



HAL
open science

Equivalence en Etanchéité Minérale : Caractérisation et Prévision

Dominique Guyonnet

► **To cite this version:**

Dominique Guyonnet. Equivalence en Etanchéité Minérale : Caractérisation et Prévision. Sciences de l'ingénieur [physics]. INSA de Lyon, 2003. tel-00578923

HAL Id: tel-00578923

<https://theses.hal.science/tel-00578923>

Submitted on 25 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

présentée devant

l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon
et l'Université Claude Bernard LYON I

Equivalence en Etanchéité Minérale : Caractérisation et Prévision

SPÉCIALITÉ : Sciences et Technique du Déchet

par

GUYONNET Dominique

Soutenue le 26 Septembre 2003 devant la Commission d'examen

Noms Prénom, Fonction, Etablissement

DUBOIS Didier, Directeur de Recherches CNRS, IRIT, Université Paul Sabatier de Toulouse	
MOSZKOWICZ Pierre, Professeur, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon	Président
PERRODIN Yves, Professeur, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat	Rapporteur
PERROCHET Pierre, Professeur, Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel	Rapporteur
PONS Charles-Henri, Maître de Conférences, Institut des Sciences de la Terre d'Orléans	
PUAUX Jean-Pierre, Directeur de l'Institut des Sciences et Techniques de l'Ingénieur de Lyon	
SARDIN Michel, Professeur, Institut National Polytechnique de Lorraine	Rapporteur

Ecole Doctorale de Chimie, Génie des Procédés, Environnement de Lyon

Préambule

Le présent résumé d'ouvrages et de travaux correspond au cas particulier *des candidats provenant de centres de recherche ou de l'industrie* prévu dans les recommandations pour les critères relatifs à l'HDR.

En effet, je suis actuellement employé par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), établissement public (EPIC). Auparavant j'ai travaillé pour ANTEA (Groupe BRGM), société d'ingénierie spécialisée dans le domaine du sol, de l'eau et de l'environnement, et avant cela chez COLENCO (Suisse) au sein d'une équipe spécialisée dans la caractérisation des sites de stockage des déchets (surtout radioactifs).

Mon travail en Suisse, au sein d'une équipe scientifique et internationale, m'a permis d'avoir une activité de recherche dès mon entrée dans la vie active. J'ai toujours cherché à privilégier le caractère *créatif* de mon travail et à le valoriser au travers de publications dans des journaux scientifiques à comité de lecture ou dans des congrès scientifiques (chapitre 7).

Au BRGM depuis 1998, je suis responsable de l'unité Sitologie et Stockage, qui fait partie du Service Environnement et Procédés. Je suis en charge d'une équipe composée d'une dizaine d'ingénieurs-chercheurs et de projets de recherche touchant plus particulièrement à :

- la caractérisation des barrières minérales pour le confinement des déchets,
- le comportement des déchets à la lixiviation,
- le transfert des polluants dans les eaux souterraines,
- la prise en compte des incertitudes dans l'évaluation des risques environnementaux.

Je réalise ces projets en collaboration avec d'autres organismes scientifiques (Cemagref, CNRS, INERIS, INSA-Lyon, InVS, Universités, ...), avec le soutien notamment de l'ADEME et du Ministère chargé de l'Environnement. Je souhaite soutenir l'HDR afin de promouvoir ces collaborations scientifiques et faciliter l'encadrement de chercheurs.

Sommaire

1.	Curriculum Vitae abrégé	5
2.	Synthèse biographique	9
3.	Synthèse des activités de recherche	11
3.1.	Axes de recherche	11
3.1.1.	Introduction	11
3.1.2.	Résolution des équations de bilan de masse.....	11
3.1.3.	Caractérisation des barrières minérales pour le confinement des déchets	12
3.1.4.	Comportement des déchets à la lixiviation	14
3.1.5.	Incertitudes en évaluation des risques	14
3.2.	Conception et/ou coordination de programmes de recherche.....	15
3.3.	Participation à des programmes de recherche nationaux	15
3.4.	Participation à l'encadrement d'étudiants.....	16
3.5.	Participation à des jurys de thèse ou de sélection de chercheurs.....	17
4.	Résumé du travail de thèse	19
4.1.	Contexte du travail effectué.....	19
4.2.	Description succincte des développements sous forme d'abaques.....	19
4.3.	Incertitudes relatives aux paramètres d'entrée	21
4.4.	Conclusions et suites.....	23
5.	Illustration de la démarche scientifique	25
5.1.	Introduction	25
5.2.	Caractérisation des matériaux de faible perméabilité	26
5.2.1.	Introduction	26
5.2.2.	Caractérisation in situ de la perméabilité de matériaux argileux	26
5.2.3.	Interactions entre matériaux argileux et lixiviats	31
5.3.	Prévision de la migration des polluants.....	41
5.3.1.	Estimation des transferts	41
5.3.2.	Prise en compte de l'incertitude dans les prévisions.....	50
6.	Activités en enseignement	59
7.	Liste des publications	63

ANNEXES

- I. Procès verbal d'équivalence de thèse de Doctorat
- II. Lettre d'appréciation des qualités d'enseignant

- III. Présentation de l'Unité Sédimentologie et Stockage du Service Environnement et Procédés du BRGM.
- IV. Présentation de l'année spéciale IGE de l'Université d'Orléans.
- V. Copies de deux articles récents

1. Curriculum Vitae abrégé

Dominique GUYONNET, 41 ans

*Responsable de l'Unité Sitologie et Stockage
Service Environnement et Procédés
Bureau de Recherches Géologiques et Minières
3, avenue C. Guillemin
BP 6009, 45060 Orléans cédex 2.*

Tél : 02 38 64 38 17, Fax : 02 38 64 30 62

Mail : d.guyonnet@brgm.fr

FORMATION ET TITRES UNIVERSITAIRES

1995-1998 Thèse de 3^{ème} cycle (option hydrogéologie), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse).

Mémoire : *Approche mathématique de l'impact des sites contaminés sur les eaux souterraines dans un contexte d'évaluation des risques.*

Directeur de Recherche : Prof. Aurèle Parriaux.

1987-1989 Master of Science in Earth Sciences (hydrogéologie), Université de Waterloo, Ontario, Canada.

Mémoire : *Transferts de polluants depuis les eaux souterraines vers les eaux de surface (exemple de Perch Lake, Chalk River, Ontario).*

Directeur de Recherche : Prof. John Cherry.

1985-1987 Diplôme d'ingénieur-géologue, Université de Genève, Suisse.

Mémoire : *Analyse sédimentaire et structurale de formations mésozoïques dans la région du Grand Crédo, Ain, France (carte géologique au 1/10 000).*

Directeur de Recherche : Prof. Jean Charollais.

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE

1999- Responsable de l'Unité Sitologie et Stockage (SIS) du BRGM. Chef de projets de recherche. Activité essentiellement orientée vers la recherche appliquée en matière de prévention et de prévision de l'impact des sources de pollution.

- Montage, gestion et réalisation de projets de recherche, dont le projet ISIS (prévention de l'Impact des Sites de Stockage), en collaboration avec d'autres organismes de recherche (Cemagref, CNRS, INRA, INSA, Universités, ...),
- Appui scientifique au Ministère chargé de l'Environnement (MEDD), pour l'élaboration de guides et de réglementations françaises ou européennes,
- Animation et gestion de l'unité SIS (12 ingénieurs-chercheurs),

1998 - 1999 Ingénieur-chercheur au Laboratoire Géochimie et Hydrogéologie du BRGM

Chargé de la réalisation de projets de recherche et de tierce-expertise liés à la gestion des déchets ou des sites pollués. Exemples de projets :

- En charge de la coordination "horizontale" du programme de l'ADEME sur les couvertures des sites de stockage de déchets ménagers et assimilés. Client : ADEME.
- Expertises pour divers projets liés aux sites de stockage de déchets ménagers. Clients : DRIRE.

1994 - 1998 Ingénieur hydrogéologue à ANTEA (Groupe BRGM)

En charge de projets liés à l'eau, l'environnement et les déchets. Exemples de projets :

- Chef du projet pour les Agences de l'Eau sur la quantification des flux polluants générés par les sites de stockage de déchets ménagers et assimilés en France. Client : Agence de l'Eau Seine-Normandie.
- Participation au projet SITINERT. Evaluation des risques pour les eaux souterraines générés par un site de stockage de déchets ultimes et stabilisés. Client : France Déchets.
- En charge de l'étude de l'impact de 3 sites de stockage de matériaux inertes. Client : Association pour la Recherche du Traitement du Déchet.

1989 - 1994 Ingénieur hydrogéologue pour la société COLENCO (Baden, Suisse)

Ingénieur hydrogéologue de projet, responsable en particulier de la planification, la mise en oeuvre et l'interprétation de tests in-situ destinés à évaluer la sûreté des sites potentiels de stockage de déchets radioactifs et chimiques. Exemples de projets :

- Etude d'impact pour la décharge de résidus de procédés thermiques de Pfungen (Canton de Zürich, Suisse). Client : Amt. für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich (Autorité cantonale pour la protection des eaux).

- Réalisation et interprétation des diagraphies de fluides effectuées dans les forages du Wellenberg, pour caractériser la roche hôte pour le stockage de déchets radioactifs. Client : CEDRA.

TRAVAUX DE RECHERCHE POST-DOCTORAUX

Responsable, au sein du BRGM, de projets de recherche relatifs aux thématiques suivantes :

- Caractérisation hydraulique des milieux peu perméables (argiles).
- Détection d'hétérogénéités dans les barrières minérales.
- Etude des interactions entre les matériaux argileux et les lixiviats de décharge.
- Compréhension du comportement des déchets à la lixiviation.
- Optimisation de la production de biogaz par des déchets à fraction fermentescible.
- Couplages entre mécanismes de transfert de polluants et processus physico-chimiques.
- Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition chronique aux polluants du sol.

EXPERIENCE PROFESSIONNELLE EN ENSEIGNEMENT

1997 - 2000 **Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux (ESEM), Orléans (France)**

Pendant 3 ans, Professeur Associé à mi-temps dans le cadre de l'année post-grade "Ingénieur Génie de l'Environnement". Enseignements (104 heures par an) relatifs à l'hydrogéologie, la géochimie des eaux, la migration des polluants, le stockage des déchets, la géologie des matériaux. Encadrement des étudiants, suivi et évaluation des projets, aide à la recherche de stages.

1999-2002 **Ecole Centrale, Nantes et Lyon (France)**

Cours de trois heures sur la caractérisation des barrières minérales utilisées pour le confinement des sites de stockage de déchets.

2002 **Ecole Nationale de la Santé Publique (Rennes, France)**

Cours de trois heures sur la modélisation hydrogéologique et hydrologique.

1995 - 1997 **Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)**

Chargé de cours dans le cadre du cycle post-grade "Géologie appliquée à l'ingénierie et à l'environnement". Cours de seize heures sur la migration des polluants dans le sous-sol.

2002 **Stage EFE (Edition Formation Entreprise), Paris**

Cours sur les bilans hydriques de décharges, dans le cadre d'une formation intitulée « Décharges et Stockages. Quels enjeux juridiques et techniques ? ».

1995 - 2002 **Groupe BRGM, Orléans (France)**

Animateur de plusieurs stages :

- présentation générale de l'Evaluation Détaillée des Risques,
- calcul des bilans hydriques de décharge à l'aide du logiciel MOBYDEC,
- mesure in situ des faibles perméabilités,
- réhabilitation des anciens sites de stockage de déchets ménagers,
- confinement des sites de stockage de déchets.

ASSOCIATIONS, SOCIETES SAVANTES

- ✧ Membre du Conseil Scientifique de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale (AFSSE).
- ✧ Membre de l'Association Internationale des Hydrogéologues depuis 1994.
- ✧ Correcteur (reviewer) pour : *Journal of Contaminant Hydrology et Water Research*

2. Synthèse biographique

Suite à un Baccalauréat scientifique (série C) obtenu en 1980 au Lycée International de Ferney-Voltaire (01), j'ai préparé une Licence en Sciences de la Terre à l'Université de Genève. Après un service militaire effectué en Alsace, j'obtiens dans cette même université un diplôme d'Ingénieur Géologue, option « formations sédimentaires ». Mon travail de recherche porte sur la cartographie et l'analyse sédimentaire et structurale des formations mésozoïques de la montagne du Crédo (Jura septentrional). Ma carte géologique a été intégrée à la feuille « St-Julien en Genevois » de la carte géologique de la France au 1/50 000^{ème}.

J'ai complété cette formation par un Master of Science en hydrogéologie à l'Université de Waterloo (Ontario, Canada). J'y acquiers des compétences dans les domaines de la modélisation des écoulements hydrodynamiques et des transferts de polluants, de la géochimie des eaux et du diagnostic des sites et sols pollués. Mon travail de recherche porte sur l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface. Je passe plusieurs étés dans les eaux de Perch Lake, près de la ville de Chalk River (Ontario), à mesurer les flux à l'interface eau-sédiment et à collecter des fluides pour analyse chimique. Les profils de concentration mesurés dans les sédiments superficiels sont interprétés en terme de flux advectifs et diffusifs à l'aide de modèles numériques.

De retour en Europe, j'intègre la société COLENCO, à Baden en Suisse alémanique. J'y suis responsable de la planification, la réalisation et l'interprétation d'essais hydrauliques destinés à évaluer la sûreté de roches hôte pour le stockage de déchets radioactifs. L'environnement scientifique et international que j'y trouve me permet de réaliser un travail créatif qui est valorisé par plusieurs publications à comité de lecture et communications à congrès (voir le chapitre 7).

En 1994 je rejoins la société ANTEA (Groupe BRGM) où je suis chargé de projets liés à l'environnement (eaux et déchets). Je décide en 1995 de préparer une thèse de Doctorat à l'Ecole Polytechnique de Lausanne, axée principalement sur le développement de solutions analytiques au problème du transfert de polluants dans les eaux souterraines, et sur le traitement de l'incertitude en évaluation des risques. Cette thèse est soutenue en 1998.

Depuis 1998, je travaille au BRGM, où je suis actuellement responsable de l'unité Sitologie et Stockage, et chargé de nombreux projets de recherche, en partenariat avec d'autres organismes scientifiques (Cemagref, CNRS, INERIS, INRA, INSA, Universités, ...), portant principalement sur la caractérisation des barrières argileuses, l'émission de polluants par les déchets et leur transfert dans le sous-sol..

3. Synthèse des activités de recherche

3.1. AXES DE RECHERCHE

3.1.1. Introduction

Comme il a été mentionné dans la synthèse biographique, ma première formation universitaire est une formation de géologue, donc plutôt *naturaliste* et basée sur l'observation. Si par la suite j'ai complété mon cursus par une formation plus orientée vers l'ingénierie et la *quantification* de phénomènes naturels, j'ai gardé de cette première formation une sensibilité particulière à deux aspects qui influencent fortement ma démarche en matière de recherche :

- l'importance de l'hétérogénéité du sous-sol,
- l'importance du facteur temps.

Bien qu'ayant débuté ma carrière professionnelle en bureau d'étude, j'ai toujours privilégié le côté créatif de mon travail, et cherché à en valoriser les résultats par des communications scientifiques. Ce contexte particulier contribue à expliquer le caractère plutôt *appliqué* des travaux de recherche que j'ai réalisés.

Le thème fédérateur de mes travaux de recherche passés et en cours est : **la prévention et la prévision de l'impact de sources de pollution sur le sous-sol**. Ce thème général a été décliné suivant plusieurs axes de recherche qui sont détaillés plus bas:

- a) Résolution des équations de bilan de masse décrivant la migration des polluants dans l'eau souterraine,
- b) Caractérisation des barrières minérales pour le confinement des déchets,
- c) Comportement des déchets à la lixiviation,
- d) Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition aux polluants du sol.

3.1.2. Résolution des équations de bilan de masse

Les cours du Professeur Edward Sudicky, à l'Université de Waterloo (Canada), m'ont donné un goût particulier pour la dérivation de solutions analytiques pour résoudre les équations de bilan de masse. Si les solutions numériques permettent de s'adapter à des géométries complexes (discontinuités, conditions aux limites, etc.), les solutions analytiques constituent une aide précieuse pour mieux comprendre le comportement d'un système, notamment en illustrant l'importance relative de tel ou tel mécanisme. La résolution de ces équations est à l'origine de la plupart des publications que j'ai réalisées durant la période de 1992 à 1997, et constitue un des principaux volets de ma thèse de Doctorat soutenue en 1998. Cette thèse

rassemble et développe des solutions analytiques pour la migration en une, deux et trois dimensions, de substances dissoutes soumises aux mécanismes de l'advection, la diffusion-dispersion, l'interaction solide-liquide et la dégradation de premier ordre. Ces travaux ont donné lieu à 3 publications de rang A (références 6, 9, 12 au chapitre 7), une publication dans une revue à comité de lecture (réf. 19) et une communication à congrès international (réf. 36). Cette thèse a également exploré les applications de la théorie des possibilités aux risques environnementaux, travaux que j'ai pu poursuivre par la suite (voir 3.1.5).

Un projet qui est situé à mi-chemin entre la recherche et le travail de service public, a consisté à reprendre certains résultats de ma thèse pour développer un outil informatique de calcul de l'impact sur les eaux souterraines d'une source de pollution située au dessus de la nappe. Cet outil, appelé MISP, s'affranchit de l'hypothèse simplificatrice d'un mélange parfait entre le flux massique provenant de la source et l'eau souterraine dans une « couche de mélange ». Il associe, par convolution, une solution pour la migration verticale à travers la zone non saturée, avec une solution pour la migration tridimensionnelle à partir d'une source plane située à la surface de la nappe. MISP (fichier exécutable, fichiers entrée, et manuel d'utilisation) peut être téléchargé gratuitement sur le site (voir aussi le chapitre 5) :

<http://www.misp.fr>.

3.1.3. Caractérisation des barrières minérales pour le confinement des déchets

Mesures de faibles perméabilités

J'ai commencé à aborder ce thème de recherche lorsque je travaillais pour COLENCO en Suisse. La caractérisation hydraulique des milieux faiblement perméables, à l'aide d'essais en forage, nécessite un savoir-faire très spécialisé et donne lieu à de nombreuses innovations tant sur le plan de la réalisation des essais que sur celui de leur interprétation. Le besoin d'une analyse fine des essais de type « slug », « pulse » (à charge variable) et à charge constante, a donné lieu à des développements que j'ai publiés dans deux publications de rang A (réfs. 14, 15).

En Suisse j'ai beaucoup travaillé sur une méthode novatrice de caractérisation des écoulements de fracture : la méthode dite de diagraphie de fluides, qui permet d'estimer les transmissivités de fractures discrètes intersectées par un forage. Mes travaux ont donné lieu à un ouvrage de synthèse (réf. 53) et deux communications à congrès internationaux (réfs. 38, 39).

En 1999, j'ai initié des travaux de recherche sur la mesure des faibles perméabilités dans le cadre du projet de recherche ISIS (Prévention de l'Impact des Sites de Stockage) financé par la Direction de la Recherche du BRGM. Dans un premier temps j'ai développé une équation permettant d'interpréter les essais d'infiltromètre en surface, en régime d'écoulement transitoire, qui tient compte des trois composantes du gradient hydraulique (pression hydrostatique, composante gravitaire, succion au front d'infiltration). Le développement mathématique de cette équation et son application à des données mesurées ont donné lieu à

une publication de rang A (réf. 7). L'équation a ensuite été utilisée pour dimensionner un appareillage de mesure de la perméabilité en surface, de type anneau simple fermé, basé sur le principe d'une réduction de section entre la base de l'infiltromètre et le tube dans lequel fluctue le niveau d'eau. Cet appareillage, appelé PERSAN[®] (**P**erméamètre à **R**éduction de **S**ection et **A**cquisition **N**umérique) est sensible à de très faibles valeurs d'infiltration. Il est particulièrement adapté à une gamme de perméabilité située entre 10^{-10} et 10^{-7} m/s, et donc à la caractérisation hydraulique des barrières argileuses en étanchéité de site de stockage. Il a été présenté au salon POLLUTEC en 2001 (voir aussi en Annexe V).

Détection d'hétérogénéité dans les barrières minérales

Ma confrontation à l'hétérogénéité du milieu géologique date de la carte géologique au 1/10 000^{ème} de la montagne du Grand Crédo (Jura septentrional) que j'ai réalisée dans le cadre de mon diplôme « d'ingénieur géologue » à l'université de Genève. Cette cartographie a permis de montrer qu'au lieu d'être constituée d'un seul anticlinal plissé et faillé, comme le suggéraient les auteurs précédents, cette montagne était en fait formée de deux anticlinaux dont l'un chevauchait l'autre sur plusieurs centaines de mètres le long d'une faille majeure. Ce travail a fait l'objet d'une publication dans une revue à comité de lecture (réf. 22).

Je me suis également intéressé à l'hétérogénéité dans le cadre de mon travail de recherche pour le « Master of Science » en hydrogéologie à l'Université de Waterloo (Canada). Les mesures de variations spatiales des flux ascendants d'eau souterraine à travers le fond du Lac Perch (Nord de l'Ontario) ont donné lieu à des simulations, par modèle numérique, de l'influence d'hétérogénéités de petite échelle sur l'interaction entre eaux souterraines et eaux de surface. Ce travail est synthétisé dans une publication de rang A (réf. 16).

L'obligation réglementaire qu'ont les exploitants de sites de stockage de déchets de vérifier la perméabilité des barrières minérales situées en fond et en couverture des casiers de stockage, m'a amené à m'interroger sur le problème de l'implantation des essais de perméabilité. En 1999 j'ai inclus, dans le projet ISIS du BRGM, un module sur la détection indirecte d'hétérogénéités, par géophysique. Les travaux réalisés sont décrits dans une publication de rang A (réf. 3 présenté en Annexe V). Le projet ISIS-2002 a repris ces travaux avec l'installation d'une planche d'essai expérimentale sur la plateforme expérimentale du BRGM. Ce travail a donné lieu à une collaboration avec l'INSA-Lyon (équipe de Gérard Didier) et à un travail de stage de fin d'études réalisé par un stagiaire de l'ENTPE.

Interaction entre matériaux argileux et lixiviats

Les interrogations des pouvoirs publics et des organismes de contrôle par rapport à l'application de la notion « d'équivalence » entre barrières d'étanchéité minérale, et la tendance actuelle qui voit une utilisation accrue de certains matériaux de remplacement des matériaux argileux naturels, m'ont amené à initier des recherches sur l'évolution dans le temps de matériaux argileux alternatifs (les géosynthétiques bentonitiques ; GSB) en contact prolongé avec des lixiviats de décharge. J'ai monté le projet LIXAR (Interactions **L**ixiviats-

Argiles), cofinancé par l'ADEME et le BRGM, et réalisé en collaboration avec le Cemagref, l'INSA-Lyon, le CRMD et l'ISTO (unités mixtes CNRS-Université d'Orléans). Le projet LIXAR, actuellement en cours (voir chapitre V), consiste à examiner les modifications structurales, texturales, chimiques et mécaniques subies par des géosynthétiques bentonitiques en contact prolongé (4 mois à 1,5 ans) avec des lixiviats, pour différentes conditions expérimentales (présaturation ou non, pression de confinement...). Les résultats récents ont déjà fait l'objet d'une publication de rang A ([2]) et de deux communications à congrès internationaux (réfs. 23, 25).

Mes travaux sur l'équivalence en étanchéité m'ont amené à coordonner la rédaction d'un guide de recommandations pour l'évaluation de l'équivalence en barrière passive de centre de stockage. Ce guide, réalisé pour le MEDD avec la participation de l'ADEME, du Cemagref, du CETE-Lyon, de l'INERIS, de l'INSA-Lyon, est disponible depuis juillet 2002 auprès du MEDD.

3.1.4. Comportement des déchets à la lixiviation

Je suis en charge du module PROMESS (**P**ollution **R**ésiduelle des **O**rdures **M**énagères en **S**cénario de **S**tockage) du projet ISIS du BRGM, qui a pour objectif d'étudier les émissions à long terme des sites de stockage de déchets ménagers, après la phase dite « réacteur ». Il s'agit d'abord de réaliser une dégradation anaérobie accélérée de déchets ménagers (dans des réacteurs en laboratoire) pour ensuite caractériser la lixiviation du résidu après maturation (par des essais en colonne de percolation ascendante). Les résultats de ce projet sont présentés à un congrès international (réf. 24).

Je travaille actuellement sur la mobilisation de polluants à partir de déchets en scénario de stockage ou de réutilisation, au travers du projet LIMULE (**L**ixiviation **M**ulti-**E**chelles), que j'ai monté en collaboration avec l'INSA-Lyon (POLDEN et LAEPSI) et qui bénéficie du soutien financier de l'ADEME. Il s'agit d'une thématique que je souhaite développer dans l'avenir, car une des principales sources d'incertitude en matière de prévision de l'impact des déchets est liée au comportement du terme source (au sens : évolution au cours du temps des flux massiques émis par les déchets).

3.1.5. Incertitudes en évaluation des risques

J'ai monté et réalisé un projet de recherche sur trois ans (achevé en juin 2002) dans le cadre du programme de recherche GESSOL (Gestion de la Qualité des Sols) piloté par l'INRA pour le compte du MEDD. Le projet que j'animais avait trait à la prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition chronique aux polluants du sol. Cette recherche, qui a été menée en collaboration avec une équipe de recherche de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, est présentée dans deux publications de rang A (réfs. 4, 8), deux communications à congrès international (réfs. 26, 28) et deux communications à conférences nationales (réfs. 40, 43). Cette thématique sera poursuivie puisque j'ai initié une thèse de Doctorat sur ce thème à

l'Université Paul Sabatier, avec une collaboration entre le BRGM, l'IRSN et l'INERIS (voir le chapitre V).

3.2. CONCEPTION ET/OU COORDINATION DE PROGRAMMES DE RECHERCHE

- Coordination générale du projet LIXAR, financé par l'ADEME, visant à étudier l'interaction entre des matériaux argileux et des lixiviats de décharge. Projet en collaboration avec le Cemagref, l'INSA-Lyon, l'ISTO et le CRMD.
- Coordination « horizontale » du programme « Couvertures » de l'ADEME, en collaboration avec : ANTEA, CREED, DRIMM, IMFT, INSA-Lyon, LIRIGM, SIMECSOL, SITA, SOLAGRO. Ce programme de recherches triennal comprenait des expérimentations sur sites réels et la rédaction d'un guide (réf. 50).
- Conception et coordination générale du projet ISIS (Prévention de l'Impact des Sites de Stockage) pour la Direction de la Recherche du BRGM. Projet regroupant plusieurs modules :
 - ✓ HETERO. Caractérisation de l'hétérogénéité des planches de matériaux argileux par des méthodes géophysiques (Annexe V).
 - ✓ PERMAR. Mise au point d'un appareillage de mesure des très faibles perméabilités.
 - ✓ PROMESS. Caractérisation du potentiel polluant résiduel des ordures ménagères après la phase de maturation.
 - ✓ PORK. Conséquences de précipitations minérales sur les variations de porosité et de perméabilité du milieu poreux (voir chapitre V).
- Conception et coordination générale du projet de recherche pour les Agences de l'Eau sur l'estimation des flux polluants émis par les décharges de déchets ménagers et assimilés. Ce travail s'est traduit par plusieurs publications (dont une de rang A) sur les bilans hydriques de décharges (réfs. 10, 21).
- Montage du projet LIMULE, cofinancé par l'ADEME, en collaboration avec POLDEN-LAEPSI.

3.3. PARTICIPATION A DES PROGRAMMES DE RECHERCHE NATIONAUX

- Participation au programme de recherche GESSOL (Gestion de la Qualité des Sols), piloté par l'INRA pour le Ministère chargé de l'Environnement (MEDD). Coordination et réalisation d'un projet sur l'incertitude en évaluation des risques liés aux polluants du sol.
- Participation au conseil scientifique du projet de recherche « stockage des déchets ménagers et santé publique » coordonné par l'Institut National de Veille Sanitaire. Appui en matière de modélisation des transferts à partir d'une décharge de déchets ménagers.

- Participation au projet TRANSPOL, piloté par l'INERIS, d'intercomparaison entre codes de calcul du transfert des polluants, dans un contexte d'évaluation des risques pour l'eau souterraine. Collaboration avec l'Ecole des Mines de Paris et la société QuantiSci. Cette participation a débouché sur deux communications à congrès (41, 42).

3.4. PARTICIPATION A L'ENCADREMENT D'ETUDIANTS

(Période suivie)

Thèses de Doctorat

2003- **Thèse de l'Université d'Orléans**

Dossier de thèse en cours de montage : Influence de la matière organique des lixiviats de décharge sur le gonflement des matériaux argileux en barrière de confinement. Thèse en collaboration avec l'Université d'Orléans et l'INSA-Lyon. Contribution personnelle : Participation au montage de la thèse et montage d'un projet d'accompagnement de la thèse. Directeur de thèse : Charles-Henri Pons.

2002- **Cédric Baudrit ; thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse**

Thèse sur les incertitudes en évaluation des risques. Contribution personnelle : montage du dossier de thèse dans le cadre d'une collaboration tripartite BRGM-IRSN-INERIS, co-encadrement du thésard. Thèse démarrée en Octobre 2002. Directeur de thèse : Didier Dubois.

2001-2003 **Nevila Jozja ; thèse de l'Université d'Orléans**

Thèse sur la migration de métaux à travers des matériaux argileux. Expérimentation et applications. Contribution personnelle : appui pour la définition des objectifs et réalisation de modélisation couplée (à l'aide du code de calcul PHREEQC) des courbes de restitution obtenues au cours d'essais en colonne de percolation. Directeur de thèse : Jean-Claude Touray.

1997-1998 **Michel Auboiroux ; thèse de l'Université d'Orléans**

Affinité de différents cations métalliques pour une montmorillonite calcique. Expérimentation et applications. Contribution personnelle : modélisation couplée (à l'aide du code PHREEQC) des transferts dans une colonne d'argile avec adsorption par échange d'ions. Directeur de thèse : Jean-Claude Touray.

1998-1999 **Shaddad Attili ; thèse de l'Université d'Orléans**

Caractérisation et analyse du comportement à la lixiviation de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (M.I.O.M.). Nature et rôle des fractions fines et ultra-fines. Contribution personnelle : appui pour le cadrage de la thèse et évaluation du rapport de thèse. Directeur de thèse : Jean-Claude Touray.

1999-2001 **Gaël Bellenfant ; thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine**
Quantification et interprétation des volumes de lixiviats générés par les sites de stockage de déchets. Contribution personnelle : Appui pour l'utilisation du modèle de bilan hydrique MOBYDEC (que j'ai développé). Directeur de thèse : Michel Bues.

2002-2003 **Christoph Steffen ; DEA à l'Institut de Veille Sanitaire**
DEA sur les risques sanitaires liés aux décharges. Contribution personnelle : appui pour l'utilisation du modèle MISP de calcul de l'impact sur les eaux souterraines. Directeur de DEA : Denis Zmirou.

Stages de fin d'études

2002 **Thomas Esclaffer ; travail de fin d'études, Année spéciale Ingénieur Génie de l'Environnement (IGE) ESEM (Orléans).**
Elaboration d'un logiciel pour mettre en œuvre la méthode "hybride" de prise en compte des incertitudes liées aux paramètres des modèles d'évaluation des risques. Contribution personnelle : Définition du sujet et suivi du stagiaire.

2002 **Boris Chevrier ; travail de fin d'études, ENTPE, VA Géotechnique-Géosciences (Lyon).**
Caractérisation multicritères d'une couche d'argile compactée. Contribution personnelle : Définition du sujet, évaluation du rapport de stage et de la soutenance.

2000 **Camille Briday, projet de fin de 3^{ème} année, ESEM (Orléans)**
Synthèse sur l'assimilation des métaux du sol par les plantes. Contribution personnelle : Définition du sujet, suivi de la réalisation et évaluation du rapport.

Participation à de nombreuses évaluations de soutenances de stages, dans le cadre de mon activité de Professeur Associé (PAST) à l'ESEM (voir chapitre 6).

3.5. PARTICIPATION A DES JURYS DE THESE OU DE SELECTION DE CHERCHEURS

2001 Jury pour un poste d'ingénieur-chercheur au Cemagref.

Président du jury : Henri Tardieu.

2000 Thèse de Mme. Sandrine Poignard, Université Paris VI. Etude des flux hydriques dans un sol non saturé hétérogène : application aux couvertures de décharge.

Directeur de thèse : Ghislain de Marsily.

1999 Thèse de M. Shaddad Attili, Université d'Orléans.

Directeur de thèse : Jean-Claude Touray.

1998 Thèse de M. Michel Auboiroux , Université d'Orléans.

Directeur de thèse : Jean-Claude Touray.

4. Résumé du travail de thèse

4.1. CONTEXTE DU TRAVAIL EFFECTUE

Ce travail de thèse a été réalisé alors que j'étais employé par la société ANTEA (Groupe BRGM), bureau d'étude spécialisé dans le domaine de l'eau, des sols, et de l'environnement. Dans le cadre de mon travail à ANTEA sur le stockage des déchets, et notamment sur la caractérisation des barrières d'étanchéité minérale, j'ai pu constater combien le mécanisme de la diffusion moléculaire était souvent négligé par les différents acteurs de la problématique « stockage en surface ». En effet, les comparaisons entre des barrières de perméabilités et d'épaisseurs différentes se basaient généralement sur un calcul du temps nécessaire pour qu'une goutte d'eau traverse les barrières, sous l'effet d'un gradient hydraulique unitaire (hypothèse d'un écoulement gravitaire). Ce constat m'a amené à développer des abaques, basées sur l'équation d'advection et diffusion-dispersion, permettant de déterminer ces temps de transfert de manière graphique, et de facilement visualiser les temps caractéristiques des domaines de validité des hypothèses de transfert purement advectif ou diffusif. Ceci a constitué un point de départ pour le développement d'autres solutions analytiques, qui au cours des années ont donné lieu à des publications et à ce travail de thèse.

4.2. DESCRIPTION SUCCINCTE DES DEVELOPPEMENTS SOUS FORME D'ABAQUES

Une des originalités des abaques proposés dans cette thèse tient au fait que l'on raisonne à l'envers par rapport à la démarche habituelle. Les abaques publiés jusqu'alors permettent de calculer une concentration en soluté en fonction de la distance à la source, du temps, et des paramètres de vitesse de l'eau, de diffusion-dispersion, de retard etc. Si par contre on s'intéresse à la question de savoir « quand est-ce qu'une certaine concentration en polluant parviendra à une certaine distance de la source ? », il faut alors procéder de manière itérative. J'ai donc généré des abaques permettant de déterminer ce temps de manière graphique. L'approche est illustrée ci-dessous pour le cas simple unidimensionnel.

On définit tout d'abord les variables adimensionnelles suivantes :

$$C_D = \frac{C}{C_0}, Z_D = \frac{z}{E}, Pe = \frac{vE}{D}, T_D = \frac{Dt}{RE^2}, L_D = \frac{\lambda RE^2}{D}$$

où :

C est la concentration en soluté à la distance z et au temps t ;

C_0 est la concentration à la source (supposée ici constante) ;

E est une distance arbitraire (par exemple l'épaisseur d'une barrière). Noter que $z = E$ lorsque $Z_D = 1$;

v est la vitesse de l'eau dans le milieu poreux ;

D est le coefficient de diffusion-dispersion ;

R est le facteur de retard ;

λ est la constante de décroissance de premier ordre.

L'équation de transport en une dimension devient :

$$\frac{\partial C_D}{\partial T_D} + Pe \frac{\partial C_D}{\partial z_D} - \frac{\partial^2 C_D}{\partial z_D^2} + L_D C_D = 0$$

La solution analytique pour une condition initiale $C(z,0) = 0$ est :

$$C_D = \frac{1}{2} \cdot \exp\left(\frac{Pe}{2} \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4L_D}{Pe^2}}\right) Z_D\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{Z_D - Pe \sqrt{1 + \frac{4L_D}{Pe^2}} \cdot T_D}{2\sqrt{T_D}}\right) +$$

$$\frac{1}{2} \cdot \exp\left(\frac{Pe}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4L_D}{Pe^2}}\right) Z_D\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{Z_D + Pe \sqrt{1 + \frac{4L_D}{Pe^2}} \cdot T_D}{2\sqrt{T_D}}\right)$$

où erfc est la fonction erreur complémentaire.

Les abaques de la figure 1 ci-dessous (publiés dans la référence 12 ; chapitre 7) permettent de déterminer quand est-ce que la fraction 1% de la concentration source parvient à une distance E de la source, sous l'effet de l'advection, la diffusion-dispersion et en présence de retard et de dégradation de premier ordre. Ils permettent de clairement visualiser la gamme de valeurs du nombre de Péclet (Pe) pour laquelle le temps de transfert est dominé par l'advection, ou au contraire par la diffusion, ainsi que la zone de transition où ces deux mécanismes ont une influence.

Ces abaques ont été générés par ordinateur à l'aide d'un algorithme de recherche automatique qui fonctionne de la manière suivante. Une première boucle est effectuée afin de couvrir une large gamme de valeurs du nombre de Péclet. Pour chaque valeur du nombre de Péclet, une boucle interne couvre les valeurs de temps adimensionnel, et la concentration relative est calculée au point $Z_D = 1$ (c'est à dire à $z = E$). Lorsque la concentration relative recherchée (dans le cas de la Figure 1 : $C_D = 1\%$) est dépassée, l'algorithme retourne au temps précédent, affine le pas de temps, et recommence de nouveau la recherche. Lorsque la valeur de C_D recherchée est détectée avec une précision suffisante, le couple (Pe , T_D) correspondant est sauvé dans un fichier, et l'algorithme passe à la valeur de Pe suivante. A noter l'enveloppe de « non restitution » de la Figure 1 : elle définit la valeur de décroissance adimensionnelle (L_D) au dessus de laquelle le polluant ne parviendra jamais à la distance E à un niveau de concentration relative de 1% (il aura été atténué en dessous de cette valeur avant d'atteindre cette distance).

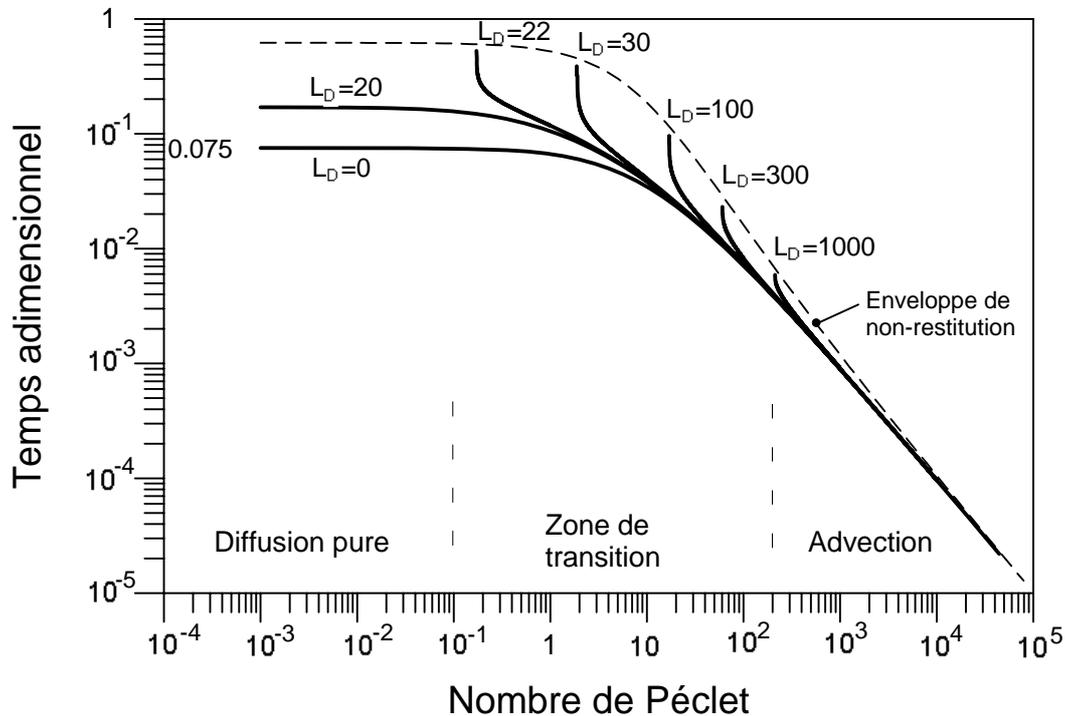


Figure 1 - Abaques pour la détermination des temps de restitution de la concentration relative $C_D = 10^{-2}$. Cas avec dégradation dans le milieu poreux.

Des abaques ont été développés pour plusieurs solutions, en 1, 2 et 3 dimensions. Un résultat significatif a été le développement de solutions, en régime permanent et transitoire, pour le système multicouche (Figure 2). Une de ces solutions est exploitée pour l'évaluation de l'équivalence hydro-dispersive entre barrières minérales multicouches (réf. 6 ; chapitre 7). Une application au cas de l'émission de polluants par des déchets de type stabilisé (émission d'un flux diffusif à partir d'une matrice solide a également donné lieu à une publication de rang A (réf. 9) et à une communication à congrès (réf. 33).

4.3. INCERTITUDES RELATIVES AUX PARAMETRES D'ENTREE

L'incertitude relative aux paramètres d'entrée des modèles de transfert de polluants peut avoir principalement deux origines. Elle peut être liée :

- à la nature aléatoire du paramètre (en raison de variations naturelles),
- à la nature incomplète ou imprécise de l'information dont on dispose concernant ce paramètre.

La meilleure manière de traiter le cas d'un paramètre présentant une variabilité aléatoire consiste à collecter suffisamment de données pour construire un histogramme de fréquence

des valeurs, et à caler une fonction de densité de probabilité sur cet histogramme. Dans le cas où l'information dont on dispose est incomplète ou imprécise, il existe une théorie, dite « des possibilités », qui a été développée précisément pour traiter ce type d'information. Le paramètre sera alors représenté par une distribution de possibilité plutôt que de probabilité.

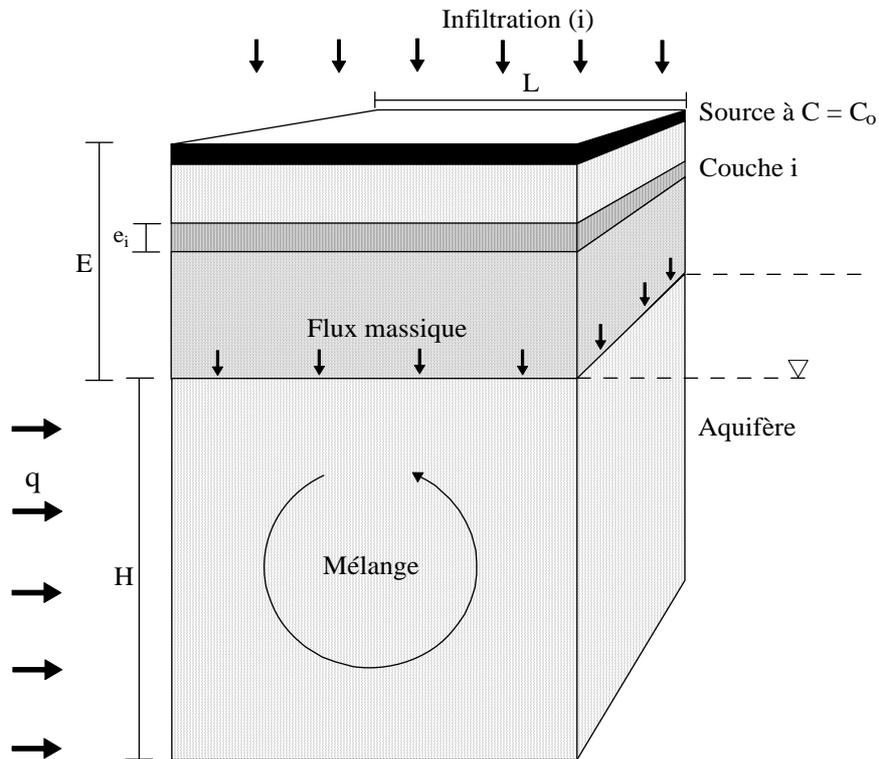


Figure 2 - Modèle conceptuel pour le système multicouche

Dans ma thèse, j'ai exploré ce mode de représentation de l'incertitude, et illustré les conséquences du choix de l'une ou de l'autre alternative (probabilités ou possibilités). J'ai pu montrer que le choix *a priori* de distributions de probabilité indépendantes, sans justification par des données mesurées ou des statistiques existantes, aura un effet minorant (non sécuritaire) sur l'estimation du risque. En effet, lors du calcul Monte Carlo, des scénarios associant des valeurs peu probables de paramètres d'entrée auront très peu de chances d'être tirées au sort (en raison de la multiplication des probabilités : $P(A \text{ et } B) = P(A) \times P(B)$). Le calcul possibiliste, par contre, considère toutes les combinaisons de valeurs des paramètres, mais sans effet multiplicatif sur l'incertitude du résultat. Il s'agit en fait d'un calcul d'intervalle effectué à différents niveaux de vraisemblance (voir en Annexe V).

Ceci est illustré dans la Figure 3 (réf. 8) qui compare les résultats du calcul probabiliste (Monte Carlo) et possibiliste, pour un calcul de risque de cancer excédentaire lié à l'ingestion d'eau souterraine dans le voisinage d'un site pollué. Cette figure montre une gamme plus large de valeurs pour le calcul possibiliste. Si un nombre très important d'itérations était utilisé pour le calcul Monte Carlo (1000 dans le cas de la Figure 3), on pourrait étendre la

gamme des résultats, mais les valeurs extrêmes auraient des fréquences d'apparition très faibles et seraient éliminées dès lors que le résultat du calcul Monte Carlo serait comparé à un critère de tolérance (par exemple 10^{-5} pour le cas de la Figure 3) pour un certain degré de probabilité (typiquement 95%). En résumé, le choix entre probabilités et possibilités peut se traduire par des résultats opposés en terme de gestion du risque : dans le premier cas le risque pourrait être jugé acceptable, tandis que dans le second il ne le serait pas.

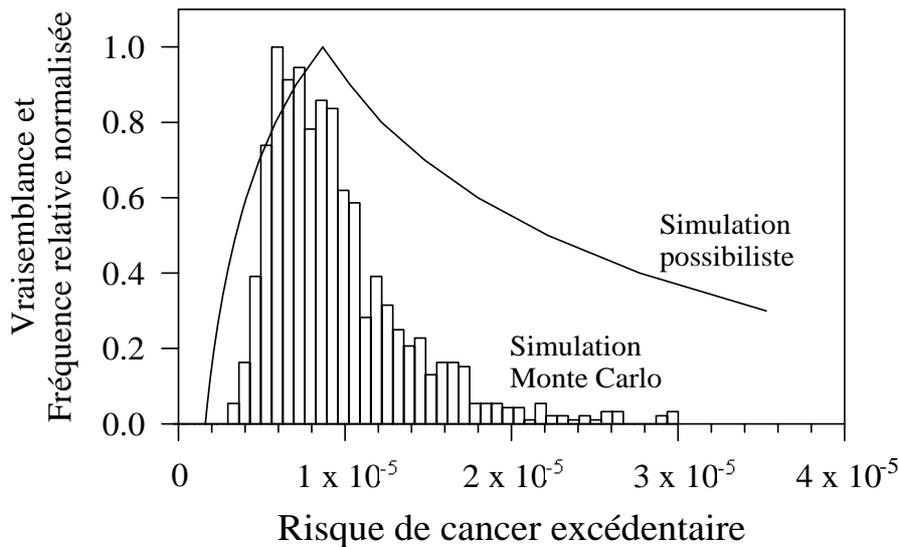


Figure 3 - Comparaison entre les résultats d'un calcul probabiliste et possibiliste. Cas de l'estimation du risque de cancer additionnel lié à l'absorption d'eau de boisson polluée.

4.4. CONCLUSIONS ET SUITES

Les solutions analytiques et abaques développés dans ce travail peuvent être utiles pour le praticien qui s'intéresse à l'impact des sources de pollution sur les eaux souterraines. Ces développements ont été valorisés par plusieurs publications de rang A et communications à congrès. Le travail effectué a été poursuivi après la thèse. Une simplification qui a été soulignée dans cette thèse concerne l'hypothèse d'un mélange parfait entre le flux massique provenant de la zone source et l'eau souterraine à l'aplomb de la source (Figure 2). Cette hypothèse est très communément adoptée pour le développement d'outils analytiques dans ce contexte. Mais elle ne correspond pas à la réalité : ce mélange est un phénomène progressif qui résulte de différents mécanismes parmi lesquels la variabilité du champ de vitesse, la dispersion verticale, et le cas échéant les gradients densitaires. Par la suite, j'ai cherché des alternatives à cette hypothèse simplificatrice et ai combiné (par convolution) une des solutions que j'avais développées dans ma thèse pour la migration verticale à travers la (ou plusieurs) couche surplombant l'aquifère, avec une solution d'un précédent auteur qui exprime la migration en trois dimensions à partir d'une source plane horizontale située à la surface de la nappe. Cela a donné lieu au développement d'un code appelé MISP (Modèle de l'Impact des

Sources de Pollution) qui est mis en accès libre sur le site web du BRGM (<http://www.misp.fr>).

Les travaux effectués sur l'application de la théorie des possibilités à l'évaluation des risques environnementaux ont été poursuivis, notamment dans le cadre du projet GESSOL (Gestion de la Qualité des Sols) piloté par l'INRA pour le MEDD. Dans des situations réelles d'évaluation des risques, on peut se trouver dans le cas où on dispose de suffisamment d'informations concernant certains paramètres pour justifier la définition de distributions de probabilité, tandis que pour d'autres la pauvreté de l'information disponible milite en faveur d'une représentation possibiliste. J'ai donc cherché à déterminer comment ces deux modes de représentation de l'incertitude pouvaient être combinées dans une même évaluation du risque d'exposition. J'ai développé, en collaboration avec l'Université Paul Sabatier (UPS) de Toulouse, l'approche dite « hybride » (voir en Annexe V), qui combine le calcul Monte Carlo et le calcul en nombres flous. Cette méthode hybride permet de représenter l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition d'une manière qui est cohérente par rapport à l'information dont on dispose dans la pratique. Elle permet notamment d'éviter de *tirer des distributions de probabilité d'un chapeau* lorsque l'information dont on dispose est incomplète ou vague. Ces travaux font l'objet de recherches complémentaires, notamment sous la forme d'une thèse de Doctorat que j'ai montée avec l'UPS (voir le chapitre V).

5. Illustration de la démarche scientifique

Thème choisi :

Equivalence en Etanchéité Minérale : Caractérisation et Prévision

5.1. INTRODUCTION

L'équivalence en étanchéité minérale est un sujet de recherche scientifique mais aussi d'actualité, tant sur le plan réglementaire que pour l'activité du stockage des déchets en France et en Europe. En effet, si la réglementation sur le stockage des déchets en France et en Europe (JO 1992, 1997, JOCE, 1999 ; voir la liste de références à la fin de ce chapitre) stipule que les sites de stockage de déchets dangereux (industriels spéciaux) et non-dangereux (ménagers et assimilés) doivent comporter à leur base une barrière minérale de faible perméabilité (ou conductivité hydraulique ; $K \leq 10^{-9}$ m/s) et d'épaisseur minimale (1 m pour les déchets non-dangereux, 5 m pour les déchets dangereux), elle prévoit néanmoins la possibilité de déroger à certaines valeurs dès lors que la barrière alternative proposée présente un niveau de protection « équivalent ».

Etant donné que dans certaines régions françaises la géologie locale ne présente pas, dans les conditions naturelles, les caractéristiques de barrières sus-mentionnées, les exploitants de sites de stockage de déchets sont particulièrement intéressés par cette possibilité de dérogation afin que la géologie locale ne soit pas un obstacle incontournable pour l'implantation de nouveaux sites de stockage ou pour l'extension de sites existants. Il convient néanmoins d'appliquer cette notion d'équivalence avec circonspection, en rappelant notamment que le contexte géologique et hydrogéologique (en particulier la vulnérabilité des ressources en eau souterraine) doivent prévaloir au choix de l'implantation des sites de stockage (voir MEDD, 2002).

Pour ce qui concerne les barrières minérales en fond de site de stockage de déchets, le problème de la protection « équivalente » concerne en premier chef la protection des ressources en eau souterraine situées à l'aplomb et en aval hydraulique du site de stockage. Un guide du Ministère chargé de l'Environnement (MEDD, 2002), à la rédaction duquel ont participé plusieurs organismes parmi lesquels le BRGM et l'INSA-Lyon, a permis de clarifier certains points relatifs à la notion d'équivalence. D'après ce guide :

Deux barrières d'étanchéité passive sont considérées comme étant « équivalentes » lorsqu'elles assurent un même niveau de protection en terme d'impact potentiel du site de stockage sur une ressource en eau souterraine.

L'estimation de l'impact potentiel d'une source de pollution sur les eaux souterraines nécessite, d'une part, une connaissance des propriétés des matériaux qui influencent le transfert d'éléments potentiellement polluants (caractérisation des matériaux) et d'autre part une prévision (à l'aide de modèles) de la migration des polluants dans le sous-sol et les eaux

souterraines. Ce sont ces deux facettes de la problématique ; caractérisation et prévision, qui sont développées ci-après pour illustrer le caractère novateur de certaines de mes contributions scientifiques et pour identifier de nouveaux axes de recherche.

5.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX DE FAIBLE PERMEABILITE

5.2.1. Introduction

Lorsque l'exploitant d'un site de stockage de déchets est confronté au problème d'une géologie locale qui ne respecte pas naturellement les spécifications réglementaires, il a la possibilité de reconstituer artificiellement la barrière. Une solution consiste à importer un matériau argileux et à le compacter de manière à optimiser le couple densité/perméabilité. Se pose notamment le problème de la mesure de la perméabilité de ce matériau. Mais il est actuellement de plus en plus courant de recourir à des matériaux alternatifs, par exemple à des géosynthétiques bentonitiques (GSB), qui sont des « tapis » de poudre de bentonite prise entre deux feuilles de géotextile. En présence d'eau (qui peut provenir de l'eau présente en phase vapeur dans le sol ou alors d'une fuite de lixiviat), la poudre de bentonite gonfle et le GSB joue alors un rôle de barrière.

Etant donné la très faible épaisseur du GSB (environ 1 cm à l'état hydraté) une question importante concerne les performances à long terme de ce type de matériau, notamment après un contact prolongé avec du lixiviat de décharge .

Mesure in situ de la perméabilité des matériaux argileux naturels et interaction des matériaux argileux avec des jus chargés sont deux sujets de recherche qui sont développés ci-après.

5.2.2. Caractérisation in situ de la perméabilité de matériaux argileux

Contexte et objectifs

La réglementation sur le stockage des déchets stipule que la perméabilité (conductivité hydraulique) des barrières de matériaux argileux utilisées pour le confinement des déchets doit être contrôlée par des essais in situ. Il existe des normes françaises décrivant différentes méthodes permettant de mesurer ce paramètre sur site. On citera notamment les normes AFNOR X-30 418 (Infiltromètre de type anneau ouvert ; AFNOR 1998), X-30 420 (Infiltromètre de type anneau fermé ; AFNOR 1999) et X-30 425 (Essai de type choc hydraulique en forage ; AFNOR 2001).

Le BRGM participe de longue date (voir par exemple Bertrand et al., 1995) à l'élaboration de ces normes et au développement de méthodes pour la détermination de la perméabilité des matériaux argileux faiblement perméables. Les travaux présentés dans ce chapitre relèvent d'une recherche *pré-normative* destinée à améliorer la fiabilité et la représentativité des mesures.

Originalité de la démarche par rapport aux travaux antérieurs

La plupart des protocoles de mesure de la perméabilité par des infiltromètres à écoulement vertical (voir AFNOR, 1998, 1999, Daniel, 1989) font l'hypothèse d'un régime d'écoulement permanent. Or dans les matériaux très faiblement perméables on peut montrer qu'un tel régime permanent met très longtemps (des semaines voire plus) à s'instaurer. L'idée de départ du développement présenté ci-dessous a été de se demander : *pourquoi ne pas exploiter les mesures effectuées durant la période d'écoulement en régime transitoire ?*

Cette interprétation de la période d'écoulement transitoire (dite « early-time » en anglais) a déjà fait l'objet de recherches par d'autres auteurs (Fallow et al., 1994, Elrick et al., 1995). Mais j'ai pu mettre en évidence une lacune de l'analyse de ces précédents auteurs qui ont négligé la composante gravitaire du gradient hydraulique responsable de l'écoulement durant l'essai (Figure 4). J'ai pu ainsi montrer, à partir de leur propres données (réf. 7 du chapitre 7), que cette simplification les a amenés à surestimer l'influence de la succion au front d'infiltration (Figure 4).

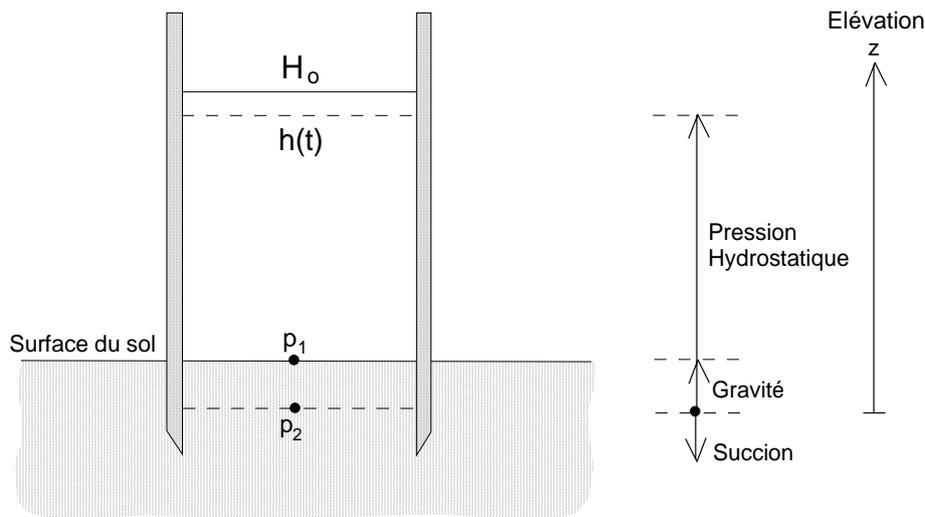


Figure 4 – Principales composantes du gradient hydraulique durant un essai d'infiltration

Résumé descriptif

La méthodologie développée pour l'interprétation des essais d'infiltration en régime transitoire est une extension de l'équation de Green et Ampt (1911) au cas d'une charge variable. Le gradient hydraulique entre les points p_2 de la Figure 1 (position du front d'infiltration) et p_1 (surface du sol) s'écrit :

$$i(t) = \frac{\psi_f - (L_f(t) + h(t))}{L_f(t)}$$

où :

ψ_f est le potentiel de succion agissant sur le front d'infiltration (supposé raide ; hypothèse de Green et Ampt),

$L_f(t)$ est l'épaisseur de la tranche saturée au temps t ,

$h(t)$ est la hauteur de la colonne d'eau au temps t .

La résolution des équations de bilan de masse décrivant l'infiltration verticale au cours du temps durant l'essai permet de calculer le temps auquel une certaine variation de charge $H_o - h(t)$ est observée (Guyonnet et al., 2000) :

$$t = \left(\frac{S_s}{S_l} \right)^2 \frac{H_o - h(t)}{K_s \left(\frac{S_s}{S_l} - \Delta\theta \right)} + \left(\frac{S_s}{S_l} \right)^2 \frac{\Delta\theta(\psi_f - H_o)}{K_s \left(\frac{S_s}{S_l} - \Delta\theta \right)^2} \ln \left[\frac{\left(\frac{S_s}{S_l} - \Delta\theta \right) (H_o - h(t))}{\Delta\theta (H_o - \psi_f)} + 1 \right]$$

où :

t est le temps auquel est observée la hauteur d'eau $h(t)$,

S_s est la section du tube dans lequel fluctue le niveau d'eau,

S_l est la section de la base de l'infiltromètre,

H_o est la hauteur d'eau en début d'essai,

K_s est la perméabilité du sol à saturation,

$\Delta\theta$ est la différence entre la teneur en eau volumique à saturation et la teneur en eau volumique initiale.

On peut ainsi interpréter les couples de valeurs $(t, h(t))$ mesurés au cours de l'essai, par calage avec l'équation précédente. La variable de calage est la perméabilité à saturation K_s . A partir de cette équation, j'ai dimensionné un infiltromètre (réf. 3 ; chapitre 7 et Annexe V) appelé PERSAN[®] (Perméamètre à Réduction de Section et Acquisition Numérique), dont le schéma de principe est présenté en Figure 5.

Le PERSAN[®] est basé sur le principe d'une réduction de section entre la base de l'infiltromètre et le tube au sein duquel fluctue le niveau d'eau. Bien que faible, le débit vertical à travers la base, ramené à la section du cylindre supérieur, se traduit par une fluctuation parfaitement mesurable du niveau d'eau. Le cylindre supérieur est amovible, pour permettre de s'adapter aux conditions de perméabilité anticipées (dans le cas d'une perméabilité élevée on choisira un diamètre de cylindre plus important).

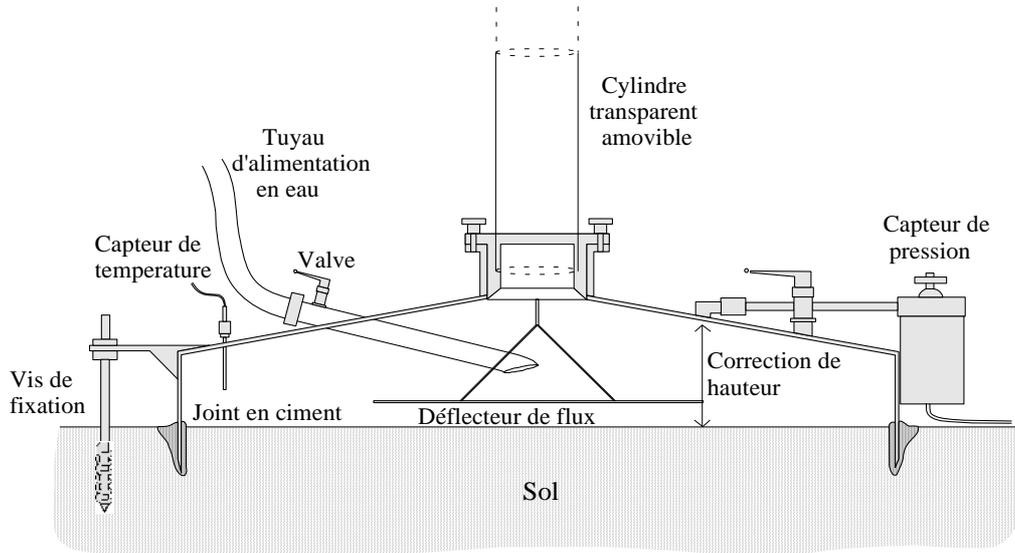


Figure 5 – Schéma du perméamètre PERSAN[®]

L'appareil a été mis en œuvre avec succès sur plusieurs planches d'essai (Figure 6).



Figure 6 – Mise en œuvre du PERSAN[®] sur une planche d'essai expérimentale

La Figure 7 donne un exemple de résultat de mesure effectuée à l'aide du PERSAN[®].

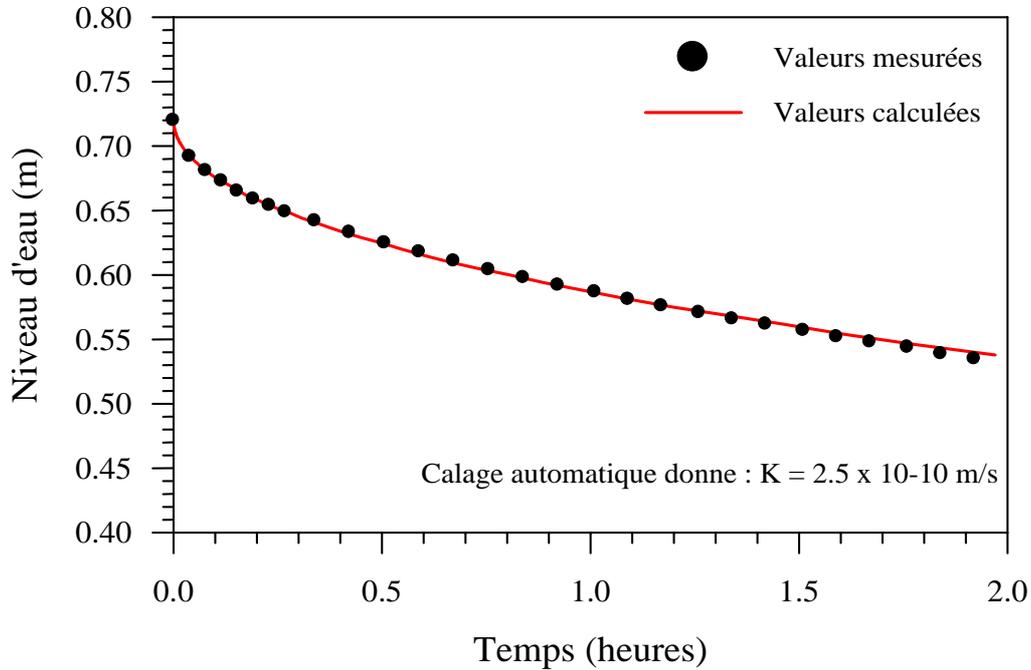


Figure 7 – Exemple de données mesurées durant un essai PERSAN[®] et calage de la courbe mesurée (à l'aide de l'équation présentée plus haut)

Les avantages de cette méthode pour la mesure de la perméabilité in situ sont :

- Une meilleure cohérence théorique par rapport à la physique de l'écoulement : on prend en compte sa nature transitoire au lieu de supposer un hypothétique régime d'écoulement permanent.
- Un gain de temps de mesure puisqu'il n'est pas nécessaire de saturer le terrain afin d'atteindre le régime « permanent ».
- Une meilleure représentativité de l'interprétation puisqu'on cale les données mesurées sur toute une fenêtre de mesures (Figure 7), au lieu de n'utiliser qu'un ou deux points en fin de mesure.
- Une meilleure représentativité de la mesure (l'appareil a un diamètre de 70 cm) comparé à certains infiltromètres de diamètre réduit (20-30 cm).

Perspectives de recherche

Actuellement, les perspectives de recherche concernent notamment l'amélioration de la localisation des mesures de perméabilité sur les planches d'essai. En effet, dans la pratique,

cette localisation est effectuée de manière très arbitraire. Or on sait que les performances des barrières d'argile compactée sont influencées par des hétérogénéités locales. Des recherches récentes et en cours (voir en Annexe V) visent donc à détecter, par des méthodes indirectes (géophysiques), des zones potentiellement anormales, pour ensuite positionner les essais de perméabilité in situ (voir aussi Aït Saadi et al., 2002).

A noter par ailleurs que le prototype du PERSAN[®] fait actuellement l'objet de recherches pour améliorer la représentativité des mesures et la facilité de mise en œuvre de l'appareillage. Il est prévu notamment de faire suivre la phase d'écoulement par une phase en « choc impulsif ». La comparaison des valeurs de perméabilité obtenues à partir de l'interprétation des deux phases devrait encore améliorer la fiabilité du résultat.

5.2.3. Interactions entre matériaux argileux et lixiviats

Contexte et objectifs

Dans l'industrie du stockage des déchets, un des principaux candidats à « l'équivalence » par rapport aux matériaux argileux naturels utilisés en étanchéité, sont les géosynthétiques bentonitiques (GSB). Un GSB est typiquement constitué de poudre de bentonite (un matériau constitué principalement de montmorillonite) contenue entre deux feuilles de géotextile. La bentonite utilisée pour cette application est une montmorillonite sodique ; des ions sodium sont adsorbés à la surface des feuillets d'argile et compensent les charges négatives liées aux substitutions isomorphiques à l'intérieur de leur structure (voir par exemple Gaboriau, 1998). Les ions sodium, de par leur affinité avec les molécules d'eau, confèrent ses propriétés de gonflement à la bentonite.

Il existe plusieurs variantes de GSB, dont les particularités tiennent principalement à la manière dont les matériaux sont assemblés (cousus, aiguilletés, collés, etc.). Les GSB se présentent sous la forme de rouleaux qui sont déroulés sur la surface à étancher, avec un certain degré de recouvrement entre les lés. Le comité français des géosynthétiques (CFG, 2001) propose des recommandations pour la mise en œuvre de ces matériaux.

Pour l'exploitant de site de stockage, ces matériaux présentent des avantages considérables. En effet, ils sont faciles à transporter et leur installation est de manière générale plus aisée que celle des couches d'argile naturelle compactée. Mais leur principal avantage est de fournir une alternative aux matériaux argileux naturels dans les régions qui en sont relativement dépourvues.

Mais si on invoque le principe « d'équivalence », il faut alors s'interroger sur l'évolution dans le temps des performances des matériaux. On sait (voir par exemple Comeaga, 1997) que l'affinité de certains cations (Ca, Mg, Al, ...) pour les sites d'échange des argiles étant supérieure à celle du sodium, la bentonite va échanger son sodium pour ces autres cations dès lors qu'ils se trouvent en solution. Cet échange peut avoir une influence négative sur les performances du matériau (augmentation de la perméabilité). Or on connaît relativement peu

de choses sur ces évolutions et comment elles peuvent être influencées par les conditions de mise en œuvre des matériaux.

Par ailleurs, un GSB hydraté soumis à la contrainte d'une colonne de déchets est un matériau dont l'épaisseur est de l'ordre de 1 cm. Quelle est l'évolution des performances mécaniques de ce matériau (résistance au poinçonnement par exemple) suite à un contact prolongé avec du lixiviat de décharge ?

Il s'agit là de questions qui sont actuellement étudiées dans le cadre du projet LIXAR dont j'ai la charge. Ce projet, cofinancé par l'ADEME et la Direction de la Recherche du BRGM, est réalisé en collaboration avec le Cémagref, l'INSA-Lyon, l'ISTO (Institut des Sciences de la Terre de l'Université d'Orléans) et le CRMD (Centre de Recherche sur la Matière Divisée du CNRS).

Originalité de la démarche par rapport aux travaux antérieurs

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence des conditions expérimentales (degré d'hydratation, type de fluide percolant) sur l'évolution de la perméabilité des GSB. Ruhl et Daniel (1997) ont étudié cinq types de GSB mis en contact avec sept types de solutions (du lixiviat réel et synthétique) et pour trois conditions d'hydratation. Ils ont observé que la condition d'hydratation était particulièrement importante ; le GSB conservait une faible perméabilité lorsqu'il était préalablement hydraté avec de l'eau de faible force ionique (en l'occurrence de l'eau du réseau). Petrov et Rowe (1997) ont également étudié les modifications de la perméabilité des GSB en fonction du type de fluide percolant, de sa force ionique, de la pression de confinement, du degré d'hydratation etc.

Ces différents auteurs ont étudié les modifications subies par les GSB à une échelle macroscopique (modifications de la perméabilité) mais ne se sont pas intéressés aux mécanismes responsables de ces modifications à une échelle microscopique. La principale originalité du projet LIXAR tient au fait que l'on étudie les modifications subies par les matériaux à différentes échelles :

- L'échelle macroscopique (suivi de l'évolution de la perméabilité dans des cellules oedométriques et des colonnes pilotes).
- L'échelle microscopique (structure des feuillets d'argile, agencement de l'eau dans les feuillets, agencement des paquets de feuillets dans l'espace, texture).

Les principales questions scientifiques posées dans le projet LIXAR sont :

- Est-ce que des modifications structurales ou texturales observables à l'échelle microscopique peuvent rendre compte des variations macroscopiques (variations de perméabilité) ?

- Quelle est l'influence de la pré-saturation du matériau argileux sur ses modifications structurales/texturales suite au contact prolongé avec des jus chargés ?
- Quelle est l'influence du type de bentonite (sodique naturelle ou calcique activée sodique) ?

Résumé descriptif

Le projet LIXAR réunit différents organismes de recherche (réf. 23).

✓ Le BRGM assure :

- la coordination du projet,
- l'analyse chimique des échantillons de fluides collectés durant les essais de percolation-diffusion réalisés par l'INSA-Lyon,
- l'interprétation, par modélisation couplée transferts/chimie, des courbes de restitution mesurées au cours de ces essais,
- l'interprétation chimique (spéciation) des échantillons de fluides.

✓ L'INSA-Lyon assure :

- la réalisation des essais de perméabilité-diffusion (Figure 8) et l'interprétation hydraulique,
- le conditionnement et l'acheminement vers le BRGM des échantillons de fluides et des GSB après démontage.



Figure 8 - Banc d'essai d'oedoperméamètres dans le laboratoire de l'INSA-Lyon

✓ Le Cémagref assure :

- la réalisation et l'interprétation des essais en colonne pilote (mise en contact prolongé des GSB avec du lixiviat sous une contrainte de 50 kPa ; Figure 9),
- le démontage des colonnes et l'auscultation des GSB après contact (1 an) pour caractériser les modifications des propriétés mécaniques.

Le GSB est alimenté en lixiviat réel par l'intermédiaire d'un défaut (trou) dans une géomembrane située au dessus du GSB, selon la méthodologie décrite dans Touze-Foltz (2001).

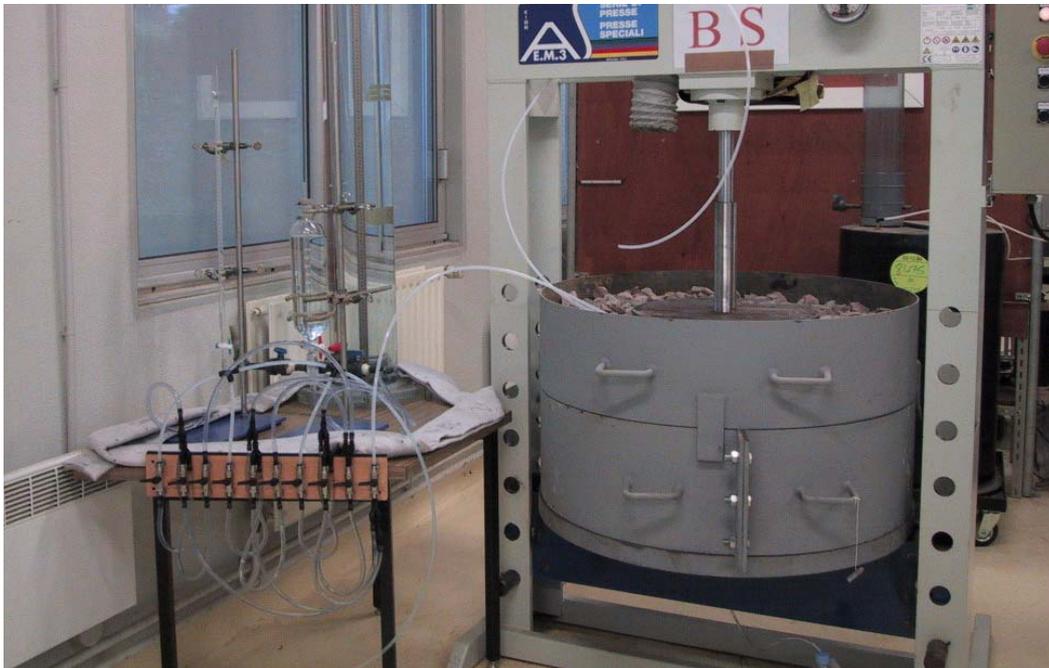


Figure 9 - Vue d'ensemble d'une colonne LIXAR du Cémagref (vue de la presse et des vases de Mariotte utilisées pour la mesure des débits)

✓ l'ISTO assure :

- l'auscultation des GSB démontés des cellules INSA par DPAX (Diffusion aux Petits Angles des rayons X)
- l'interprétation quantitative des spectres.

La DPAX permet, sans remaniement de l'échantillon, d'explorer un domaine angulaire qui correspond à des distances de corrélation adaptées à la détermination de la taille et de la structure interne des parois entre pores du matériau argileux. Les paramètres déduits de l'analyse sont :

\bar{M} : nombre moyen de feuillets quasi-parallèles constituant la particule (épaisseur des parois des pores) ;

\bar{d} : distance moyenne entre les feuillets ;

$\frac{\delta^2}{\bar{d}^2}$: paramètre de désordre caractérisant la répartition plus ou moins ordonnée des différentes distances au sein des parois.

L'interprétation des spectres de DPAX permet de révéler la présence d'une phase gonflée (ou « gel » ; $\bar{d} > 70 \text{ \AA}$) qui génère des pics à un angle compris entre 1 et 2° , et/ou une phase dite « solide hydraté » ($\bar{d} < 20 \text{ \AA}$) constituée de « paquets » de feuillets d'argile et qui donne des pics à un angle compris entre 4 et 5° .

✓ le CRMD assure :

- L'auscultation des matériaux démontés des cellules INSA par MET (Microscopie Electronique à Transmission).
- L'interprétation des photos.

Les images obtenues par MET, permettent la caractérisation de l'organisation des matériaux dans une gamme d'échelles allant de plusieurs micromètres à des valeurs inférieures au nanomètre. Il est ainsi possible de définir la texture, la micro-texture, la structure de l'assemblage observé.

Lors des essais oedométriques de l'INSA, deux types de GSB ; l'un contenant de la bentonite naturellement sodique (noté GSBa) et l'autre contenant de la bentonite calcique activée sodique (noté GSBb) sont mis en contact, sous une contrainte de 10 kPa , avec deux types de fluides : un lixiviat synthétique ($\text{CaCl}_2 \text{ } 0.1\text{M}$) et un lixiviat réel (prélevé sur un site de stockage de déchets ménagers). Une argile naturelle a également été étudiée à des fins de comparaison. L'essai sur les GSB est divisé en deux phases : une phase de gonflement et une phase de percolation. La phase de gonflement est réalisée soit directement avec le lixiviat (synthétique ou réel), soit avec une solution de faible force ionique (une solution $\text{NaCl } 10^{-3} \text{ M}$). Le tableau 1 résume les essais réalisés à ce jour dans le cadre du projet LIXAR.

Les résultats des essais des essais oedométrique montrent notamment :

- les meilleures performances du GSBa comparé au GSBb. Dans tous les cas, le gonflement du GSBa était supérieur à celui du GSBb et les valeurs du coefficient de perméabilité étaient inférieures (Figures 10 et 11).
- Le caractère agressif du lixiviat synthétique par rapport au lixiviat réel. Durant l'essai 3 (Figure 10) la perméabilité augmente sensiblement durant la phase de percolation avec le lixiviat synthétique (LS), tandis qu'avec le lixiviat réel (Figure 11) on observe pas d'augmentation.

Tableau 1 - Liste des essais de perméabilité-diffusion réalisés dans le cadre du projet LIXAR

Référence essai	0	0'	1	2	3	4
<i>Ten Eau initiale</i>	<i>Nat</i>	<i>Nat</i>	<i>Nat</i>	<i>Nat</i>	<i>Nat</i>	<i>Nat</i>
<i>Fluide de saturation</i>	<i>FI</i>	<i>FI</i>	<i>LS</i>	<i>LR</i>	<i>FI</i>	<i>FI</i>
<i>Fluide de percolation</i>	-	<i>FI</i>	<i>LS</i>	<i>LR</i>	<i>LS</i>	<i>LR</i>
GSBa	X	X	X	X	X	X
GSBb	X	X	X	X	X	X
Argile naturelle			X	X	X	X

FI : fluide d'imbibition ($\text{NaCl } 10^{-3} \text{ M}$)

LS : lixiviat synthétique ($\text{CaCl}_2 \text{ } 0.1\text{M}$)

LR : lixiviat réel

Nat : teneur en eau initiale du GSB (15 à 20%).

Note : le fluide de saturation est le fluide servant à la phase de mise en saturation (et gonflement) du GSB. Cette phase dure environ 10 jours. Le fluide de percolation est le fluide introduit après la phase de saturation sous une charge de 5 à 80 cm.

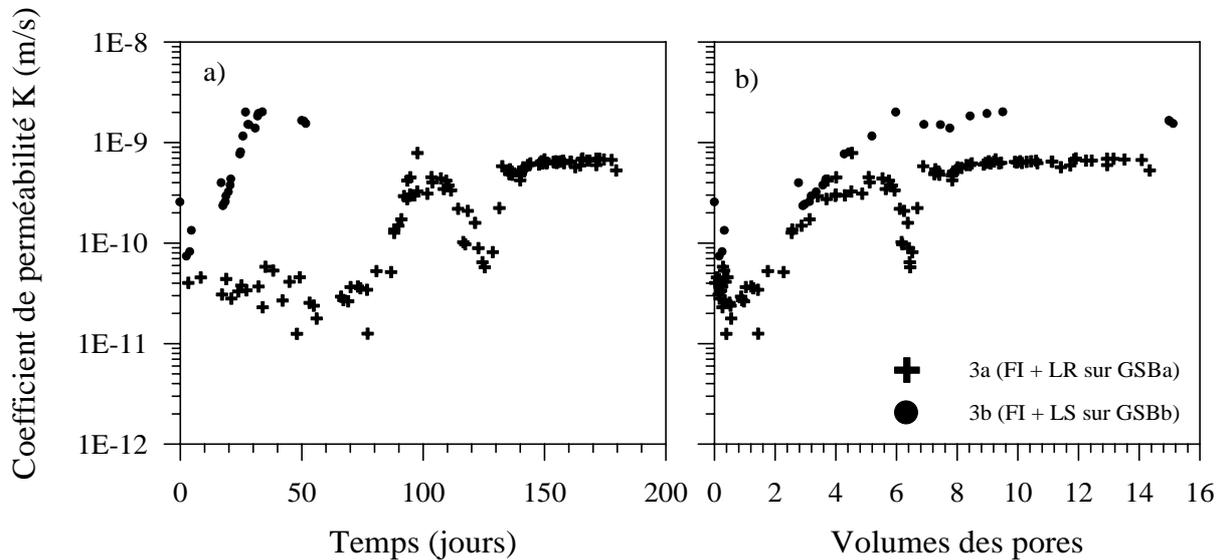


Figure 10 – Evolution du coefficient de perméabilité observée durant l'essai 3 (lixiviat synthétique)

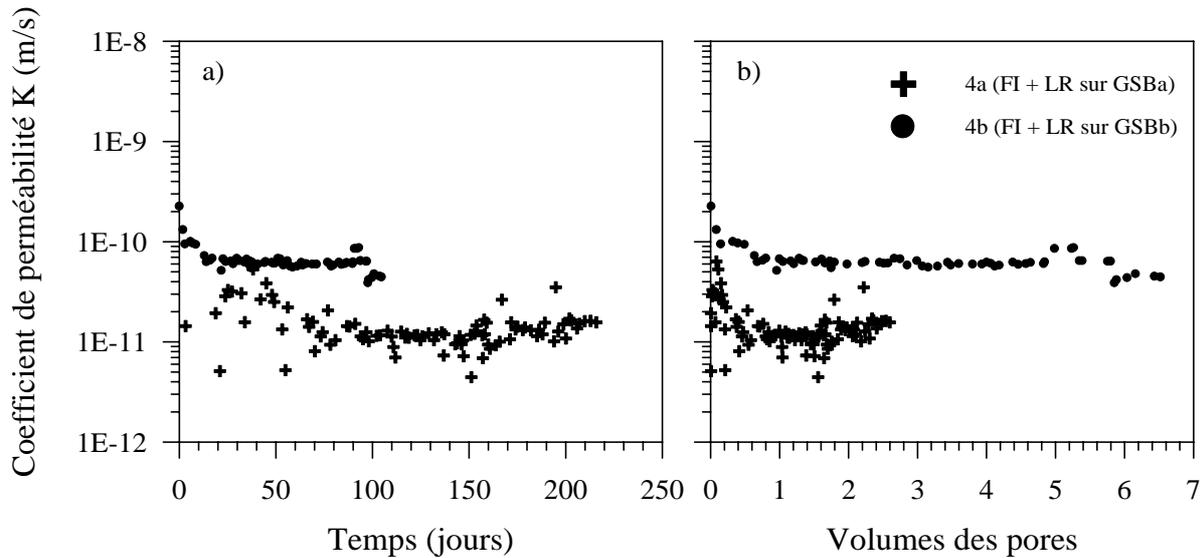


Figure 11 – Evolution du coefficient de perméabilité observée durant l'essai 4 (lixiviat réel)

L'auscultation par DPAX :

- Confirme l'agressivité du lixiviat synthétique CaCl_2 0.1 M par rapport au lixiviat réel. Le lixiviat synthétique « imprime sa marque » sur les GSB (provoque une contraction des feuillets) avec ou sans pré-imbibition avec le NaCl 10^{-3}M (comparer les spectres 1a et 3a de la Figure 12). Ceci se traduit par une disparition des modulations du spectre à des valeurs angulaires entre 1° et 2° (correspondant à la phase gel) et une accentuation des modulations à des angles compris entre 5° et 6° (correspondant à la phase « solide hydraté »).
- Le lixiviat réel favorise l'apparition de phase gel. Cette phase gel apparaît d'autant mieux qu'il y a pré-imbibition. On voit en effet sur la Figure 12 que le spectre de la bentonite issue de l'essai 2a montre une disparition de la phase gel, tandis que dans celui de l'essai 4a (pré-hydraté) cette phase est bien apparente. Ces résultats, combinés avec ceux des cations échangeables mesurés avant et après contact (Guyonnet et al. 2003), montrent l'influence des cations monovalents (NH_4^+ , K^+) du lixiviat réel sur le gonflement et vraisemblablement de sa fraction organique.
- La phase « solide hydraté » (paquets de feuillets) est moins marquée (moindre nombre de feuillets dans les paquets) dans le cas de la bentonite sodique naturelle que dans celui de la bentonite calcique activée sodique. Ceci se retrouve à l'échelle macroscopique, avec des perméabilités plus faibles pour le GSBa que pour le GSBb.

Les résultats obtenus jusqu'à présent indiquent un meilleur comportement hydraulique et textural de la bentonite naturellement sodique par rapport à la bentonite calcique activée sodique. Par ailleurs, le lixiviat synthétique utilisé n'est pas un bon candidat pour l'intercomparaison des performances des GSB dans un cadre normatif. Il semble

indispensable d'inclure d'autres cations (monovalents) ainsi qu'une fraction organique dont la nature précise reste encore à définir (voir plus loin les perspectives de recherche).

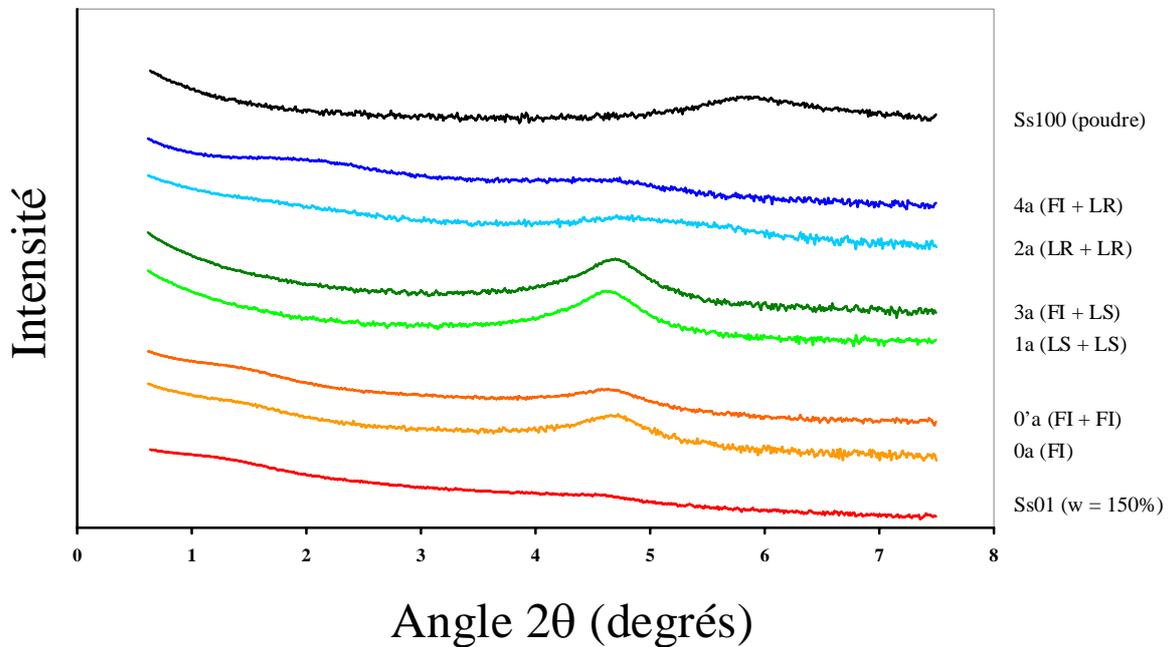


Figure 12 – Synthèse des spectres DPAX pour le GSB SS100 (naturellement sodique)

L'analyse au Microscopie Electronique à Transmission (MET) a permis :

- De visualiser la structure de l'argile à l'échelle nanométrique ; espacement entre feuillets, nombre moyen de feuillets dans la phase "solide hydraté" (voir la Figure 13).
- De quantifier, en conjonction avec la DPAX, les proportions relatives de phase "gel" et de phase "solide hydraté".
- De proposer un critère pour distinguer entre de la bentonite sodique naturelle et de la bentonite calcique activée sodique, à savoir la proportion de phase gel dite "grande distance" ($> 20 \text{ \AA}$, les feuillets présentant une exfoliation ; Figure 14).

Dans un contexte de recherche de matériaux "équivalents" en étanchéité, ce dernier point est important car il permettrait un contrôle sur la nature de la bentonite du GSB (sodique naturelle ou calcique activée sodique). En effet, le guide MEDD (2002) préconise l'utilisation de GSB à base de bentonite sodique naturelle et présentant une masse surfacique d'au moins 5 kg/m^2 . Se pose donc la question de la vérification du type de bentonite. A noter qu'un critère pratique de distinction qui découle de ce travail est la proportion de carbonate de calcium. En effet, l'activation de bentonite calcique par mélange avec des cendres volcaniques de composition Na_2CO_3 donne lieu à la formation de CaCO_3 qui reste dans la bentonite. La redissolution de cette calcique lors du passage d'un fluide peu chargé en calcium peut amener une "désactivation" de la bentonite par remplacement de Na par Ca.

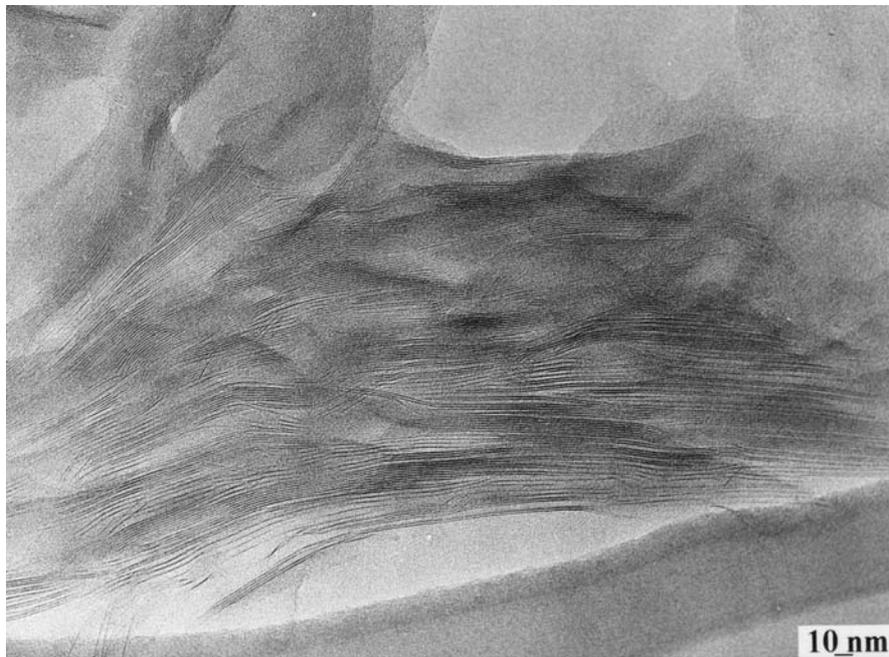


Figure 13 – Image MET de l'échantillon 2a montrant les « paquets » de feuillets de la phase dite « solide hydraté ». Distance entre feuillets de 1.42 nm, empilement moyen de 40 feuillets.

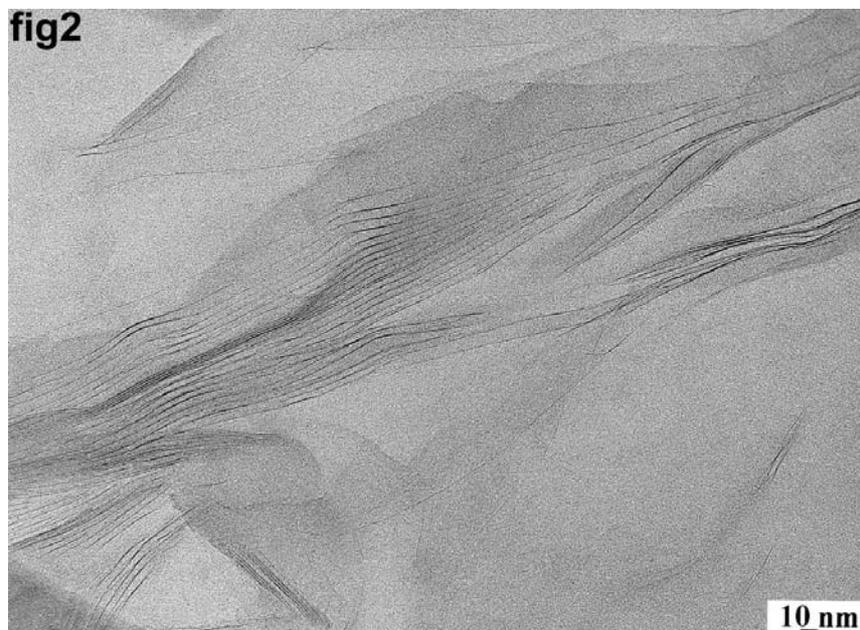


Figure 14 – Image MET de la bentonite sodique naturelle (SS100) hydratée à l'eau dé-ionisée montrant une phase gel dite « à grande distance »

Les courbes de restitution mesurées durant les essais de perméabilité-diffusion ont été interprétées à l'aide d'une modélisation couplée transfert/chimie (voir le chapitre 5.3) en prenant en compte :

- les variations de débits mesurés durant les essais,
- le transport de solutés par l'eau mobile (advection) et par diffusion,
- les réactions de spéciation chimique (phases liquide et solide),
- les réactions d'échange ionique entre la solution et l'argile.

Cette interprétation permet de démontrer clairement que l'échange surface-solution est bien régi par un mécanisme d'échange d'ions. Ce mécanisme entraîne un remplacement des ions sodium de la bentonite par d'autres cations sur des périodes de temps relativement courtes (de l'ordre de quelques mois ou même de semaines). En l'absence de pré-hydratation par le fluide peu chargé ($\text{NaCl } 10^{-3} \text{ M}$), la prédominance de phase « solide hydraté » (paquets de feuillets séparés par de l'eau « liée ») entraîne une moindre « accessibilité » des sites d'échange. Les ions sodium diffusent au cours du temps depuis l'eau « liée » de la phase hydratée vers la phase gel (voir chapitre 5.3).

Perspectives de recherche

Un résultat particulièrement intéressant du projet LIXAR a été de constater la différence de comportement du matériau bentonitique vis à vis du lixiviat synthétique par rapport au lixiviat réel. Même s'ils ont des forces ioniques similaires, le lixiviat synthétique « imprime » sa marque et fait disparaître la phase « gel » de l'argile (observée en DPAX) au bénéfice de la phase dite « solide hydraté » (paquets de feuillets d'argile à faible distance). Lors du contact avec le lixiviat réel, par contre, une phase « gel » subsiste. Le contenu du lixiviat réel en cations monovalents et/ou sa fraction organique ont une influence importante sur le gonflement de la bentonite et sur ses propriétés structurales.

Il s'agit là d'une question scientifique qui n'a jusqu'à présent jamais été abordée dans ce contexte, et qui nécessite une technicité très particulière dans le domaine de la caractérisation de la matière organique. C'est pourquoi il a été proposé une suite à ce projet de recherche, intitulé LIXAR II, qui sera accompagné d'un travail de thèse, en collaboration avec l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) et l'INSA-Lyon. Le principal objectif scientifique de la thèse sera d'étudier l'influence de la fraction organique du lixiviat réel sur le gonflement de la bentonite des géosynthétiques bentonitiques et sur les paramètres du transfert. Pour atteindre cet objectif, il faudra : i) préciser finement le rôle joué par l'ammonium (composant important des lixiviats) ; ii) doser et identifier les molécules organiques du lixiviat qui ont une influence prépondérante; iii) étudier quantitativement l'influence des molécules organiques caractéristiques du lixiviat sur le gonflement. Il s'agira enfin de définir un lixiviat "synthétique" constitué des molécules prédominantes (inorganiques et organiques). Ce lixiviat synthétique pouvant servir dans un cadre normatif afin d'apprécier les performances des différents GSB.

L'essentiel des expériences sera réalisé avec des lixiviats réels et des fractions obtenues à partir de ceux-ci, par filtration tangentielle ainsi que par percolation sur des colonnes de résine (voir Albéric et al., 2000, Disnar et al., 2003). Lixiviats et fractions feront l'objet d'un dosage du carbone organique total ainsi que d'une détermination des poids moléculaires des molécules constitutives par chromatographie liquide-spectrométrie de masse. Les constituants organiques seront concentrés et isolés par lyophilisation, puis caractérisés globalement, au niveau fonctionnel, par spectrométrie IR et par RMN ^{13}C . Les constituants biologiques (sucres, phénols dérivés de la lignine, acides gras, acides aminés) présents dans ces solutions seront aussi identifiés et quantifiés, après hydrolyse, par analyses spécifiques. Les constituants organiques de faible poids moléculaire seront dosés et identifiés individuellement par chromatographie en phase gazeuse (CPG) et CPG-spectrométrie de masse, après extraction par solvants et dérivatisation en composés stables (silylation, méthylation).

Des solutions seront reconstituées à partir des fractions organiques de différentes taille moléculaires et mis en contact avec la bentonite à l'aide d'essais en oedoperméamètre. Il s'agira de déterminer quelle(s) fraction(s) ont une action prédominante sur le gonflement de la bentonite. La bentonite après contact sera caractérisée :

- à l'échelle nanométrique à l'aide de la DPAX et du MET,
- à l'échelle micrométrique à l'aide, vraisemblablement, du Cryo-MEB.

5.3. PREVISION DE LA MIGRATION DES POLLUANTS

5.3.1. Estimation des transferts

Contexte et objectifs

Comme il a été dit en introduction, l'équivalence des barrières d'étanchéité minérale en fonds de sites de stockage de déchets ménagers et industriels spéciaux s'évalue en terme de protection équivalente des ressources en eau souterraine. L'évaluation de la migration de polluants dissous à travers des barrières multicouches nécessite l'emploi de modèles de calcul qui prennent en compte les mécanismes responsables du transfert et du devenir des polluants. Cette section résume certains apports scientifiques relatifs à cette thématique.

Originalité de la démarche par rapport aux travaux antérieurs

Pour ce qui concerne le transfert de polluants au travers de barrières multicouches, j'ai pu développer, en collaboration avec le GEOLEP de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), des solutions analytiques originales permettant d'évaluer le transfert de solutés au travers de barrières multi-couches. Les solutions analytiques des précédents auteurs ont généralement considéré une seule couche (voir Rowe et Booker, 1985, Van Genuchten, 1982). Une solution semi-analytique a été proposée par Rowe et Booker (1987) pour le

problème multi-couche. Des solutions purement analytiques pour le problème multi-couche n'apparaissent pas dans ces précédents travaux.

Ces solutions, bien que limitées à des géométries et des conditions aux limites simples, sont de plus en plus utilisées dans le domaine de l'ingénierie du stockage des déchets. Mais elles ne permettent pas de prendre en compte certains mécanismes, et notamment le couplage entre la migration de solutés et les réactions de spéciation (précipitation-dissolution) qui peuvent influencer leur devenir et leur mobilité. C'est pourquoi mes travaux actuels privilégient plutôt les approches numériques.

Résumé descriptif

a) Solutions analytiques

Le système modélisé correspond à celui de la Figure 2 du chapitre 4. On suppose une source émettant une concentration en polluant dissout à une concentration constante et surplombant une barrière multi-couche. Cette barrière se situe à l'aplomb d'un aquifère. La solution analytique combine l'équation de transport par advection et diffusion-dispersion pour la migration verticale dans le multi-couche, avec une équation de bilan de masse pour le mélange du flux polluant avec l'eau de l'aquifère.

La solution analytique exprimant la concentration dans l'aquifère à l'aplomb de la zone source et en régime stabilisé est :

$$c^* = \frac{C_o}{1 + \frac{qH}{iL} \left(1 - \exp \left[- \int_0^E \frac{i}{\theta(z)D(z)} \delta z \right] \right)}$$

où c^* = concentration dans l'aquifère en régime permanent ; C_o = concentration source constante ; E = épaisseur totale de la barrière ; i = infiltration verticale à travers la barrière ; $\theta(z)$ = teneur en eau volumique à la profondeur z ; $D(z)$ = coefficient de dispersion longitudinale à la profondeur z ; L = largeur de la source dans la direction d'écoulement des eaux souterraines ; H = épaisseur de l'aquifère (de la couche de mélange) ; q = vitesse de Darcy dans l'aquifère.

A noter que pour une barrière comportant trois couches d'épaisseurs e_1, e_2, e_3 , de teneurs en eau $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ et de coefficients de dispersion D_1, D_2, D_3 , l'intégrale dans l'équation précédente donne :

$$\int_0^E \frac{i}{\theta(z)D(z)} \delta z = i \left(\frac{e_1}{\theta_1 D_1} + \frac{e_2}{\theta_2 D_2} + \frac{e_3}{\theta_3 D_3} \right)$$

J'ai également développé une solution approchée pour le problème transitoire, qui donne des différences de moins de 1% par rapport à la résolution numérique du même problème :

$$\overline{c^*(p)} = \frac{C_o}{p} \cdot \frac{\exp\left[\frac{i\varphi}{2}\right] \chi}{\left(\theta_a H p \varphi + \frac{Hq}{L} \varphi\right) \left(\exp\left[\frac{\chi}{2}\right] - \exp\left[-\frac{\chi}{2}\right]\right) + \frac{1}{2} (i\varphi + \chi) \exp\left[\frac{\chi}{2}\right] - \frac{1}{2} (i\varphi - \chi) \exp\left[-\frac{\chi}{2}\right]}$$

avec : $\varphi = \int_0^E \frac{1}{g(z)D(z)} \delta z$ et $\chi = \sqrt{i^2 \varphi^2 + 4E p \int_0^E \frac{1}{D(z)} \delta z}$

où :

$\overline{c^*(p)}$ est la concentration dans l'aquifère exprimé dans le domaine de Laplace,

p est la variable de Laplace,

θ_a est la porosité de l'aquifère.

La Figure 15 compare ces deux solutions analytiques (en régime permanent et transitoire) avec un modèle numérique, pour 3 scénarios (voir réf. 6).

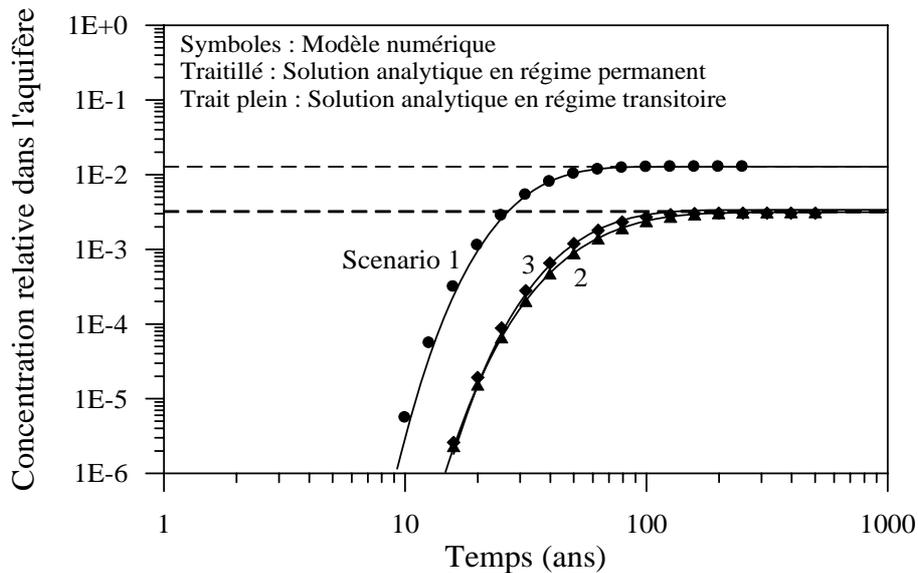


Figure 15 – Comparaison des solutions analytiques avec un modèle numérique pour le problème multi-couche.

Une limite du schéma conceptuel de la Figure 2 sur lequel se basent ces solutions analytiques est l'hypothèse d'un mélange parfait sur toute la hauteur d'une « couche de mélange » dans l'aquifère. Cette hypothèse est très fréquemment adoptée en évaluation des risques pour les eaux souterraines. Pourtant le mélange du flux provenant d'une source sus-jacente avec de l'eau de la nappe est un processus graduel qui résulte de plusieurs phénomènes parmi lesquels la variation spatiale du champ des vitesses, la dispersion latérale, les effets de densité, etc.

Une alternative à cette « couche de mélange » est fournie par une solution proposée par Galya (1987). Cet auteur a utilisé des fonctions de Green pour développer une solution pour le cas de la migration en 3 dimensions de solutés émis par une source horizontale à flux constant, située à la surface de la nappe. D'où l'idée de convoluer cette solution avec la solution pour la migration verticale à partir d'une source située au dessus de la nappe. Le modèle conceptuel qui en résulte est illustré dans la Figure 16.

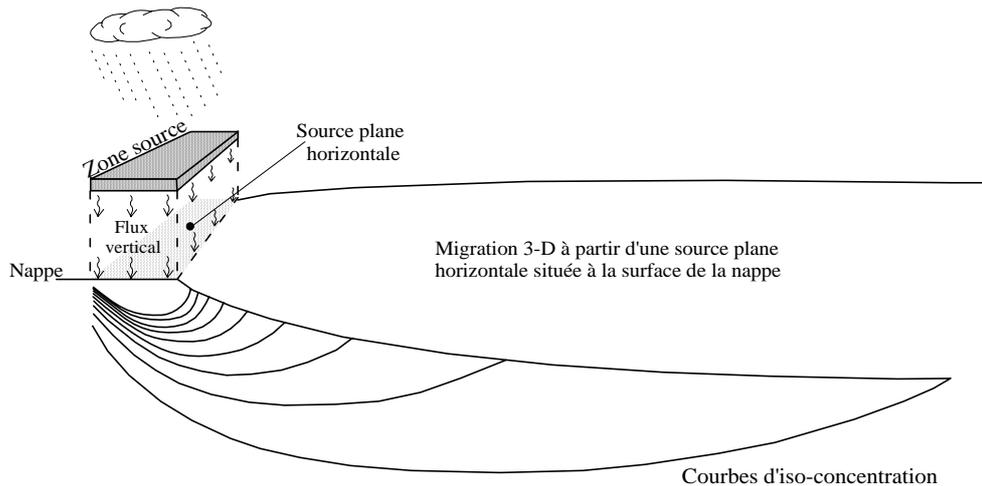


Figure 16 - Modèle conceptuel du code MISP

Cette convolution a donné lieu à un code de calcul, appelé MISP, qui est proposé en accès libre sur le site : <http://www.misp.fr>. Les conséquences de l'hypothèse d'un mélange parfait sont discutées par ailleurs dans une publication de rang A ([1]).

b) Modélisation numérique couplée transfert/chimie

Dans le cadre du projet LIXAR (voir plus haut), je réalise l'interprétation quantitative, à l'aide d'un modèle couplé transfert/chimie, des essais de percolation-diffusion réalisés dans le laboratoire de Gérard Didier à l'INSA-Lyon. Un lixiviat synthétique (une solution de CaCl_2 0.1 M) et un lixiviat réel percolent au travers de deux types de géosynthétiques bentonitiques (GSB ; l'une sodique naturelle et l'autre calcique activée sodique) avec différentes conditions de pré-hydratation du matériau (sa teneur en eau naturelle ou saturation par une solution NaCl 10^{-3}M).

Le modèle couplé est utilisé ici en tant *qu'outil d'aide à la compréhension des mécanismes* en jeu durant les essais de percolation-diffusion. Ces principaux mécanismes sont :

- le transport de solutés par de l'eau mobile (advection) au sein d'une porosité connectée,
- la diffusion de solutés au sein d'une porosité connectée ou non,

- l'échange ionique des solutés avec la surface d'échange (l'argile).

La prise en compte conjointe de ces différents mécanismes est effectuée à l'aide du code de calcul PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 1999). A noter qu'une difficulté supplémentaire tient au fait que la vitesse d'infiltration varie au cours du temps (Figure 17). La courbe de débit mesurée est discrétisée par une courbe approchée qui est intégrée au calcul PHREEQC. A noter également que PHREEQC suppose que le coefficient de diffusion est le même pour toutes les espèces chimiques. Un modèle permettant d'éviter cette hypothèse simplificatrice a été proposé par Moszkowicz et al. (1996).

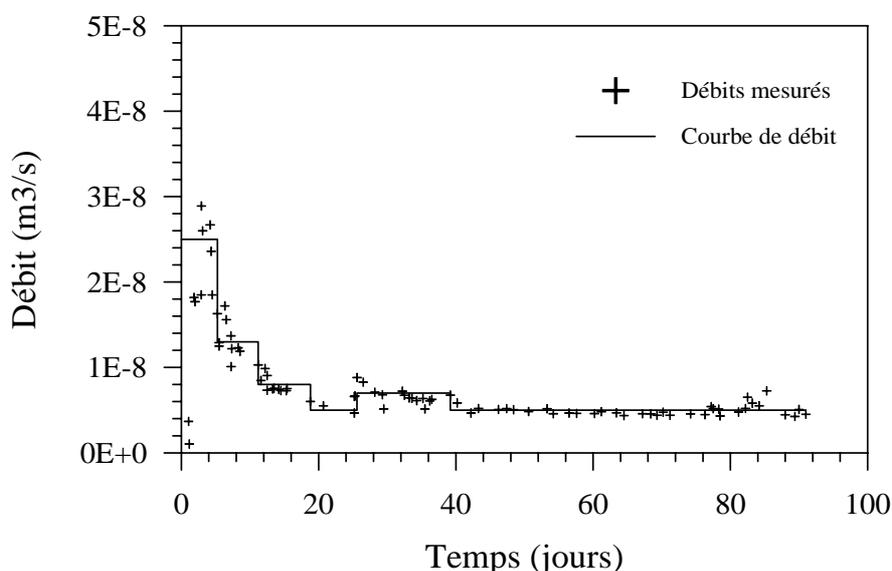


Figure 17 – Essai de percolation-diffusion 1a: courbe des débits mesurés en fonction du temps et courbe approchée

La Figure 18 montre la simulation de l'essai 1a (percolation du lixiviat synthétique CaCl_2 0.1M à travers le GSB sodique naturel sans pré-hydratation) lorsqu'on suppose que la concentration en sites d'échange de l'argile est celle basée sur la capacité d'échange cationique (CEC) mesurée (75 méq/100 g). On constate que la simulation ne reproduit pas les courbes mesurées ; le modèle prédit un échange beaucoup plus important entre le Na initialement sur la surface d'échange et le Ca dans la solution de percolation.

La Figure 19 montre le même calcul mais en supposant une capacité d'échange cationique beaucoup plus faible (d'un facteur 4). On note qu'on reproduit les tendances de manière beaucoup plus satisfaisante. Par contre, on ne reproduit pas le « plateau » de sodium observé sur le long terme. Si on suppose, comme c'est le cas dans cette simulation, qu'il n'y a qu'une seule porosité accessible, le sodium est complètement exporté au bout de 3 mois. Ce plateau est interprété comme étant lié à la présence d'eau liée dans la phase « hydratée », mise en évidence par DPAX (voir le chapitre 5.2.3), et qui est moins accessible. Il y a là un « réservoir » de sodium qui se vide lentement au cours du temps par diffusion.

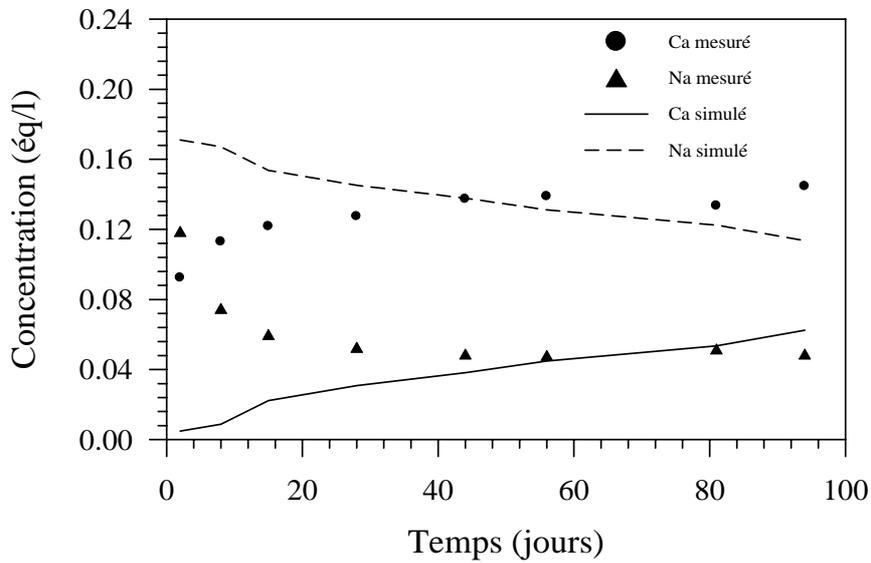


Figure 18 – Simulation de l’essai 1a en supposant que : concentration de sites d’échange = 0.9 mole/l (basé sur la capacité d’échange cationique mesurée).

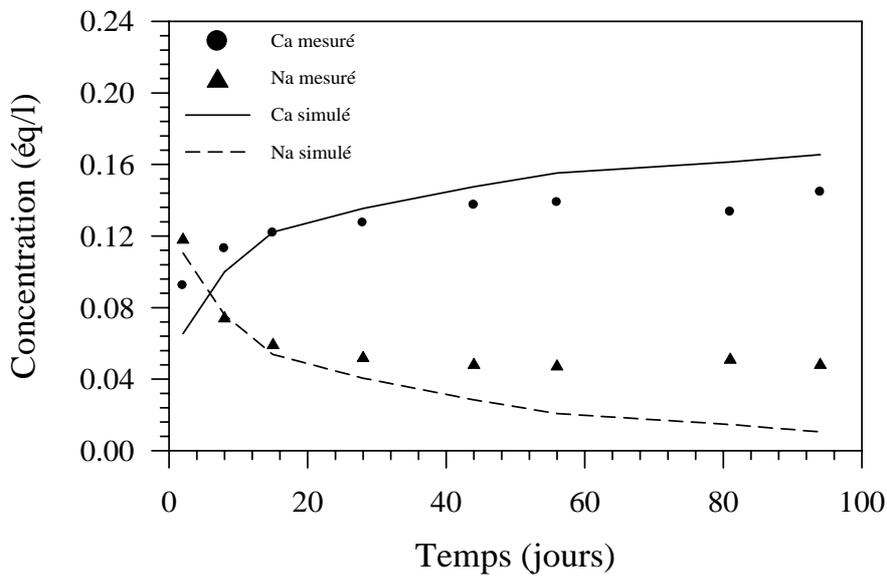


Figure 19 – Simulation de l’essai 1a en supposant : concentration de sites d’échange = 0.2 mole/l.

La Figure 20 montre le résultat d’une simulation effectuée en spécifiant un système à double porosité. Pour chaque maille du modèle, il y a une autre maille qui représente la porosité secondaire. L’échange entre les deux porosités se fait selon une cinétique de premier ordre par

le biais d'un facteur d'échange (Van Genuchten, 1985). Les valeurs de paramètres qui ont servi pour le calage de la Figure 20 sont :

- porosité mobile = 0.2
- porosité immobile = 0.5
- facteur d'échange = 0.008 hr⁻¹

A noter que cette combinaison de valeurs de paramètres n'est sans doute pas unique, mais la simulation permet néanmoins de montrer que l'hypothèse d'un système à double porosité permet d'expliquer l'observation (les mesures). Cette hypothèse est cohérente avec la présence de paquets de feuillets d'argile faiblement espacés (Section 5.2.3) dont le sodium interfoliaire est sans doute beaucoup moins disponible que le sodium présent dans la phase gel.

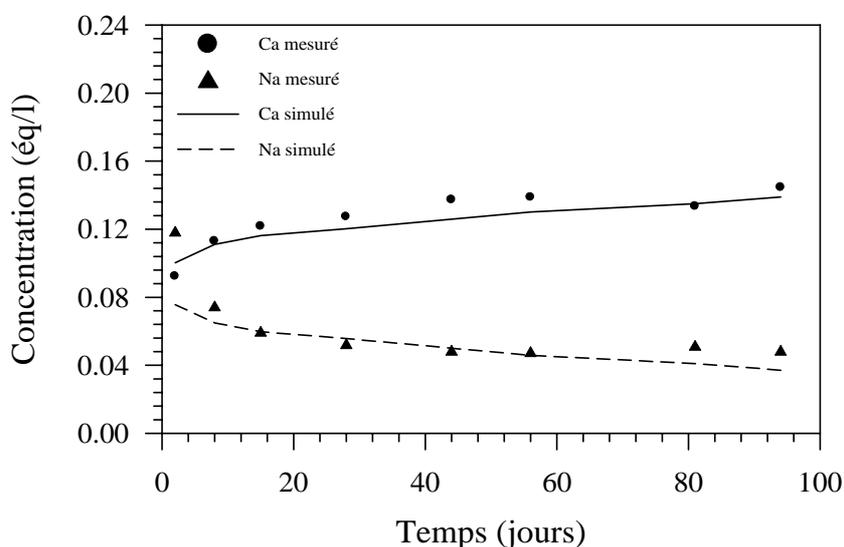


Figure 20 – Simulation de l'essai 1a avec un système à double porosité.

Perspectives de recherche

Je ne prévois pas d'effectuer dans un futur proche de travaux significatifs sur le développement de solutions analytiques appliquées au transfert de polluants. Par rapport aux problèmes auxquels je m'intéresse actuellement, l'intérêt des solutions analytiques est limité car elles ne permettent pas (ou difficilement) d'intégrer des couplages entre des transferts (hydrodispersifs) et des réactions chimiques (d'équilibre ou contrôlées par de la cinétique). A noter toutefois que les réactions telles que la précipitation/dissolution, la spéciation et l'adsorption, peuvent être prises en compte par voie analytique lorsqu'on néglige la dispersion (voir Schweich et al., 1993). Mais ce dernier mécanisme est essentiel à l'étude des milieux peu perméables.

Je participe actuellement à des travaux visant à modifier des codes couplés transfert/chimie, notamment pour prendre en compte l'influence de précipitations sur les écoulements. Les principaux développements réalisés au BRGM en matière de couplages entre le transfert de solutés inorganiques et les réactions chimiques qui influencent leur mobilité (spéciation, échanges ioniques, réactions d'oxydo-réduction, etc.) ont été réalisés en couplant le code d'écoulement et de transport hydrodispersif non-réactif MARTHE (Thiéry, 1993) avec des codes chimiques « dédiés » réalisés à l'aide d'un progiciel nommé ALLAN-NEPTUNIX. Contrairement à plusieurs modèles couplés existants, dont le code chimique est réalisé « une fois pour toutes » et qui est donc aussi exhaustif que possible (mais lourd en temps de calcul), la philosophie adoptée par le BRGM a consisté à définir le système chimique en fonction du problème traité, et à générer un code chimique spécifique pour ce système (voir Kervevan et al., 1999). La plateforme ALLAN permet de définir les réactions chimiques souhaitées, tandis que NEPTUNIX génère un code de calcul qui résout le système d'équations. Ce code est ensuite couplé avec le code MARTHE.

Dans le cadre du projet de recherche ISIS-2001 (Impact Sites de Stockage) dont j'ai eu la charge, j'ai inclus un module dont l'objectif a été de permettre de prendre en compte, dans le code de calcul MARTHE du BRGM, l'influence de précipitations minérales sur les variations de porosité (dans chaque maille du modèle), pour relier ces variations de porosité à des variations de perméabilité (au travers d'une équation de type Kozeny-Carman) et ensuite recalculer le champ d'écoulement avec le nouveau champ de perméabilité. Ce couplage entraîne donc une itération de plus par rapport au couplage transfert-chimie classique, puisqu'à chaque nouvelle chimie calculée, la porosité et la perméabilité sont réactualisées et le champ d'écoulement est recalculé. La Figure 21 illustre le fonctionnement de ce code pour le cas générique d'une colonne de matériaux surplombant un drain sableux. L'écoulement est bidimensionnel non saturé. La recharge se fait à la surface de la colonne et le drain a un exutoire situé en bas à droite de la figure. La précipitation dans le drain a été obtenue en supposant la présence d'un minéral sursaturé « générique », sans intégrer de données réelles car l'objectif était uniquement de tester le fonctionnement de la version modifiée du modèle MARTHE. On illustre ainsi que les diminutions de porosité induites par les précipitations peuvent se traduire par une diminution de l'efficacité du drain et donc à une augmentation de la hauteur de la surface libre (la hauteur de la colonne d'eau au dessus du drain).

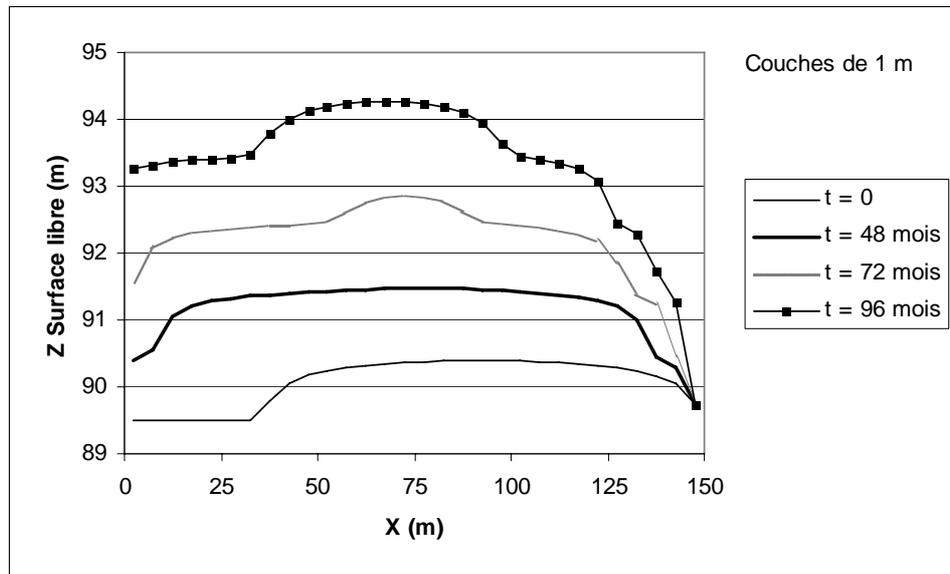


Figure 21 – Calcul de l'influence de précipitations minérales dans un drain situé à la base d'une colonne de déchets, sur la position de la surface libre (hauteur des lixiviats).

Une application évidente de ce type de modèle est l'étude du colmatage des drains situés en fond de casiers de stockage de déchets ménagers et assimilés, colmatages dont on sait qu'ils peuvent provoquer des hauteurs importantes de colonnes de lixiviats dans les casiers. Ces colonnes de lixiviats entraînent une sollicitation hydraulique accrue des systèmes d'étanchéité en fond de casier et augmentent les débits de fuite à travers le fond, qui peuvent générer des nuisances pour les eaux souterraines. Actuellement, une collaboration sur ce thème avec le Cémagref est à l'étude. Les objectifs du projet de recherche sont de :

- définir un système chimique qui reproduit les observations concernant la minéralogie des colmatages de drains en fond de casiers de stockage de déchets ménagers,
- générer un code chimique qui rend compte de ce système,
- coupler ce code chimique avec la version modifiée de MARTHE qui prend en compte l'influence des précipitations minérales sur les variations de porosité, de perméabilité, et du champ d'écoulement,
- confronter les résultats des calculs avec les observations de terrain en terme de hauteur de colonne de lixiviats.

Cette recherche devra fournir des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Sur quelle échelle de temps peut-on s'attendre à une disparition quasi-totale de la capacité de drainage ?
- Quelle est l'influence du régime d'écoulement sur la réduction de la capacité de drainage ?

- Comment influencer le système pour diminuer les risques de colmatage ?

5.3.2. Prise en compte de l'incertitude dans les prévisions

Contexte et objectifs

La prévision du transfert de polluants dans le sous-sol et les eaux souterraines comporte une part importante d'incertitude car le transfert, et l'impact, dépendent de nombreux paramètres dont certains ne sont pas facilement renseignés. L'incertitude relative à ces paramètres peut avoir essentiellement deux origines. Elle peut être due au fait qu'un paramètre présente un caractère aléatoire (en raison de la variabilité naturelle du phénomène en jeu), ou alors à la nature partielle ou incomplète de l'information disponible.

Dès lors que des décisions doivent être prises sur la base d'une estimation des risques de transfert de polluants depuis leur source vers des cibles vulnérables, il semble important que l'incertitude soit intégrée au processus décisionnel. L'objectif des travaux résumés ci-dessous est d'essayer de représenter et de propager l'incertitude de manière cohérente.

Originalité de la démarche par rapport aux travaux antérieurs

Une des originalités de la démarche adoptée par rapport à ce problème de l'incertitude consiste à se demander « à quel type d'information a-t-on affaire ? » et d'adapter le mode de représentation de l'incertitude en conséquence. En effet, différents types d'information se prêtent à différents modes de représentation de l'incertitude. On essaie donc d'éviter de faire des *a priori* concernant le mode de représentation (pour des raisons surtout de commodité méthodologique), et de promouvoir une méthodologie de représentation de l'information qui est cohérente par rapport à la nature de l'information disponible.

La grande majorité des auteurs considèrent l'incertitude en terme de probabilités. Mais la représentation de l'incertitude relative à un paramètre à l'aide d'une fonction de distribution de probabilité unique suppose en toute rigueur qu'une « population » a été échantillonnée, une analyse statistique a été effectuée, et qu'une fonction de densité de probabilité a été calée sur un histogramme de fréquences relatives. Des fonctions de distribution de probabilité dites *a priori* peuvent également être définies dans un contexte Bayésien, mais cela suppose qu'elles seront ajustées au fur et à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles. S'il n'y a pas suffisamment de données pour effectuer une véritable analyse statistique et si de nouvelles informations ne seront pas collectées, il peut être jugé préférable de se référer plutôt à la notion d'intervalle qu'à celle de fréquence. Une distribution de possibilité (ou nombre flou ; Dubois et Prade, 1988, Zadeh, 1978) associe des intervalles de valeurs à un « degré de vraisemblance » (ou degré de possibilité). Ce degré de vraisemblance traduit la notion « d'absence de surprise » que la valeur du paramètre tombe à l'intérieur de l'intervalle. Le nombre flou le plus simple (et le moins informatif) est une simple fonction « chapeau » (Figure 22) qui traduit le fait que la valeur du paramètre se situe vraisemblablement entre deux valeurs limites (il s'agit en fait d'un simple intervalle min-max).

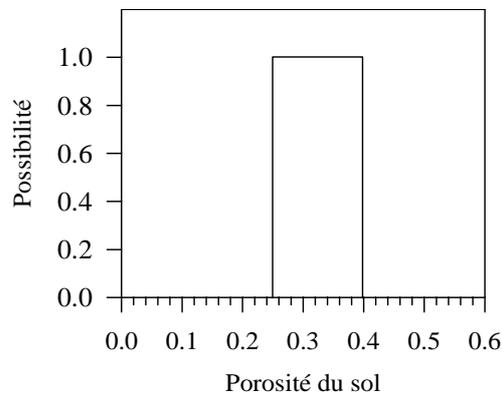


Figure 22 – Nombre flou de type intervalle min-max pour la porosité d'un sol

Mais l'investigateur ou l'expert possède souvent une information qui est plus riche que celle véhiculée par un simple intervalle min-max ; par exemple il peut savoir que certaines plages de valeurs sont plus pertinentes que d'autres. Il peut alors véhiculer cette information à l'aide d'un nombre flou tel que celui représenté par la Figure 23a). Ce nombre flou nous informe que la porosité de ce sol est vraisemblablement située entre 0.25 et 0.4 (c'est le « noyau » du nombre flou), sans qu'il y ait de préférence exprimée à l'intérieur de cet intervalle, mais que des valeurs aussi faibles que 0.15 ou aussi élevées que 0.5 (c'est le « support » du nombre flou) ne peuvent pas être totalement exclues. Des valeurs respectivement supérieures ou inférieures à ces valeurs sont considérées comme n'étant pas possibles. L'interpolation linéaire qui apparaît entre le noyau et le support est une hypothèse par défaut (on pourrait en supposer d'autres), mais en l'absence d'information supplémentaire cette hypothèse est plutôt sécuritaire.

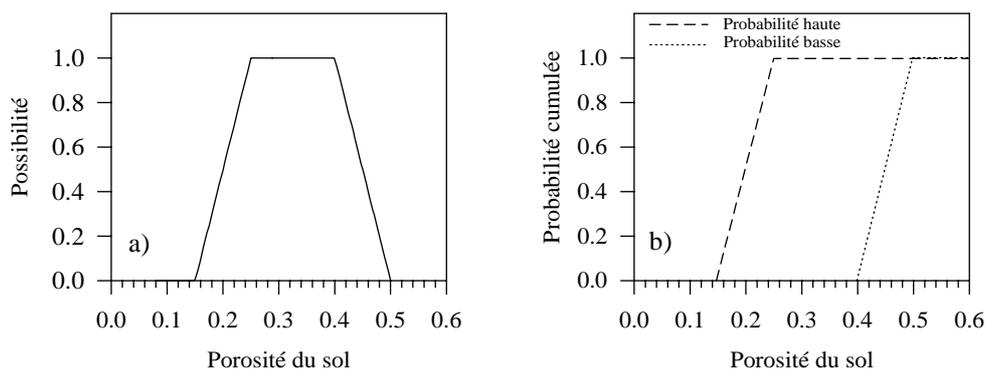


Figure 23 - a) Nombre flou de type trapézoïdal représentant l'incertitude sur la porosité d'un sol. b) Distributions de probabilité limitantes haute et basse.

A noter qu'un nombre flou peut être représenté par une famille de distributions de probabilité (voir Dubois et Prade 1992) délimitée par une distribution basse et une distribution haute (Figure 23b). La véritable distribution se situe donc quelque part à l'intérieur de cet intervalle,

mais l'information dont on dispose ne nous permet pas de dire où. En principe, on pourrait se passer d'utiliser des nombres flous dans les calculs et ne travailler qu'avec des familles de distributions de probabilité, mais cela se révèle peu commode dans la pratique, et la théorie des possibilités offre un cadre simple pour traiter ce type d'information.

L'exemple synthétique ci-dessous permet de bien illustrer les enjeux dans un contexte d'évaluation des risques lorsque des a priori sont effectués concernant le mode de représentation de l'incertitude. Supposons que l'on ait affaire à deux paramètres non reliés, A et B, dont on ne sait que peu de choses si ce n'est que A est situé entre 0 et 1, tandis que B est situé entre 1 et 2. On s'intéresse à la somme de A et B et plus particulièrement à la valeur moyenne de cette somme. Si on se place dans un cadre possibiliste, les paramètres A et B sont des intervalles de type min-max et leurs nombres flous respectifs sont représentés dans la Figure 24a). La somme de A et B est simplement l'intervalle 1-3. La valeur moyenne est l'intervalle tout entier : sur la base de l'information disponible on ne peut pas définir de préférence à l'intérieure de cet intervalle. En adoptant maintenant une approche probabiliste que l'on pourrait qualifier de « naïve », on supposera que les paramètres A et B sont représentés par des fonctions de densité de probabilité uniformes (voir les fonctions de densité de probabilité et les distributions de probabilité associées en Figure 24b). Dans ce cas la somme de A et B est une fonction de densité de probabilité triangulaire de valeur moyenne 2 et de valeurs minimum et maximum 1 et 3 respectivement.

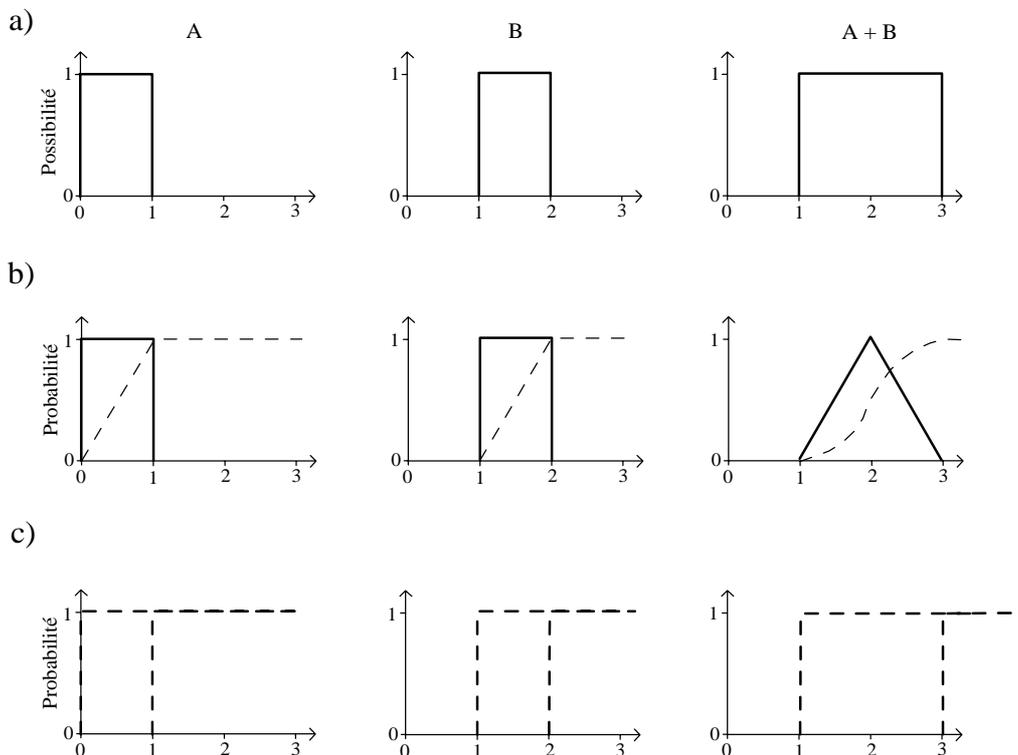


Figure 24 - Illustration de la différence entre un calcul a) possibiliste, b) probabiliste « naïf », et c) probabiliste cohérent, pour un cas simple décrit dans le texte.

On constate donc que le choix a priori de distributions de probabilité aboutit à un résultat beaucoup plus « précis » que dans le cas possibiliste. Mais cette précision est artificielle car on a supposé l'équirépartition des probabilités alors que cette hypothèse n'était pas justifiée par l'information disponible. Dans un cadre probabiliste, et compte tenu de l'information supposée pour cet exemple, il faudrait travailler avec toutes les lois de probabilité envisageables et prendre l'enveloppe pour définir les intervalles de probabilité. On aboutit ainsi (Figure 24c) au même résultat qu'avec l'approche possibiliste, mais de manière moins directe.

La plupart des précédents auteurs ont généralement d'abord choisi un cadre méthodologique et ont ensuite décidé comment ils voulaient représenter l'incertitude affectant les paramètres de leurs modèles de transfert. Dans le domaine de l'évaluation de la sûreté nucléaire par exemple (Prado et al., 1999, Bonano et al., 1990), on choisit généralement de se placer dans un cadre probabiliste en supposant que les variables en question sont des variables aléatoires et on assigne des fonctions de distribution de probabilité à ces variables en s'appuyant éventuellement sur du jugement d'expert (voir aussi Labieniec et al., 1997).

D'autres auteurs (par exemple Dou et al., 1995, Freissinet et al., 1998) ont adopté une approche par nombres flous. La principale originalité de la démarche scientifique adoptée dans le cadre de mes travaux sur l'incertitude en évaluation des risques a été d'essayer de combiner ces deux modes de représentation de l'incertitude (probabiliste et possibiliste) dans une même estimation des risques de transfert ou d'exposition.

Résumé descriptif

Mes travaux sur la prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation des risques de transfert ont jusqu'à présent consisté à combiner les modes de représentation probabiliste et possibiliste dans les calculs. J'ai développé, en collaboration avec l'Université Paul Sabatier de Toulouse, une méthode (appelée hybride) qui permet de combiner des probabilités et des possibilités dans l'évaluation des risques. Sans aller dans les détails (voir l'article présenté en Annexe V), cette méthode combine l'échantillonnage aléatoire des fonctions de distribution de probabilité (méthode Monte Carlo) avec le calcul en nombres flous (par la méthode dite des alpha-coups).

L'application de cette méthodologie à un cas réel de contamination au plomb sur un site industriel a permis d'illustrer son potentiel dans un contexte d'aide à la décision. La carte de la Figure 25 représente le « degré de possibilité » de dépasser une dose jugée « tolérable » (ici $1 \mu\text{g}/\text{j kg}^{-1}$) suite à une exposition par le biais de la consommation de légumes.

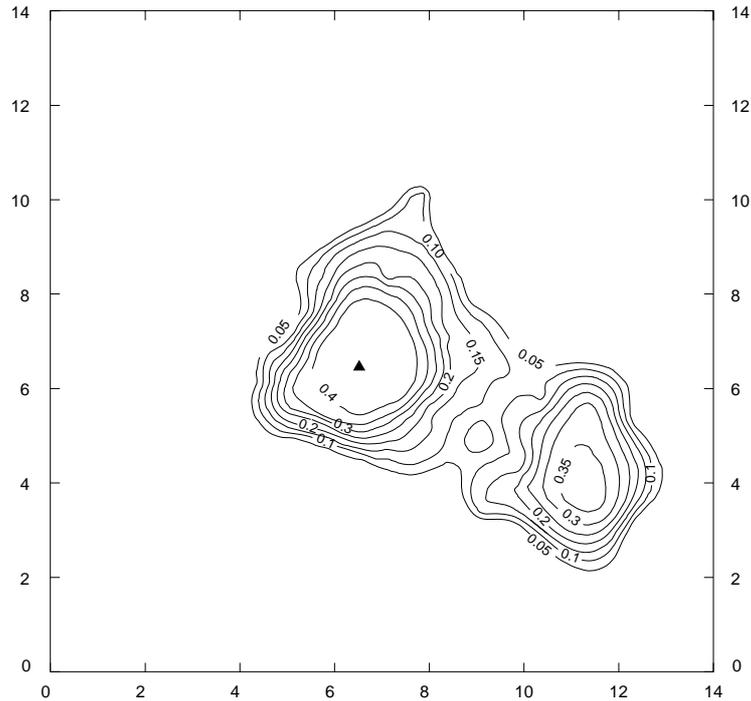


Figure 25 – Carte de la possibilité de dépasser une dose jugée tolérable ($1 \mu\text{g/j kg}^{-1}$)
Triangle = cheminée d’usine. Graduation = km.

Ce type de carte peut aider à décider dans quelle zone restreindre les pratiques culturales. Des limites de possibilité de dépassement de 0.1 ou 0.2, par exemple, se traduiraient par une restriction sur la culture de légumes destinée à la consommation humaine sur une superficie d’environ 20 kilomètres carrés. A noter qu’exiger une possibilité de zéro peut, dans de nombreuses situations, être trop strict et se traduire par des restrictions d’usage sur des superficies de terrain trop importantes, ou par des coûts de réhabilitation trop élevés. Comme le calcul en nombres flous est plus sécuritaire que le calcul Monte Carlo (voir [4]), les critères de tolérance en terme de possibilités ne doivent pas être aussi stricts qu’en terme de probabilités résultant d’une analyse Bayésienne.

Mais il appartiendra toujours à l’autorité sanitaire compétente (ou au décideur), de dire quel degré de possibilité (ou de probabilité) de dépassement de la valeur guide est acceptable. Les méthodes proposées contribuent donc à clarifier les rôles : le scientifique aide le décideur à prendre les moins mauvaises décisions compte tenu de l’information dont il dispose. Mais dans le domaine des risques environnementaux, représenter les risques sous la forme de valeurs précises n’est pas cohérent par rapport à cette information. Il y a toujours une part d’incertitude dont nous devons tenir compte, mais il appartient au décideur de dire quel degré d’incertitude il est prêt à tolérer compte tenu notamment des attentes sociétales.

Perspectives de recherche

La méthode hybride développée dans nos travaux précédents est une méthode parmi d'autres pour combiner des probabilités et des possibilités dans une même évaluation des risques. Une thèse est actuellement en cours à l'Université Paul Sabatier de Toulouse sous la Direction de Didier Dubois, qui vise à explorer d'autres voies envisageables et évaluer leurs domaines de validité et d'application respectifs. Une voie qui paraît particulièrement intéressante est celle des fonctions de croyance (Shafer, 1976) qui permet d'attribuer des probabilités, non pas à des valeurs ponctuelles (des singletons) mais à des intervalles de valeurs (appelés éléments focaux). Cette théorie recouvre celles des probabilités et des possibilités.

Un aspect qui ne sera pas abordé par le thésard, mais qui sera exploré par le BRGM en collaboration avec des organismes spécialisés dans le domaine des sciences sociales, est la manière dont la perception sociale du risque peut influencer l'application pratique des méthodologies proposées. Si d'un point de vue scientifique, la méthode hybride présente des avantages clairs (elle permet de représenter l'incertitude liée aux paramètres d'exposition de manière cohérente par rapport à l'information dont on dispose dans la pratique), son application dans un contexte décisionnel sera influencée par la manière dont le risque est perçu par les différents acteurs de la problématique. On peut citer : l'administration représentée par les agents de la DRIRE et du Ministère, les industriels propriétaires des sites pollués, les bureaux d'étude, les associations locales de défense des riverains, les médias.

Des travaux seront réalisés pour :

- explorer comment ce type de représentation du risque peut être perçu par ces acteurs,
- examiner comment adapter les modes de représentation du risque pour améliorer la communication sur le risque.

Il s'agit d'essayer d'éviter des erreurs comme celles qui ont pu être commises dans le passé, avec notamment la présentation de valeurs d'excès de risque individuel (ERI) autour de sites industriels, que les médias ont pu utiliser à mauvais escient en les multipliant par la population environnant les sites pour en déduire le nombre de cancers « prévisibles » au sein de cette population.

Références citées

Ait Saadi, L., Cazaux, D. and Didier, G. (2002) - Evaluation of homogeneity and potential tightness of shallow geological substratum and clay liner by geophysical methods. ASTM, PA (Sous presse).

AFNOR (1998) - Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapps, ou artificiellement reconstitués. Infiltrmètre à double anneau, de type ouvert. Norme AFNOR NF X 30-418. Association Française de Normalisation, Paris.

AFNOR (1999) - Détermination de la perméabilité d'une formation géologique en place, de matériaux rapps, ou artificiellement reconstitués. Infiltrmètre à simple ou double

- anneau, de type fermé. Norme AFNOR NF X 30-420. Association Française de Normalisation, Paris.
- AFNOR (2001) - Détermination du coefficient de perméabilité d'un terrain par essai à charge variable en forage fermé. AFNOR X 30-425. Association Française de Normalisation, Paris.
- Albéric, P., Viollier, E., Jézéquel, D., Grosbois, C., Michard, G. (2000) - Interactions between trace elements and dissolved organic matter in the stagnant anoxic deep layer of a meromitic lake. *Limnology and Oceanography*, 45(5) :1088-1096.
- Bertrand, L., Larrose, P. and Ouvry, J.-F. (1995) - Amélioration des perméamètres PANDA et PRECI. Etude et réalisation de deux prototypes. Rapport BRGM R 38260, Orléans, France.
- Bonano, E., Hora, S., Keeney, R., and von Winterfeldt, D. (1990) - "Elicitation and use of expert judgement in performance assessments for high-level radioactive waste repositories." *Sandia National Laboratories Report SAND89-1821*, Albuquerque, New Mexico.
- CFG, (2001) - Recommandations Générales pour la Réalisation d'Etanchéité par Géosynthétiques Bentoniques. Comité Français des Géosynthétiques, fascicule 12.
- Comeaga, L. (1997) - Dispositifs d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques dans les centres de stockage de déchets. Thèse de l'INSA-Lyon.
- Daniel, D.E. (1989) - In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering* 115, no. 9: 1205-1226.
- Disnar, J.R. Guillet B., Keravis D., Di-Giovanni C., Sebag D. (2003) - Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis : scope and limitations. *Organic Geochemistry* 34 : 327-343.
- Dou, C., Woldt, W., Bogardi, I., and Dahab, M. (1995) - "Steady-state groundwater flow simulation with imprecise parameters." *Water Resour. Res.*, 31(11), 2709-2719.
- Dubois, D., et Prade, H. (1988) - Possibility theory. New York Plenum Press, 263 pp.
- Dubois, D., and Prade, H. (1992) - When upper probabilities are possibility measures. *Fuzzy Sets and Systems*, 49, 95-74.
- Elrick, D.E., Parkin, G.W. Reynolds, W.D., and D.J. Fallow (1995) - Analysis of early-time and steady state single-ring infiltration under falling head conditions. *Water Resour. Res.* 31, no. 8: 1883-1993.
- Fallow, D.J., Elrick, D.E., Reynolds, W.D., Baumgartner, N., and G.W. Parkin (1994) - Field measurement of hydraulic conductivity in slowly permeable materials using early-time infiltration measurements in unsaturated media. In : *Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil*, ASTM STP 1142. Daniel and Stephen eds., ASTM, Philadelphia, 375-389.
- Freissinet, C., Erlich, M., and Vauclin, M. (1998) - A fuzzy logic-based approach to assess imprecision of soil water contamination modelling. *Soil & Tillage Research*, 47, 1-17.
- Gaboriau, H. (1998) - Propriétés des bentonites. GEO-BENTO 1998, Paris, 2-3 février, Ed. Insatech, pp.2-12.

- Galya, D. (1987) - A horizontal plane source model for groundwater transport. *Ground Water*, v.25, no.6, pp.733-739.
- Green, W.H., and G.A. Ampt. (1911) - Studies on soil physics. Part I – The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.* 4: 1-24.
- Guyonnet, D., Norotte, N., Touze-Foltz, N., Pons, C.-H., Clinard, Ch., Didier, G., Gaucher, E., Gaboriau, H. (2003) - LIXAR : Interactions Lixivats-Argiles - Rapport Final. Rapport BRGM RP-52449-FR. 153 pp., 2003.
- Guyonnet, D., Amraoui, N., Kara, R. (2000) - Analysis of transient data from infiltrometer tests in fine-grained soils. *Ground Water* Vol.38 No.3, pp.396-402.
- JO (1992) - Arrêté du 12 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilités pour les installation nouvelles. *Journal Officiel de la République Française* du 30 mars 1993.
- JO (1997) - Arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installation de stockage de déchets ménagers et assimilés. *Journal Officiel de la République Française* du 2 octobre 1999.
- JOCE (1999) - Directive du Conseil No 1999/31/CE du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets. *Journal Officiel du Conseil de l'Union Européenne* JOCE No L 182 du 16 juillet 1999.
- Kervevan, C., Baranger, P., Thiery, D. (1999) - Une approche originale de la modélisation couplée hydrodynamique-transport-chimie basée sur l'utilisation de simulateurs chimiques spécifiques (SCS). Dans : *Stabilisation des Déchets et Environnement 99* - Lyon Villeurbanne - France - 13-16/04/1999, p. 158-162.
- Labieniec, P. Dzombak, D., and Siegrist, R. (1997) - "Evaluation of uncertainty in a site-specific risk assessment." *J. Envir. Engrg.*, ASCE, 123(3), 234-243.
- MEDD (2002) - Guide Guide de recommandations à l'usage des tiers-experts pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive de centre de stockage.
- Moszkowicz, P., Pousin, J., Sanchez, F. (1996) - Diffusion and dissolution in a reactive porous medium : Mathematical modelling and numerical solutions. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 66, 377-389.
- Parkhurst, D., Appelo, C. (1999) - User's guide to PHREEQC (Version 2) – A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGS Water-Resources Investigations Report 99-4259, Denver, USA.
- Petrov, R., Rowe, R.K. (1997) - Geosynthetic clay liner (GCL) – chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performances. *Can. Geotech. J.* 34 : 863-885.
- Prado, P., Draper, D., Saltelli, S., Pereira, A., Mendes, B., Eguilior, S., Cheal, R., Tarantola, S. (1999) - "Gesamac: Conceptual and computational tools to tackle the long-term risk from nuclear waste disposal in the geosphere." *European Commission Report* EUR 19113 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg, 87 pp.

- Rowe, R.K. et Booker, J.R. (1987) - An efficient analysis of pollutant migration through soil. In : Numerical Methods for transient and coupled problems, Ch.2, pp.13-42, Lewis, Hinton, Bettess and Schrefler (Eds.), John Wiley and Sons Ltd.
- Rowe, R.K. et J.R. Booker (1985) - 1-D pollutant migration in soil of finite depth. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111, no.4, 479-499.
- Ruhl, J., Daniel, D. (1997) - Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 4: 367-381.
- Schweich, D., Sardin, M., Jauzein, M. (1993) - Properties of concentration waves in presence of nonlinear sorption, precipitation/dissolution, and homogeneous reactions. 1. Fundamentals. *Water Resources Research*, 29 (3) : 723-733.
- Shafer, G. (1976) – A mathematical theory of evidence. Princeton University Press, New Jersey, USA.
- Thiéry, D. (1993) - Modélisation des aquifères complexes. Prise en compte de la zone non saturée et de la salinité. Calcul des intervalles de confiance. *Hydrogéologie*, no.4, 325-336.
- Touze-Foltz (2001) - Modélisation des transferts advectifs dans les étanchéités composites de centres de stockage de déchets. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Van Genuchten, T. (1982) - Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation. *United States Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1661*.
- Van Genuchten, M. (1985) – A general approach for modeling solute transport in structured soils. *IAH Memoirs*, v. 17 : 513-536.
- Zadeh, L. (1978) - Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 1, 3-28.

6. Activités en enseignement

1997 - 2000 Ecole Supérieure de l'Énergie et des Matériaux (ESEM), Orléans (France)

J'ai été, pendant 3 ans, Professeur Associé à mi-temps (PAST) dans le cadre de l'année spéciale IGE (Ingénieur Génie de l'Environnement) de l'ESEM (voir l'Annexe IV). Cette année spéciale est une formation reconnue par la "Commission des titres", délivrant à des jeunes ingénieurs diplômés un titre complémentaire d'Ingénieur en Génie de l'Environnement. Elle est également ouverte aux titulaires d'un DEA, d'un DESS ou équivalent. Elle mène alors à un diplôme d'université en Génie de l'Environnement. Dans le cadre de cette année spéciale j'étais responsable de la coordination de deux modules d'enseignement :

- Prévention et traitement des pollutions,
- Etudes d'impact, transferts de pollution.

L'année spéciale faisant appel à de nombreux intervenants externes, cette coordination consistait à s'assurer de la cohérence entre les différentes interventions (en particulier à éviter les doublons). Dans le cadre de ces modules, j'avais la charge d'enseigner les cours relatifs à :

- l'hydrogéologie : introduction aux écoulements de fluides en milieu poreux, équations de bilan de masse en écoulement, interprétation des pompages d'essai, zone non saturée, écoulements multiphasiques, exercices d'application sur ordinateur...,
- la géochimie des eaux : introduction à la thermodynamique des solutions aqueuses, prélèvements sur le terrain et conditionnements, notions de balance ionique et de correction d'activité, principes de fonctionnement des modèles géochimiques, applications sur ordinateur à l'aide du code MINTEQ...,
- la migration des polluants dans le sous-sol : mécanismes de migration et d'atténuation (convection, diffusion-dispersion, interaction liquide-solide, dégradation), équations de bilan de masse, exemples d'application, résolution des équations de migration par solutions analytiques et numériques...,
- le stockage des déchets : concepts de stockage dans une logique d'impact, critères d'admission des déchets, aménagements des sites (barrières argileuses, matériaux synthétiques, réseaux de drainage, notion d'équivalence), gestion des flux polluants : traitement des lixiviats, collecte et élimination/valorisation des biogaz....

J'étais également responsable de l'examen final qui clôturait ces deux modules, du suivi et de l'évaluation des projets (voir Annexe IV), et j'aidais à la recherche de stages. L'examen final consistait généralement en un traitement de cas semi-réel de diagnostic de site pollué : sur la base de l'historique du site, le candidat devait élaborer un programme de diagnostic en vue d'un éventuel traitement du site. Pour compléter ma charge d'enseignement (96 heures), j'enseignais également un cours de deuxième année à l'ESEM sur la géologie des matériaux

utilisés dans l'industrie. Le responsable de la formation IGE, M. Jean **Lévieux** (voir Annexe I), a été remplacé en 2000 par Mme. Lydie **Leforestier**.

2002 **Ecole National de la Santé Publique (Rennes)**

J'ai été sollicité pour la première fois en 2002 par l'ENSP pour délivrer un cours de 3 heures sur les modèles en hydrologie et hydrogéologie, à des étudiant destinés à devenir des inspecteurs de la santé publique. Ils sont intéressés par ces aspects dans le cadre de l'évaluation des volets sanitaires des dossiers d'études d'impact. Responsable de la formation : Rémi **Demillac**.

1999-2002 **Ecole Centrale, Nantes et Lyon**

Depuis 1999, je suis sollicité dans le cadre d'une semaine thématique « Géo-Environnement » destinée aux ingénieurs de 3^{ème} année des Options Génie Civil des Ecoles Centrales de Lyon et de Nantes. Je délivre un cours de trois heures sur la caractérisation des barrières minérales utilisées pour le confinement des sites de stockage de déchets. Un accent particulier est porté sur la notion « d'équivalence » en étanchéité passive. Responsable de la formation : Gérard **Pironneau**.

1995 - 1997 **Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**

Dans le cadre du cycle post-grade "Géologie appliquée à l'ingénierie et à l'environnement", j'ai été chargé pendant trois années d'un cours de seize heures sur la migration des polluants dans le sous-sol. Je ne suis plus sollicité pour cet enseignement depuis que ce module est traité par l'Ecole Polytechnique de Montréal (collaboration entre quatre organismes : EPFL, Ecole des Mines de Paris, Université de Liège, EPM). Responsable de la formation : Aurèle **Parriaux**.

2002 **Stage EFE (Edition Formation Entreprise), Paris**

Formation sur les bilans hydriques de décharges, dans le cadre d'une formation intitulée « *Décharges et Stockages. Quels enjeux juridiques et techniques ?* ». Ce stage s'adresse principalement à des ingénieurs travaillant en bureau d'étude ou directement pour les exploitants de sites de stockage.

1995 - 2002 **Groupe BRGM, Orléans (France)**

Depuis 1995, j'ai eu la charge de nombreux stages proposés par BRGM-Formation :

- Présentation générale de la méthodologie nationale de l'Evaluation Détaillée des Risques (EDR) liés aux sites potentiellement pollués.

Je délivre cet enseignement de 3 heures en « binôme » avec un représentant du Ministère chargé de l'Environnement. Il s'adresse aux représentants de l'administration (DRIRE), aux ingénieurs des bureaux d'étude, et aux industriels.

- Calcul des bilans hydriques de décharge à l'aide du logiciel MOBYDEC (que j'ai développé).

Présentation des différents termes du bilan hydrique (pluie, évapo-transpiration, ruissellement, infiltration, etc.), illustration de l'importance du pas de temps de calcul, présentation du logiciel de calcul, application à des cas concrets.

- Mesures de perméabilité dans les matériaux argileux.

Principes d'écoulements dans les matériaux peu perméables. Matériels de mesure. Eléments perturbateurs : évaporation, gonflement. Importance du gradient hydraulique. Mesure du profil d'humidité après essai.

- Réhabilitation des anciens sites de stockage de déchets ménagers.

Diagnostic de site pour dimensionner la réhabilitation. Gestion des flux liquides (lixiviats) et gazeux (biogaz). Dimensionnement des couvertures en fonction d'un objectif de gestion des flux. Suivi des évolutions (tassements, fuites). Réseau de surveillance des eaux souterraines.

- Confinement des sites de stockage de déchets.

Aspects réglementaires, principes pour la conception et le dimensionnement des couvertures, barrières passives (caractérisation, mise en œuvre, contrôle), barrières actives (étanchéité-drainage), équivalence (principes d'équivalence en étanchéité).

7. Liste des publications

☞ Publications à comité de lecture de « rang A »

1. Guyonnet, D., Neville, C., Seguin, J.-J. (2003) – On analytical solutions for screening calculations of solute transport in groundwater. *Journal of Contaminant Hydrology* (soumis).
2. Norotte, V., Didier, G., Guyonnet, D., Gaucher, E. (2004) – Evolution of GCL hydraulic performance during contact with landfill leachate. *Advances in Geosynthetic Clay Liner Technology : 2nd Symposium, ASTM STP 1456*, R.E. Mackey and K. Von Maubeuge (Eds.), ASTM International, West Conshohocken, PA. (accepté).
3. Guyonnet, D., Gourry, J.-C., Bertrand, L., Amraoui, N. (2003) – Heterogeneity detection in an experimental clay liner. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pp. 149-160.
4. Guyonnet, D., Bourguine, B., Dubois, D., Fargier, H., Côme, B., Chilès, J.-P. (2003) – Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering* 129, 68-78.
5. Freyssinet, P., Piantone, P., Azaroual, M., Itard, Y., Clozel-Leloup, B., Guyonnet, D., Baubron, J.-C. (2002) – Chemical changes and leachate mass balance of municipal solid waste bottom ash submitted to weathering. *Waste Management*, 22, pp. 159-172.
6. Guyonnet, D., Perrochet, P., Côme, B., Seguin, J.-J., Parriaux, A. (2001) – On the hydro-dispersive equivalence between multi-layered mineral barriers. *Journal of Contaminant Hydrology* 51, pp. 215-231.
7. Guyonnet, D., Amraoui, N., Kara, R. (2000) – Analysis of transient data from infiltrimeter tests in fine-grained soils. *Ground Water* Vol.38 No.3, pp.396-402.
8. Guyonnet, D., Côme, B., Perrochet, P., Parriaux, A. (1999) – Comparing two methods for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering*, 125 :7, 660-666.
9. Guyonnet, D., Seguin, J.-J., Côme, B., Perrochet, P. (1998) – Type curves for estimating the potential impact of stabilized waste storage facilities on groundwater. *Waste Management & Research*, 16 : 5 : 467-475.
10. Guyonnet, D., Didier-Guelorget, B., Provost, G., Feuillet, C. (1998) – Accounting for water storage in landfill leachate modelling. *Waste Management & Research*, 16 : 3 : 285-295.
11. Guyonnet, D., Côme, B., Sauty, J.P. (1996) - Reply to a comment by P. Perrochet on "Type curves for estimating breakthrough times of pollutants with first-order decay". *Hydrogeology Journal*, v. 4, no. 3. pp. 107-110.
12. Guyonnet, D., Côme, B., Sauty, J.-P. (1995) - Pollutant breakthrough type curves with first-order decay. *Hydrogeology Journal*, Vol. 3 No.4.

13. Löw, S., Guyonnet D. (1994) - Critical parameters controlling pollutant migration from waste disposal sites: field investigations and influence on aquifer pollution. *Eclogae Geologicae Helveticae* Vol. 87 no 2.
14. Guyonnet, D., Mishra, S., McCord, J. (1993) - Estimating the volume of porous medium investigated during slug tests. *Journal of Ground Water*, Vol. 31, n° 4, p. 627-633.
15. Mishra, S., Guyonnet, D. (1992) - Analysis of observation-well response during constant-head testing. *Journal of Ground Water*, vol. 30, n° 4, p. 523-528.
16. Guyonnet, D. (1991) - Numerical modeling of effects of small-scale sedimentary variations on groundwater discharge into lakes. *Limnology and Oceanography*, vol. 36, n° 4, pp. 787-796.

☛ Publications à comité de lecture (non classées « rang A »)

17. Guyonnet, D., Darmendrail, D. (2002) – Le stockage des déchets ultimes. *Revue du Palais de la Découverte* No.300.
18. Guyonnet, D., Côme, B., Ouvry, J.F., Barrès, M. (1998) - Concepts de stockage de déchets. Un essai de définition dans une logique d'impact. *Déchets-Sciences et Techniques*, no. 9 : 39-44.
19. Guyonnet, D., Seguin, J.J., Côme, B. (1997) - Solutions analytiques pour l'évaluation simplifiée de l'impact des sites de stockage de déchets sur les eaux souterraines. *Déchets-Sciences et Techniques* no. 5 : 9-16.
20. Côme, B., Guyonnet, D., Magnouni, S. (1997) - Apports potentiels de la théorie des possibilités à l'évaluation des risques environnementaux. *Déchets Sciences & Techniques*, no. 7 : 40-46.
21. Guyonnet, D., Didier-Guelorget, B., Provost, G., Feuillet, C. (1996) - Interprétation des volumes d'effluents liquides collectés sur deux sites de stockage de déchets ménagers et assimilés. *Techniques Sciences et Méthodes*, no. 12, 59-67.
22. Guyonnet D. (1988) - La structure de la montagne du Grand Crédo (Ain, France). *Arch. Sci.*, vol. 41, fasc. 3.

☛ Conférences internationales

23. Guyonnet, D., Clinard, Ch., Didier, G., Duquennoi, Ch., Gaboriau, H., Gaucher, E., Hébé, I., Norotte, V., Pons, C.-H., Touze-Foltz, N. (2003) – A multiple-scale investigation of GCL interaction with landfill leachate. *SARDINIA-2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium* (Th. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann Eds.). S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy).
24. Guyonnet, D., Nowak, C., Riolland, H., Dictor, M.-C., Galle, P., Joublain, F. (2003) – Emission of soluble constituents from MSW following anaerobic degradation. *SARDINIA-2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium* (Th. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann Eds.). S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy).

25. Didier, G., Norotte, V., Guyonnet, D., Gaucher, E. (2003) – Evolution of GCL hydraulic performance during contact with leachate. ASTM Symposium on Advancements in Geosynthetic Clay Liner Testing Methods. Denver, Colorado, Juin 20 2003.
26. Guyonnet, D. (2003) – Uncertainties in risk assessments : combining probabilities and possibilities. CONSOIL, 8th International Conference on Contaminated Soil. Gand, Belgique, 12-16 mai 2003.
27. Ouvry, J.-F., Pecci, R., Guyonnet, D. (2002) – The equivalence between multi-layer barriers. 7^{ème} Conférence Internationale sur les Géosynthétiques. Comité Français des Géosynthétiques. 22-27 Septembre 2002, Nice.
28. Guyonnet, D. (2002) – Uncertainties following site characterisation and how to incorporate them in the decision-making process. NICOLE Network meeting, Avril 18-19, Pise (Italie).
29. Guyonnet, D., Gourry, J.-C., Bertrand, L., Amraoui, N., Florentin, P., Frémaux, F. (2001) – Investigation of an experimental clay liner with controlled heterogeneities. Proceedings SARDINIA-2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium (Th. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann Eds.). S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy), Vol. 3, pp. 123-131.
30. Hjelmar, O., Van der Sloot, H., Guyonnet, D., Rietra, R., Brun, A., Hall, D. (2001) – Development of acceptance criteria for landfilling of waste : an approach based on impact modelling and scenario calculations. Proceedings SARDINIA-2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium (Th. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann Eds.). S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy), Vol. 3, pp. 711-721.
31. Barina, G., Budka, A., Gisbert, T., Guyonnet, D., Puglierin, L., Cirino, N. (2001) – Identification and assessment of leachate recirculation effects at a real-scale landfill. Proceedings SARDINIA-2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium (Th. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann Eds.). S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy), Vol .2, pp. 95-104.
32. Auboiroux, M., Guyonnet, D., Touray, J.-C., Bergaya, S., 1999 - A comparative analysis of cation exchange in GCL and compacted clay liners in contact with landfill leachate. Proceedings SARDINIA-1999, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium (Th. Christensen, R. Cossu and R. Stegmann Eds.). S. Margherita di Pula, Cagliari (Italy), Vol. 3, pp. 189-196..
33. Guyonnet, D., Côme, B. (1999) – Waste stabilization : a component of the “ equivalence ” between storage systems of different designs ? Conférence STAB&ENV 1999, (Méhu, J., Keck, G., Navarro, A. Eds). Société Alpine de Publication, Villeurbanne, France.
34. Guyonnet, D., Côme, B. (1997) - Towards a tool for reactor landfill optimization. SARDINIA-97, S. Margherita di Pula (Italie), 13-17 Octobre 1997.
35. Guyonnet, D. (1996) – Restoration of an existing landfill site : a French example. ACTIM Conference, Bangkok, December 12-13.
36. Guyonnet, D., Côme, B. (1995) - Type curves for estimating times of first pollutant arrival through low permeability barriers. SARDINIA-95, Cagliari, Sardinia.

37. Löw, S., Guyonnet D., Lavanchy J.M., Voborny O., Vinard P. (1994) - From field measurements to effective hydraulic properties of a fractured aquitard. A case study. International Symposium IAHR "Transport and Reactive Processes in Aquifers", Zürich, Suisse.
38. Guyonnet, D., Lavanchy, J.M., Vomvoris, S., Löw, S., Kelley, V. (1993) - Evidence for preferential pathways for flow from crosshole hydraulic tests and a pilot fluid logging test. Symposium The Hydrogeology of Hard Rock, Oslo, Norvège.
39. Guyonnet, D., Löw, S., Lavanchy, J.M., Blümling, P. (1993) - Les logs de conductivité électrique pour caractériser les sites de stockage de déchets toxiques. Symposium GEOCONFINE-93, Montpellier (France).

✦ Conférences nationales et colloques

40. Guyonnet, D., Baudrit, C., Bourguin, B., Dubois, D., Fargier, H., Côme, B., Chilès, J.-P. (2002) - Incertitudes en évaluation des risques : une approche hybride. Première rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués : bilan et perspectives. Paris, 12-13 décembre 2002. Organisé par l'ADEME.
41. Chartier, R., Amraoui, N., Baranger, P., Delos, A., De Windt, L., Duro, L., Goblet, P., Guyonnet, D., Jordana, S., Kervevan, Ch., Kimmel, M. (2002) - Impact de stériles miniers sur les eaux souterraines : application de plusieurs modèles de transport couplé en hydrogéochimie. Première rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués : bilan et perspectives. Paris, 12-13 décembre 2002. Organisé par l'ADEME.
42. Bour, O., Rollin, C., Baroudi, H., Garcia, M., Emonet, A., Bues, M., Le Thiez, P., Blondel, Th., Schwartz, J., Benslimane, F., Guyonnet, D. (2002) - Approche Méthodologique de la modélisation du transport des HAP dans les sols et les eaux. Première rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués : bilan et perspectives. Paris, 12-13 décembre 2002. Organisé par l'ADEME.
43. Guyonnet, D., Bourguin, B., Chilès, J.-P., Fargier, H., Côme, B. (2001) - Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition : cas d'un site pollué par du cadmium. Journée scientifique de l'Industrie Minérale et Environnement (IME), Février 2001.
44. Gourry, J.-C., Guyonnet, D. (2001) - Corrélation entre perméabilité hydraulique et conductivité électrique d'une barrière ouvragée. 3^{ème} Colloque GEOFCAN, D. King (Ed). Orléans, 25-26 septembre 2001.
45. Guyonnet, D., Poignard, S. (2000) - Limites des évaluations quantitatives de l'équivalence entre barrières minérales multi-couches. Actes du séminaire sur la notion d'équivalence en étanchéité-drainage. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Paris.
46. Guyonnet, D., Didier, G., Ouvry, J.F., Pinte, J.C. (1998) - Le calcul de "l'équivalence" entre barrières de conceptions différentes. Conférence Géobento-98, 2-3 février 1998, Paris.

47. Guyonnet, D., Grua, B., Ouvry, J.F., Rouvreau, L., Hénaff, P. (1996) - Des solutions de réhabilitation adaptées à chaque site : exemple de la décharge du Spertot à Brest. Assises Nationales des Déchets Ménagers, Agen, du 11 au 12 septembre 1996.
48. Guyonnet, D., Löw, S. (1991) - Accounting for surface complexation in a landfill impact assessment study. Symposium Chemodynamics of Groundwater, confrontation of laboratory or field measurements with modelling, Mont-Sainte-Odile, Alsace, France.

↳ **Ouvrages significatifs**

49. 2002 - Guide de recommandations, à l'usage des tiers experts, pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité d site de stockage de déchets. Guide du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.
50. 2001 – Guide pour le dimensionnement et la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés. Guide ADEME.
51. Lemièrre, B., Seguin, J.-J., Le Guern, C., Guyonnet, D., Baranger, Ph. (2002) – Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'Evaluation Détaillée des Risques pour les ressources en eau. Documents du BRGM 300.
52. Guyonnet, D., Jucker, C., Méhu, J. (2001) – Guide pour l'implantation de stockages de déchets monoproduits. Rapport BRGM RP-50417-FR.
53. Guyonnet, D., Rivera, A., Löw, S., Correa, N., Jaquet, O. (1993) - Analysis of fluid logging tests from Wellenberg boreholes SB1, SB3, SB4 and SB6. Nagra Technical Report NTB 92-01, Baden (Suisse).
54. Guyonnet, D., Lavanchy, J.M. (1992) - Analysis of single and crosshole tests at the BK-Site, Grimsel test site. In: Interpretation of crosshole hydraulic tests and a pilot fluid logging test for selected boreholes within the BK-Site, Grimsel test site (Vomvoris S., Frieg B., Eds.). Nagra Technical Report NTB 91-09, Baden (Suisse).

ANNEXES

- I Procès-verbal d'équivalence de thèse**

- II Lettre d'appréciation des qualités d'enseignant**

- III Présentation de l'Unité Sitologie et Stockage du Service Environnement et Procédés du BRGM**

- IV Présentation de l'année spéciale IGE de l'ESEM**

- V Copies de deux articles récents**

- Annexe I -

Procès-verbal d'équivalence de thèse

- Annexe II -

Lettre d'appréciation des qualités d'enseignant

- Annexe III -

Présentation synthétique de l'unité Sitologie et Stockage (SIS)

Le BRGM est divisé en 7 Services Opérationnels (le Chef de Service est indiqué entre parenthèses) :

- Connaissance et diffusion de l'information géologique (J. Demange).
- Ressources minérales (J. Testard).
- Aménagement et risques naturels (H. Modaressi).
- Eau (D. Pennequin).
- Environnement et procédés innovants (D. Darmendrail).
- Analyse et caractérisation minérale (A.-M. Fouillac).
- Service des actions régionales (M. Villey).

Le service Environnement et Procédés Innovants (EPI) a pour objectif de piloter la thématique « Environnement » et de réaliser des projets liés à :

- ✓ La gestion et la réhabilitation des sites contaminés.
- ✓ La gestion des déchets.
- ✓ La sécurité des sites de stockage de déchets.
- ✓ La caractérisation, le traitement et la valorisation des matières premières, des déchets et des sols pollués.

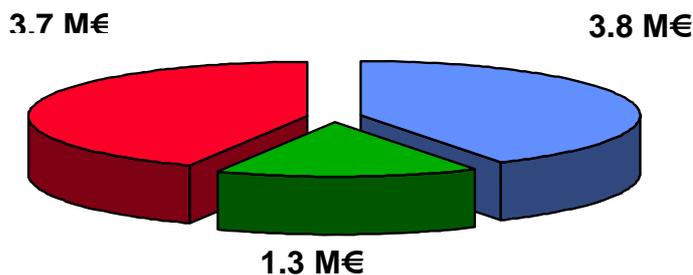
Ce service a un effectif d'environ 71 ingénieurs et techniciens dont les principaux métiers sont la géologie, l'hydrogéologie, la chimie, la géochimie, la biologie, la minéralurgie, la géotechnique et le génie des procédés.

Il dispose de moyens matériels dont :

- Une halle pilote d'une superficie de 2 000 m² comportant :
 - un atelier de broyage voie sèche
 - un atelier de traitement voie humide avec flottation, gravimétrie, séparation magnétique...,
 - un atelier de minéraux blancs,
 - un atelier de biotechnologies et hydrométallurgie,
 - une plate-forme expérimentale extérieure.
- Un laboratoire d'essais d'une superficie de 450 m² composé :

- d'un laboratoire de biotechnologie,
- d'un laboratoire de lixiviation.

La répartition du chiffre d'affaires du service entre ses trois principaux pôles d'activité (Recherche et Développement, Service Public, et commercial à l'international) est présentée ci-dessous (année 2001). A noter que le volet dit « commercial » concerne principalement l'activité à l'international, notamment dans le cadre de projets PHARE, de jumelages avec des pays en pré-accession à l'Union Européenne, ou encore d'environnement minier dans des pays en voie de développement.



■ R&D	■ Service Public	■ « Commercial »
---	---	---

Le service Environnement est subdivisé en 4 unités (le Responsable d'Unité est indiqué entre parenthèses) :

- Biotechnologies (D. Morin).
- **Sitologie et Stockages** (D. Guyonnet).
- Déchets et Traitement des Matériaux (H. Gaboriau).
- Environnement Industriel (P. Billaud).

L'unité Sitologie et Stockages (SIS) a un effectif de 9 ingénieurs, et a pour objectif de réaliser des projets liés au stockage des déchets. Le savoir-faire des agents de l'unité SIS est centré sur :

- le milieu géologique,
- la caractérisation des matériaux argileux utilisés en étanchéité de site de stockage,
- le comportement des déchets à la lixiviation,
- la modélisation hydrogéologique,
- la modélisation géochimique,
- le couplage entre les transferts de substances en solution et les réactions chimiques qui influencent leur devenir dans le sous-sol.

Au sein de l'unité SIS, environ 2 personnes travaillent à temps complet sur des projets de recherche liés à la géochimie des roches hôtes pour le stockage des déchets radioactifs, en partenariat avec l'ANDRA. Parmi les projets significatifs on citera :

- ✓ THERMOAR : développement d'un modèle thermodynamique pour prédire la composition chimique des eaux interstitielles d'une argile indurée (les argillites du Callovo-Oxfordien de l'Est de la France).
- ✓ ALCAR-Ecoclay : Etude des modifications induites par la mise en place d'ouvrages en béton (perturbation hyperalcaline) dans un encaissant argileux.
- ✓ CALORIMAR : Détermination expérimentale des constantes thermodynamiques de minéraux argileux.

Deux ingénieurs hydrogéologues réalisent des tierce-expertises pour des dossiers d'évaluation détaillée des risques pour l'eau souterraine (EDR « Eau ») induits par des sources de pollution (notamment des stockages de déchets sur des sites industriels abandonnés ou en activité).

Le projet de recherche ISIS (prévention de l'Impact des Sites de Stockage), que je coordonne, fait intervenir plusieurs agents de l'unité dans le cadre des différents modules qui le composent (voir chapitres 3 et 5) :

- ✓ LIXAR. Etude à plusieurs échelles de l'interaction entre des matériaux argileux et des lixiviats de décharge. Projet en collaboration avec le Cemagref, l'INSA-Lyon, l'ISTO et le CRMD.
- ✓ HETERO. Caractérisation de l'hétérogénéité des planches de matériaux argileux par des méthodes géophysiques. Projet en collaboration avec l'INSA-Lyon.
- ✓ PERMAR. Mise au point d'un appareillage de mesure des très faibles perméabilités ; le PERSAN.
- ✓ PROMESS. Promotion de la production de biogaz par des ordures ménagères en réacteur anaérobie et caractérisation, par des essais en colonne de percolation ascendante, du potentiel polluant du résidu après maturation.
- ✓ PORK. Interaction entre variations de porosité et de perméabilité suite à la précipitation de phases minérales. Modification de modèles de calcul existants (MARTHE) pour permettre de prendre en compte les variations de porosité, et donc de perméabilité, du milieu poreux suite à la précipitation de minéraux.
- ✓ FUZZY. Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition chronique aux polluants du sol. Développement d'une méthode dite « hybride » probabiliste-possibiliste. Projet réalisé en collaboration avec l'Université Paul Sabatier de Toulouse (équipe de Didier Dubois).

Un agent SIS est en charge du développement, sous Access, de la base de données ELDORADO (Etat des Lieux et Diagnostic pour la Remise en état des Décharges d'Ordures ménagères et assimilées). Cette base de données, qui constitue un outil d'aide à la gestion des décharges brutes, permet de mettre en mémoire les sites, de les classer vis à vis de quatre types d'impacts potentiels, et d'élaborer un dossier de résorption sommaire. Il a été appliqué notamment à l'inventaire des décharges brutes du département des Pyrénées Orientales.

Les agents SIS interviennent en appui pour le Ministère chargé de l'Environnement (MEDD), pour la réalisation d'inventaires, de bases de données, et de guides méthodologiques dans le domaine du stockage des déchets ou de la migration des polluants. On citera pour exemple :

- ✓ 2002 - Guide de recommandations, à l'usage des tiers-experts, pour l'évaluation de « l'équivalence » en étanchéité passive de centre de stockage. Coordination : D. Guyonnet.
- ✓ 2002 – Définition de seuils d'alerte dans le cadre des réseaux de suivi des eaux souterraines. Coordination : R. Chartier.
- ✓ 2001 - Guide pour l'implantation de stockages de déchets monoproduits. (Réalisé en collaboration avec POLDEN). Coordination : D. Guyonnet.
- ✓ 2001 - Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes. Coordination : B. Lemière.
- ✓ 2001 - Guide pour le dimensionnement et la mise en œuvre des couvertures de sites de stockage de déchets. (Réalisé pour l'ADEME en collaboration avec SITA, CGEA, LIRIGM, SOLAGRO, ...). Coordination : D. Guyonnet.
- ✓ 2001 – Evaluation des risques pour les eaux souterraines dans le cas de plusieurs sources de pollution. Recommandations méthodologiques. Coordination : R. Chartier.

Les agents de l'unité SIS sont sollicités pour animer des stages de formation. M. Romain Chartier, par exemple, anime le volet « Risques pour les eaux souterraines » dans le cadre du stage « Evaluation Détaillée des Risques » qui met en œuvre la méthodologie nationale élaborée par le BRGM et l'INERIS pour le MEDD.

- Annexe IV -

Présentation de l'année spéciale IGE de l'ESEM

(voir : <http://www.univ-orleans.fr/ESEM/IGE/>)



ESEM - Université d'Orléans

L'année spéciale IGE (Ingénieur en Génie de l'Environnement) de l'ESEM (Ecole Supérieure de l'Energie et des Matériaux) est une formation reconnue par la "Commission des titres", délivrant à des jeunes ingénieurs diplômés un titre complémentaire d'Ingénieur en Génie de l'Environnement. Cette formation est également ouverte aux titulaires d'un DEA, d'un DESS ou équivalent. Elle mène alors à un diplôme d'université en Génie de l'Environnement. Elle est accessible soit à des jeunes diplômés, soit à des cadres d'entreprises ou en recherche d'emploi grâce aux Services de Formation Continue de l'Université d'Orléans, qui bénéficie du concours financier du Conseil Régional.

Objectifs	Diplômes délivrés
Compléter la formation des ingénieurs et des universitaires scientifiques. Permettre aux cadres de l'industrie et des collectivités territoriales d'intégrer dans leur métier une approche environnementale.	Avec un diplôme d'ingénieur : Ingénieur en Génie de l'Environnement Avec un DEA, DESS ou équivalent : Diplôme de spécialisation en Génie de l'Environnement

Programme des études

L'année est divisée en quatre périodes correspondant aux modules. Les douze modules traitent les aspects généraux, scientifiques et appliqués de l'Environnement. Un stage de quatre à six mois conclut la formation.

Modules généraux	<ul style="list-style-type: none">- Droit et législation de l'environnement- Economie de l'environnement et d'entreprise, management environnemental- Sociologie et communication- Aménagement du territoire et S.I.G- Insertion professionnelle
Modules scientifiques	<ul style="list-style-type: none">- Ecologie fondamentale et appliquée- Physico-chimie de l'hydrosphère- Physico-chimie de l'atmosphère- Physico-chimie des sols
Modules techniques	<ul style="list-style-type: none">- Métrologie et analyse- Prévention et traitement des pollutions- Etudes d'impact, transferts de pollution- Risques naturels et risques industriels

Durant l'année, les étudiants réalisent un projet d'une centaine d'heures (environ 2 demi-journées par semaine de début janvier à fin avril) donnant lieu à un rapport et une soutenance. Il s'agit la plupart du temps de travaux bibliographiques poussés (y compris sur Internet), complétés par des contacts auprès d'organismes publics ou d'entreprises. Le partenaire s'engage alors à suivre le projet et à conseiller l'étudiant. Les projets peuvent être une introduction au stage.

Exemples de projets :

- identification des anomalies entre les procédures appliquées et la réglementation ;
- risques sanitaires liés à l'épandage des boues de stations d'épuration ;
- diagnostic précédant la mise en place d'un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

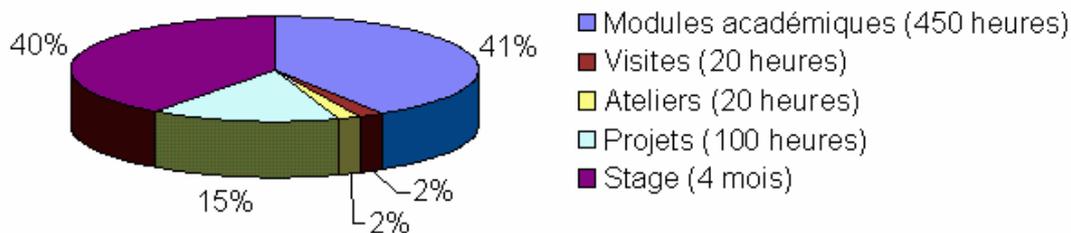
Les stages consistent en un travail individuel de quatre mois, de mi-mai à mi-septembre, dans les locaux des entreprises, des administrations ou des collectivités locales, avec prise en charge financière. Sur la base d'un cahier des charges, le partenaire s'engage à suivre le stagiaire et à mettre à sa disposition les moyens nécessaires. Le mémoire peut rester confidentiel en cas de besoin.

Exemples de stages :

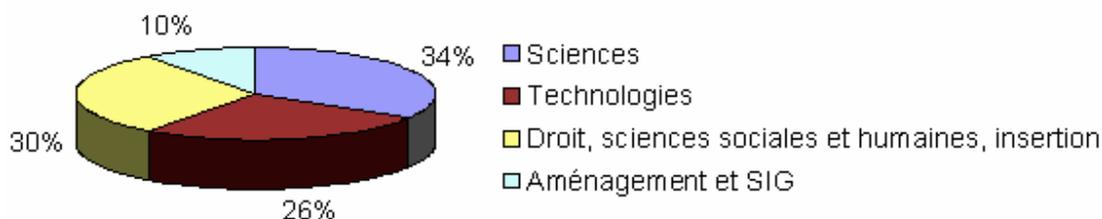
- étude d'impact d'infrastructures autoroutières ;
- gestion et mise en conformité d'effluents industriels ;
- mise en place d'un système de management environnemental (ISO 14001).

La formation IGE : quelques chiffres

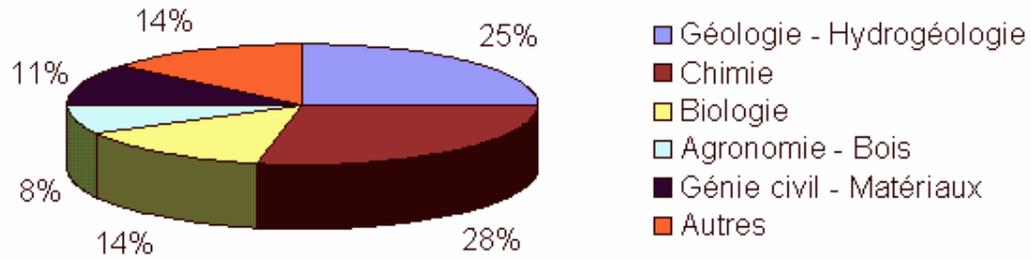
Répartition des horaires d'enseignement



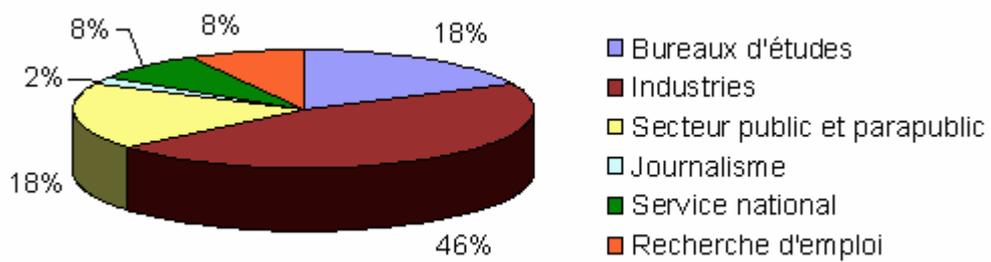
Répartition des modules académiques



Origine des étudiants par domaine de compétences



Débouchés



- Annexe V -

Copie de deux articles récents

Guyonnet, D., Gourry, J.-C., Bertrand, L., Amraoui, N. (2003) – Heterogeneity detection in an experimental clay liner. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, 149-160.

Guyonnet, D., Bourguin, B., Dubois, D., Fargier, H., Côme, B., Chilès, J.-P. (2003) – Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering*, 128, 68-78.

