

Le stockage des déchets radioactifs

Alexandre Ern

CERMICS, Université Paris-Est, École Nationale des Ponts et Chaussées

CEMRACS, 23/07/2013

Repères

- ▶ la radioactivité
- ▶ les déchets radioactifs
- ▶ la gestion des déchets radioactifs
- ▶ quelques références (sur internet)
 - ▶ www.andra.fr et www.dechets-radioactifs.com
 - ▶ www.laradioactivite.com
 - ▶ www.nuclear-waste.eu

La radioactivité

- ▶ Découverte suite aux travaux de Becquerel (1896) et de Pierre et Marie Curie (1898)
- ▶ La radioactivité résulte de l'émission de plusieurs types de rayonnements suite à la désintégration d'atomes instables, les **radionucléides** (RN)
- ▶ La radioactivité d'un RN diminue spontanément avec le temps : notion de **demi-vie**

^3H	12.3 ans
^{226}Ra	1600 ans
^{14}C	5700 ans
^{36}Cl	300 000 ans
^{129}I	16 millions d'années
^{235}U	700 millions d'années

Mesures de la radioactivité

- ▶ Elle se mesure en becquerels (# désintégrations/sec)
- ▶ Les effets biologiques de la radioactivité sur les êtres vivants se mesurent en **Sieverts**
- ▶ En France, l'exposition moyenne est de **3.5 mSv/an**
 - ▶ 1.1 mSv/an d'origine artificielle
 - ▶ 2.4 mSv/an d'origine naturelle
 - ▶ 1 radio pulmonaire = 0.3 mSv, un AR Paris-NY = 0.06 mSv

Usages de la radioactivité

▶ Défense

- ▶ force de dissuasion et propulsion nucléaire

▶ Électronucléaire

- ▶ centrales nucléaires, fabrication et traitement du combustible

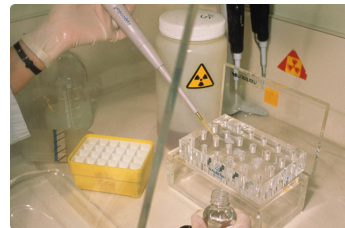
▶ Industrie (hors électronucléaire)

- ▶ extraction, contrôle de soudure, stérilisation, conservation de produits alimentaires, ...

▶ Médecine

- ▶ thérapies, diagnostics

▶ Recherche



Quelques jalons historiques



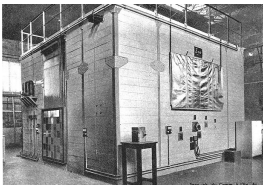
1934 Irène et Frédéric Joliot-Curie créent le premier atome radioactif



1938 Otto Hahn découvre la fission de l'uranium



1942 Enrico Fermi conçoit la première réaction en chaîne contrôlée



1948 premier prototype de réacteur nucléaire français la pile ZOE à Châtillon

L'autorité de sûreté nucléaire

- ▶ L'ASN contrôle, au nom de l'État, l'ensemble des **activités nucléaires civiles** en France, notamment
 - ▶ les centrales nucléaires d'EDF
 - ▶ les installations du CEA
 - ▶ le transport des matières radioactives
 - ▶ les activités nucléaires en médecine et recherche
- ▶ L'ASN contribue à l'**information** des citoyens
- ▶ L'ASN publie un **rapport annuel** sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France
- ▶ L'ASN s'appuie sur les expertises scientifiques de l'**Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire** (IRSN)

Les déchets radioactifs

- ▶ Les **déchets radioactifs** sont des substances radioactives pour lesquelles **aucune utilisation ultérieure** n'est prévue ou envisagée
- ▶ Les **matières radioactives** sont des substances radioactives pour lesquelles **une utilisation ultérieure** est prévue ou envisagée
- ▶ Production nationale par an et par habitant
 - ▶ **2 kg de déchets radioactifs**
 - ▶ 390 kg d'ordures ménagères
 - ▶ 2.5 t de déchets industriels
- ▶ Inventaire national des déchets radioactifs (réalisé tous les 3 ans)
 - ▶ en 2010, **1.3 Mm³** (équiv. conditionné) [volume Stade de France : 2.2Mm³]
 - ▶ répartition des **volumes** par secteur économique

secteur	électr.	rech.	défense	indus.	médecine
(%)	59	26	11	3	1

Classification des déchets

- ▶ **HA** Haute activité (plusieurs Mds becq/g)
 - ▶ principalement issus des combustibles usés (CU)
- ▶ **MA-VL** Moyenne activité - vie longue (M à Md becq/g)
 - ▶ en majorité issus du traitement des CU
- ▶ **FA-VL** Faible activité - vie longue (10^4 becq/g)
 - ▶ déchets graphite (réacteurs de 1ère génération) et déchets radifères (extraction d'U, industrie du Ra, assainissement de sites contaminés)
- ▶ **FMA-VC** Faible et moyenne activité - vie courte (10^2 à 10^6 becq/g)
 - ▶ exploitation et démantèlement des centrales nucléaires, cycle du combustible, centres de recherche et activité biomédicale
- ▶ **TFA** Très faible activité (≤ 100 becq/g)
- ▶ Répartition des volumes par type de déchet

type	HA	MA-VL	FA-VL	FMA-VC	TFA
(%)	0.2	3.1	6.6	62.8	27.3

0.2% du volume contient 97% de l'activité radioactive

Inventaires prévisionnels

- ▶ **Scénarios** sur la base d'**hypothèses** spécifiques à chaque secteur
 - ▶ notamment, allongement de la durée de fonctionnement du parc électronucléaire à 50 ans et traitement de la totalité des CU

Volume (m ³)	2020	2030
HA	4 000	5 400
MA-VL	45 000	49 000
FA-VL	89 000	133 000
FMA-VC	1 000 000	1 200 000
TFA	750 000	1 300 000
Total	1 900 000	2 700 000

La gestion des déchets radioactifs I

- ▶ Loi de programme du 28 juin 2006 sur la **gestion durable des matières et déchets radioactifs**
 - ▶ fait suite à la Loi Bataille de 1991
- ▶ Les recherches et études relatives à ces déchets sont conduites selon **trois axes complémentaires**
 - ▶ la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue
 - ▶ le stockage réversible en couche géologique profonde
 - ▶ l'entreposage
 - ▶ **Commission Nationale d'Évaluation** (CNE) (8 personnalités qualifiées, 4 experts scientifiques)
- ▶ Modes de gestion « **historiques** », e.g.,
 - ▶ immersion dans l'Atlantique (1967 et 1969)
 - ▶ 14 200 tonnes (France), 150 000 tonnes (tous pays)

La gestion des déchets radioactifs II

- ▶ Le **CEA** est pilote sur l'Axe I de la Loi (séparation, transmutation)
- ▶ L'**ANDRA** (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) a pour missions notamment
 - ▶ la conception et exploitation des **centres de stockage**
 - ▶ la gestion durable des déchets radioactifs français, l'inventaire national, ...
- ▶ L'**entreposage** consiste à placer les matières ou déchets radioactifs à **titre temporaire** (e.g., 50 à 100 ans) dans une installation
- ▶ Le **stockage** consiste à les placer dans une installation destinée à les conserver de façon (potentiellement) **définitive**
- ▶ La **réversibilité d'un stockage** fait référence à la possibilité d'en retirer les déchets pendant une certaine durée (e.g., 100 ans)

La gestion des déchets radioactifs III

- ▶ Trois types de stockage
 - ▶ le **stockage de surface** (TFA, FMA-VC) 2 centres actuellement exploités dans l'Aube
 - ▶ le **stockage à faible profondeur** (FA-VL), à l'étude (échec en 2009 suite au retrait des candidatures)
 - ▶ le **stockage profond** (HA, MA-VL), à l'étude, **échéance en 2014**
- ▶ Le stockage en couche géologique profonde
 - ▶ dossier ANDRA 2005 établissant la **faisabilité technique** d'un tel stockage pour les déchets HA et MA-VL
 - ▶ considéré comme **solution de référence** pour ces déchets dans la Loi du 28 juin 2006

Le stockage de surface



1969 premier site de stockage français FMA-VC (Manche)
fermé en 1994, sous surveillance, 527 000 m³
ouverture d'un nouveau site dans l'Aube (1992)
95ha, 3 communes (Soulaines-Dhuys, Epothémont, Ville-aux-Bois)

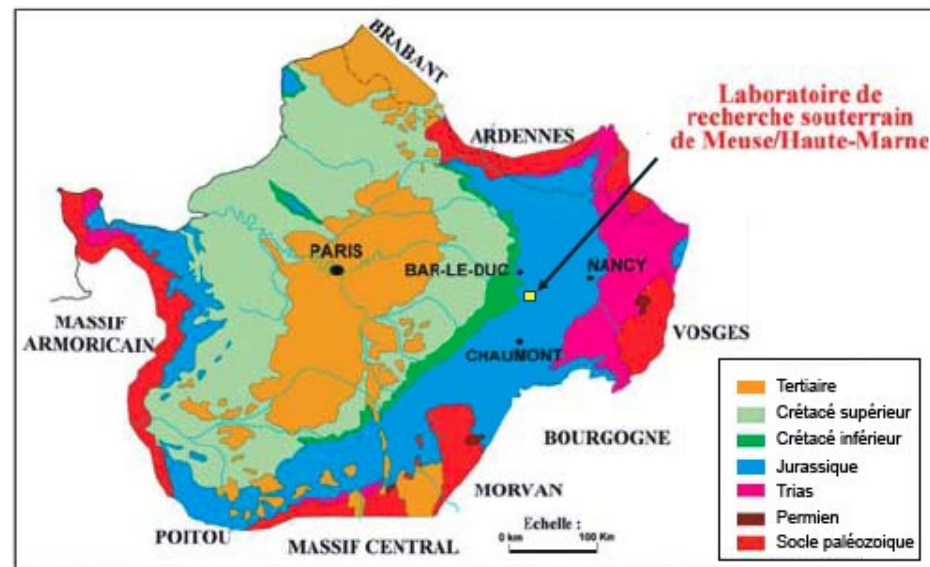


2003 site de stockage TFA de l'Aube
45ha, 2 communes (Morvilliers, La Chaise)
la France, premier pays au monde à se doter d'un tel site

Le projet Cigéo

(Centre industriel de stockage géologique, ANDRA)

- ▶ un des plus gros projets industriels français
- ▶ localisation en **Meuse Haute Marne** à l'Est du bassin parisien
- ▶ entré en phase de conception industrielle (premier contrat de maîtrise d'œuvre d'études signé en janvier 2012)
- ▶ volumes prévisionnels (m³) : 10 000 pour HA, 70 000 pour MA-VL
- ▶ 30% des déchets HA et 60% des déchets MA-VL destinés à Cigéo **sont déjà produits**



Aspects locaux

- ▶ **Deux départements** concernés : Meuse et Haute Marne
 - ▶ projet de territoire élaboré par la préfecture de la Meuse (voies ferrées, routes, réseaux, logement, écoles, commerces)
- ▶ **Comité Local d'Information et de Suivi (CLIS)**
 - ▶ prévu par la Loi de 1991, puis par celle de 2006
 - ▶ suivi de l'évolution des connaissances, information du public
- ▶ **Observatoire Pérenne de l'Environnement (OPE)**
 - ▶ état des lieux de l'environnement autour du site de Cigéo
 - ▶ conserver la mémoire de cet environnement
 - ▶ une démarche unique en son genre...

Quel coût pour la gestion des déchets radioactifs ?

- ▶ Rapport de la Cour des comptes (31.01.12)
 - ▶ coûts de la filière électronucléaire
 - ▶ **28,4 Md€** pour la gestion des déchets déjà produits (conditionnement, entreposage, transport, stockage, R&D)
- ▶ Le coût de Cigéo : une évaluation complexe
 - ▶ chiffrage intermédiaire de **35 Md€** par l'ANDRA en 2009
 - ▶ coût de la recherche estimé à **118 M€** par an
 - ▶ coût arrêté annuellement par le Ministre en charge de l'Énergie
- ▶ Les producteurs de déchets (EDF, CEA, AREVA)
 - ▶ **provisionnent** en vue du stockage futur des déchets déjà produits
 - ▶ le devis actuel du stockage se traduit pour EDF par une provision de **5 Md€** à travers la constitution progressive d'actifs dédiés
 - ▶ le coût de Cigéo serait de l'ordre de qq.% du coût de prod. du Mw.h

Échéances

- ▶ **2013** : débat public
 - ▶ la Loi Barnier (02.02.1995) prévoit l'association et la participation du public à l'élaboration des projets d'aménagement
 - ▶ le débat doit permettre d'**informer** le public, d'**assurer** l'expression la plus large possible et d'**éclairer** le maître d'ouvrage
- ▶ **2014** : demande d'autorisation de création (DAC)
- ▶ **2016** : projet de loi sur les conditions de réversibilité
- ▶ **2025** : mise en service prévisionnelle

L'international

- ▶ La Directive européenne “Déchets” impose à tous les états membres d'établir un **programme national de gestion** de leurs déchets
- ▶ **Belgique** 2 centrales, 7 réacteurs, recherche site stockage depuis 2009
- ▶ **Suisse** 4 centrales, 5 réacteurs, études pour stockage en cours (pas avant 2040)
- ▶ **Suède** 3 centrales, 10 réacteurs, arrêt progressif, stockage (granite) CU Forsmark 2025
- ▶ **Finlande** 2 centrales, 4 réacteurs, stockage à Onkalo (granite) des CU et HA pour 2020
- ▶ **États-Unis** 65 centrales, 104 réacteurs, études du site Yucca Mountain arrêtées en 2010, 3 sites de stockage FA de faible profondeur

La roche hôte

- ▶ **Argilite du Callovo-Oxfordien**
 - ▶ formée il y a **165 Ma**
 - ▶ située à **500 mètres de profondeur**
 - ▶ épaisseur de l'ordre de 100 m
- ▶ Plusieurs propriétés **favorables au stockage**
 - ▶ circulation d'eau très lente (cm/Ka)
 - ▶ rétention des RN
 - ▶ résistance mécanique
 - ▶ environnement géologique stable

Principes généraux du stockage

- ▶ Un **réseau pluri-km de galeries** est creusé dans la roche hôte, complété par des installations de surface, des descenderies, ...
- ▶ La roche hôte constitue la **principale barrière de confinement**
- ▶ S'y ajoutent des barrières de confinement d'origine humaine
 - ▶ conditionnement des déchets (verres, enrobés bitumineux, ...)
 - ▶ conteneurs (béton, acier)
 - ▶ barrières ouvragées à l'entrée et le long des galeries



Horizons temporels

- ▶ L'horizon ultime est le **million d'années**
 - ▶ un des principaux RN relâchés est ^{129}I , dont la demi vie dépasse le Ma
 - ▶ -65 Ma : dinosaures ; -40 Ma : Alpes ; -30 Ka : homo sapiens
- ▶ À cet horizon, le monde souterrain nous apparaît comme plus stable que le monde en surface
- ▶ Comment **transmettre l'information** aux générations futures ?
 - ▶ transmission classique (langage, images, symboles) : quelques siècles
 - ▶ au delà : possibilité d'oubli, de régression technologique, ...

Les différentes phases du stockage

- ▶ **10^2 ans** (intervention humaine)
 - ▶ exploitation, surveillance
- ▶ **10^3 - 10^4 ans**
 - ▶ **retour à l'équilibre** de la roche suite aux perturbations THMCR
 - ▶ **dégradation** des barrières d'origine humaine
- ▶ **10^6 ans**
 - ▶ **lente migration des RN** à travers la géosphère vers les exutoires
 - ▶ transferts possibles dans la **biosphère**, impact estimé ≤ 0.25 mSv/an

Le laboratoire souterrain de Meuse Haute Marne (ANDRA)

- ▶ Créé en 2000 à Bure, autorisation d'exploitation jusqu'en 2030
- ▶ 320 personnes y travaillent
- ▶ 3300 capteurs, 30 km de carottes
- ▶ 890 galeries
- ▶ Visites possibles



La recherche amont

- ▶ Le CNRS contribue à la **structuration de la recherche amont** sur la gestion des déchets radioactifs
 - ▶ programme interdisciplinaire **PACEN (→ 2011) puis Grand Défi NEEDS** (nucléaire, énergie, environnement, déchets, société)
 - ▶ partenariat avec les acteurs industriels
- ▶ Exemples de **thématiques scientifiques** en lien avec le stockage
 - ▶ caractérisations de la roche hôte (de l'échantillon au massif géologique), couplages THMCR
 - ▶ transferts des RN dans le sous-sol, vers les écosystèmes et la biosphère
 - ▶ physico-chimie des radio-éléments aux interfaces et en solution
 - ▶ matériaux innovants en conditions extrêmes
 - ▶ temporalité, liens entre générations

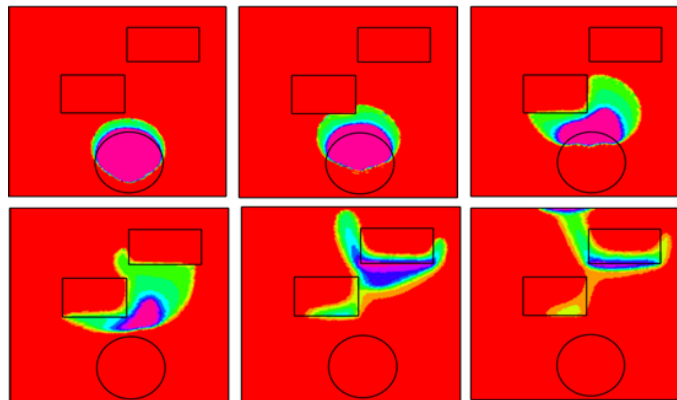
Les mathappli I

- ▶ Groupement de Recherches **MoMaS**
 - ▶ modélisations mathématiques et simulations numériques pour la gestion des déchets radioactifs
 - ▶ membre du programme interdisciplinaire PACEN
 - ▶ dir. A. Bourgeat (02-05), A. Ern (06-11), T. Lelièvre (12-)
 - ▶ www.gdrmommas.org
- ▶ **Exemples de travaux** (présentés ci-après)
 - ▶ modélisation aux très petites échelles
 - ▶ estimation d'erreur a posteriori
 - ▶ incertitudes (propagation et quantification)

Les mathappli II

▶ Autres exemples importants

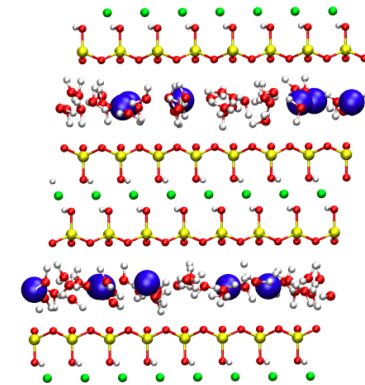
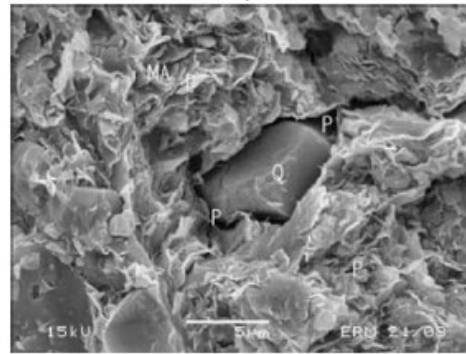
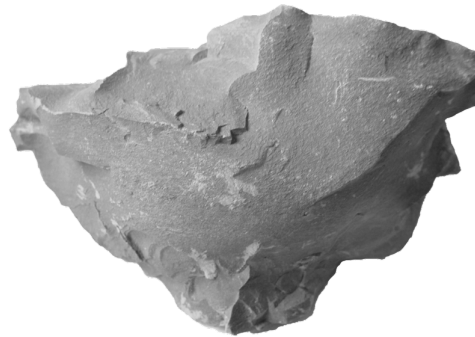
- ▶ écoulements multiphasiques (FP7 Euratom/FORGE)
- ▶ écoulements réactifs, couplages multi-physiques
- ▶ modèles d'endommagement
- ▶ schémas numériques innovants (volumes finis, Galerkin discontinu...)
- ▶ décomposition de domaine, préconditionneurs, HPC...



simulation de la remontée d'une bulle de gaz (M. Panfilov, Nancy)

Modélisation aux très petites échelles I

- ▶ L'argilite à différentes échelles (10^{-2} , 10^{-6} , 10^{-10} m)



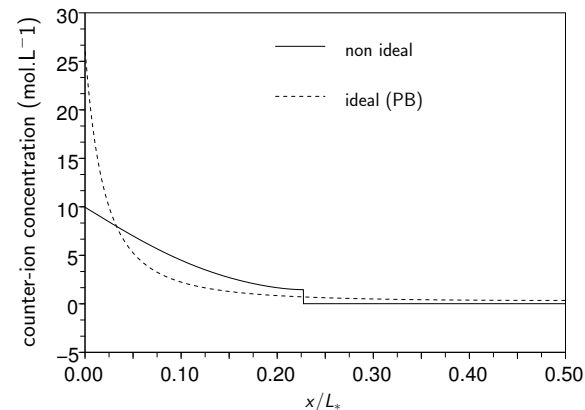
- ▶ Échelle **mésoscopique**
 - ▶ mise en évidence de **micro-structures** (micro-tomographe rayons X)
[Delage et al., '06]
- ▶ Échelle **microscopique**
 - ▶ l'argilite est constituée de feuillets chargés négativement
 - ▶ entre ces feuillets, $\sim 10^2$ molécules d'eau et des ions
[Laboratoire PECSA, vert Al, jaune Si, rouge O, blanc H et bleu Na]

Modélisation aux très petites échelles II

- ▶ Simulations par **dynamique moléculaire**
 - ▶ potentiels d'interaction (inter-moléculaires et avec la paroi)
 - ▶ exemple d'application : **calcul de coefficients de transport**
 - ▶ développements méthodologiques ; exemple : rejet d'incrémentes conduisant à une énergie trop importante (cf. **projet SMARTMC**)
- ▶ Modèles de **milieux continus**
 - ▶ équation de Poisson pour le potentiel électrostatique + bilan de masse pour les ions en solution + écoulement (Stokes)
 - ▶ modèles **à l'équilibre** basés sur la minimisation d'une fonctionnelle d'énergie libre (Poisson–Boltzmann dans le cas idéal)

Modélisation aux très petites échelles III

- ▶ **Exemple de résultat** [thèse R. Joubaud (CERMICS, PECSA, ANDRA)]
 - ▶ **écarts à l'idéalité** en situation de fort confinement
 - ▶ **écranage** des charges surfaciques, séparation en 2 phases



- ▶ Un **défi scientifique majeur** : le changement d'échelle du **feuille** **vers le polycristal** (du nm au μm)
- ▶ **Méthodes multi-échelles**
 - ▶ algorithmes efficaces (échelles de temps / échelles d'espace)
 - ▶ couplage DM / MMC
 - ▶ homogénéisation stochastique (modélisation aléatoire du VER, Pore Network Model, cf. **projet HOMOGPOR**)

Estimation d'erreur a posteriori I

► Cadre général

- solution exacte u (inconnue!)
- solution approchée u_δ (connue!)
- mesure d'erreur $J_u(u_\delta)$ (distance entre u et u_δ)
- estimateur d'erreur $\eta(u_\delta)$ facilement calculable à partir de u_δ (et des données du problème)

► Principales propriétés

- borne supérieure garantie (→ certification du calcul!)

$$J_u(u_\delta) \leq \eta(u_\delta)$$

- efficacité et robustesse

$$\eta(u_\delta) \leq C J_u(u_\delta)$$

où C est indépendante des paramètres du modèle (non-linéarités, temps de simulation, Péclet, ...) et de discrétisation

- indice d'efficacité $\eta(u_\delta)/J_u(u_\delta)$ proche de 1



Estimation d'erreur a posteriori II

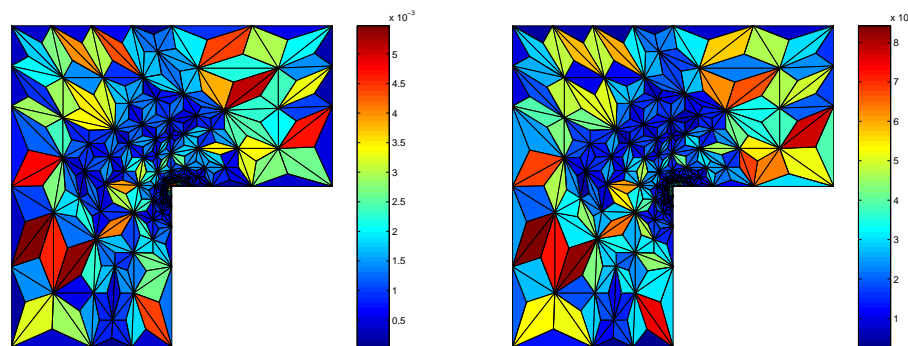
- ▶ Exemple : écoulement de Darcy en milieu poreux

$$-\nabla \cdot (\mathbf{S} \nabla u) = f \quad \text{dans } \Omega$$

- ▶ solution approchée u_δ obtenue par la méthode des EF
- ▶ mesure de l'erreur en **norme d'énergie** $\|\mathbf{S}^{1/2} \nabla (u - u_\delta)\|_{L^2}$
- ▶ Approche par flux équilibrés
 - ▶ flux exact $\phi := -\mathbf{S} \nabla u$, $\phi \in H(\text{div}; \Omega)$ t.q. $\nabla \cdot \phi = f$
 - ▶ grâce à la conservativité des EF, il est possible de **construire localement** $\hat{\phi}_\delta \in H(\text{div}; \Omega)$ t.q. $\nabla \cdot \hat{\phi}_\delta = f_\delta$
[Prager & Synge '47; Ladevèze '75; Braess & Schoeberl '08; ...]
 - ▶ l'estimateur d'erreur est $\eta(u_\delta) = \|\mathbf{S}^{-1/2} (\hat{\phi}_\delta + \mathbf{S} \nabla u_\delta)\|_{L^2}$
- ▶ Avantages de l'approche par flux équilibrés
 - ▶ borne supérieure **garantie** (contrairement à l'approche classique)
 - ▶ traitement **unifié** pour une large classe de schémas numériques (EF, VF, DG...) [AE & Vohralik '10]

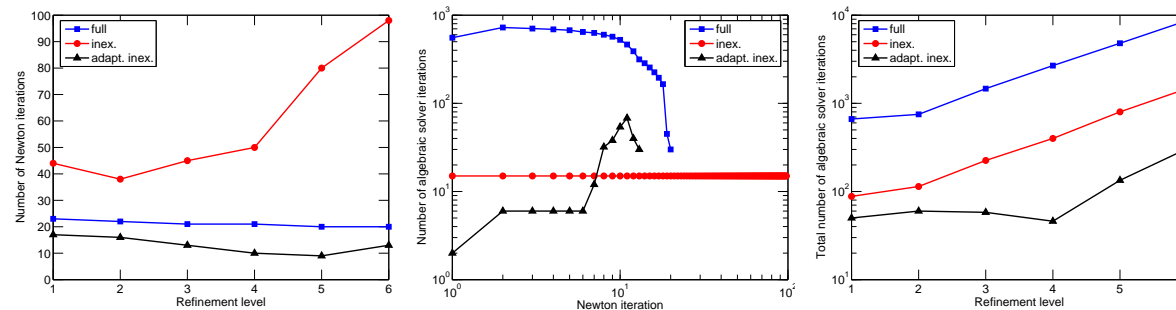
Estimation d'erreur a posteriori III

- ▶ L'estimation d'erreur a posteriori : un outil pour **optimiser les calculs**
- ▶ **Exemple : maillages adaptatifs**
 - ▶ une théorie bien consolidée pour les EDP elliptiques : convergence et optimalité [Cascon, Kreuzer, Nochetto & Siebert '08]
 - ▶ problème plus ouvert pour les EDP évolutives, non-linéaires
 - ▶ exemple : erreur estimée et réelle sur un problème non-linéaire avec une singularité de coin [AE & Vohralik '13]



Estimation d'erreur a posteriori IV

- ▶ Une autre application importante : **équilibrer les différentes composantes de l'erreur**
 - ▶ EDP non-linéaire $A(u) = f$ (dans un espace fonctionnel)
 - ▶ discrétisation ... système non-linéaire $A(U) = F$ (dans \mathbb{R}^N)
 - ▶ linéarisation (e.g., méthode de Newton) ... $\Delta^k U^k = F^k$, $k = 1, 2, \dots$
 - ▶ algèbre linéaire (e.g., GMRes) ... $\Delta^k U^{k,i} = F^k - R^{k,i}$, $i = 1, 2, \dots$
- ▶ Il est possible d'estimer séparément (par des bornes garanties) les erreurs de discrétisation, de linéarisation et d'algèbre linéaire
 - ▶ **méthode de Newton inexacte adaptative**
 - ▶ exemple de gains computationnels [AE & Vohralik '13]

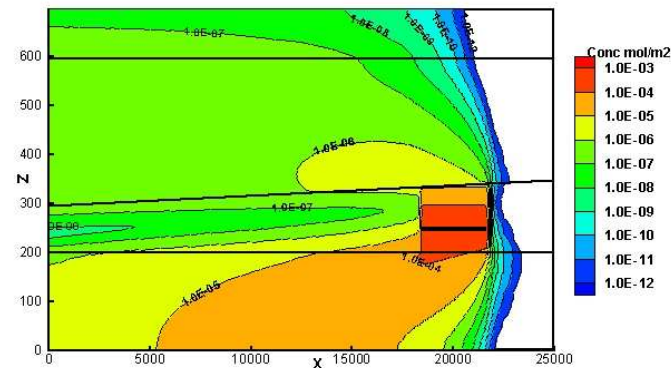


Incertitudes I

- ▶ **Ingrédients d'une simulation**
 - ▶ sélection d'un **modèle** représentant les processus physiques
 - ▶ sélection d'une **méthode numérique** (discrétisation et solveur) pour approcher la solution du modèle
 - ▶ sélection d'un jeu de **données** : conditions initiales et aux limites, paramètres phénoménologiques, termes sources
- ▶ **Incertitudes sur les données**
 - ▶ quel impact sur la solution (ou une observable) ?
 - ▶ comment quantifier cet impact ?
 - ▶ comment le réduire ?

Incertitudes II

- ▶ **Exemple : transport à partir d'un site de stockage (idéalisé)**
 - ▶ écoulement d'eau (pas de gaz) : modèle de Darcy
 - ▶ transport des RN par **diffusion**-convection-réaction
- ▶ **12 paramètres** : 4 conductivités hydrauliques pour le modèle de Darcy et 8 coefficients de diffusion pour les RN
- ▶ Concentration de ^{129}I à $5 \cdot 10^5$ ans [A. Bourgeat et al., Comput. Geosci, 2006]



- ▶ On se concentre sur une **observable Φ** : le flux de RN à un exutoire à un temps donné
- ▶ **1 choix des 12 paramètres \rightarrow 1 simulation \rightarrow 1 résultat pour Φ**

Incertitudes III

▶ Approche paramétrique

- ▶ on décrit les 12 paramètres par des VA $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_N)$
- ▶ on suppose ces VA **indépendantes et de loi connue**
- ▶ on cherche à approcher la dépendance fonctionnelle de Φ en ξ
- ▶ améliorations : prise en compte d'observations, minimisation de l'information introduite...

▶ Méthodes spectrales stochastiques

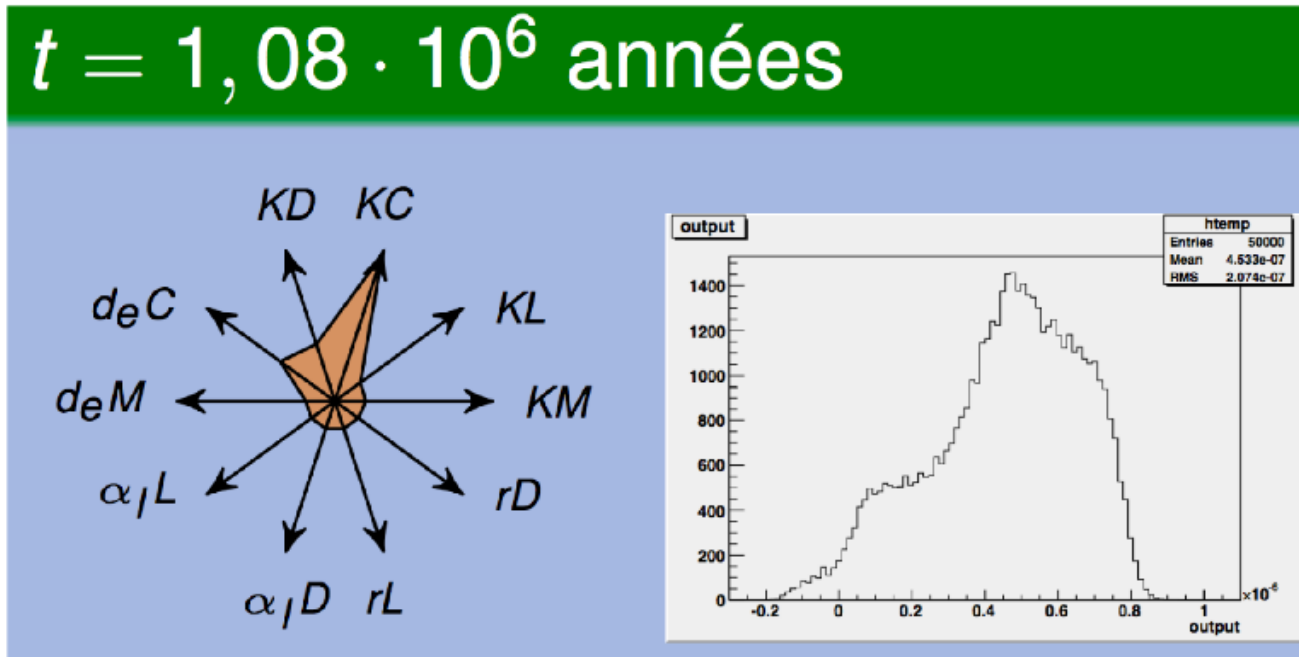
- ▶ choix a priori d'un espace de dimension finie engendré par une base $\{\Psi_\alpha(\xi)\}_{1 \leq \alpha \leq P}$, e.g., **polynômes de chaos** associés à la pdf de ξ
- ▶ recherche des **modes stochastiques** $(\Phi_\alpha)_{1 \leq \alpha \leq P}$ de Φ tels que

$$\Phi(\xi) \approx \sum_{\alpha=1}^P \Phi_\alpha \Psi_\alpha(\xi)$$

- ▶ cette représentation permet d'estimer les moments de Φ , sa pdf, des indices de sensibilité (ANOVA), ...
- ▶ viable pour N **pas trop grand**

Incertitudes IV

- ▶ **Exemple de résultat** [thèse T. Crestaux, Paris 13 et CEA/DEN]
 - ▶ approche non-intrusive (**utilisation répétée du code déterministe**)
 - ▶ paramètres les plus influents sur la variabilité de l'observable
 - ▶ pdf de l'observable



Conclusion générale

- ▶ Des **enjeux importants** (technologiques, économiques, sociétaux)
- ▶ La France compte parmi les **leaders** de la R & D sur le sujet
- ▶ De nombreux **problèmes ouverts**, en particulier
 - ▶ en modélisation mathématique et numérique
 - ▶ à l'interface d'autres disciplines (mécanique, chimie, matériaux, géologie, SHS...)
- ▶ **Apports possibles** des mathappli
 - ▶ consolider les bases mathématiques des **modèles multi-physiques**
 - ▶ simuler la matière à de **très petites échelles** et développer des modèles **homogénéisés** à plus grande échelle
 - ▶ concevoir des méthodes numériques **robustes** (échelles de temps et d'espace, paramètres...)
 - ▶ améliorer les **performances** du calcul intensif
 - ▶ explorer les **incertitudes**, les quantifier et aider à les réduire