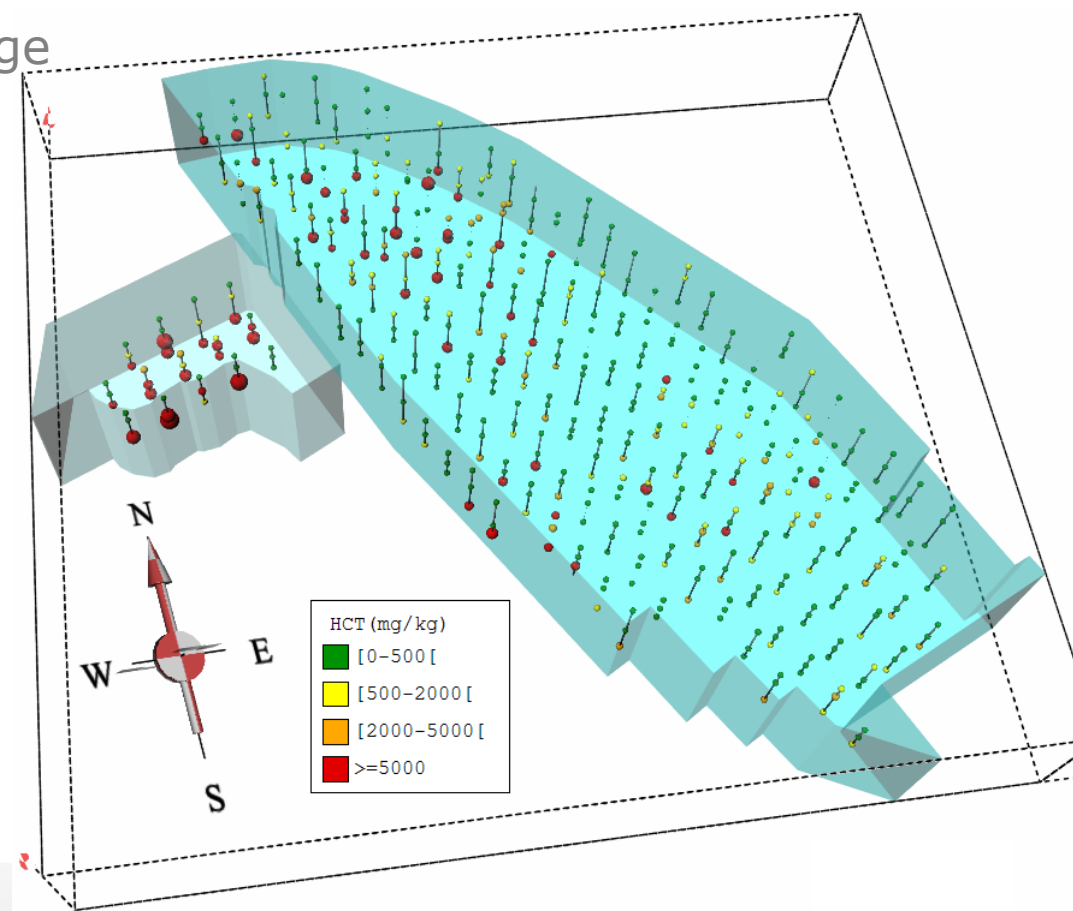
- Ancien dépôt pétrolier TOTAL.
- Superficie ~ 5ha.
- Contamination en hydrocarbures liée à l'activité du site.
- Polluant considéré : HCT (C10-C40).
- Seuil considéré : 5000 mg/kg.

- Objectifs de l'étude géostatistique

- Cartographier la contamination en HCT.
- Estimer les volumes contaminés et les incertitudes associées
- Déterminer la compatibilité des terres avec le seuil de 5000 mg/kg.

Analyse exploratoire HCT

- Localisation et distribution des teneurs en HCT (C10-C40) :
 - Maillage systématique 15m x 15m
 - 3 échantillons par sondage



Geovariances
Where no one has gone before



Conférence UCIE du 2 octobre 2009

Analyse exploratoire HCT

- Structure spatiale des teneurs en HCT :



Geovariances
Where no one has gone before



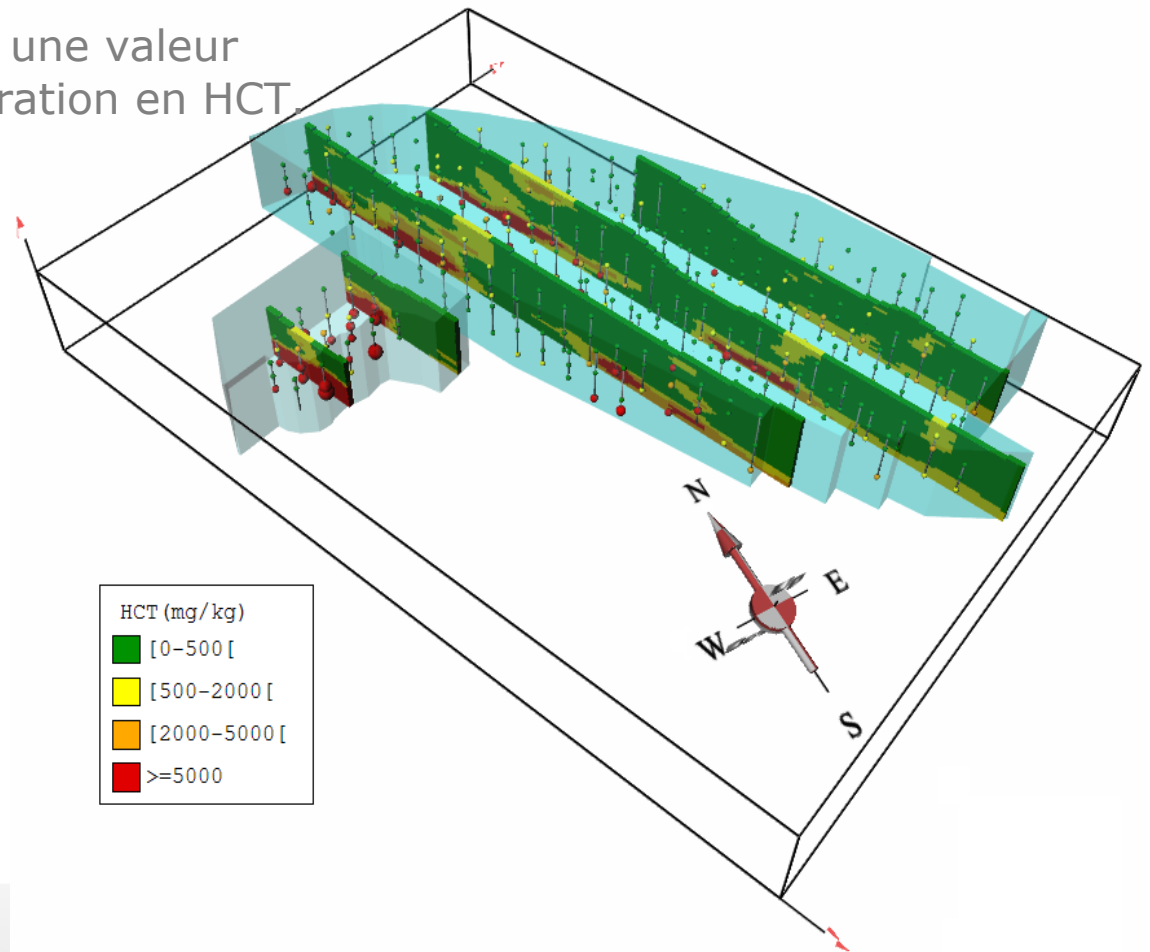
Conférence UCIE du 2 octobre 2009

Estimation des concentrations

- Krigeage des concentrations HCT:

- Fournit en chaque cellule une valeur probable pour la concentration en HCT.

(Visualisation en coupe)



Geovariances
Where no one has gone before



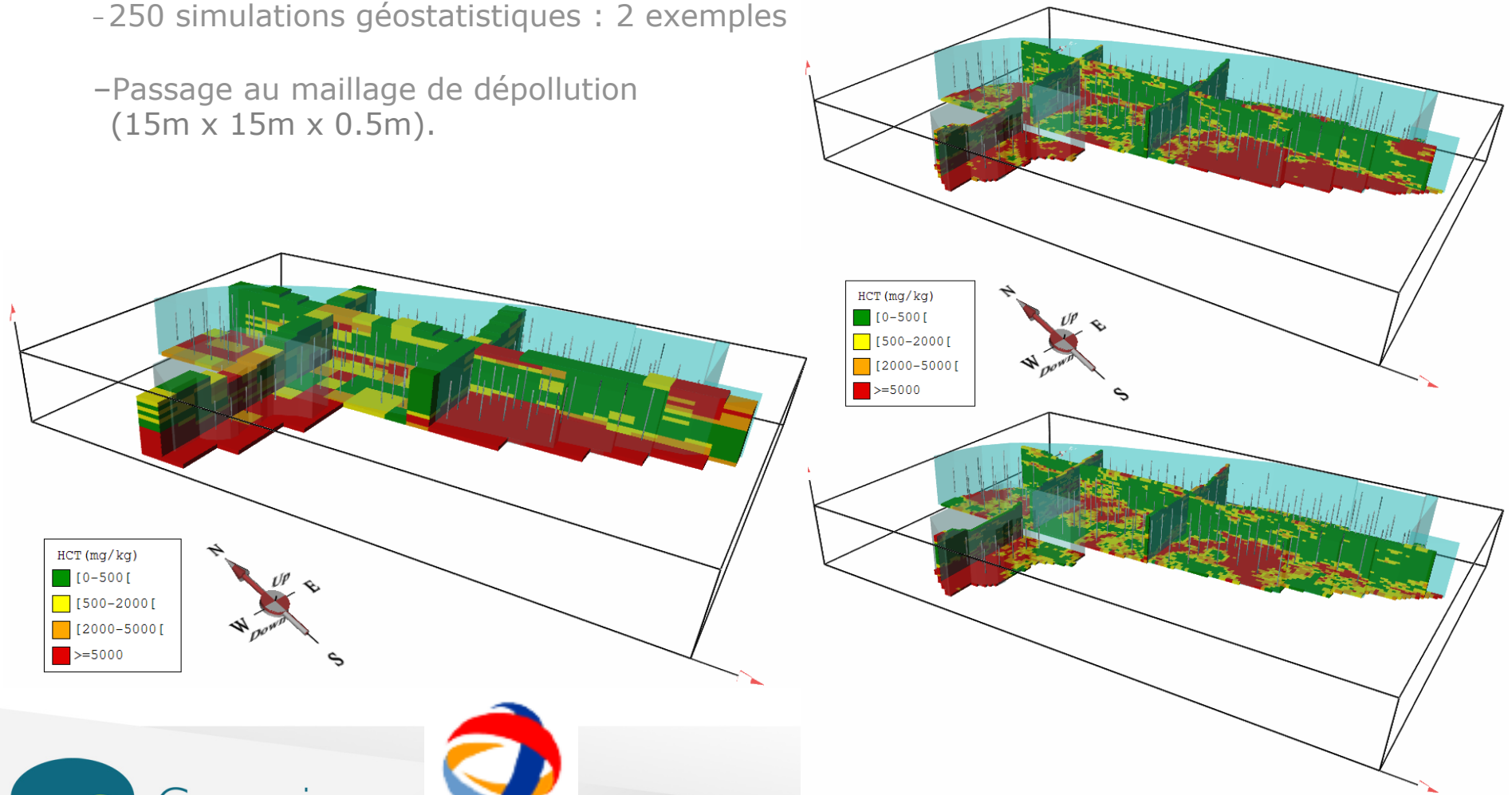
Conférence UCIE du 2 octobre 2009

Volumes contaminés en HCT

- Simulations stochastiques des concentrations :

- 250 simulations géostatistiques : 2 exemples

- Passage au maillage de dépollution (15m x 15m x 0.5m).



Geovariances
Where no one has gone before



Conférence UCIE du 2 octobre 2009

Volumes contaminés en HCT

- Volumes contaminés :

- Seuillage de chaque simulation à 5000 mg/kg, calcul du volume contaminé et analyse statistique de la distribution des volumes obtenus.

Altitude NGF		≥22m	22-24m	24-26m	26-28m	≥28m
Volume total		246 600 m ³	74 700 m ³	74 700 m ³	72 788 m ³	24 413 m ³
Q5	(m ³)	18 788	15 188	675	563	225
Q10		20 138	15 975	900	788	225
Q50		22 950	18 675	1 688	1 688	675
Q90		25 988	21 375	2 700	2 813	1 463
Q95		26 775	22 275	2 925	3 263	1 688

Exemple de lecture : il y a 95% de chances d'avoir un volume contaminé inférieur à 26 775 m³ pour la parcelle, parmi les 246 600 m³ qu'elle contient.



Geovariances
Where no one has gone before



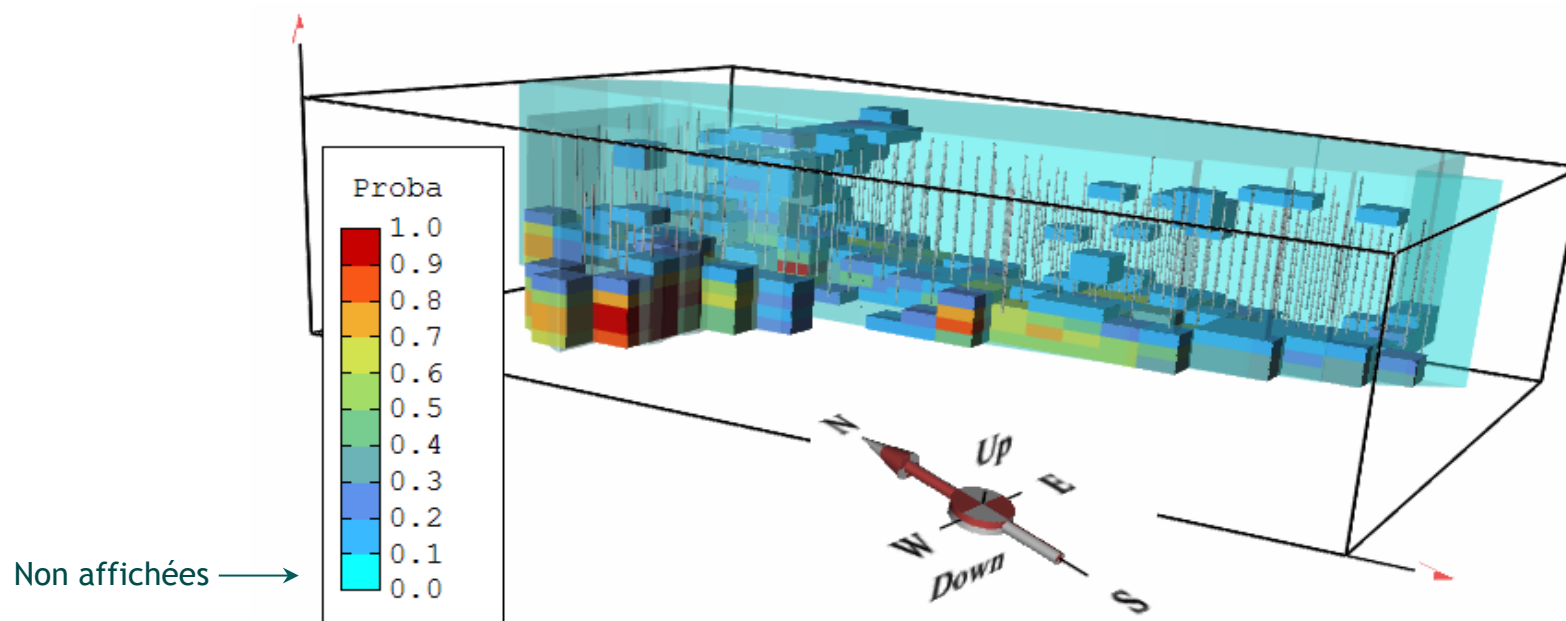
IE du 2 octobre 2009

Volumes à excaver et trier

- Calcul de la probabilité de dépassement du seuil :

-La mise en œuvre de la dépollution nécessite que l'on puisse déterminer quelles mailles dépassent le seuil !

Proba[HCT>5000mg/kg]



Geovariances
Where no one has gone before



2 octobre 2009

Conclusion de l'exemple

- Bilan de l'application :

- Analyse exploratoire des données, structuration nette de la contamination.
- Post-traitements : estimation globale des volumes contaminés et locale de la probabilité de dépassement du seuil (5000 mg/kg en HCT).
- Localisation préférentielle de la contamination en profondeur conduit à des volumes à trier et d'accessibilité très élevés.
- Investigation détaillée et valorisation des données ⇒ **estimation fiable du coût de dépollution probable et des incertitudes associées.**

- Remerciements :

Céline GALANTIN & Jean-Jacques CESTARI (TOTAL Dépôts Passifs)



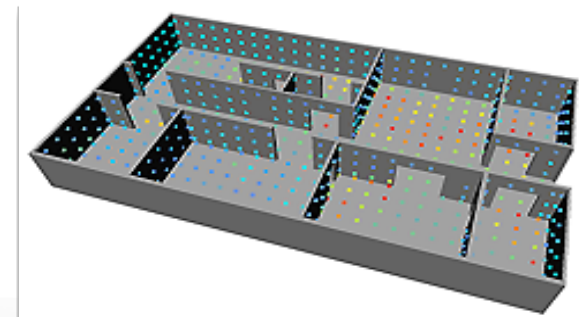
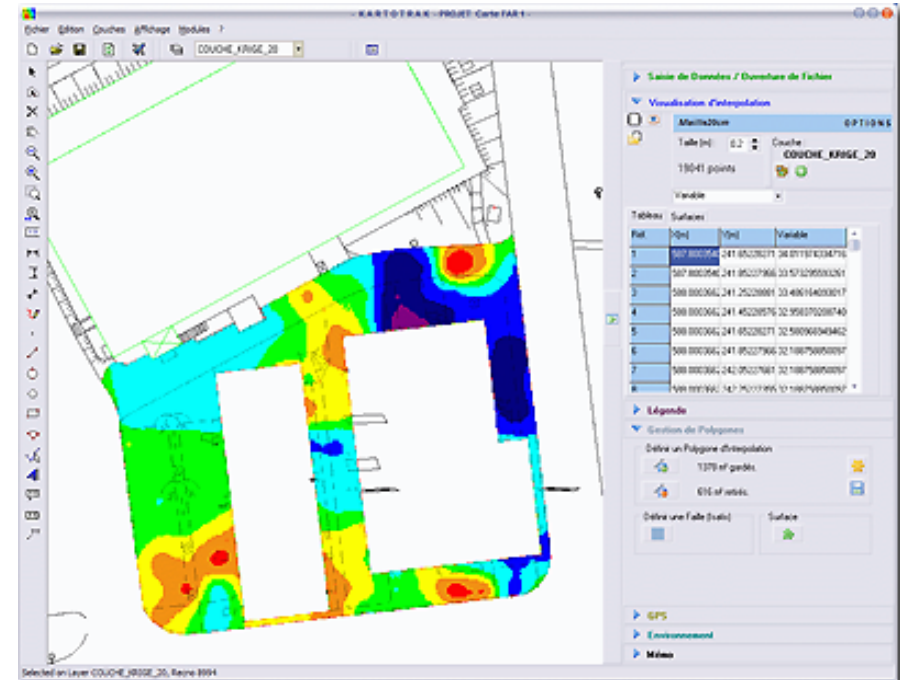
Geovariances
Where no one has gone before



Conférence UCIE du 2 octobre 2009

Exemple 2 : contaminations radiologiques

- **Cadre** : Démantèlement et assainissement de sites nucléaires (Cea, Edf, Areva)
- **Objectif** : Cartographie d'aires extérieures (sols) et d'installations nucléaires (bétons) contaminées par des radionucléides (^{137}Cs)
- **Méthodologie** : techniques multivariables de co-krigeages, variances de krigeage
- **Résultats** :
 - orientation de campagnes d'échantillonnage
 - intégration de données (spectrométrie gamma in situ, carottages, bouchardages...)
 - contrôle de la dépollution



 Source Didier DUBOT CEA/FAR/SAS

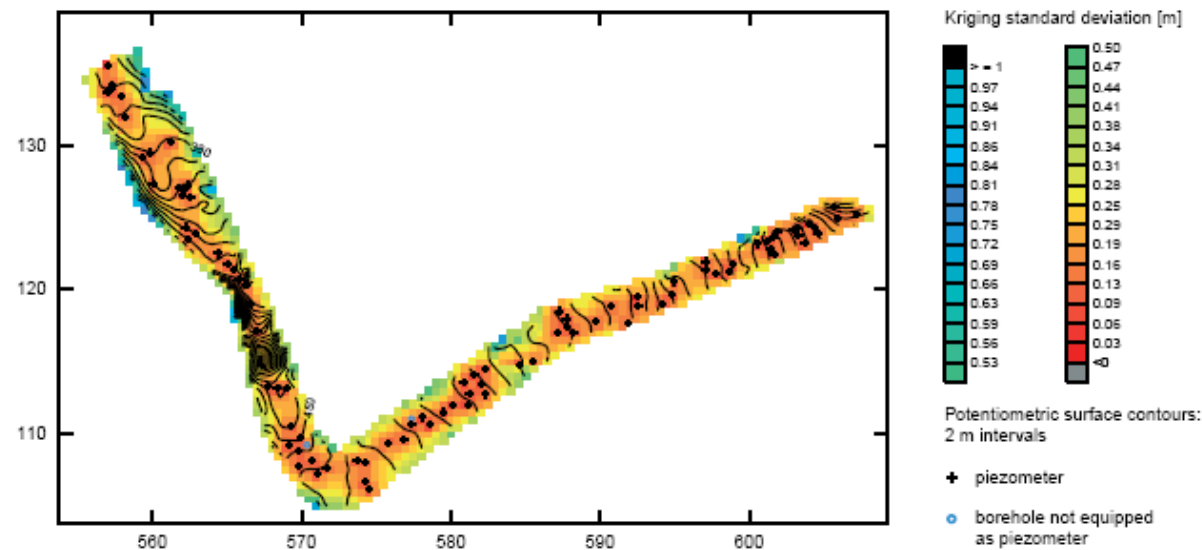
Exemple 3 : Optimisation de piézomètres

- **Cadre** : Surveillance de l'aquifère de la vallée Rhône-Alpes de Sierre jusqu'au lac de Genève (CREALP)
- **Objectif** : Optimiser le réseau de piézomètres, afin de réduire le coût de surveillance sans diminuer la qualité de la carte des potentiels
- **Méthodologie** : krigeage intrinsèque, variance de krigeage
- **Résultat** : Réduction de 20% du nombre total de piézomètres automatiques

COLENCO
Colenco Power Engineering Ltd



Geovariances
Where no one has gone before



Source Olivier JAQUET (COLENCO, 1998)

Avantages de l'approche géostatistique

- Permet de quantifier les incertitudes

- Sur l'estimation des concentrations en place
- Sur l'estimation des volumes contaminés

⇒ Estimation plus réaliste des coûts de dépollution

- Permet de réduire les incertitudes

- En optimisant les stratégies d'échantillonnage (sols, réseau de piézomètres)
- Par une analyse exploratoire et un Contrôle Qualité des mesures le plus tôt possible
- En intégrant des informations auxiliaires (historique, mesures terrain type XRF ou autre, paramètres organoleptiques, autres polluants, ...)



Photo Biogénie



Geovariances
Where no one has gone before

Limites de l'approche géostatistique

- Cas de contaminations très hétérogènes

- Exemple typique : remblais remaniés.

Aucune sélection possible de mailles saines/contaminées à partir d'un maillage même fin \Rightarrow décision globale

Pas de modélisation géostatistique sophistiquée... mais la géostatistique permet de détecter très tôt, par un échantillonnage adapté, cette situation (absence de continuité spatiale) et d'éviter une catastrophe financière !

- Autre exemple : anciennes structures enfouies.

Intégration dans le modèle géostatistique si leur localisation est connue, sinon : augmentation de la variabilité spatiale des teneurs et des incertitudes !

- Cas de pollutions présentant une dynamique temporelle forte

Complémentarité géostatistique / modélisation physico-chimique.

- Cas de petits sites, simples et avec peu d'investigations

Quantifier la variabilité spatiale de la contamination n'est bien entendu pas systématiquement nécessaire...

Mais se méfier d'interpolations ou prédictions spatiales rapides !



Conclusion : anticiper !



Mesures + Valorisation Géostatistique



Maîtrise anticipée
des incertitudes



Economies Financières



Geovariances
Where no one has gone before

Merci pour votre attention

... et pour vos questions !



Geovariances
Where no one has gone before

Conférence UCIE du 2 octobre 2009