



Traitement des incertitudes appliqué au stockage de déchets radioactifs

Guillaume PEPIN

*Direction Recherche et Développement
Service Evaluation et Analyse de Performance*

01/02/2012

*Première rencontre GAMNI-MAIRCI : Précision et incertitudes
Mercredi 1^{er} Février 2012*



1. L'Andra : son contexte, ses missions
2. La problématique des incertitudes : origine, objectifs
3. Les méthodologies de traitement des incertitudes mises en œuvre
4. Exemples d'application et de résultats dans le contexte d'un stockage de déchets radioactifs
5. Perspectives

L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs est un établissement public industriel et commercial (EPIC)

- Indépendante des producteurs de déchets,
- Placée sous la tutelle des ministères en charge de la recherche, de l'énergie et de l'environnement (signature d'un contrat quadriennal 2009-2012)

Les implantations





Trouver, mettre en œuvre et garantir des solutions de gestion sûres pour l'ensemble des déchets radioactifs français afin de protéger les générations présentes et futures du risque que présentent ces déchets.



1. Exploiter et surveiller les centres de stockage existants
2. Etudier et concevoir des centres de stockage pour les déchets en attente de la création d'un centre adapté
3. Collecter les déchets « non électronucléaires » et les objets radioactifs détenus par les particuliers
4. Assainir d'anciens sites pollués par la radioactivité
5. Répertorier l'ensemble des matières et déchets radioactifs produits en France (volumes, localisation, volumes prévisionnels)
6. Informer tous les publics sur les déchets radioactifs et leur gestion
7. Diffuser son savoir-faire à l'étranger

- En raison de la décroissance naturelle de la radioactivité, les déchets radioactifs ont la particularité de voir leur **dangerosité diminuer progressivement dans le temps**. Cependant, en fonction des déchets, cette décroissance peut prendre plusieurs centaines de milliers d'années.
- La solution pour protéger l'homme et l'environnement du danger que les déchets représentent est de les **isoler le temps nécessaire à cette décroissance radioactive**.
- C'est pourquoi, la France, comme de nombreux autres pays, a fait le choix du **stockage** comme solution de gestion à long terme.

Les concepts de stockage mis en œuvre par l'Andra sont adaptés à la dangerosité des déchets et à l'évolution de cette dangerosité dans le temps.

Aujourd'hui en France, **trois solutions de stockage** sont mises en œuvre ou à l'étude afin de prendre en charge l'ensemble des déchets radioactifs produits :



➤ le stockage **de surface**

➤ le stockage **à faible profondeur**, entre 15 et 200 m (à l'étude)



➤ le stockage **profond**, à 500 mètres (à l'étude)





1. L'Andra : son contexte, ses missions
- 2. La problématique des incertitudes**
3. Les méthodologies de traitement des incertitudes mises en œuvre
4. Exemples d'application et de résultats dans le contexte d'un stockage de déchets radioactifs
5. Perspectives

La gestion du « multi »...(1/2)

Multicomposant

déchets
galeries

colis de déchets
alvéoles

ouvrages d'accès (puits) modules et zones

milieu géologique

Multimatériau

verre céramique métal

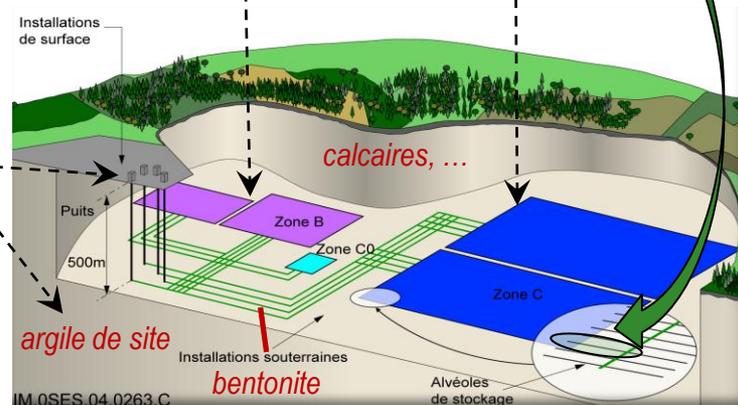
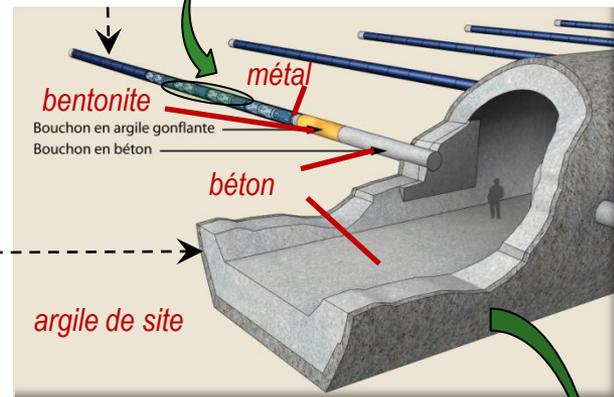
 béton

argile d'ouvrage (bentonite)

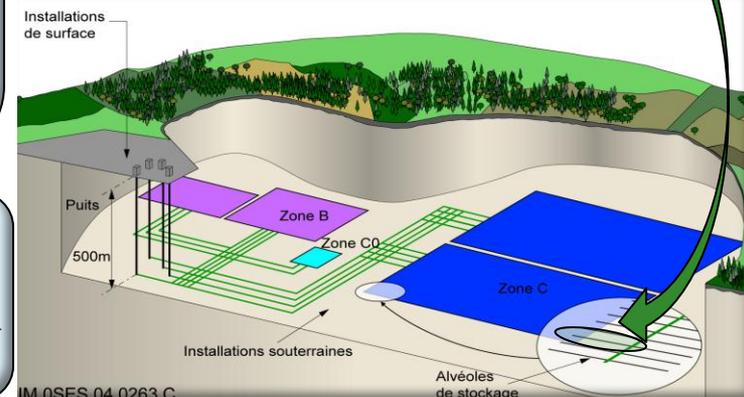
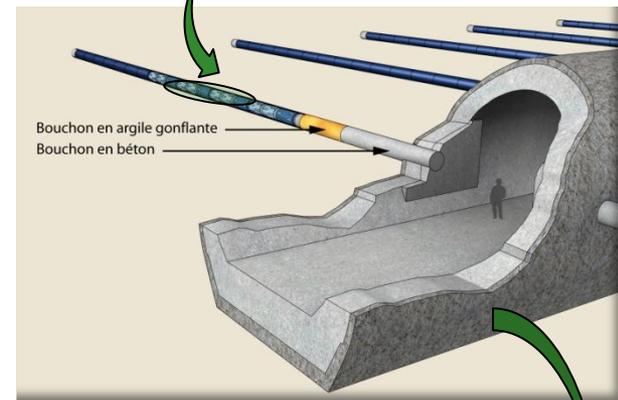
argile de site

calcaires, ...

Ex : colis/alvéole HA



Ex : colis/alvéole HA



La gestion du « multi »...(2/2)

Multi-physique (des objets à simuler)

Thermique (T), Hydraulique-Gaz (H),
Mécanique (M), Chimie (C), Radiologique (R)
Transfert de solutés en milieu poreux (Tr).

Multiéchelle spatiale

- centimétrique à métrique : déchet
- métrique à décamétrique : alvéole
- hectométrique à kilométrique : stockage
- plurikilométrique : milieu géologique

→ Gestion de > 7 ordres de grandeurs en espace

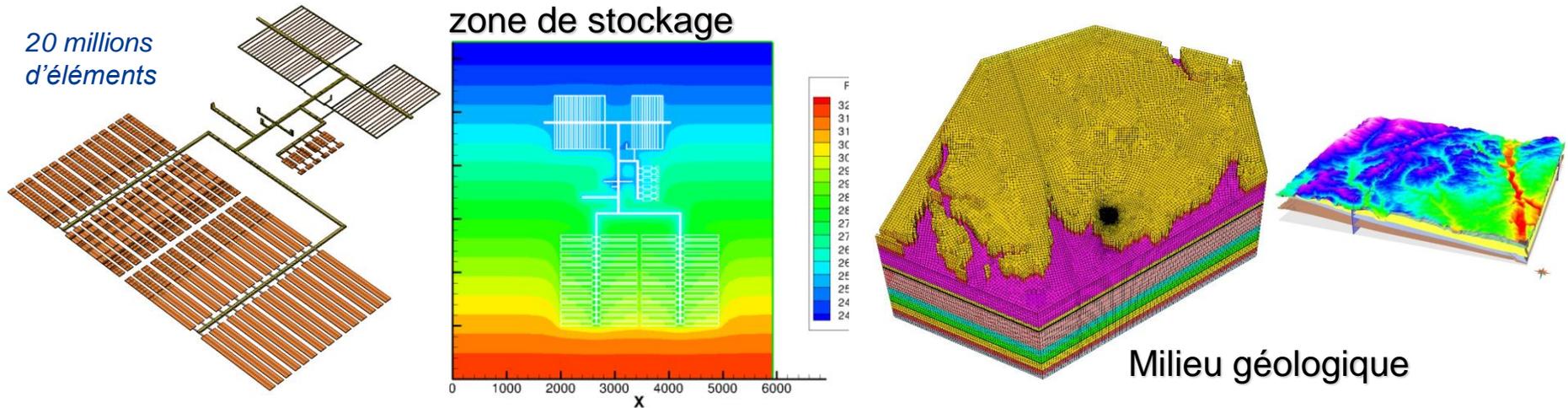
Multiéchelle temporelle



Une définition et un traitement des incertitudes au cœur des différentes applications, en lien étroit avec la simulation numérique



Exemple-type de simulation numérique (ex : analyse de performances)



- Transfert de masse radionucléides depuis les colis jusqu'à l'exutoire à travers les différents composants du stockage et le milieu géologique
- Milieu poreux équivalent, homogène, continu, saturé ou insaturé
- Transfert en convection/diffusion/dispersion avec précipitation, sorption et décroissance / filiation

Plusieurs milliers de calculs à mener :

- (scénarios/situations/colis-type de déchets/concept de stockage/radionucléide)
- incertitudes portant de manière systématique sur plusieurs dizaines de paramètres
- temps calcul variant de plusieurs heures à plusieurs jours par unité
- mise en œuvre du parallélisme et du calcul haute Performance

La typologie des différentes incertitudes liées à l'évaluation d'un stockage de déchets radioactifs couvre (1/2) :

- » Les incertitudes sur les caractéristiques intrinsèques du composant du stockage :
 - les imprécisions des techniques de mesures,
 - les grandeurs non accessibles à la mesure (données bibliographiques),
 - la variabilité du composant dans l'espace au regard d'un échantillonnage nécessairement limité :
 - + *Milieu géologique : nombre limité de mesures → vision « continue » (méthodes d'interpolation)*
 - + *Matériau : passage de l'échantillon → ouvrage / couche géologique (méthodes d'up-scaling)*
 - le modèle qui sous-tend la définition de la grandeur
 - + *ex : grandeurs macroscopiques vs échelle microscopique*
 - les processus régissant l'évolution du stockage et leur niveau de couplage
 - + *représentation des modèles vs complexité des phénomènes*
 - + *prédiction long terme*

La typologie des différentes incertitudes liées à l'évaluation d'un stockage de déchets radioactifs couvre (2/2) :

» Les incertitudes technologiques

- La variabilité des conditions d'exploitation pour le futur (techniques de creusement, ..),
- Les limitations des connaissances sur les conditions de mise en œuvre d'une technologie particulière dans un contexte souterrain (spécificité stockage),

» Les événements externes

- Les phénomènes d'origine naturelle
 - + *événements climatiques, géologiques,*
- Les phénomènes d'origine humaine
 - + *Intrusion, effets anthropiques*

Aux incertitudes liées aux composants du stockage, on quantifie les différentes erreurs de représentation numérique et aux précisions obtenues

Objectifs

1. Quantifier l'incertitude d'un résultat, autour d'un point de « référence » à partir des différentes incertitudes d'entrée : analyse d'incertitudes
2. Evaluer le poids des incertitudes sur les résultats : analyse de sensibilité
 - » localement , autour de points de fonctionnement
 - » globalement, en termes d'incertitude d'entrée sur les incertitudes de sortie
 - Retour sur la R&D et la conception
 - Aide sur la compréhension du système
 - Domaine de fonctionnement et spécification des composants
 - Identification de marges (sûreté, dimensionnement)
3. Quantifier l'erreur commise à chaque étape mathématique/numérique : analyse d'erreur



1. L'Andra : son contexte, ses missions
2. La problématique des incertitudes
- 3. Les méthodologies de traitement des incertitudes mises en œuvre**
4. Exemples d'application et de résultats dans le contexte d'un stockage de déchets radioactifs
5. Perspectives

Choix des méthodes : principe

Objectif :

- Analyse de sensibilité (locale et globale)
- Analyse d'incertitudes (distribution d'une réponse)

Inventaires et tests de différentes méthodes

Méthodes retenues:

- probabiliste Monte-Carlo → globale
- déterministe, différentiation → locale
- ANOVA + (méta-modèles) pour problèmes complexes
- *méthode fiabiliste (Form/Sorm) en complément*

Contraintes :

- nature et complexité du problème physique (nombre de paramètres, non-linéarités,...)
- disponibilité et nature des incertitudes des données d'entrée
- méthode disponible et éprouvée,
- résultats accessibles à la compréhension « commune »
- potentiel de Calcul Haute Performance (logicielle et matérielle)

Les méthodes retenues en fonction du type d'incertitude

▪ Situations / Scénarios



Traitement déterministe
Pas de traitement probabiliste

Principes (en accord avec la Règle Fondamentale de Sûreté) :

- Pas de quantification de probabilité d'occurrence de scénarios
- Pas de calcul de distribution de la dose



→ pas de calcul de risque

▪ Modèles

Représentation {espace/temps} des composants du stockage et de son environnement



Traitement :

- *Déterministe (référence, alternatif)*

Traitement :

- *Déterministe mono /multi paramétrique*
- *Probabiliste Monte-Carlo*
(sur code numérique ou métamodèle)

En complément éventuel

- Méthode Form/Sorm
- différentiation /état adjoint

Mise en œuvre de la méthode déterministe « classique » (1/1)

- « **phénoménologique** » ou « **best estimate** »
(= traduisant le meilleur état de la recherche),
- « **conservatif** » (= qui tend à majorer l'impact),
- « **pénalisant** » (= sans fondement physique, mais constituant un majorant absolu),
- « **référence / alternatif** » (si le choix d'une référence est ambigu).

référence

sensibilité

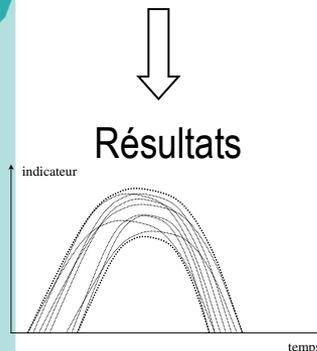
Mise en œuvre de la méthode probabiliste (1/2)

Démarche générale

- identification des cas de calcul/paramètres
- définition des distributions de probabilité (pdf)
- définition des corrélations/contraintes entre paramètres
- simplification des modèles et/ou construction de méta-modèle
- méthode d'échantillonnage

PRE-PROCESSING

Mise en œuvre
des outils
(solveurs)



PROCESSING

- **ANALYSE DE SENSIBILITE**

Choix des indicateurs statistiques
→ corrélation/régression
{entrée/sortie} sur les valeurs brutes et/ou de rang

- **ANALYSE D'INCERTITUDES**

- Quantiles, moments, distribution
- Position des calculs de référence

POST-PROCESSING

Mise en œuvre de la méthode probabiliste (2/2)

Calcul des indicateurs statistiques de l'analyse de sensibilité

Relation Linéaire ?

Non

Oui

Coefficients de corrélation
(Pearson, PCC)

Coefficient de Régression
Standard (SRC)

Relation monotone ?

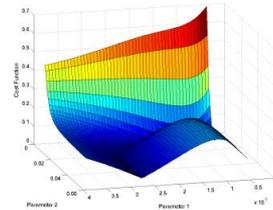
Non

Oui

Coefficients de corrélation des rangs
(Spearman, PRCC)

Coefficients de régression basée sur
les rangs (SRRC)

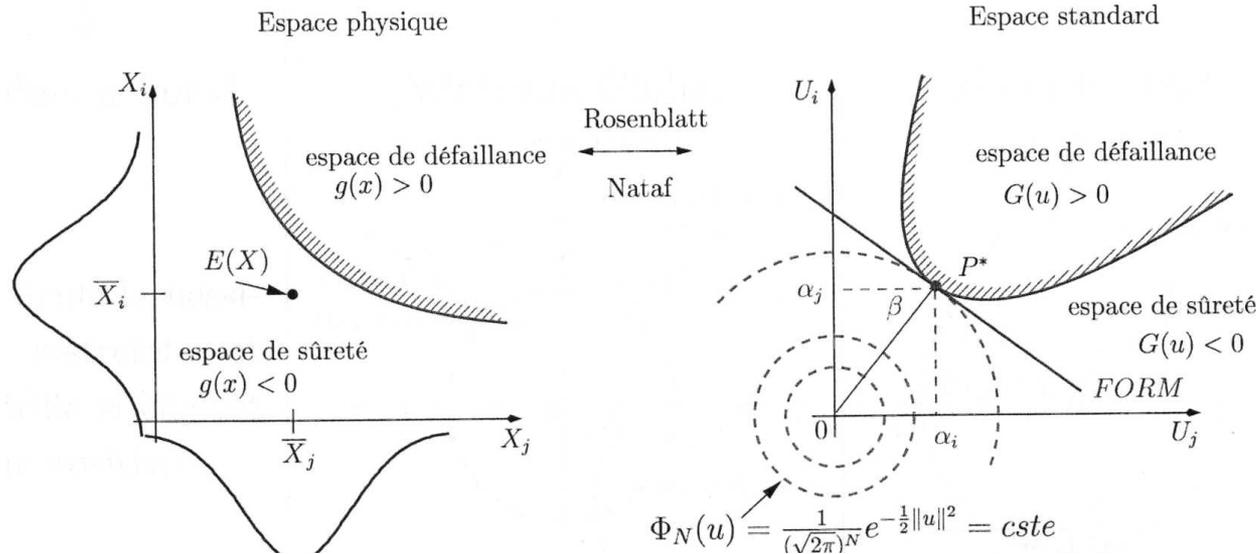
Indicateurs de Sobol / FAST :
Nécessite plusieurs milliers de calculs!



Métamodèles
(surfaces de réponse)

Simplifications du modèle numérique
(quantification des approximations)

Mise en œuvre de la méthode fiabiliste (1/1)

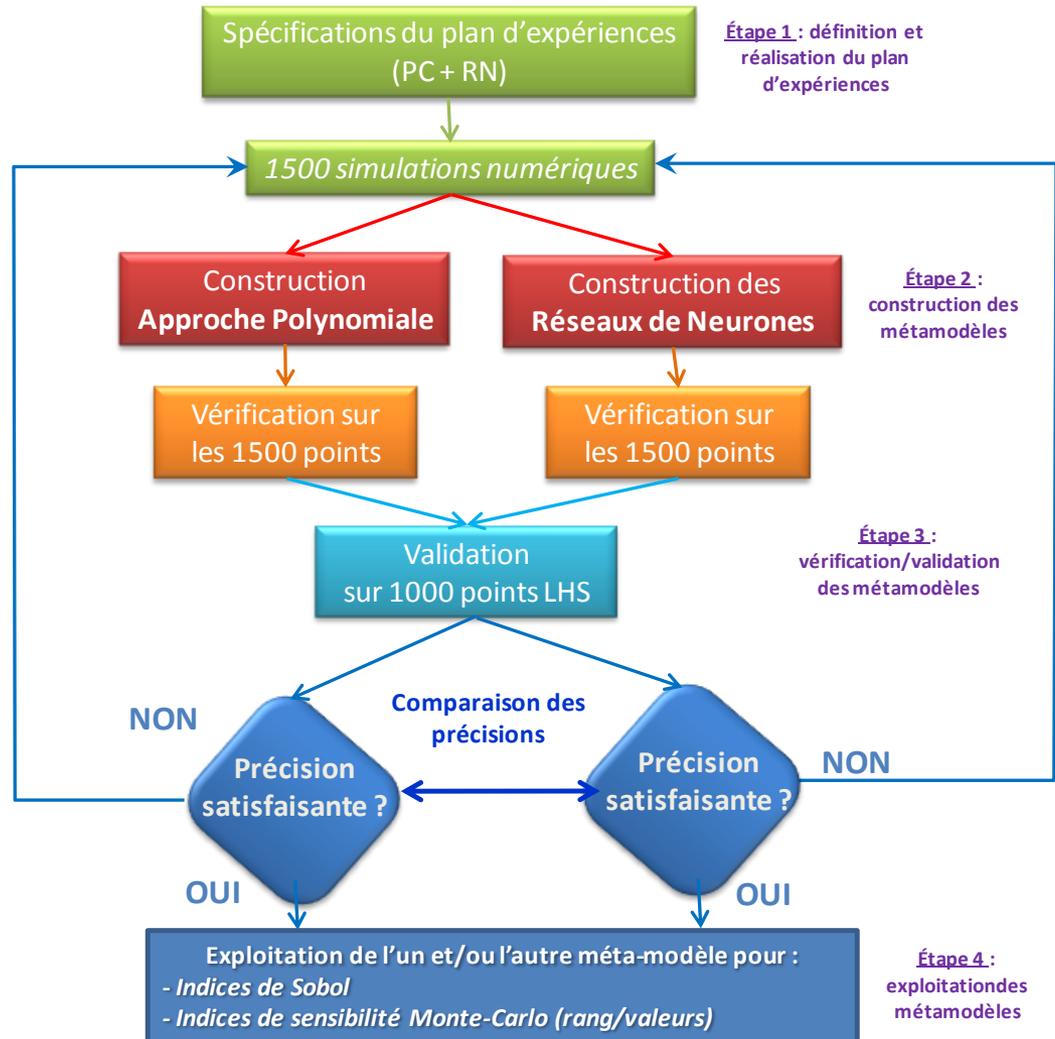


Réf. EDF/DRD/MRI

- *identification d'un événement* (un indicateur physique = une valeur seuil)
- *transformation de l'espace physique dans l'espace standard*
- *détermination du point de conception P**
(point d'atteinte de la valeur seuil, de probabilité maximale dans l'espace standard)
- *calcul de la probabilité d'atteinte de seuil (Pdéf)*
- *analyses probabilistes complémentaires :*
 - *identification des paramètres les plus influents autour de P**,
 - *indices de fiabilité,*

Construction et mise en œuvre des méta-modèles (1/1)

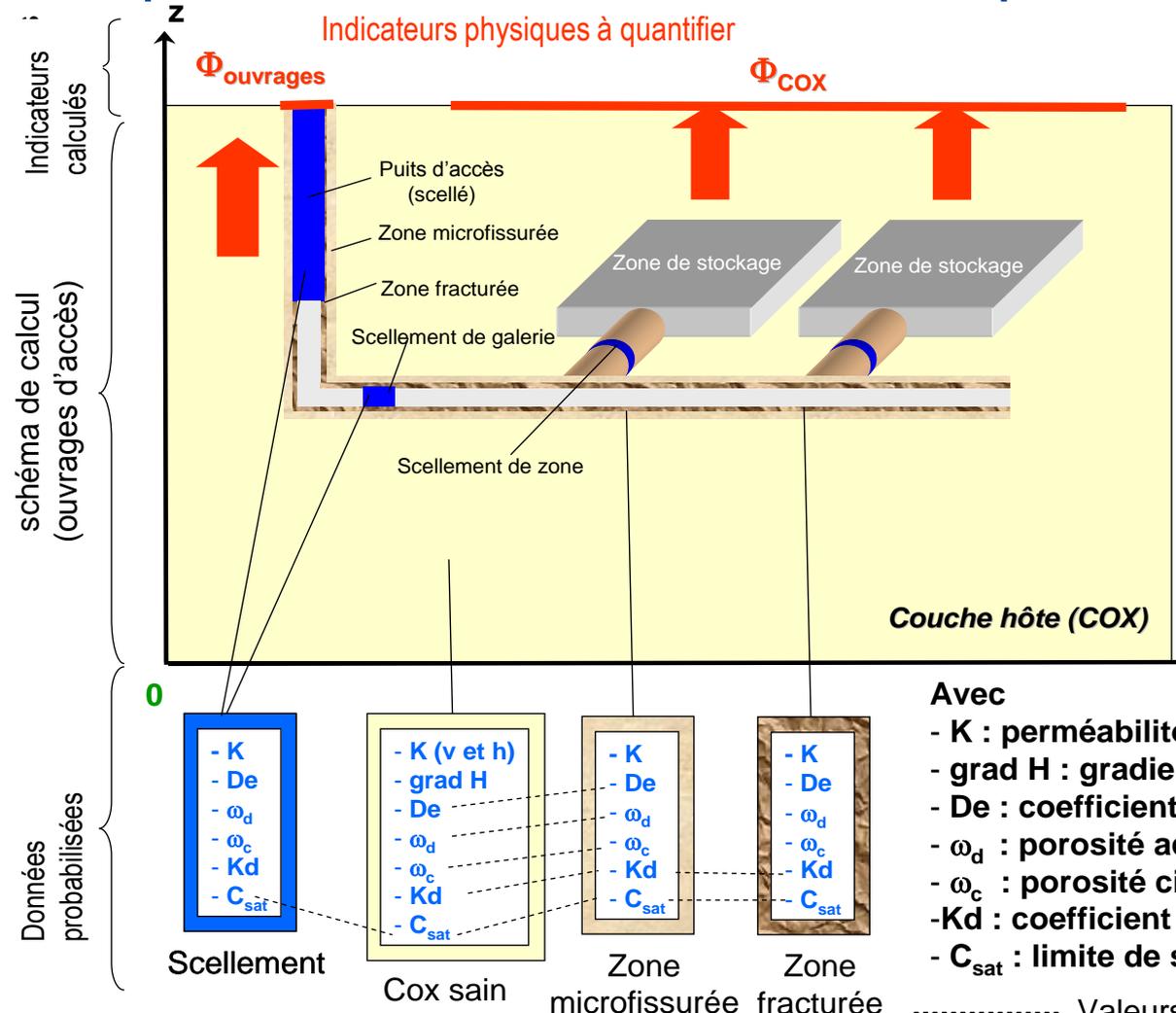
Travail réalisé en partenariat avec le





1. Contexte / Objectifs
2. Caractéristiques des simulations numériques
3. Méthodologies de traitement des incertitudes et d'analyse de sensibilité
- 4. Exemples d'application et de résultats dans le contexte d'un stockage de déchets radioactifs**
5. Perspectives

Description du cas de calcul – identification des paramètres physiques



● 18 Paramètres hydro, transport, rétention, solubilité à probabiliser

● Étude limitée aux ouvrages et à la formation hôte : pas d'études sur les encaissants et sur le colis

● Étude simultanée des voies de transfert par le système {ouvrages + EDZ} et le COX sain sur l'I129, radionucléide à vie longue, mobile et peu soluble

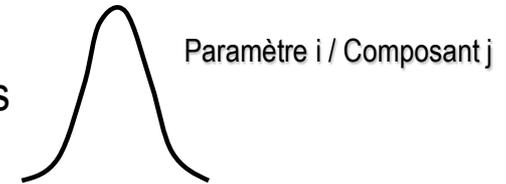
Avec

- K : perméabilité
- grad H : gradient de charge ascendant
- De : coefficient de diffusion effectif
- ω_d : porosité accessible à la diffusion
- ω_c : porosité cinématique
- Kd : coefficient de partage
- C_{sat} : limite de solubilité

----- Valeurs égales
(hors corrélations)

Définition des pdf (1/2)

⇒ calées sur un grand nombre de résultats expérimentaux disponibles



Ex : paramètres du Callovo-Oxfordien (couche d'argiles)

« Incertitude » retenue

=

variabilité géologique
des paramètres

+

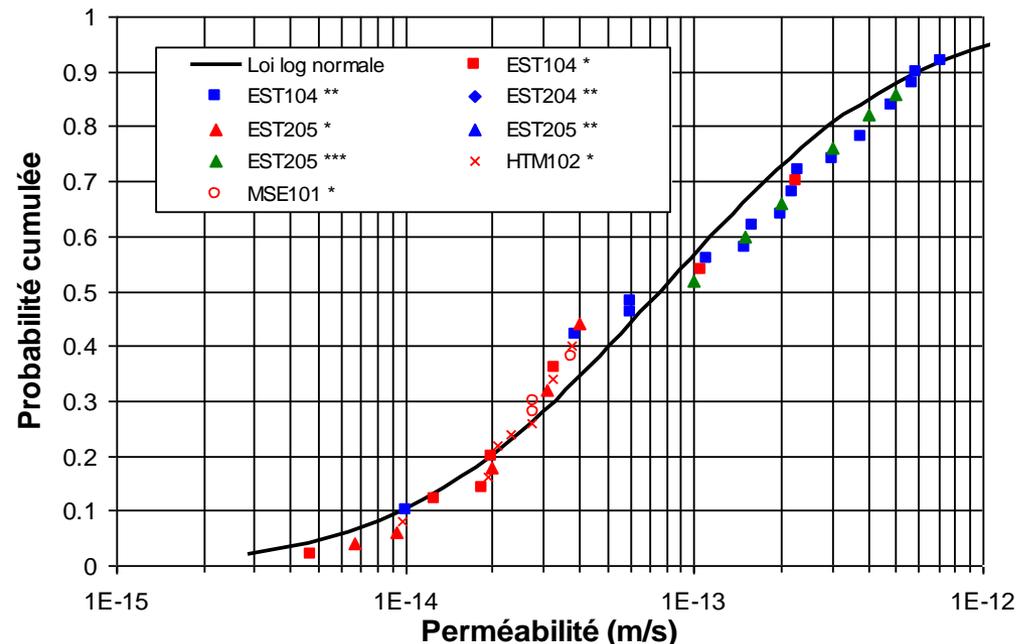
incertitudes liée aux méthodes
de caractérisation expérimentale

+

incertitudes liées aux
différentes échelles de
caractérisation
(pluri-centimétrique pour
l'échantillon à pluri-métrique
pour un forage)

moyenne loi log normale : 2.8 E-13 (moyenne loi normale associée : -30.2)
écart type loi log normale : 9.5 E-13 (écart type loi normale associée : 1.6)
médiane loi log normale : 7.7E-14
 $R^2=0.97$

Perméabilité verticale COX



Définition des pdf (2/2)

Toutes les pdf sont tronquées

exemples

✓ Coefficient de diffusion effectif

Loi normale $m = 2,8 \cdot 10^{-12}$;

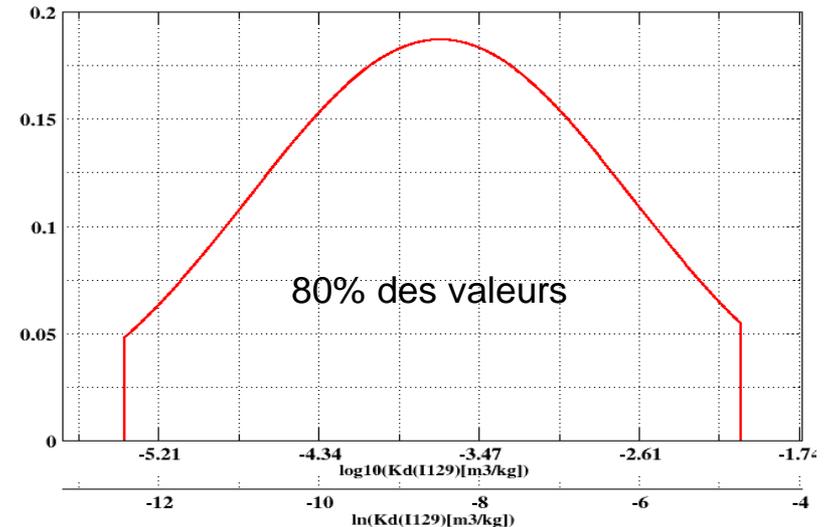
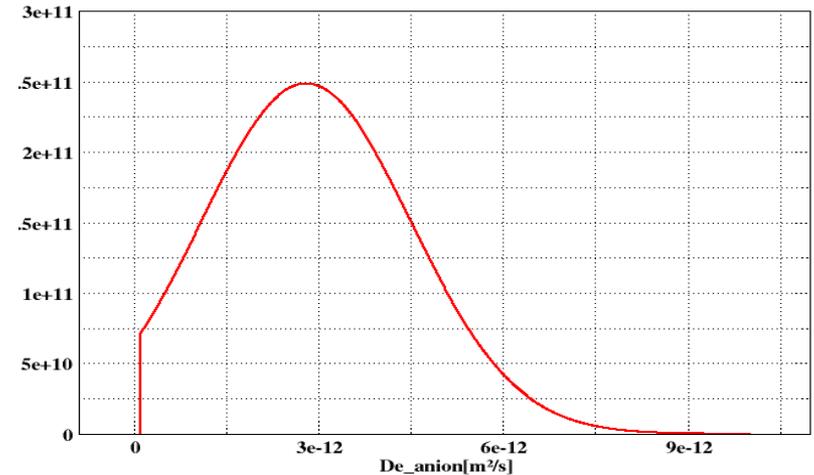
$\sigma = 1,7 \cdot 10^{-12}$; $[10^{-13} ; 10^{-11}]$

✓ Coefficient de partage de l'iode

- Loi discrète pour 20% des valeurs (valeur nulle),

- Loi normale sur les Log pour 80% des valeurs

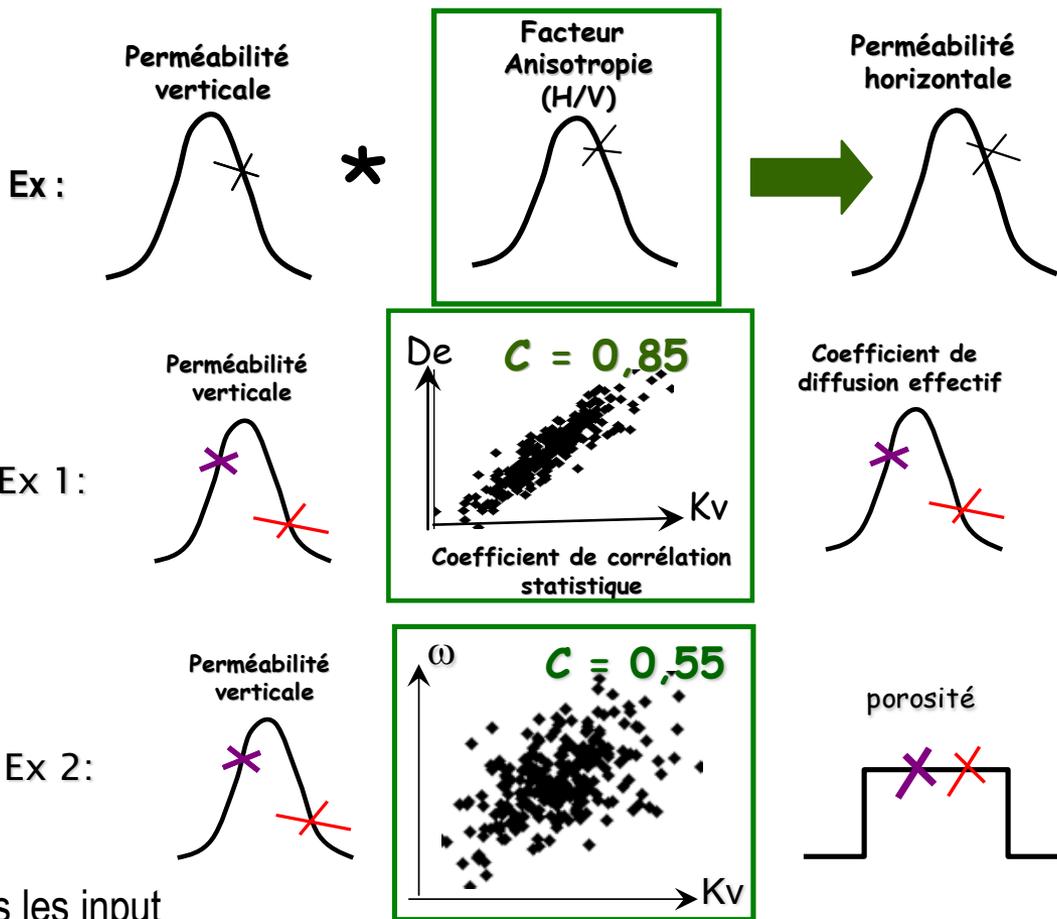
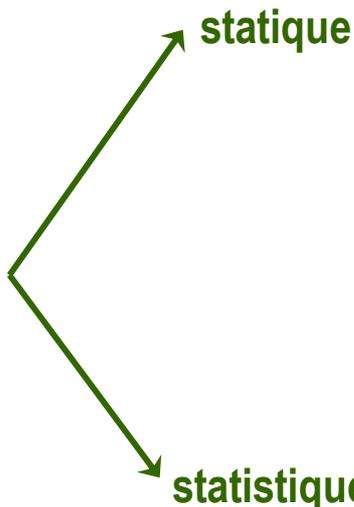
($m = -8,48$; $\sigma = 2,388$; $[4 \cdot 10^{-6} ; 8,8 \cdot 10^{-3}]$)



Définition des corrélations/contraintes entre paramètres (1/2)

⇒ Garantir une cohérence physique entre les paramètres de chaque jeu de données
 Corrélations/contraintes appliquées après échantillonnage LHS

➤ Corrélation



⇒ Matrice de corrélation entre tous les input

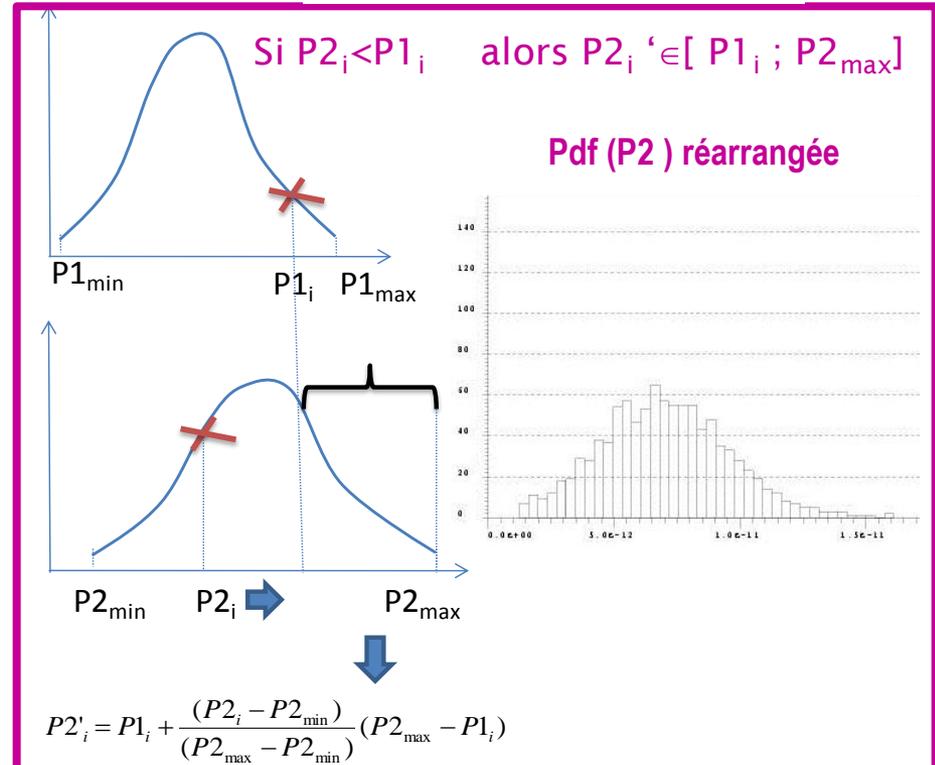
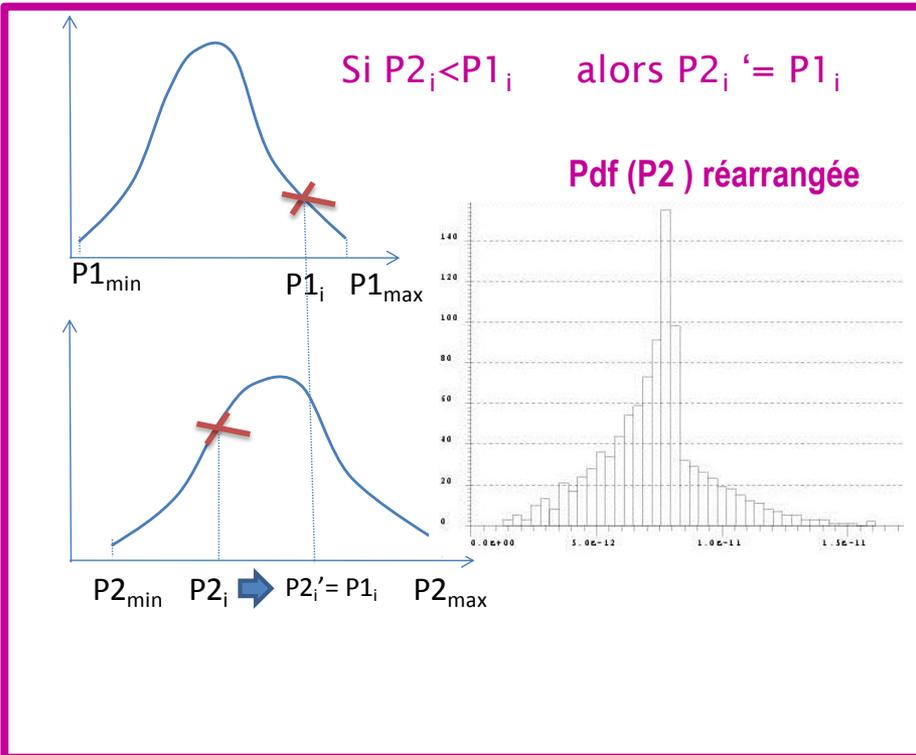
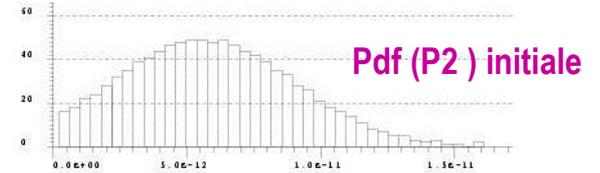
Définition des corrélations/contraintes entre paramètres (2/2)

- **Contraintes**
 - **inégalités** Ex : K (zone fracturée) > K (zone microfissurée) > K_h (COX sain) > K_v (COX sain)
 - **« croisées »** Ex : Si K (zone micro fissurée) $\leq 10 K_h$ (COX sain) ALORS ω (zone micro fissurée) = ω (COX sain)



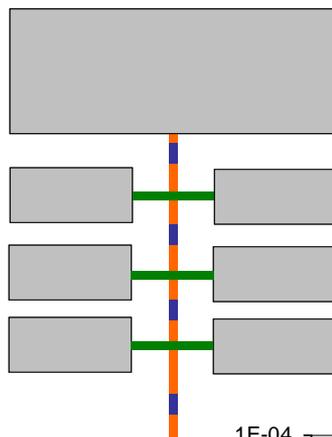
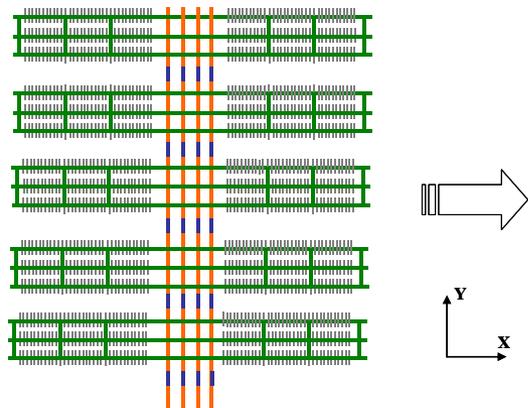
L'utilisation de contraintes modifie la pdf initiale de certains paramètres

Contrainte: $P_2 > P_1$



Simplifications des modèles

Contraintes : 1 calcul complet pour un {RN/colis-type/scénario}
= entre 20 à 50 h de CPU → nécessité de simplifier



Simplifications en macro-composants:

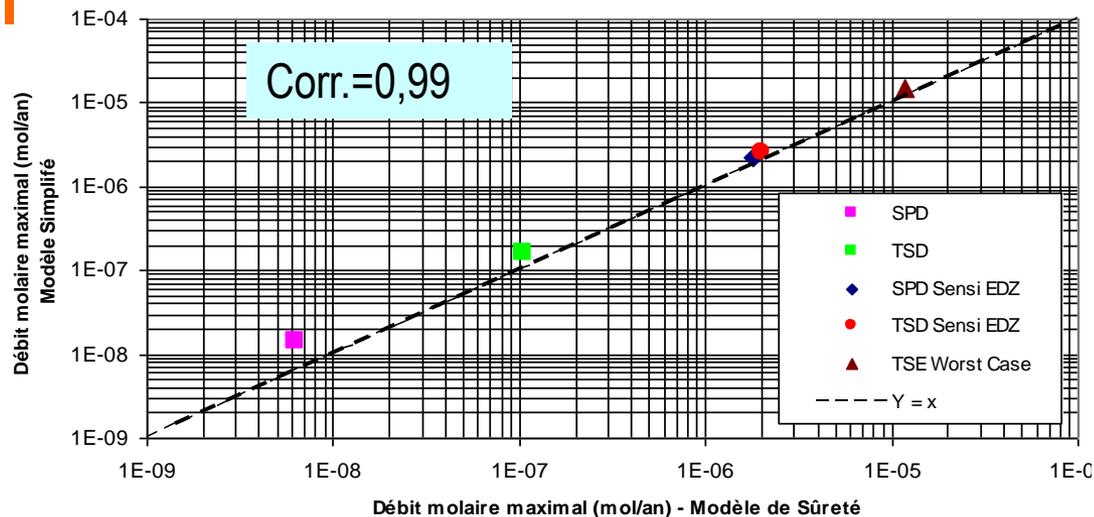
(respect de l'hydraulique du système)

- « boîtes » stockage
- regroupement des galeries



Gain « temps CPU » d'un facteur 10

*Simplification validée
par comparaison
(modèle initial / modèle simplifié)
sur plusieurs cas de calcul*



Une évaluation des méta-modèles (réseau de neurones, approche polynomiale) est en cours (cf ci-après)

Mise en œuvre numérique

Tirage

Jeux de données physique

↳ hétérogènes

↳ fort contrastes de paramètres

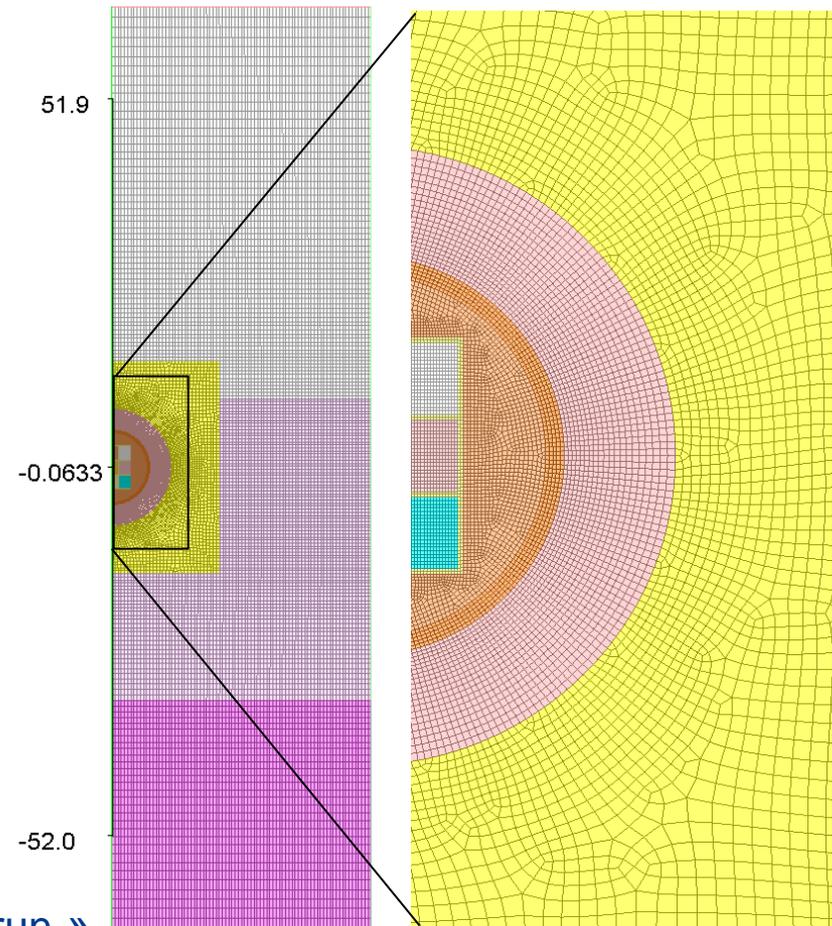


Analyse préalable

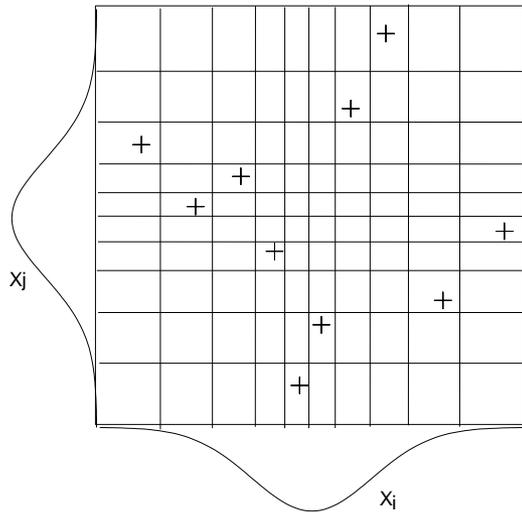
Jeux de données numériques correspondant au meilleur compromis *{discrétisation spatiale et temporelle / solveur / précision requise}*, pour différentes classes de calcul (→ automatique)



Convergence adaptée à chaque « run »
(minimisation de l'erreur numérique)

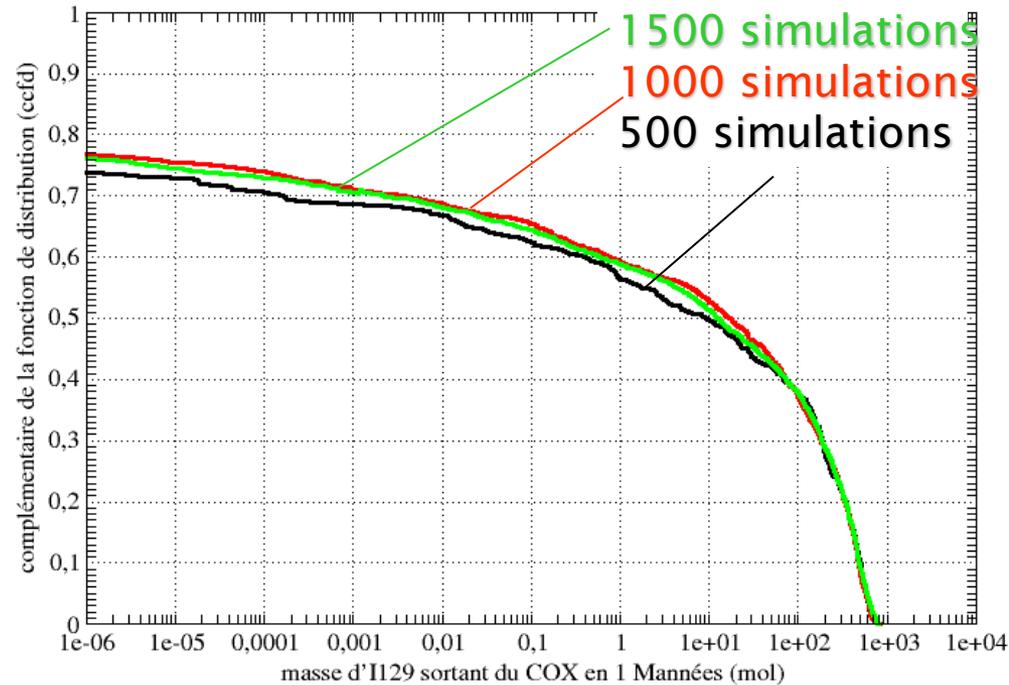


Méthode d'échantillonnage

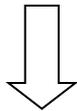


Méthode Hypercube Latin (LHS)

→ couverture du spectre de variation de l'ensemble des paramètres)



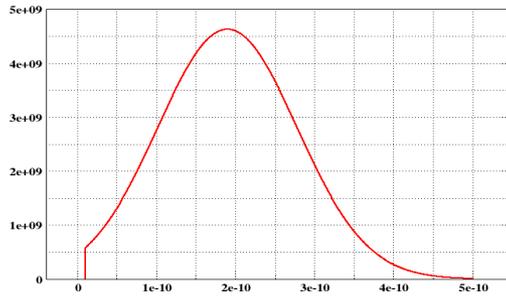
Détermination du nombre nécessaire de simulations
→ Stabilisation de la fonction « réponse »



1000 simulations sont suffisantes

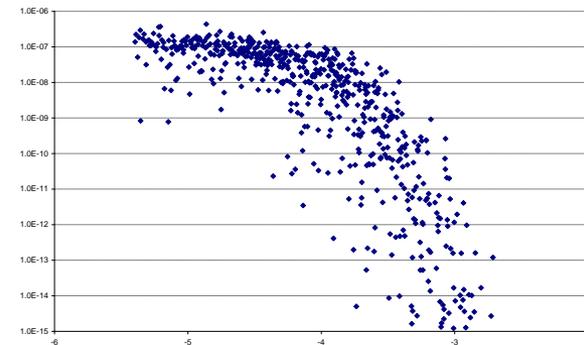
Indicateurs de sortie

Analyses d'incertitudes



- ✓ évolution dans le temps des différents *quantiles* à 1%, 5%, 25%, 50% (médiane), 75%, 95%, 99%
- ✓ distribution (*pdf, ccfd*) des indicateurs physiques (à différentes dates ou pour les maxima) + quantification des *moments* (kurtosis, skewness)

Analyse de sensibilité globale

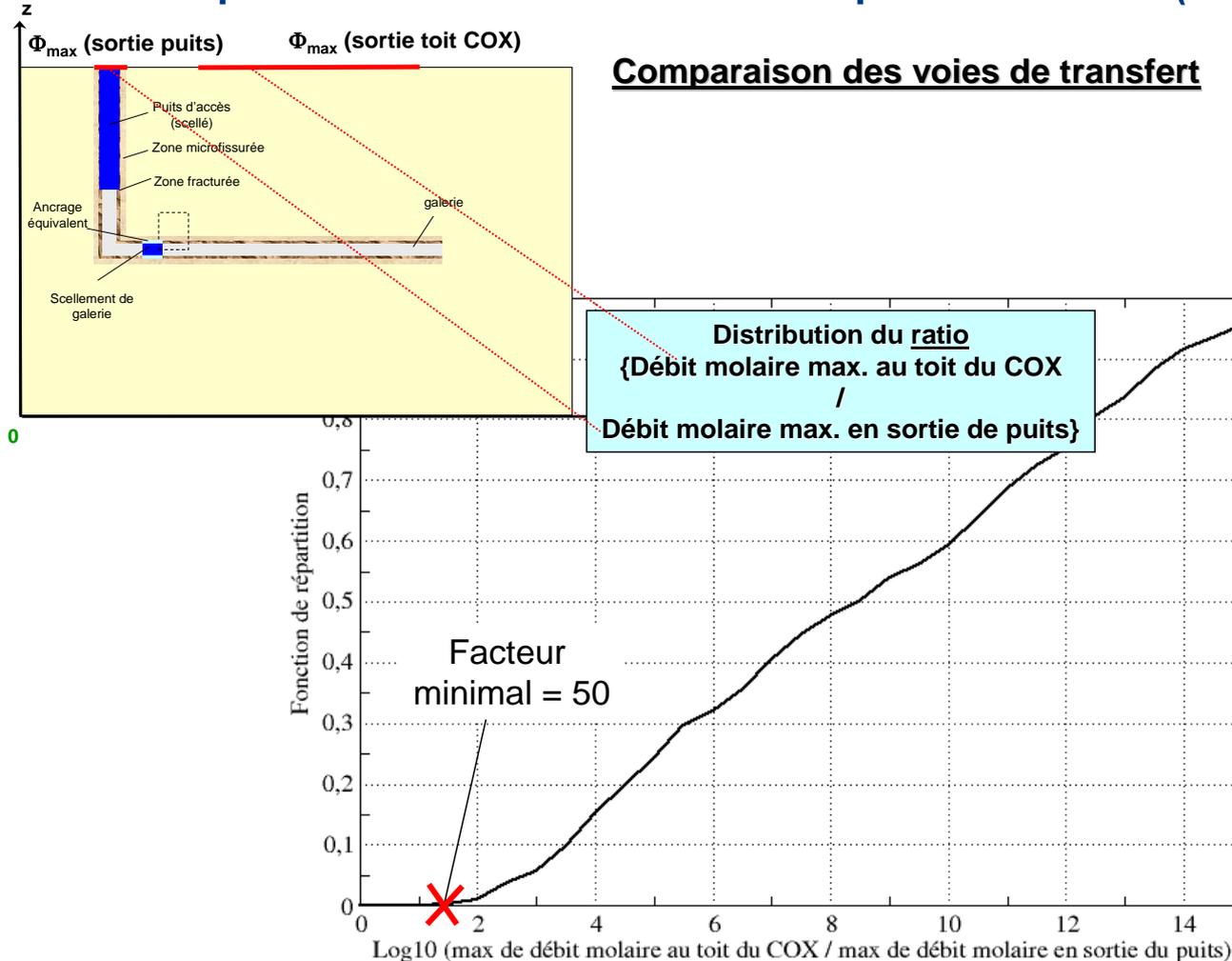


Facteurs de sensibilité

- ✓ de linéarité {résultat/données d'entrée} : *Pearson, PCC, SRC,...*
- ✓ de monotonie {résultat/données d'entrée} : *Spearman, PRCC, SRRC,...*

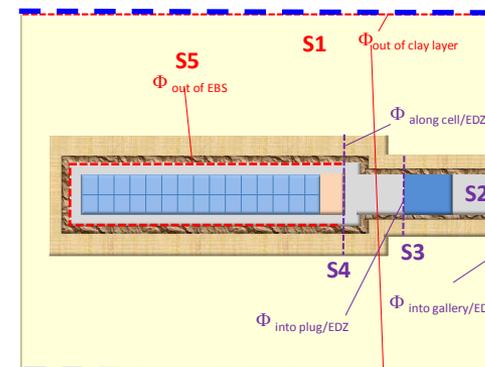
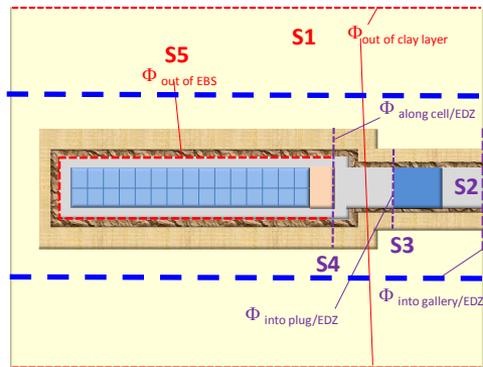
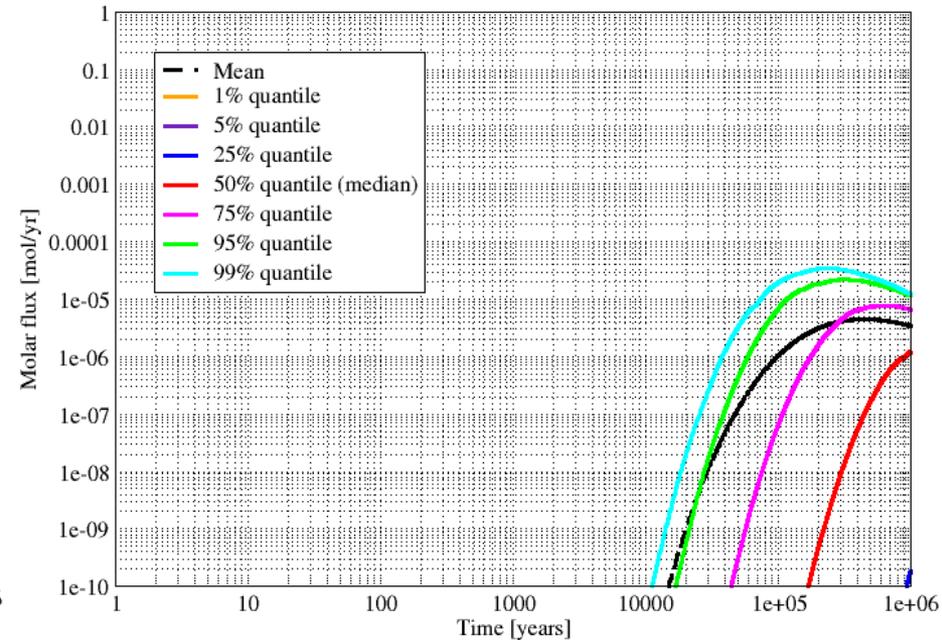
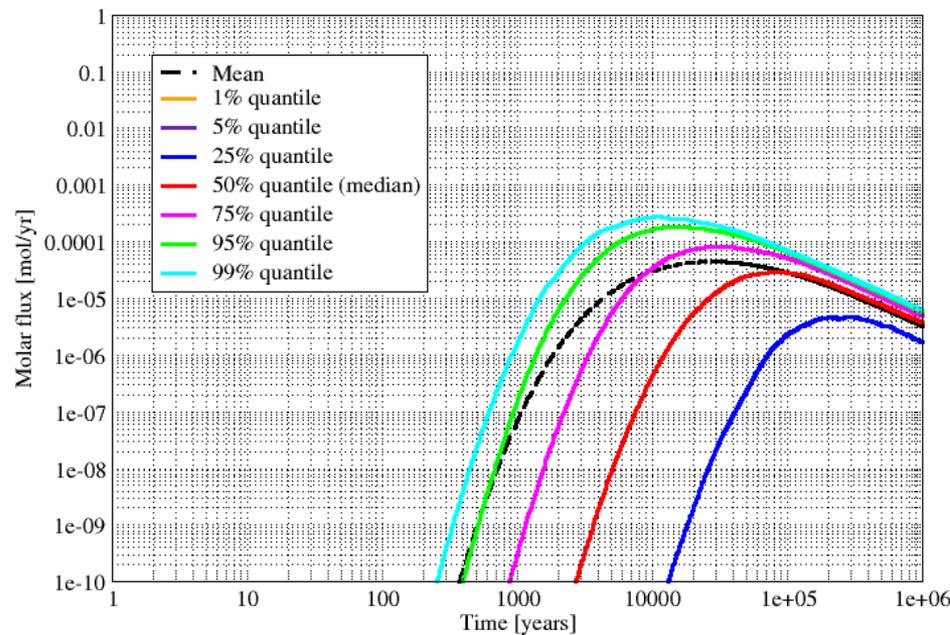
Nuages de points

Analyse d'incertitudes probabiliste Monte-Carlo : exemple de résultats (1/2)



→ La voie de transfert « naturelle » reste toujours prépondérante

Analyse d'incertitudes probabiliste Monte-Carlo : exemple de résultats (2/2)

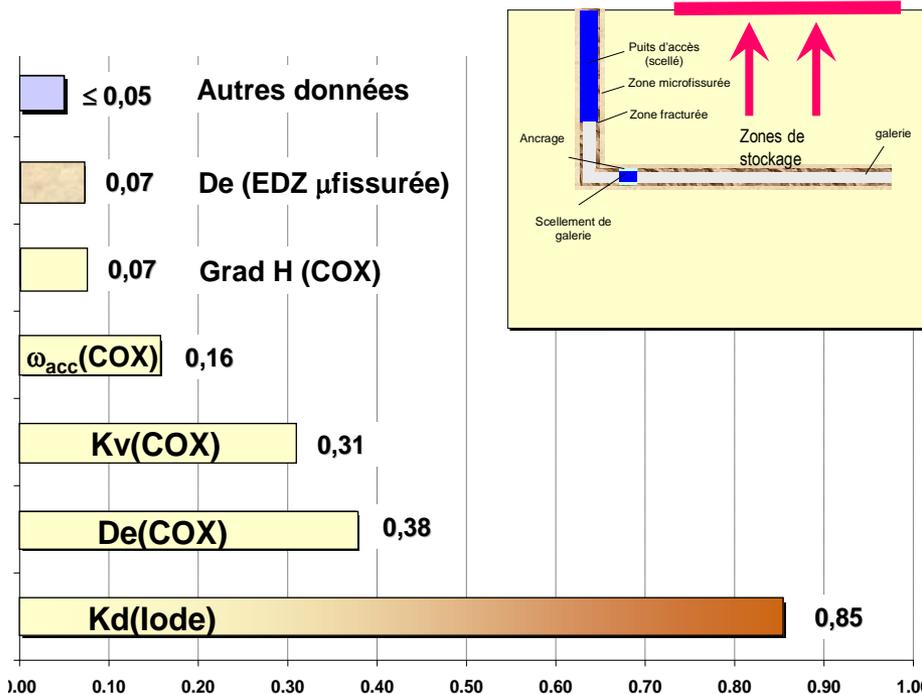


Analyse de sensibilité probabiliste Monte-Carlo : exemple de résultats

Coefficient de corrélation de rang {paramètre/résultat}

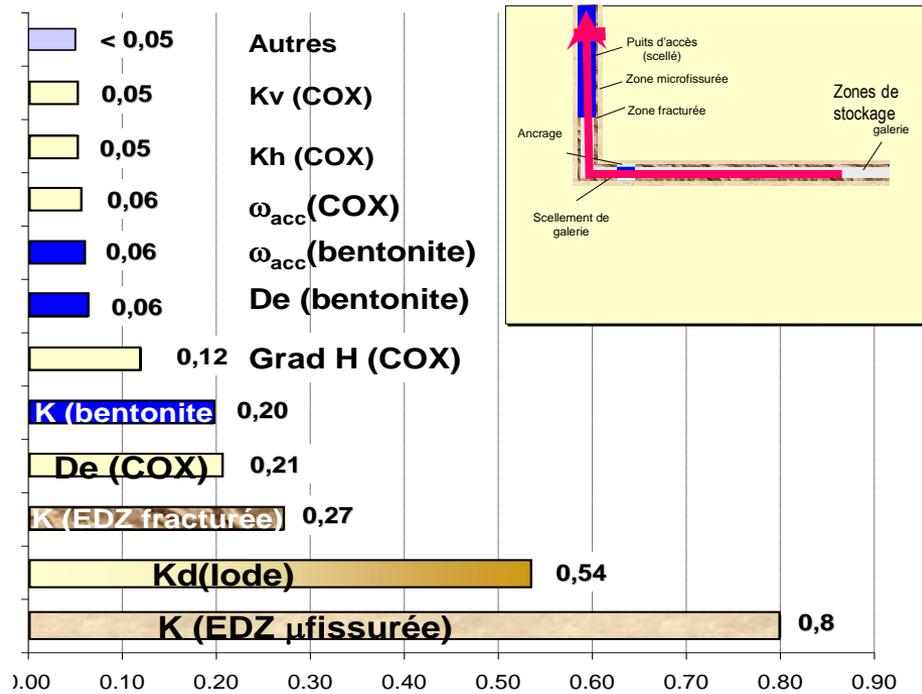
⇒ Hiérarchisation des paramètres influents pour chaque voie de transfert

Max de débit molaire d'iode à la sortie du COX

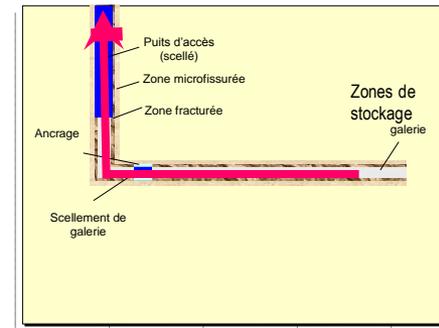
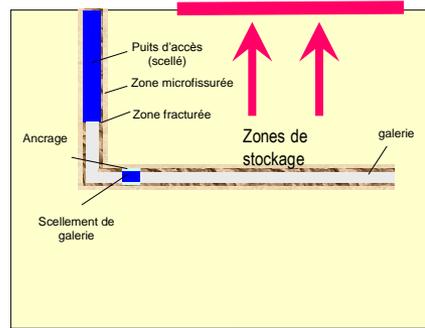


Coefficient de monotonicité

Max de débit molaire d'iode à la sortie du puits

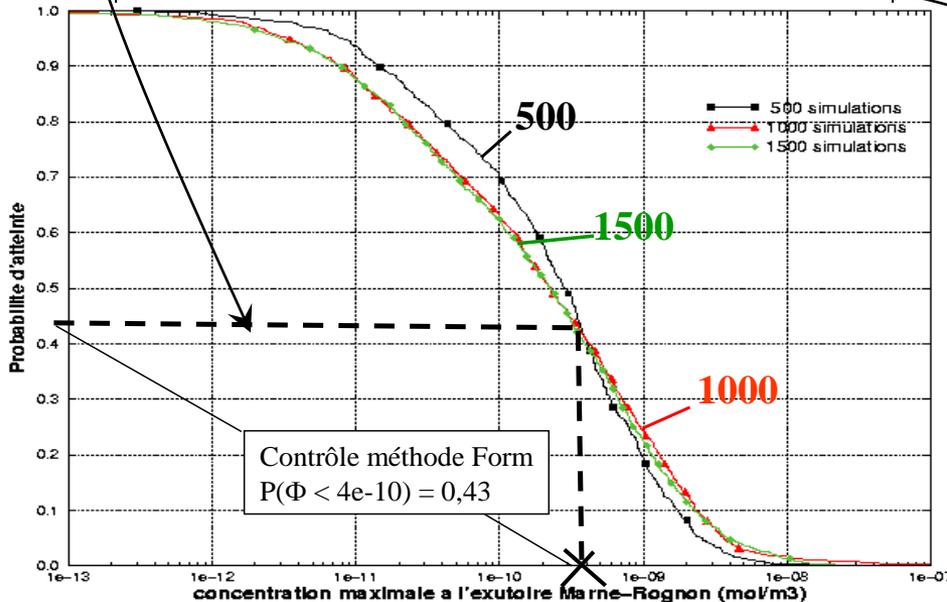


Coefficient de monotonicité

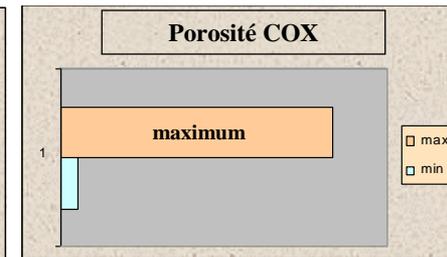
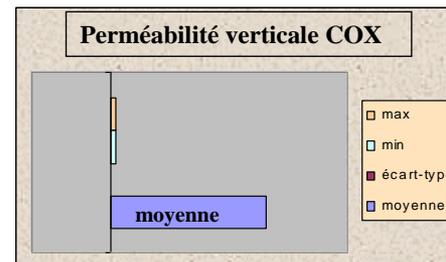


Mise en œuvre de méthodes fiabilistes Form/Sorm (en complément du MC - exercice)

Points forts	Points faibles
<ul style="list-style-type: none"> ✓ nombre optimisé de simulations ✓ indicateurs pertinents : <ul style="list-style-type: none"> - probabilité de d'atteinte de seuil - indice de fiabilité, - facteur d'importance, - facteur de sensibilité 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ raisonnement basé sur le point de conception P^* <i>(tests d'optimalité coûteux, limite quand seuil difficile à atteindre, ou surface d'atteinte de seuil discontinue)</i> ✓ mise en oeuvre de la méthode pour chaque événement

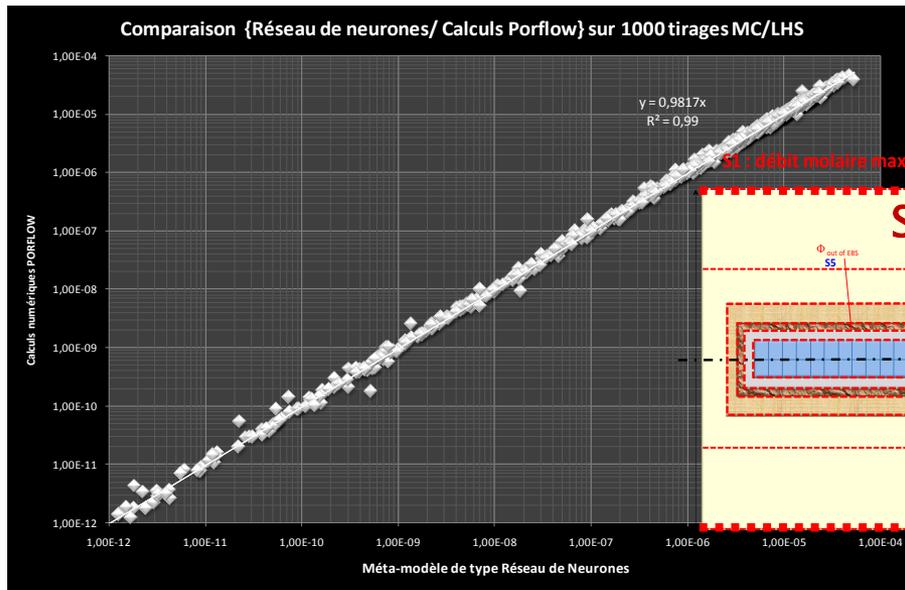


$$C(\text{seuil}) = 4 \cdot 10^{-9} \text{ mol/m}^3$$

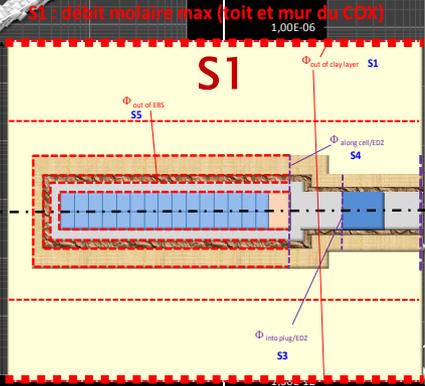
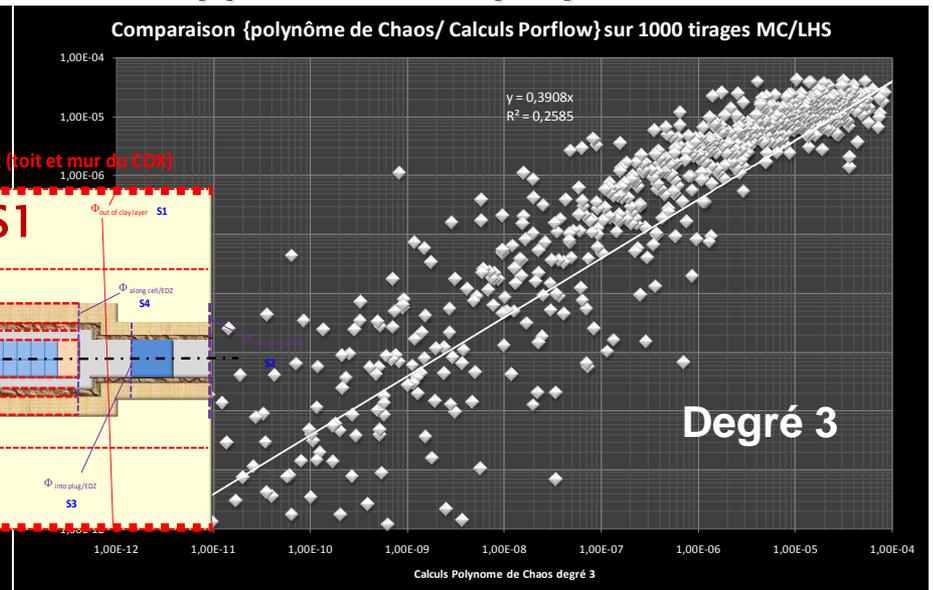


Construction et mise en œuvre des métamodèles

Réseau de Neurones



Approximation polynomiale



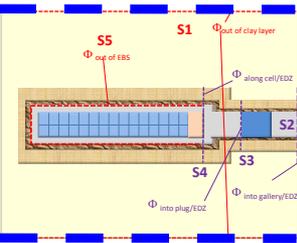
- ✓ Très bonne approximation sur plusieurs ordres de grandeur
- ✓ Coefficient de détermination du modèle (0,99)

- ✓ Grande dispersion des résultats
- ✓ Faible R^2
- Amélioration nécessaire de la précision (degré du polynôme)

➔ Exploitation du réseau de neurones pour l'étude

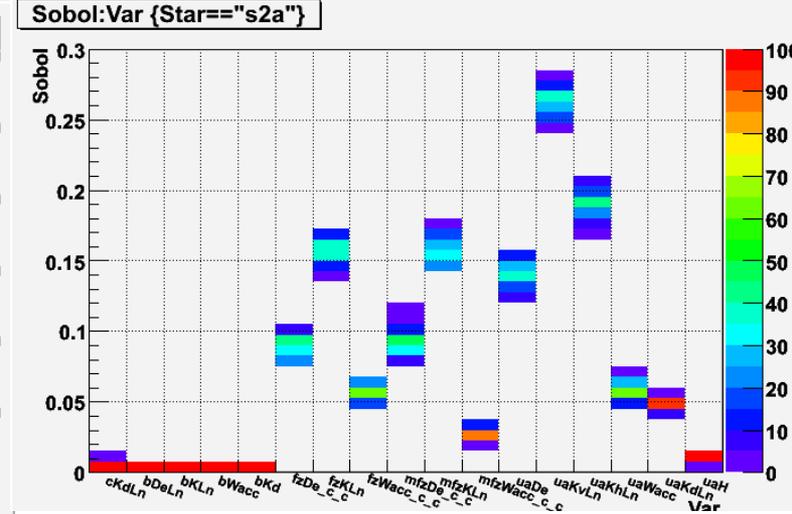
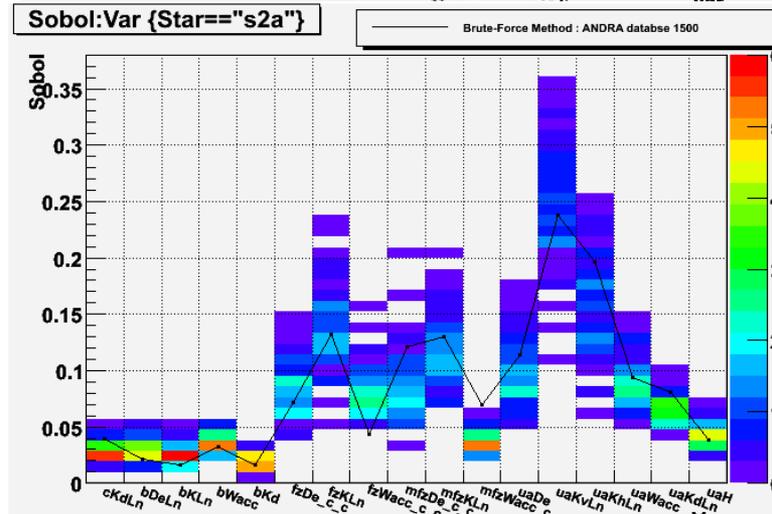
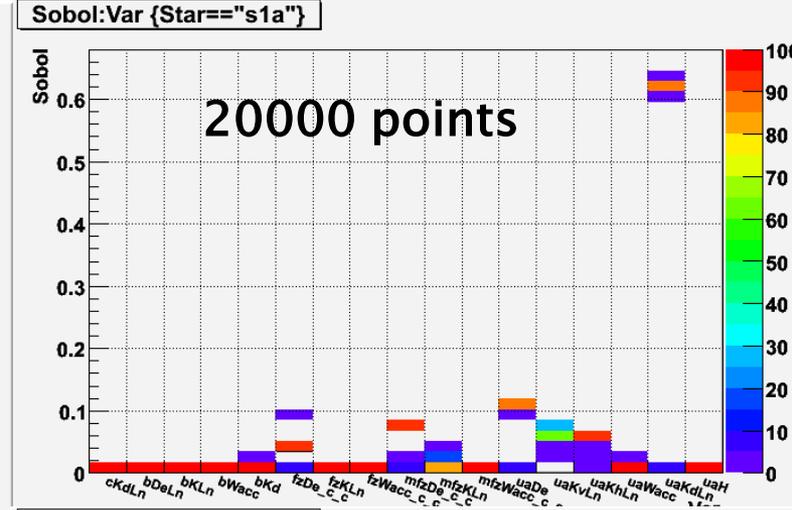
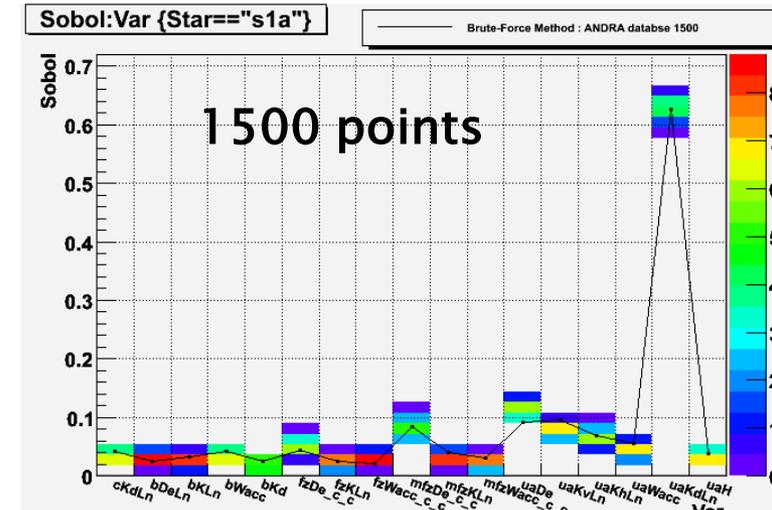
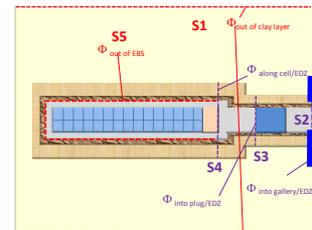
Exploitation des métamodèles : calcul des indices de Sobol

s1



$$S_i = \frac{\text{Var}[E(y|x_i)]}{\text{Var}[y]}$$

s2





1. L'Andra : son contexte, ses missions
2. La problématique des incertitudes : origine, objectifs
3. Les méthodologies de traitement des incertitudes mises en œuvre
4. Exemples d'application et de résultats dans le contexte d'un stockage de déchets radioactifs
5. Perspectives

- Plusieurs axes de R&D liés :
 - Développement des méthodes / Outils de simulation probabiliste
 - Développement des méthodes de calcul Haute Performance
 - Poursuite des acquisitions de données, notamment sur le milieu géologique, permettant de mettre en oeuvre les méthodes et outils

- Poursuite de la double approche déterministe/probabiliste de traitement des incertitudes pour l'évaluation de performance/sûreté

- Utilisation de l'approche probabiliste en amont des calculs de sûreté, pour représenter certains processus phénoménologiques « complexes » :
 - Ecoulement di-phasique eau-gaz en champ proche d'une alvéole
 - Couplage chimie-transport
 - ...

● Développement/utilisation des méthodes et/ou outils :

- méthode directe (état adjoint) → sensibilité de type « local » (exploitation thèse ANDRA/INRIA)
- surfaces de réponse de type réseau de neurones → achat du logiciel ModeFrontier

● Acquisition de données :

- Détermination de la variabilité des paramètres d'écoulement et de transport à l'échelle de la zone de transposition pour le Callovo-Oxfordien et les formations encaissantes (*moyens de base : forages, sismique 3D, ...*) → corrélations entre données (porosité, litho-stratigraphie, perméabilité, ...) et détermination des différentes échelles de variabilité : passage du modèle géostatistique au modèle d'écoulement/transport
- Détermination expérimentale des corrélations entre certains paramètres d'écoulement et de transport: perméabilité, diffusion, porosité, rétention