
Guide Chapeau

CaPhéInE : CAractérisation des
PHEnomènes de transfert en zone
INsaturée des Eléments traces

Mars 2012

Caphéine : guide chapeau

Ce guide a été rédigé dans le cadre du projet CaPhéInE financé par l'Ademe et réalisé en partenariat par le BRGM, l'INERIS, EDF et le CEA :



Coordinateur du projet : Valérie Guérin (BRGM)

Rédacteurs :

- Valérie Guérin (BRGM)

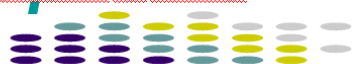
Ont également collaboré à ce guide :

- Julien Michel (INERIS)
- Philippe Bataillard (BRGM)
- Hélène Roussel (Ademe)
- Fabien Decung (EDF)
- Elicia Verardo (BRGM),
- Geoffrey Boissard (BRGM),
- Ingmar Pointeau (CEA)

Sommaire

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Problématique..... | 8 |
| 2 | Objectifs | 10 |
| 2.1 | Objectif général du programme CAPHEINE | 10 |
| 2.2 | Descriptions des différents guides | 11 |
| 2.3 | Articulation entre guides | 12 |
| 2.4 | Limites des guides | 13 |
| 3 | Méthodologie développée dans le cadre de CAPHEINE..... | 15 |
| 3.1 | Choix d'une approche graduée | 15 |
| 3.2 | Privilégier l'observation de terrain et les mesures sur site | 16 |
| 3.3 | Importance du schéma conceptuel et du scénario du fonctionnement actuel et futur des sites | 18 |
| 3.4 | Place dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sol pollués..... | 18 |
| 3.5 | Place de la méthodologie dans le cadre normatif | 20 |
| 4 | Guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la ZNS du sol»..... | 22 |
| 4.1 | Généralités | 22 |
| 4.2 | Approche méthodologique retenue..... | 23 |
| 4.2.1 | Niveau 1 : | 26 |
| 4.2.2 | Niveau 2 : | 26 |
| 4.2.3 | Niveau 3 : | 26 |
| 4.3 | Conclusion du guide expérimentation | 27 |
| 5 | Guide « caractérisation hydrique de la ZNS » | 28 |
| 5.1 | Généralité..... | 28 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2 | Approche méthodologique retenue..... | 29 |
| 5.2.1 | Niveau 1 | 32 |
| 5.2.2 | Niveau 2 | 32 |
| 5.2.3 | Niveau 3 | 32 |
| 5.3 | Conclusion du guide transfert hydrique..... | 33 |
| 6 | Guide « Modélisation des écoulements et du transfert des ETM en ZNS » | 34 |
| 6.1 | Généralité..... | 34 |
| 6.2 | Approche méthodologique retenue..... | 34 |
| 6.2.1 | Niveau 1 | 38 |
| 6.2.2 | Niveau 2 | 38 |
| 6.2.3 | Niveau 3 | 38 |
| 6.3 | Conclusion du guide modélisation | 39 |
| 7 | Guides sites | 40 |
| 7.1 | Site 1 : ancien site de traitement de minerai en zone gneissique..... | 40 |
| 7.1.1 | Contexte du site :..... | 40 |
| 7.1.2 | Problématique : | 40 |
| 7.1.3 | Méthodologies mise en œuvre : | 41 |
| 7.1.4 | Retour d'expérience : | 42 |
| 7.2 | Site 2 : Site de stockage de sédimente en zone alluvionnaire | 45 |
| 7.2.1 | Contexte du site :..... | 45 |
| 7.2.2 | Problématique : | 45 |
| 7.2.3 | Méthodologies mise en œuvre : | 45 |
| 7.2.4 | Retour d'expérience : | 47 |
| 7.3 | Site 3 : Site industriel en zone alluvionnaire | 48 |
| 7.3.1 | Contexte du site :..... | 48 |
| 7.3.2 | Problématique : | 48 |



| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.3.3 | Méthodologies mise en œuvre : | 49 |
| 7.3.4 | Retour d'expérience : | 49 |
| 7.4 | Site 4 : Site industriel en zone alluvionnaire | 51 |
| 7.4.1 | Contexte du site :..... | 51 |
| 7.4.2 | Problématique : | 52 |
| 7.4.3 | Méthodologies mise en œuvre : | 52 |
| 7.4.4 | Retour d'expérience : | 54 |
| 7.5 | Site 5 : Site de fabrication d'engrais en contexte calcarénitique | 56 |
| 7.5.1 | Contexte du site :..... | 56 |
| 7.5.2 | Problématique : | 57 |
| 7.5.3 | Méthodologies mise en œuvre : | 57 |
| 7.5.4 | Retour d'expérience : | 58 |
| 8 | Conclusion générale | 59 |

Illustration

Liste des figures

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Lien entre les différents guides CAPHEINE | 13 |
| Figure 2 - Méthodologie graduée pour l'évaluation des risques vis-à-vis des eaux souterraines liée aux ETM présents en ZNS | 15 |
| Figure 3 – Fosse creuser sur le site 1 – profondeur environ 2 m. La présence d'un horizon de texture fine entre environ 50 et 100 cm (couleur grise sur la photo) retrouvé systématiquement sur le site a permis d'éliminer la voie de transfert vertical de As proposée par le schéma conceptuel. | 17 |
| Figure 4 - Représentation schématiques des actions de gestion des sites et sols pollués envisageables – place de CAPHEINE (adapté de Colombano et al., 2009) | 19 |
| Figure 5 - Schéma conceptuel du devenir des ETM dans un sol. En italique sont indiqués les mécanismes ou processus considérés comme rapides qui déplacent les éléments de la phase liquide vers les surfaces solides (à l'exception de l'absorption par les cellules vivantes). Les processus notés de (a) à (e) déplacent les éléments de la surface vers l'intérieur des phases solides du sol. Ils sont considérés plus lents et plus difficilement réversibles. Modifié de McLaughlin (2001). | 22 |
| Figure 6 - Objectifs et niveaux retenus pour le guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la ZNS du sol» | 24 |
| Figure 7 - Mécanismes affectant le transport de l'eau | 28 |
| Figure 8 - Objectifs et niveaux retenus pour le guide « Caractérisation hydrique de la ZNS | 30 |
| Figure 9 - Objectifs et niveaux retenus pour le guide « Modélisation des écoulements et du transfert des ETM en ZNS » | 35 |

Liste des tableaux

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 – Typologie des sites étudiés | 12 |
| Tableau 2 - Procédure progressive pour l'évaluation de l'impact (norme ISO 15175) | 21 |
| Tableau 3 - Tableau synthétique des paramètres à acquérir ou des expériences à mener par niveau pour le guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la zone non saturée du sol : diagnostic du site» | 25 |
| Tableau 4 - Tableau synthétique des paramètres à acquérir ou des expériences à mener par niveau pour le guide « Caractérisation hydrique de la ZNS | 31 |
| Tableau 5 - Paramètres d'entrée nécessaires selon les différents niveaux considérés et selon le type de modélisation envisagée par niveau pour le guide « Modélisation des écoulements et du transfert des ETM en ZNS » | 37 |



1 Problématique

En France, la décision d'intervenir sur un site pollué et le choix des moyens à mettre en œuvre pour le réhabiliter, sont fonction du contexte environnemental, de la nature de la pollution et des risques résultants pour l'Homme et les ressources en eau. Actuellement, la majorité des études évaluant les risques de contamination des eaux souterraines ne prennent pas en compte la spécificité de la zone non saturée.

Dans le cas des éléments traces minéraux (ETM), les mécanismes qui contrôlent leur mobilité sont variables dans le temps et dans l'espace : ils sont fortement liés aux conditions physico-chimiques du milieu et donc à ses changements. Selon les conditions, le transfert des polluants vers les couches plus profondes et les nappes souterraines peut être facilité. De même, une éventuelle immobilisation des polluants dans les couches superficielles peut être réversible. Si ces mécanismes sont mal compris, le potentiel de risque d'un site peut être mésestimé. Ainsi, parfois, aucune action de gestion n'est engagée alors qu'un changement du milieu imposé par un nouvel usage du site peut engendrer une libération d'éléments. Dans d'autres cas, au contraire, il est parfois décidé d'engager des travaux de réhabilitation coûteux, qui sont inutiles car les mécanismes naturels sont aptes à en contrôler l'impact.

Dans les études d'impact, on considère que la totalité des éléments lixiviables parvient à la nappe, ignorant alors le rôle potentiellement « protecteur » de la ZNS vis-à-vis des eaux souterraines.

Dans le cas de pollution historique, la ZNS est souvent contaminée, il faut alors évaluer les risques de relargage de polluants de puis celle-ci vers la nappe. Souvent cela se fait dans les conditions de fonctionnement actuel du site en occultant les éventuelles modifications de milieu qui peuvent engendrer des relargages.

Or la zone non-saturée des sites pollués contient très souvent les produits source (primaire ou secondaire) de contamination. La compréhension des phénomènes chimiques et hydrauliques qui la caractérisent est donc indispensable pour déterminer l'existence d'un risque à plus ou moins long terme pour les eaux souterraines, en prenant en compte les usages actuels, mais aussi les possibles changements d'usage, et/ou les modifications physico-chimiques éventuelles ultérieures du site d'étude, qui peuvent influencer sur la mobilité des polluants.

Le rôle « protecteur » / « retardateur » ou « émetteur » de la ZNS est donc à quantifier dans une optique de gestion à long-terme des sites. Sa caractérisation doit permettre d'agir de façon proportionnée compte tenu des enjeux environnementaux et sanitaires qu'elle aura permis de préciser.

Il faut donc être capable d'apprécier les risques de contamination des eaux souterraines et d'expliquer les conditions de migration ou d'immobilisation de la pollution compte-tenu du contexte du site.

Dans le cas d'une modification d'usage, il est nécessaire de prévoir les changements de conditions du milieu qui pourraient entraîner une plus grande mobilité et disponibilité des polluants. Cette connaissance pourra justifier d'éventuelles restrictions d'usages (dans le cadre de réhabilitations ponctuelles ou de grande ampleur de friches industrielles par exemple).

2 Objectifs

2.1 Objectif général du programme CAPHEINE

Pour mieux apprécier les risques au regard de l'usage du site, il est nécessaire de mieux comprendre le comportement des éléments traces minéraux (ETM). Cependant, les processus qui gouvernent leur devenir en zone non saturée sont complexes et nombreux. Par conséquent, la compréhension et la modélisation de ces phénomènes qui permettrait d'anticiper les effets d'un changement d'usage sur la mobilité des ETM, demande l'acquisition d'un nombre suffisant de données hydriques et chimiques. Compte tenu des coûts financiers importants de leur acquisition et de leur exploitation, il convient d'être particulièrement pertinent lors de la définition des caractérisations à mettre en œuvre.

Le projet CAPHEINE vise à mettre à disposition une **méthodologie permettant de préciser les contextes (typologie des sites, polluants, géologie et l'hydrologie) dans lesquels il est utile de prendre en compte la zone non-saturée du site dans l'évaluation des risques**. Les différents guides proposent plusieurs méthodes permettant d'améliorer la connaissance du fonctionnement du système. Ainsi, **les paramètres à acquérir du point de vue hydrologique et chimique, les méthodes disponibles pour acquérir ces paramètres, et la façon de les intégrer aux modèles pour obtenir une modélisation réaliste du fonctionnement du site sont précisées**.

Le programme CAPHEINE s'est attaché à définir selon le degré de complexité du contexte et selon la sensibilité environnementale du site, les investigations/modélisations à mettre en œuvre pour ne pas être exagérément pessimiste ou optimiste en termes d'estimations des flux et vitesses de transfert des ETM depuis le sol vers la nappe.

Ce programme vise à rendre plus systématique la prise en compte de la zone non-saturée dans les études de risques vis-à-vis de la ressource en eau des sites pollués. Pour cela, ce projet vise à juger de l'intérêt de prendre en compte cette zone et vise à élaborer une méthodologie permettant de préciser, selon le degré de complexité du contexte, les actions à mettre en œuvre.

Pour cela, le projet a conduit à la rédaction de guides qui ont pour but de mettre à disposition des professionnels du secteur, une méthodologie permettant de préciser quand, comment et pourquoi acquérir tel ou tel paramètre dans un contexte de gestion d'un site contaminé (diagnostic, évaluation des risques, proposition de traitement).

Ces guides s'adressent aux principaux acteurs responsables du diagnostic et de la surveillance de sites et sols pollués.

2.2 Descriptions des différents guides

Le projet a permis d'élaborer trois guides techniques qui proposent plusieurs méthodes permettant d'améliorer la connaissance du fonctionnement du système.

Les paramètres à acquérir du point de vue hydrologique et chimique et les méthodes disponibles pour les acquérir sont détaillés dans deux guides :

- la caractérisation de la mobilité des ETM est abordée dans le guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la zone non saturée du sol » (Bataillard *et al.*, 2012) ;
- pour les paramètres hydriques, on se reportera au guide « Caractérisation hydrique de la zone non saturée » (Guérin *et al.*, 2012).

L'intégration des données obtenues dans les modèles numériques et le choix du type de modèle à privilégier pour obtenir une modélisation réaliste du fonctionnement du site sont quant à eux détaillés dans un troisième guide :

- la modélisation du transfert d'ETM est abordée dans le guide « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée » (Boissard *et al.*, 2012).

Le programme **CAPHEINE** s'est également appuyé sur l'étude de 5 sites, appelés «guides sites », auxquels il est fait référence dans les guides techniques. Ces « guides sites » détaillent les actions mises en œuvre sur chacun de ces sites. Chacun des sites présente un contexte hydrogéologique et une histoire industrielle différente (cf. Tableau 1).

Tableau 1 – Typologie des sites étudiés

| Typologie | Contexte industriel | Contexte hydrogéologique | Besoins de gestion | Application des guides |
|-----------|------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Site 1 | Traitement de minerais | Arène gneissique et gneiss ZNS variable de 10 à 1 m | Compréhension de l'évolution des teneurs en Mn et As pour choix méthode de gestion du site après réhabilitation partielle | 1-Guide mobilité des ETM 2-Guide modélisation |
| Site 2 | Dépôt de sédiment | Alluvions quaternaire fins et craie ZNS de 10 m | Confirmation de l'absence d'impact constaté sur la nappe malgré une source active importante | 1-Guide modélisation 2-Guide mobilité des ETM 3-Guide hydrique |
| Site 3 | Traitement de bois | Alluvions quaternaire grossiers ZNS de 6 m | Besoin de compréhension des chroniques de concentration observées en nappe | 1-Guide mobilité des ETM 2-Guide modélisation |
| Site 4 | industrie | Alluvions quaternaire grossiers ZNS de 5 m | Besoin de calcul de temps de transfert à la nappe en situation accidentelle | 1-Guide hydrique 2-Guide modélisation |
| Site 5 | Fabrication d'engrais | Alluvions quaternaires grossiers ZNS variable de 4 à 1 m | Besoins d'évaluation de la mobilité future selon les options de gestion retenues | 1-Guide mobilité des ETM |

2.3 Articulation entre guides

Le choix de trois guides techniques s'explique par le fait que chacun d'entre eux ne s'adresse pas forcément au même public. Ainsi la mise en œuvre des essais détaillés dans les guides sur la caractérisation de la mobilité des ETM et sur la détermination des paramètres hydriques font appel à des compétences spécifiques rarement portées par les mêmes personnes, de même que le guide sur la modélisation. Si les personnes mettant en œuvre ces trois guides peuvent être différentes, une forte concertation entre-elles est indispensable afin d'accorder la caractérisation hydrique et chimique aux besoins de modélisation.

La mise en œuvre des trois guides sur chaque site n'est pas obligatoire : elle dépendra du besoin d'approfondissement des connaissances hydro-géologiques, chimiques et biologiques, en fonction du contexte du site. Les guides « Caractérisation hydrique de la zone non saturée » et « Caractérisation

cas des composés organiques. Par contre, tous les aspects liés à la connaissance des transferts hydriques en ZNS ainsi qu'une partie des approches de modélisation sont transposables au cas des polluants organiques.

Les guides sites n'ont pas objet de décrire en détails toutes les actions mises en œuvre pour la gestion de ceux-ci. Ils ont pour objet d'explicitier pour le champ d'action de **CAPHEINE**, les méthodes qui ont été mises en œuvre pour répondre à la problématique, les résultats obtenus et le retour d'expérience *i.e.* facilité de mise en œuvre, coût et qualité de la réponse obtenue par rapport aux attentes.

3 Méthodologie développée dans le cadre de CAPHEINE

3.1 Choix d'une approche graduée

Dans chaque guide, la méthodologie proposée pour l'évaluation des risques est graduée dans le sens où elle se divise en 3 niveaux, de l'investigation la plus simple à la plus complexe. Elle est schématisée Figure 2.

En fonction des enjeux, des moyens associés et de la spécificité du site, différents niveaux d'étude sont proposés.

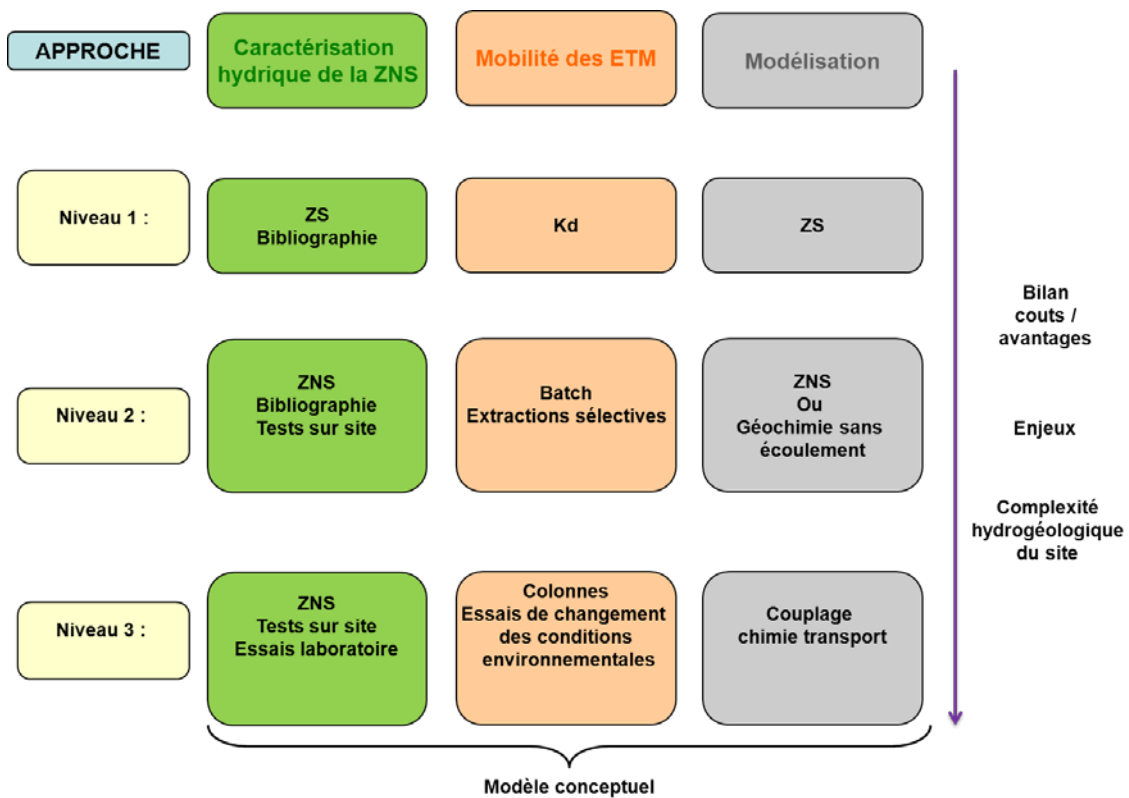


Figure 2 - Méthodologie graduée pour l'évaluation des risques vis-à-vis des eaux souterraines liée aux ETM présents en ZNS

L'approche par niveau permet d'adapter l'effort de caractérisation à chaque contexte d'étude.

Pour chaque niveau, une recherche de l'optimisation des investigations a été réalisée. Cela peut se traduire par exemple, au couplage de caractérisations qui ne sont pas forcément faites ensemble au cours de l'approche classique, mais qui est proposé ici en vue d'un gain de temps ultérieur et d'une amélioration de la qualité d'interprétation (ex : mesure de paramètres majeurs en plus des

contaminants dans des solides et des solutions). La pertinence des données acquises, c'est-à-dire leur utilité et la façon de les exploiter, sont présentées à chaque étape.

Les investigations de niveau 1 et 2 sont opérationnelles. Elles font appel pour la plupart à des protocoles de caractérisation normalisés. Elles peuvent être mises en œuvre afin de résoudre des problèmes urgents grâce à une prise de décision basée sur une caractérisation optimisée.

Les investigations de niveau 3 sont beaucoup moins répandues. Elles sont encore difficiles à envisager dans le cadre d'étude de site contraintes sur le plan financier et temporel. Elles sont toutefois à encourager une fois la situation du site « stabilisée », c'est-à-dire une fois que les mesures d'urgences ont été prises et que tout risque étant écarté, un consortium constitué de responsables du site, d'ingénieurs de bureau d'étude et de scientifiques, peut prendre le temps d'une étude plus complète, intégrant de la R&D, moins soumise à la pression des résultats attendus. Si des questions nécessitant des actions de recherche sont identifiées, cette étude pourrait prendre la forme d'une thèse financée par des industriels propriétaires des sites à travers notamment des dispositifs avantageux type CIFRE et crédit d'impôt recherche. Ce genre de montage pourrait être encouragé par les services de contrôle de l'Etat (DREAL). Ils pourraient constituer des réponses adaptées dans le cas de situations complexes et non urgentes, voire à titre préventif dans le cas de sites étendus.

Le choix du niveau d'investigation dépend du contexte du site défini par le schéma conceptuel. On pourra par exemple retenir une approche de niveau 1 pour l'hydrodynamique en ZNS et l'approche de niveau 2 pour la mobilité des éléments traces.

Le niveau d'investigation tient compte également des coûts à prévoir pour les investigations supplémentaires par rapport aux bénéfices attendus. Etant donné les caractéristiques complexes que peuvent présenter les sites, leur caractérisation et le calcul des impacts prévisibles des ETM sur la ressource en eau peut effectivement s'avérer coûteux et difficile. En cas de doute sur le succès des nouvelles investigations pour répondre aux questions posées, l'aspect financier peut dans certains cas, guider l'arrêt ou la poursuite des travaux.

3.2 Privilégier l'observation de terrain et les mesures sur site

La méthodologie développée dans **CAPHÉINE** a comme fondement l'observation de terrain et la réalisation de mesures *in situ*.

Seules les observations de terrain (c.à.d. sondages, fosse, observation de la végétation...) peuvent rendre compte de l'hétérogénéité du site et orienter le choix du nombre d'échantillons à considérer.

L'étude de la zone non saturée demande la définition des différentes couches qui la constituent (horizons du sol, hétérogénéités du sous-sol). Pour cela la réalisation de fosses pédologiques à la pelle mécanique, en plus de sondage sol, est à encourager fortement. La visualisation d'un volume

La location d'une pelle mécanique de petite taille reste raisonnable (de l'ordre de 1500 euros/jour avec chauffeur). Toutefois, l'analyse d'un nombre plus important d'échantillons, justifié par les observations des profils, peut engendrer un surcout significatif qu'il faut anticiper.

La réalisation de mesures *in situ* en vue de limiter les modifications de la chimie des échantillons prélevés lors du transport au laboratoire est également à privilégier notamment dans le cas des espèces sensibles au redox et aux échanges gazeux. Parmi ces déterminations sur site, peuvent figurer la mesure du pH, du Eh, le passage sur résine de solutions pour la spéciation de As ou encore des mesures de Fe(II) par colorimétrie.

3.3 Importance du schéma conceptuel et du scénario du fonctionnement actuel et futur des sites

Le diagnostic est l'étape fondamentale de la caractérisation du site contaminé. Il doit permettre l'établissement d'un schéma conceptuel et d'un scénario du fonctionnement du site comme le précise la méthodologie nationale de gestion des sites et sol pollués. Ces éléments constitueront le fil directeur de l'étude et seront à la base du plan de gestion du site. Leur établissement doit donc être sans faille ce qui mérite un investissement conséquent pour acquérir une bonne caractérisation du site.

Le plan de gestion proposera des usages futurs du site après réhabilitation éventuelle. Une bonne anticipation du comportement des polluants dans ces futures conditions peut ouvrir la porte à des opportunités nouvelles, non évoquées en première approche faute d'informations quantitatives sur leur transfert potentiel.

En outre, ces connaissances peuvent aider à gérer la contamination résiduelle en proposant un mode de gestion adapté des zones concernées (mode d'occupation et/ou amendements des sols spécifiques, définition d'un programme de suivi pertinent).

3.4 Place dans la méthodologie nationale de gestion des sites et sol pollués

La méthodologie de gestion des sites et sols pollués est décrite dans les textes du MEEDDAT du 08 février 2007 (MEEDDAT, 2007).

La maîtrise des sources et des impacts est recherchée autant que faire se peut, car elle participe à la démarche globale :

- de réduction des émissions de substances responsables de l'exposition chronique des populations ;
- d'amélioration des milieux.

Les méthodologies développées dans **CAPHEINE** pour la caractérisation de la mobilité des éléments traces permettent de mieux évaluer le potentiel d'émission de la source de contaminant et donc d'aller au-delà des pratiques actuelles qui s'arrêtent souvent à la teneur totale au sein de la source et non au potentiel d'émission.

Les méthodes préconisées envisagent aussi des expérimentations permettant d'évaluer la mobilité future en cas de modification des conditions physico-chimiques du milieu.

La mise en œuvre du guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la zone non saturée du sol : diagnostic du site » (Bataillard *et al.*, 2012) permet de faire des choix de gestion argumentés grâce à la compréhension des mécanismes qui contrôlent l'émission des polluants.

La mise en œuvre des guides « Caractérisation hydrique de la zone non saturée » (Guérin *et al.*, 2012). et « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée » (Boissard *et al.*, 2012) permet quant à elle, une meilleure connaissance des transferts et des impact.

Finalement, la mise en œuvre des méthodologies développées dans **CAPHEINE** permet une meilleure connaissance de la source, du transfert et des impacts. En conséquence, elle réduit les incertitudes et doit permettre de faire des choix de gestion plus ciblés.

3.5 Place de la méthodologie dans le cadre normatif

Les guides **CAPHEINE** s'inscrivent en complément des normes méthodologiques récentes NF EN ISO 15175 (sur la caractérisation des sols en relation avec la nappe phréatique), NF X 31-620 (sur les prestations de services relatives aux sites et sols pollués) et NF EN 12920 (sur le comportement des déchets en conditions spécifiées). Les guides fournissent effectivement les clefs pour le choix des investigations, la logique de leur succession de mise en œuvre au cours de l'étude et surtout pour l'interprétation des résultats. Les normes, quant à elles, fournissent le cadre (les lignes directrices ou « les portes à ouvrir » pour faire le parallèle avec la clef) dans lequel ses caractérisations doivent être effectuées.

On notera par ailleurs, le caractère gradué de la norme NF EN ISO 15175 (Tableau 2), en bonne concordance avec la logique de l'approche **CAPHEINE**.

| | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Étape 1 | Investigation préliminaire, y compris recherches documentaires, historique du site, contaminants potentiels, données régionales sur la géologie et l'hydrogéologie disponibles |
| | Description de la géologie et de la pédologie locales, moyennement détaillées, et pour vérifier l'existence d'une pollution |
| | Analyses chimiques pour identifier les éléments et les concentrations |
| | Évaluation préliminaire de l'impact |
| | Définition de l'importance du problème, actions ultérieures (par exemple surveillance du site, nettoyage immédiat, investigations complémentaires ou aucune action requise) |
| Étape 2 | Investigations complémentaires sur site et en laboratoire pour une évaluation de l'étendue de la source, des conditions hydrauliques spécifiques, de la mobilité, des conditions de transformation et de dégradation et des conditions de réservoir applicables |
| | Deuxième évaluation de l'impact |
| | Décision d'actions complémentaires |
| Étape 3 | Le cas échéant, investigations et essais, en laboratoire et sur site, de détails particuliers (par exemple lixiviation et/ou dégradation), modélisation informatique |
| | Troisième évaluation de l'impact |

Tableau 2 - Procédure progressive pour l'évaluation de l'impact (norme ISO 15175)

Les guides, et notamment le guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la zone non saturée du sol : diagnostic du site » (Bataillard *et al.*, 2012), font référence de manière systématique aux normes techniques décrivant les protocoles d'acquisition des paramètres cités lorsqu'elles existent.

4 Guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la ZNS du sol »

4.1 Généralités

Ce guide technique fournit des recommandations pour la caractérisation physico-chimique et la mise en œuvre d'essais de laboratoire ayant pour but de mieux caractériser le potentiel de mise en solution/rétention des sols vis à vis des ETM. Il propose une méthodologie graduée, de complexité croissante, selon le contexte, la complexité du site d'étude et les objectifs de l'étude.

Les ETM sont soumis dans les sols à de nombreux mécanismes qui vont contrôler leur mobilité (Figure 5).

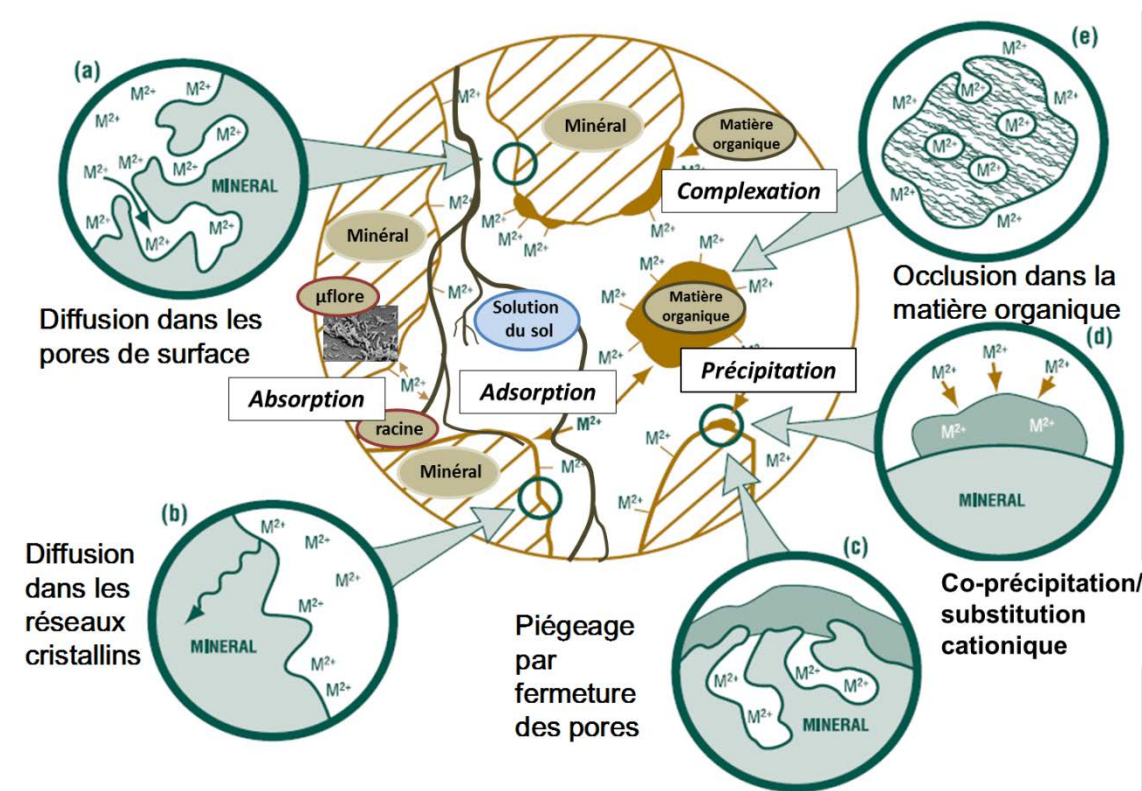


Figure 5 - Schéma conceptuel du devenir des ETM dans un sol. En italique sont indiqués les mécanismes ou processus considérés comme rapides qui déplacent les éléments de la phase liquide vers les surfaces solides (à l'exception de l'absorption par les cellules vivantes). Les processus notés de (a) à (e) déplacent les éléments de la surface vers l'intérieur des phases solides du sol. Ils sont considérés plus lents et plus difficilement réversibles. Modifié de McLaughlin (2001).

A l'heure actuelle, les diagnostics se limitent trop souvent à une spatialisation 3D de la contamination du site et reste très lacunaire en ce qui concerne les paramètres majeurs des

matériaux de la ZNS susceptibles de contrôler la mobilité des ETM (voir à ce sujet le rapport de phase 1 du projet – BRGM/RP-56024-FR). Ce guide propose de dépasser largement cet état des lieux.

4.2 Approche méthodologique retenue

Décrire la spéciation des ETM le plus finement possible, comprendre, voire prédire son évolution avec le temps et sous différentes contraintes, est essentiel pour une gestion raisonnée du site. Mais une telle caractérisation dans des systèmes aussi complexes, peut rapidement s'avérer laborieuse et donc coûteuse. **La méthodologie proposée vise donc à fournir un effort de caractérisation proportionnel aux enjeux du site** (risque pressenti pour les ressources en eau, pression socio-économique) dans le cadre de la définition et de la mise en œuvre du plan de gestion de ce dernier.

Elle s'organise autour des 3 objectifs suivants :

- Caractériser les conditions géochimique actuelles du site ;
- Comprendre la mobilité des ETM dans ces conditions ;
- Anticiper la mobilité des ETM dans les conditions futures du site.

Le principe de proportionnalité est atteint grâce à la déclinaison de chacun de ces objectifs selon 3 niveaux de précision. L'investissement humain et financier croit progressivement du niveau 1 au niveau 3. Ces derniers peuvent être sommairement présentés sur la base du degré d'interprétation des phénomènes qu'ils vont pouvoir fournir :

- Niveau 1 : propose une caractérisation du potentiel de transfert des contaminants en vue d'une **interprétation semi-empirique** ;
- Niveau 2 : propose une caractérisation du transfert des contaminants en vue d'une **interprétation semi-mécaniste** ;
- Niveau 3 : propose une caractérisation fine des processus en vue d'une **interprétation mécaniste**.

Cette organisation est schématisée Figure 6.

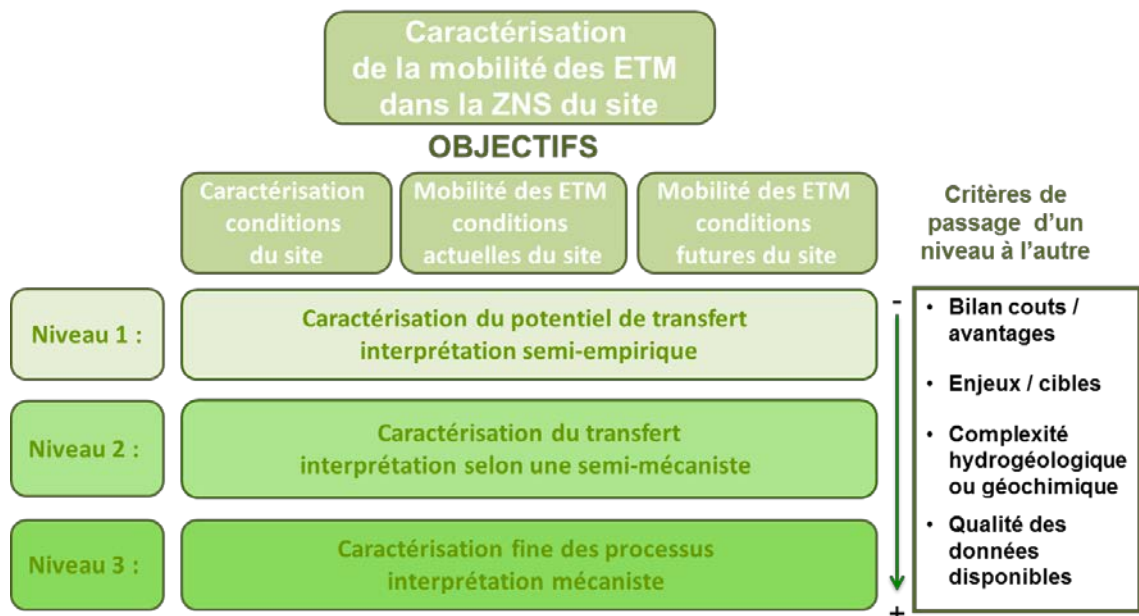
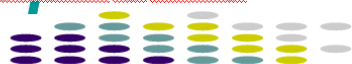


Figure 6 - Objectifs et niveaux retenus pour le guide « « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la ZNS du sol » »

Les paramètres à acquérir ou les expériences à mener par niveau sont résumés pour chaque étape de caractérisation dans le tableau 3.

Tableau 3 - Tableau synthétique des paramètres à acquérir ou des expériences à mener par niveau pour le guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la zone non saturée du sol : diagnostic du site »

| Etape de la caractérisation | Paramètres à acquérir/expérience à mener | Informations fournies |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractérisation du contexte du site | Niveau 1 <ul style="list-style-type: none"> - granulométrie - pH, Eh - carbone organique - calcaire total | Potentiel de rétention des ETM |
| | Niveau 2 <ul style="list-style-type: none"> - CEC et cations échangeables - Extractions chimiques non destructives - Chimie exhaustive des lixiviats | <ul style="list-style-type: none"> - Compléments spécifiques au site - Caractérisation des réactions de surface, - Calcul d'indices de saturation - Préparation à la modélisation géochimique |
| | Niveau 3 <ul style="list-style-type: none"> - Extractions chimiques destructives, - Minéralogie (DRX, MEB-EDS, EXAFS...). | <ul style="list-style-type: none"> - Phases porteuses d'ETM pour modélisation géochimique - Vérification d'hypothèses de fonctionnement |
| Mobilité des ETM dans les conditions actuelles du site | Niveau 1 <ul style="list-style-type: none"> - K_D d'après la littérature, adapté au contexte du site avec discussion, - Ou estimation d'un K_D sur base de désorption (essai de lixiviation normalisé) | Estimation chiffrée du potentiel de rétention/mobilisation des ETM |
| | Niveau 2 <ul style="list-style-type: none"> - Batch pour mesure isotherme du K_D, - Expériences en colonnes normalisées - Batches (normalisés dans la mesure du possible), avec contrainte imposée représentative du contexte du site. | <ul style="list-style-type: none"> - Calcul d'un K_D propre au matériau étudié - Caractérisations du devenir des ETM avec prise en compte d'effets hydrodynamiques et de phénomènes cinétiques - Formulation d'hypothèses de fonctionnement. |
| | Niveau 3 <ul style="list-style-type: none"> - Colonnes et/ou batches non normalisés avec contrainte imposée représentative du contexte du site, - Toute expérience de laboratoire visant à vérifier les hypothèses du niveau 2. | Mise en évidence/discussion des hypothèses concernant les processus responsables de la mobilité des ETM |
| Mobilité des contaminants dans les conditions futures du site | Niveau 1 <ul style="list-style-type: none"> - K_D d'après la littérature, représentatif du futur contexte du site avec discussion, | Estimation chiffrée du potentiel de rétention/mobilisation des ETM par calcul |
| | Niveau 2 <ul style="list-style-type: none"> - Batches en conditions imposées (pH/Eh, force ionique), - Expérience de vieillissement accéléré au laboratoire | <ul style="list-style-type: none"> - Caractérisation simple de la mobilité des ETM sous l'effet d'une contrainte potentielle - Validation/calage du modèle de simulation des processus réactionnels |
| | Niveau 3 <ul style="list-style-type: none"> - Colonnes et/ou batches non normalisés avec contrainte imposée représentative du futur contexte du site, - Tests d'altération, - Etude d'analogues naturels ou anthropiques anciens. | Proposition de scénario d'évolution à moyen et long terme sur la base des résultats de la modélisation des processus réactionnels. |



4.2.1 Niveau 1 :

L'approche de niveau 1 constitue le niveau minimum préconisé dans ce guide. Elle est attendue comme une réponse suffisante pour les sites d'enjeux moindre ou issus d'un contexte simple. Elle vise à une caractérisation du potentiel de transfert des contaminants en vue d'une modélisation semi-empirique.

4.2.2 Niveau 2 :

Si les caractérisations de niveau 1 ne sont pas suffisantes pour écarter tout risque d'impact, des compléments de niveau 2 sont requis afin de préciser le fonctionnement du site. On se place alors dans un objectif de caractérisation du potentiel de transfert des contaminants en vue d'une modélisation semi-mécanistique.

Cette approche de niveau 2 comprendra la chimie la plus complète possible des échantillons solides et liquides recueillis sur site ou obtenus après lixiviation imposée, ainsi que la nature et les propriétés de surface des matériaux solides. Ces déterminations sont guidées par les hypothèses de fonctionnement formulées au niveau 1.

4.2.3 Niveau 3 :

La caractérisation de niveau 3 vise une connaissance et une description encore plus complète des réactions élémentaires responsables du devenir des ETM dans la ZNS. Elle invite à utiliser des modèles mécanistes c'est-à-dire capable de tenir compte de chacune de ces réactions pour reproduire la qualité des eaux en sortie du site voire prédire cette qualité en fonction de l'évolution d'un paramètre ou simplement du temps. La mise en œuvre du niveau 3 va demander l'acquisition de données complémentaires sur les constituants solides des échantillons.

Le stade ultime de ces caractérisation sera le couplage du modèle réactif avec le modèle de transfert (Cf. guide « Modélisation des écoulements et du transport des éléments traces en zone non saturée », Boissard *et al.*, 2012 et guide « transfert hydriques en ZNS », Guérin *et al.*, 2012)).

La méthodologie suppose que les niveaux 1 et 2 aient été préalablement réalisés avant la mise en œuvre de l'approche de niveau 3.

4.3 Conclusion du guide expérimentation

Afin de caractériser la mobilité des éléments traces minéraux dans la zone non saturée du sol, le guide propose trois niveaux d'étude de complexité croissante pour caractériser

- le contexte du site. Les paramètres à acquérir sur le matériau constitutif de la ZNS sont décrits dans cette partie ainsi que leur apport à la caractérisation de la mobilité des ETM,
- la mobilité des ETM dans les conditions actuelles du site. Cette partie revient sur l'utilisation du coefficient de partage entre le contaminant et la phase solide (K_D) ou coefficient de distribution, et présente ses limites. Il rappelle que cette approche est à réserver à des situations correspondant aux conditions dans lesquelles le K_D a été déterminé, puisque la spéciation des ETM dépend fortement des conditions physico-chimiques du milieu. Le guide propose donc des protocoles pour évaluer ce paramètre en tenant compte des conditions physico-chimiques du site étudié, mais aussi d'autres investigations qui permettent d'avoir une approche plus mécanistique des interactions entre les polluants et les solides constitutifs de la ZNS.

La mobilité des ETM dans les conditions futures. Des tests pouvant mimer des conditions futures du site y sont présentés. Le projet CAPHEINE a permis de mettre en évidence les limites et contraintes relatives à ces différentes expériences. En effet, si les investigations de niveau 1 et 2 peuvent être mises en œuvre assez facilement et font appel à des modes opératoires normalisés, les investigations de niveau 3 nécessitent la mise en œuvre de méthodes plus longues et plus coûteuses. Elles ne pourront donc pas être mises en œuvre dans des études contraintes sur le plan financier et temporel mais seront en général conduites pour des situations non urgentes, pouvant faire par exemple appel à une étape de R&D.

5 Guide « caractérisation hydrique de la ZNS »

5.1 Généralité

La caractérisation et l'évaluation des transferts en ZNS fait appel aux bilans hydriques (volume d'eau entrant dans le système) et à l'évaluation des flux parvenant à la nappe (Figure 7 - *Mécanismes affectant le transport de l'eau*).

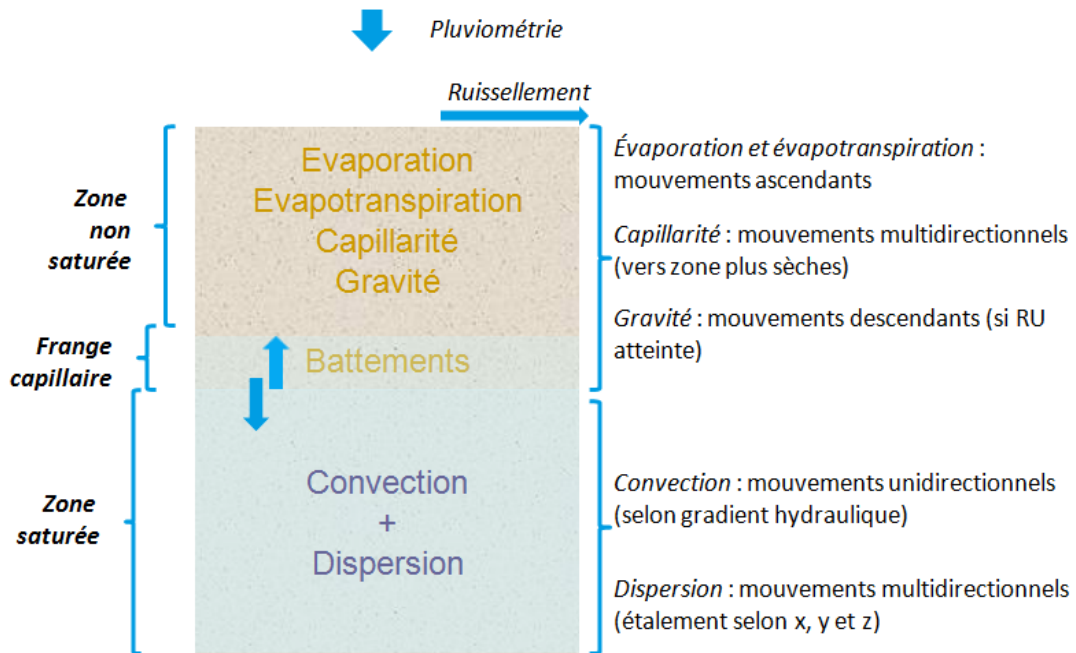


Figure 7 - Mécanismes affectant le transport de l'eau

Les pratiques actuelles consistent soit à ne pas considérer la ZNS soit à la considérer comme une zone saturée. Dans le second cas, l'évaluation des flux à travers la ZNS est basée sur des calculs simplifiés, assimilant la couche à une zone 1D aux écoulements verticaux. Cette approche revient alors à considérer des écoulements unidirectionnels dans la ZNS en négligeant les effets de dispersion/atténuation par capillarité. Le conservatisme de cette approche est alors d'autant plus fort que les conditions in-situ sont éloignées de ces hypothèses.

Ces approches utilisent généralement les données météo de pluviométrie et d'évapotranspiration locale (station la plus proche) ainsi qu'une évaluation de la conductivité hydraulique à saturation du sol.

Les évaluateurs de risque font souvent leur calcul sur la base des vitesses de transferts en milieu saturé.

Pour améliorer la détermination des flux de polluant des installations industrielles vers la nappe et parvenir au calcul des temps de transfert vers la nappe, il faut disposer des caractéristiques hydrauliques de la zone non saturée (ZNS) qui reposent sur la détermination des courbes de rétention d'eau et de conductivité hydraulique¹.

Dans d'autres circonstances (incidents/accidents de production notamment), il peut être nécessaire de déterminer expérimentalement (et avec précision) le temps de transfert à travers la ZNS ainsi que l'impact d'une pollution au toit de la nappe.

5.2 Approche méthodologique retenue

Le projet **CAPHEINE** propose une approche graduée la caractérisation hydrique de la ZNS, pour aller plus loin que les pratiques actuelles, en ayant une meilleure compréhension des mécanismes impliqués.

Cette méthodologie considère deux objectifs différents selon que l'on veuille :

- Estimer les flux d'eau parvenant à la nappe. Pour cela, il faut acquérir des paramètres hydriques pour la caractérisation hydrodynamique de la ZNS. Ces paramètres sont indispensables pour la modélisation des transferts en ZNS. Cela nécessite aussi de faire un bilan hydrique de l'infiltration naturelle ;
- Estimer les temps de transfert à la nappe. En effet, dans certaines circonstances (incidents/accidents de production notamment), il peut être nécessaire de déterminer expérimentalement (et avec précision) le temps de transfert à travers la ZNS ainsi que l'impact d'une pollution au toit de la nappe. Dans ce cas-là on se situe dans un contexte d'infiltration forcée du fait d'un déversement ou d'une fuite.

L'estimation des flux va exiger la détermination conjoint :

- Du bilan hydrique du site ;
- Des courbes de rétention ou loi caractéristiques des différents horizons rencontrés.

Cette méthodologie comprend plusieurs niveaux d'approche (niveaux 1, 2 et 3), du plus simple au plus complexe, et est schématisée ci-dessous (Figure 8) :

¹ La courbe de rétention d'eau relie la teneur en eau du milieu au potentiel matriciel et quantifie la propriété du matériau à se saturer en eau. La courbe de conductivité hydraulique relie la conductivité hydraulique à la teneur en eau et quantifie la propriété du matériau à conduire l'eau.

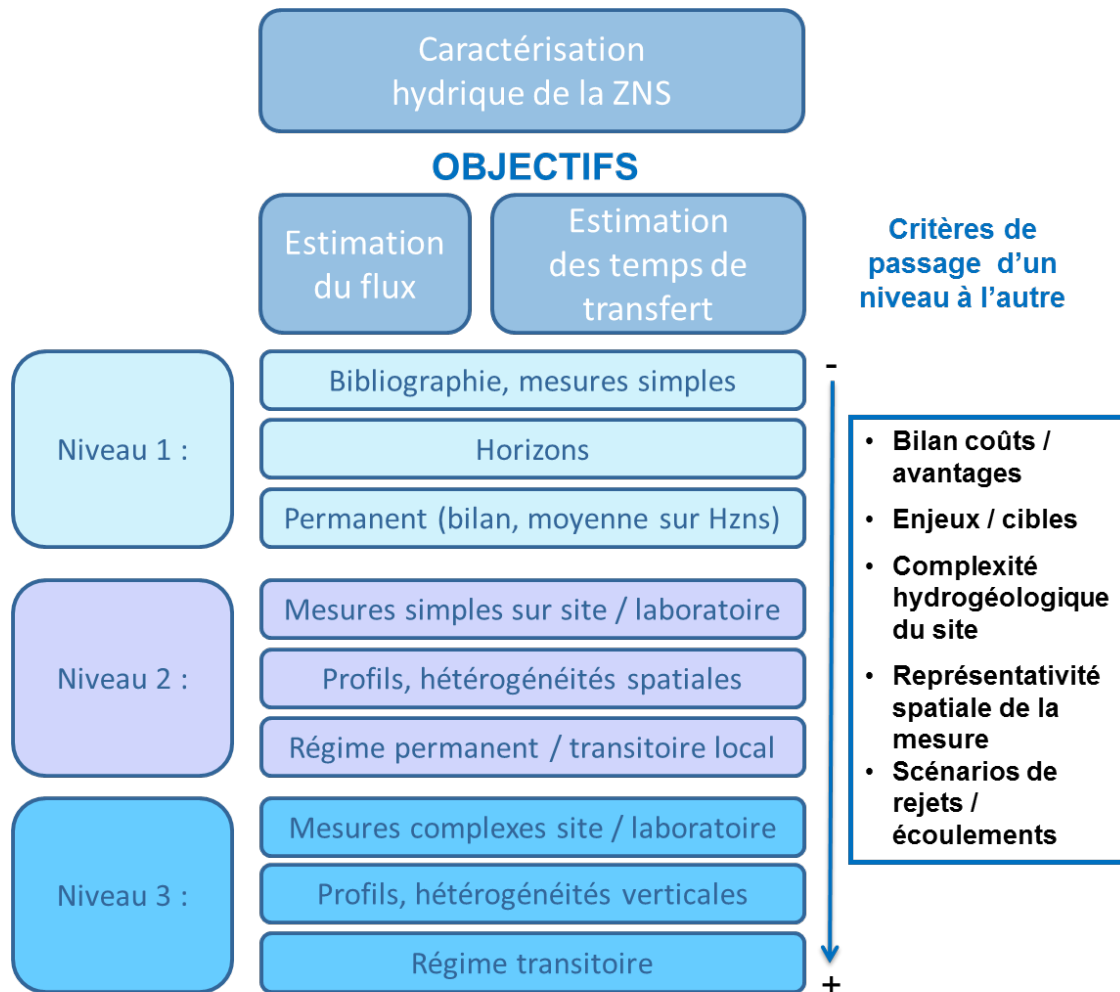


Figure 8 - Objectifs et niveaux retenus pour le guide « Caractérisation hydrique de la ZNS

Les principales méthodes préconisées selon le niveau retenues sont rappelées sur le tableau 4.

Tableau 4 - Tableau synthétique des paramètres à acquérir ou des expériences à mener par niveau pour le guide « Caractérisation hydrique de la ZNS

| Caractérisation selon régime d'écoulement | Paramètres à acquérir / expérience à mener | Informations fournies |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractérisation hydrique pour écoulement en régime gravitaire (selon scénarios de déversement) | <p>Niveau 1</p> <ul style="list-style-type: none"> - Humidité sur échantillons, ETP site - Flux entrants : volume infiltré, durée d'infiltration et superficie d'infiltration - $h(\theta)$ et $k(\theta)$ par FPT sur granulométrie - K_s par FPT /BDD - Vitesse moyenne 1D équivalent ZNS (sans transitoire) selon volume déversé, surface d'infiltration et K_s | <p>Préparation à la modélisation des écoulements non saturés</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1^{ère} informations sur les horizons de la ZNS - Première approximation des temps de transfert - Dimensionnement d'essais |
| | <p>Niveau 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Humidité sur échantillons, ETP site - K_s Darcy ou méthodes d'infiltrométrie - Estimation de V_∞ par essai anneau sous charge - $h(\theta)$ et $k(\theta)$ par BEST (surface, fosse) - Temps de transfert en transitoire (avancée d'un front d'infiltration) | <p>Amélioration de la connaissance du site :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monitoring sur site - Compléments spécifiques au site - Hétérogénéités spatiales - Information sur l'infiltration sur site |
| | <p>Niveau 3</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ruissellement par canal venturi - K_s par infiltration in-situ (forage, fosses) - Essai d'infiltration et de traçage grand infiltromètre | <p>Amélioration de la compréhension des mécanismes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vérification d'hypothèses de fonctionnement - Fonctionnement global de la ZNS en régime gravitaire (temps de séjour, atténuation) |
| Caractérisation hydrique pour écoulement en régime capillaire et/ou mixte (selon scénarios de déversement) | <p>Niveau 1</p> <ul style="list-style-type: none"> - Humidité sur échantillons, ETP site, Ruissellement sur estimation de pente - $h(\theta)$ et $k(\theta)$ par FPT sur granulométrie - K_s par FPT / BDD - Vitesse moyenne 1D à l'échelle ZNS (sans transitoire) avec bilan des infiltrations moyennes annuelles / K_s | <p>Préparation à la modélisation des écoulements non saturés</p> |
| | <p>Niveau 2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Humidité sur échantillons, ETP site - $h(\theta)$ et $k(\theta)$ par BEST (surface, fosse) - K_s Darcy (laboratoire) - K_s par forages ou en surface, couche superficielle | <p>Amélioration de la connaissance du site :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compléments spécifiques au site - Information sur l'infiltration sur site |
| | <p>Niveau 3</p> <ul style="list-style-type: none"> - ruissellement par canal venturi - acquisition de $h(\theta)$ et $k(\theta)$ in-situ {suction ; TDR} - $h(\theta)$ et $k(\theta)$ labo en imbibition et drainage - K_s par infiltration in-situ : forage, fosses - Essai d'infiltration et de traçage grand infiltromètre en adaptant la mise en œuvre au milieu et au scénario | <p>Amélioration de la compréhension des mécanismes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vérification d'hypothèses de fonctionnement - Fonctionnement global de la ZNS (temps de séjour, atténuation) |

5.2.1 Niveau 1

La typologie des sols étudiés et leurs caractéristiques structurelles donnent des informations pertinentes sur les propriétés hydrodynamiques du sol telles que la porosité, la perméabilité, les propriétés de rétention hydrodynamique (liées à la texture). De plus, les mécanismes géochimiques sont influencés par ces propriétés et nécessitent l'estimation des surfaces spécifiques et densités des sols mis en jeu.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Si cette connaissance n'est pas directement utilisable au niveau « hydrique », elle est souvent un pré-requis à l'estimation de paramètres hydriques. Mais il peut être nécessaire de mettre en œuvre des méthodes de terrain et de laboratoire pour acquérir les paramètres de transfert hydrique en ZNS.

Une **première évaluation des courbes caractéristiques $h(\theta)$ et $k(\theta)$ et de la conductivité hydraulique du sol** peut être réalisée par l'utilisation de bases de données spécifiques ou de lois empiriques sur la base de classes texturales. Le recours à ces bases de données, nécessite donc la réalisation de mesures de granulométrie des différents horizons de la ZNS.

5.2.2 Niveau 2

En niveau 2, on va affiner notre connaissance du site pour aller vers une **évaluation de plus en plus fine des flux et des temps de transfert**. Pour cela, des **méthodes de mesures en laboratoire et sur site** sont proposées qui permettront l'acquisition des **caractéristiques propres au site**.

La réalisation de fosses ou forage préliminaire pour **évaluer la variabilité verticale des faciès** entre la surface et la nappe est un préalable indispensable. Car c'est sur cette base que seront définies le nombre de couches à caractériser.

Les investigations à partir du niveau 2 prennent en compte les complexités locales et visent à caractériser les couches d'intérêts.

5.2.3 Niveau 3

En niveau 3, on va encore affiner notre connaissance du site pour aller vers une évaluation précise des flux et des temps de transfert. Pour cela, des méthodes de mesures en laboratoire et sur site sont proposées qui permettront l'acquisition des caractéristiques propres au site.

En niveau 3, on peut réaliser des essais en profondeur, en fond de fosses. Ces mesures ne sont possibles que jusque vers 2 m de profondeur. Pour des couches plus profondes, on doit recourir à des prélèvements de sols afin de réaliser des expériences en laboratoire sur des sols reconstitué à la densité apparente initiale des sols.

En niveau 3 on va aussi pouvoir prendre en compte les variations temporelles.

5.3 Conclusion du guide transfert hydrique

Une enquête, réalisée auprès des bureaux d'études et des DREALS en 2007, a montré que la zone non saturée des sols est peu souvent considérée du point de vue hydrique dans les études réalisées sur les sites et sols pollués (Cf. Bataillard et Guérin, 2008). Quelques caractéristiques physiques du sous-sol sont au mieux recherchées lors de la mise en place de certaines techniques de dépollution (évaluation de la perméabilité à l'air, à l'eau et porosité).

CAPHEINE a donc voulu illustrer les possibilités techniques actuellement disponibles permettant d'acquérir des données hydriques sur la zone non saturée.

Ce guide propose un certain nombre de méthodes pour acquérir les paramètres indispensables pour approcher au mieux les transferts hydriques et les flux d'eau en ZNS selon la sensibilité environnementale du site, c'est à dire selon les enjeux liés au site mais aussi selon la complexité de ce dernier et en regard des conditions in-situ.

Globalement, le premier niveau repose sur une approche bibliographique ou sur la base de mesures simples. Sa mise en œuvre est donc peu coûteuse, par contre les incertitudes associées aux différents paramètres restent fortes. Ce niveau est donc à réaliser en première approche de manière systématique, ensuite si la complexité du contexte du site ou les enjeux associés aux cibles identifiées l'exige, on réalisera les investigations et mesures prévues dans les niveaux 2 et 3.

Les niveaux 2 et 3 ont pour objet de diminuer les incertitudes liées au fonctionnement hydrique de la ZNS du site. Ces deux niveaux font appel à des mesures au laboratoire ou sur le terrain. Les mesures préconisées au niveau 3 sont plus difficiles à réaliser et plus chères, le passage du niveau 2 au niveau 3 reposera donc essentiellement sur un bilan coût avantage.

Cette meilleure connaissance des propriétés hydriques de la zone non saturée permet de mieux :

- Calculer les flux de contaminant parvenant à la nappe et de les intégrer dans une démarche d'évaluation des risques vis-à-vis des cibles identifiées ;
- Evaluer la vulnérabilité des eaux souterraines en permettant un calcul des temps de transfert à la nappe des polluants ;
- Définir les conditions d'application de certaines techniques de dépollution (injection, pompage).

6 Guide « Modélisation des écoulements et du transfert des ETM en ZNS »

6.1 Généralité

Ce guide expose l'intérêt, les contraintes et les limites de la modélisation des écoulements et du transport des éléments traces dans la zone non saturée. Il propose également une méthodologie graduée, de complexité croissante, selon le contexte, la complexité du site d'étude et les objectifs de la modélisation.

Dans les études d'impact réalisées sur la ressource en eau, la zone non saturée est rarement prise en compte. Dans ce cas, l'hypothèse considérée est que le transfert entre la surface du sol et la surface de la nappe est immédiat et que la concentration d'entrée dans la nappe correspond à la concentration dans l'eau des pores au niveau de la zone contaminée. Dans le cadre d'une évaluation des risques vis-à-vis de la ressource en eau, cette étape peut s'avérer suffisante pour vérifier l'absence d'impact sur la nappe. En revanche, si cette étape n'est pas suffisante, la prise en compte de la ZNS est nécessaire.

La méthodologie exposée dans ce guide vise à mettre en œuvre une modélisation prenant en compte la ZNS, dans les situations où une problématique vis-à-vis de la présence d'ETM y a été mise en évidence.

6.2 Approche méthodologique retenue

Etant donné les caractéristiques complexes que peut présenter la zone non saturée, la caractérisation des sites et le calcul des impacts prévisibles du transfert des ETM pourront, selon les contextes, s'avérer coûteux et difficiles. Aussi, une méthodologie graduée pour l'évaluation des risques liés au transfert des ETM pour la ressource en eau est proposée ici.

Cette méthodologie considère deux objectifs différents selon que l'on veuille :

- évaluer les risques vis-à-vis de la ressource en eau souterraine ;
- améliorer la compréhension des phénomènes régissant la mobilité des ETM dans la ZNS.

La méthodologie comprend plusieurs niveaux de modélisation (Niveaux 1, 2 et 3), du plus simple au plus complexe, et est schématisée ci-dessous (cf. Figure 9).

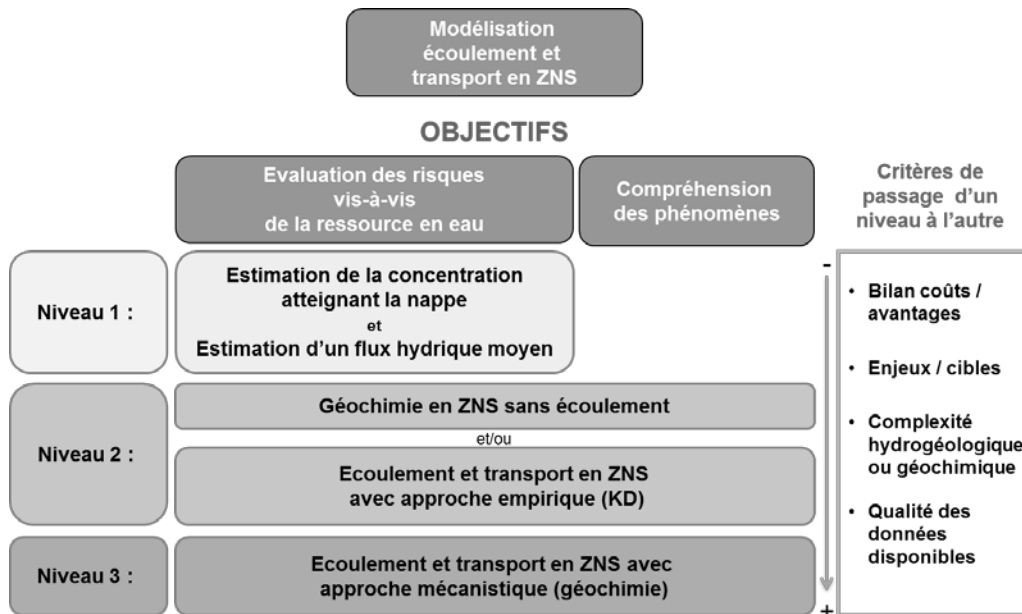


Figure 9 - Objectifs et niveaux retenus pour le guide « Modélisation des écoulements et du transfert des ETM en ZNS »

Le choix du niveau est fonction :

- d'un bilan coût/avantages, comparant les avantages apportés par la modélisation de chacun des niveaux aux coûts humains et matériels liés à l'acquisition des paramètres et à la modélisation, et également aux coûts d'éventuelles mesures compensatoires (recouvrement, confinement, ...) liées à la présence des ETM ;
- de la complexité du contexte (géologique, hydrogéologique, ...) du site ;
- de la qualité des données disponibles ;
- des enjeux (économiques, environnementaux, sociétaux, ...) liés à la présence des ETM dans la ZNS.

Dans le cas où il existe, sur le site d'étude, une contrainte réglementaire et/ou environnementale sous forme d'une concentration maximale admissible au niveau d'un point d'exposition (par exemple, critère de potabilité des eaux), le critère pour passer d'un niveau à l'autre peut être la comparaison de cette concentration avec celle calculée (issue de la modélisation) : si la concentration calculée est supérieure à la concentration maximale admissible, il peut être envisagé de passer au niveau suivant, plus complexe et plus onéreux à mettre en œuvre, mais plus réaliste et donc moins pénalisant vis-à-vis de l'impact considéré. Il est à noter toutefois que ce critère est à utiliser avec précaution dans la mesure où il doit être assuré que le niveau modélisé est réellement plus pénalisant que le suivant.

Dans tous les cas, quel que soit le niveau retenu, lorsqu'il s'agit de mesurer l'impact du transfert des ETM sur la ressource en eau, la prise en compte du transport dans la zone saturée est indispensable après l'étape de modélisation dans la zone non saturée décrite dans le présent rapport. La prise en compte de la zone saturée peut être réalisée soit :

- après la prise en compte de la zone non saturée, de manière découplée (les données de sortie du modèle ZNS sont utilisées comme données d'entrée dans le modèle ZS) ;
- de manière couplée, lorsque le code numérique utilisé intègre les phénomènes ayant lieu en ZNS et en ZS dans un même modèle. Dans ce cas, il peut être pertinent de modéliser en premier lieu en ZS seule, pour obtenir les paramètres de calage (perméabilité à saturation et recharge) à utiliser pour le modèle en zone non saturée. De même, si les matériaux aquifères présentent des caractéristiques proches de celles des matériaux de la ZNS, modéliser d'abord en ZS seulement peut permettre de préciser indirectement les caractéristiques de la ZNS (site 3).

Les principaux paramètres d'entrée nécessaires à la modélisation selon le niveau retenu sont rappelés dans le Tableau 5.

Tableau 5 - Paramètres d'entrée nécessaires selon les différents niveaux considérés et selon le type de modélisation envisagée par niveau pour le guide « Modélisation des écoulements et du transfert des ETM en ZNS »

| Niveau de modélisation | Paramètre d'entrée nécessaire | Niveau de caractérisation | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| | | Caractérisation hydrique | Caractérisation de la mobilité des ETM | |
| Niveau 1 | Estimation de la concentration atteignant la nappe: Concentration dans l'eau des pores de la zone contaminée Epaisseur de la zone contaminée Epaisseur de la zone non saturée | / / Niveau piézométrique | Niveaux 1, 2 et 3 / / | |
| | Estimation de la vitesse de transport dans la zone non saturée: Teneur en eau volumique moyenne Facteur de retard Infiltration efficace annuelle ou conductivité hydraulique à saturation | Niveau 1 / Niveaux 1, 2 et 3 | / Niveaux 1, 2 et 3 / | |
| | Modélisation des écoulements: loi de rétention loi de perméabilité conditions initiales et aux limites | Niveaux 1, 2 et 3 Niveaux 1, 2 et 3 Niveaux 1, 2 et 3 | / / / | |
| | Modélisation du transport selon l'approche empirique: porosité dispersivités longitudinale et transversale caractéristiques du double milieu (si nécessaire) conditions initiales et aux limites K _p constante de Henry (si nécessaire) | Niveau 1 et 2 / / / / / / | / / / / / Niveaux 1, 2 et 3 / | |
| | Niveau 2 | Géochimie sans écoulement: - pour le calcul de spéciation en solution et le calcul des indices de saturation : o conditions géochimiques du milieu (pH, Eh, température, pression de CO ₂) ; o composition chimique de l'eau, force ionique de l'eau, compétition avec les autres polluants et ions majeurs en solution ; o composition minéralogique des phases solides pouvant contrôler la solubilité des polluants métalliques. | / / / | Niveau 1 Niveau 2 Niveau 3 |
| | | - pour la prise en compte de l'échange cationique (ou quantification de l'adsorption) : o nombre de site d'échange par unité de masse d'échangeur ; o valeur des constantes d'échange. | / / | Niveau 2 / |
| - pour la prise en compte de la complexation de surface : o constantes de complexation pour chaque métal et chaque type de site ; o nombre de sites w et s disponibles ; o surface spécifique de la phase complexante ; o quantité totale de cette dernière présente dans le système. | | / / / / | / / / / | |
| - pour la prise en compte de la cinétique des réactions : o constante correspondant au taux de réaction. | | / | Niveaux 2 et 3 | |
| Niveau 3 | | Modélisation des écoulements: Idem Niveau 2 - Modélisation des écoulements | Idem Niveau 2 - Modélisation des écoulements | Idem Niveau 2 - Modélisation des écoulements |
| | | Modélisation du transport selon l'approche mécanistique: Idem Niveau 2 - Géochimie sans écoulement | Idem Niveau 2 - Géochimie sans écoulement | Idem Niveau 2 - Géochimie sans écoulement |

6.2.1 Niveau 1

Le niveau 1 correspond à un calcul de flux massique surfacique de polluant atteignant la nappe.

6.2.2 Niveau 2

En niveau 2, on peut retenir une approche qui consiste à modéliser les écoulements et le transport dans la zone non saturée de manière couplée ; la modélisation de la chimie du polluant étant simplifiée (Ecoulement et transport en ZNS avec approche empirique (K_D)). Le transfert d'espèces est modélisé en prenant en compte un facteur de retard rendant compte globalement de l'ensemble des processus physico-chimiques (adsorption, complexation, précipitation, ...) se produisant entre l'ETM et le milieu hôte. Ce facteur de retard dépend du coefficient de partition solide/liquide retenu et obtenu selon une isotherme linéaire, de Langmuir, de Freundlich,Le modèle utilisé pour cette étape est appelé « modèle de transport généralisé ».

Cette étape peut être complétée par une modélisation géochimique sans écoulement (ou « géochimie en batch ») pour les contextes où la géochimie est pressentie comme jouant un rôle important. Cette étape permet de tester la partie purement chimique du modèle (i.e. sans dimension spatiale) et peut constituer une étape préalable à une modélisation couplée « chimie-transport » (Niveau 3).

6.2.3 Niveau 3

A ce niveau, les écoulements et le transport sont modélisés et la chimie est traitée de façon beaucoup plus complète, selon l'approche mécanistique : le couplage géochimie/transport permet de prendre en compte, de manière spatiale, éventuellement temporelle (en régime transitoire) les différents mécanismes (précipitation/dissolution, complexation de surface, échange cationique, précipitation de surface, co-précipitation...). L'utilisation d'un tel modèle est beaucoup plus lourde en termes d'investissement humain et sera plutôt à réserver pour des sites à fort enjeux. Par ailleurs, elle nécessite une très bonne connaissance de la matrice (chimie, minéralogie et propriétés physiques).

Le modèle à utiliser pour cette étape est appelé « modèle couplé chimie-transport », utilisant deux types de codes :

- un code géochimique pour simuler les réactions physico-chimiques auxquelles un élément polluant est susceptible d'être soumis dans le milieu ;
- un code de transport pour simuler la mobilité de l'élément (diffusion/dispersion, convection).

Si la modélisation a pour objectif d'améliorer la connaissance des phénomènes régissant le transfert des ETM dans la zone non saturée, seuls les Niveau 2 et Niveau 3 peuvent prétendre répondre à cette problématique.

6.3 Conclusion du guide modélisation

Le travail réalisé dans le cadre du projet CAPHEINE a mis en évidence l'intérêt de modéliser la zone non saturée, en tant qu'outil d'aide à la décision et d'orientation des choix de gestion (dans le cadre de l'évaluation des risques vis-à-vis de la ressource en eau souterraine, par exemple) mais aussi en tant qu'outil d'aide à la compréhension des phénomènes liés à la présence des ETM dans la ZNS.

Le travail réalisé dans le cadre du projet CAPHEINE a mis en évidence l'intérêt de modéliser la zone non saturée, en tant qu'outil d'aide à la décision et d'orientation des choix de gestion (dans le cadre de l'évaluation des risques vis-à-vis de la ressource en eau souterraine, par exemple) mais aussi en tant qu'outil d'aide à la compréhension des phénomènes liés à la présence des ETM dans la ZNS.

L'utilisation des modèles demande d'avoir quelques règles de bon sens. Notamment, le choix du modèle à utiliser doit s'inspirer du principe de proportionnalité suivant : le modèle géochimique doit être le moins complexe possible compte tenu des données disponibles et des incertitudes de ces données ainsi que des objectifs assignés à l'étude (Burnol et al. 2004). Ainsi, un code trop simple risque de ne pas pouvoir prendre en considération le phénomène majeur de migration du polluant, et inversement, un code trop complexe risque de nécessiter plus de données que celles dont on dispose. Le choix d'un modèle complexe, très difficile à caler du fait de données insuffisantes, n'est pas utile et peut même être source d'erreur si l'on est amené à faire des hypothèses non justifiées. L'utilisateur doit donc juger avant l'utilisation d'un code s'il dispose des données minimales pertinentes (Burnol, 2006).

Etant donné la réalité des écoulements et transferts souterrains (milieux intrinsèquement hétérogènes et seulement partiellement investigables), les calculs peuvent, selon les contextes, s'avérer coûteux et difficiles. C'est pourquoi une méthodologie graduée de complexité croissante, comprenant plusieurs niveaux de modélisation, est proposée afin de tenir compte de la zone non saturée. Le dernier niveau (Niveau 3), qui propose d'utiliser un modèle dit « couplé » associant le transport convectif-dispersif et les réactions chimiques, peut représenter un indispensable outil d'aide à la compréhension du comportement du système. Dans le cas de systèmes complexes, les capacités prédictives du modèle peuvent s'avérer limitées.

Néanmoins, des progrès rapides sont en cours pour ce qui concerne cette capacité prédictive, notamment en termes de puissance des méthodes numériques et d'amélioration dans la prise en compte des mécanismes complexes (hystérèse, zone racinaire, double milieu, microbiologie, ...).

7 Guides sites

7.1 Site 1 : ancien site de traitement de minerai en zone gneissique

7.1.1 Contexte du site :

Le site 1 étudié par le BRGM est un ancien site de traitement de minerai aurifère présentant une zone non-saturée importante en un secteur du site (un confinement). La puissance de la zone non-saturée est majeure au niveau de la zone source de pollution et diminue à l'approche de la rivière, servant d'exécutoire à la nappe superficielle. Une nappe plus profonde située au niveau des granites et des gneiss peut localement être présente ; elle est en connexion directe avec la nappe superficielle.

Ce site d'étude a fait l'objet de nombreux travaux dont les résultats ont souligné l'importance des phénomènes d'oxydo-réduction sur le contrôle de la solubilité des éléments d'intérêt sélectionnés (Fe, Mn et As). Il a été réhabilité récemment, les travaux ont notamment consisté à confiner les matériaux contaminés. Les eaux sont recueillies dans un bassin, connecté à la rivière. Ce bassin est essentiel car il permet de lisser les pics de débit des eaux arrivant à un éventuel dispositif de traitement et assure une aération des eaux permettant ainsi d'avoir essentiellement de l'As sous sa forme V la moins toxique. En continuité hydraulique avec la nappe, il intègre les eaux souterraines et superficielles contaminées, et ses sédiments sont constitués de matériaux lessivés de la zone contaminée.

L'étape suivante est de contrôler la qualité des eaux afin de respecter les concentrations de rejet en Fe, As et Mn (imposées par arrêté préfectoral) dans la rivière qui coule en contrebas du site. Les résultats des campagnes de suivi montrent que les rejets en As et Mn dépassent parfois ces seuils.

7.1.2 Problématique :

Il est impératif de comprendre les mécanismes de contrôle des concentrations de ces éléments en solution afin d'adapter un éventuel traitement des eaux recueillies dans le bassin.

Les concentrations importantes en As observées au niveau du bassin d'aération peuvent provenir de trois phénomènes :

- l'apport continu d'eaux de ruissellement qui résultent soit de pluies soit de résurgences à différents endroits du site dont plusieurs proviennent du tas de déchets confinés ;
- une possible mobilisation d'As présent dans les sédiments les plus fins déposés au fond du bassin ;
- l'apport continu des eaux souterraines en amont du bassin et dont la contamination en As est avérée.

La persistance du manganèse en solution dans le bassin d'aération peut provenir de deux phénomènes :

- la présence de fer en solution dans le bassin inhibe l'élimination du manganèse et la formation des oxydes de manganèse ;
- le temps de séjour des eaux dans le bassin n'est pas adapté à la cinétique de précipitation du manganèse.

→ Dans le cadre du projet CAPHEINE, nous nous sommes attaché à répondre à expliciter les concentrations en arsenic et manganèses observées, afin d'évaluer et dimensionner les méthodes de réhabilitation envisagées (barrière perméable réactive, bioréacteur (wetland), ...). Ceci demande une estimation précise des flux d'eaux et des cinétiques réactionnelles afin de déterminer le temps de séjour de l'eau et les conditions physico-chimiques qui permettront l'abattement souhaité des concentrations.

7.1.3 Méthodologies mise en œuvre :

Pour répondre à cette question, les méthodes suivantes ont été mises en œuvre :

Du point de vue chimique, les caractérisation et expérimentations suivant ont été réalisées :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractérisation du contexte du site | 2 | - Susceptibilité magnétique - Fluorescence X | Cartographie du site et de localisation des zones fortement concentrées en arsenic |
| Caractérisation de la mobilité des ETM dans les conditions actuelles du site | 2 | - Réalisation de deux piézomètres en amont de la BPR - Prélèvements d'eaux souterraines et des eaux superficielles - Prélèvements et analyses d'échantillons de sédiments au fond du bassin de sols en amont du bassin - Réalisation d'extractions simples | Estimation du potentiel de rétention/mobilisation de As |
| | 3 | Réalisations de batch avec différentes conditions expérimentales, système ouvert ou système fermé et inoculé ou stérile | Etude des conditions nécessaires à l'oxydation du manganèse dans le bassin d'aération Caractérisation de la précipitation du manganèse dans le bassin d'aération |

Du point de vue hydrique, les investigations suivantes ont été menées :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|-------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractérisation du contexte du site | 1 | Achat des données météo pluviométrie plus évapo-transpiration locale à la station la plus proche | Bilans hydriques |
| Caractérisation de de la ZNS | 1 | Utilisation de bases de données et de loi empiriques sur base analyse granulométrique | - Détermination de la courbe de rétention - Détermination de la conductivité hydraulique à saturation |
| | 2 | Réalisation d'essai Best au laboratoire | |

Du point de vue modélisation, les modèles suivant ont été mis en œuvre :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Compréhension des mécanismes responsables des écoulements en zone saturée et en ZNS | 1 | Modélisation hydrodynamique en zone saturée (Feflow) | Modélisation des écoulements en zone saturée - Site avant réhabilitation |
| | 2 | Modélisation hydrodynamique en zone non saturée (Feflow) | Modélisation couplée des écoulements en zones saturée et non saturée - Site avant réhabilitation |
| | 2 | Modélisation hydrodynamique en zone non saturée (Feflow) | Modélisation couplée des écoulements en zones saturée et non saturée - Site après réhabilitation |

7.1.4 Retour d'expérience :

Problématique de l'arsenic

Les extractions et les analyses chimiques des sols ont montré que l'arsenic et le manganèse se fixent principalement dans l'horizon superficiel par adsorption sur des oxydes de fer bien cristallisés au pied du confinement et plus amorphes près du bassin. La zone non saturée n'est donc pas une source d'arsenic compte tenu de la configuration du site, au contraire elle présente les conditions favorables à sa fixation.



L'ensemble des observations et des mesures permet de conclure que les eaux circulant au sein du site contribuent toutes à l'apport d'arsenic dans le bassin. En effet l'arsenic présent dans le bassin provient essentiellement des drains issus du confinement, des sédiments et des eaux souterraines.

Les résultats de caractérisation des sédiments du bassin ont bien montré la présence majoritaire d'As(III) dans la fraction lixiviable à l'eau mais l'ensemble des caractérisations montre qu'il est oxydé en As(V) lors de son séjour dans la colonne d'eau avant son rejet. Si les eaux de ressuyage du confinement devenaient acides et réductrices une solubilisation de l'arsenic pourrait être observée. Cet élément pourrait donc être efficacement sorbé sur des particules d'oxydes de fer dans le cadre d'un traitement passif des rejets.

La spéciation des eaux du bassin met en évidence que d'un point de vue thermodynamique l'oxydation du manganèse présent en solution est possible. La quantité de fer dans les eaux du bassin est trop faible pour permettre la précipitation du manganèse par sorption sur les oxy-hydroxydes de fer. L'expérience réalisée met en évidence que le manganèse peut précipiter par oxydation favorisé soit par catalyse microbienne soit par catalyse hétérogène.

L'adsorption de l'arsenic sur les hydroxydes de fer précipités préalablement pourrait permettre de contrôler la mobilité de l'arsenic dans les eaux. Des simulations réalisées avec le logiciel PHREEQC mettent en évidence l'adsorption de l'arsenic et du manganèse sur les hydroxydes de fer entre le pied du confinement et le bassin. Ces derniers proviennent essentiellement d'une résurgence, positionnée à l'est du drain central et au pied du talus, présentant de forte concentration en fer.

Cependant au niveau du bassin de rétention les concentrations en fer ne sont pas assez importantes pour permettre la précipitation du fer et du manganèse sous forme d'oxyde afin de créer des sites de sorption pour l'arsenic V. De plus on constate que les concentrations en arsenic sont plus importantes à la sortie qu'à l'entrée du bassin (Annexe A). Les conditions dans le fond du bassin sont probablement anoxiques ce qui entraîne la réduction de l'arsenic V en arsenic III et remobilise l'arsenic dans les eaux du bassin.

Les techniques de remédiation qui peuvent être envisagées pour abattre les concentrations en arsenic doivent inclure l'oxygénation des eaux et/ou un ajout de fer.

Etude du manganèse

Dans les eaux du bassin, les oxy-hydroxydes de fer précipités sédimentent en profondeur. Cependant la quantité d'oxygène dissous en profondeur dans le bassin est faible, donc le manganèse dissous qui aurait pu se sorber sur les oxy-hydroxydes de fer ne peut pas être oxydé. Dans cette configuration l'oxydation du manganèse par catalyse hétérogène dans les eaux du bassin est difficile. Aussi, le temps de séjour des eaux dans le bassin n'est pas assez important pour permettre l'oxydation par catalyse microbienne qui est inhibé par la présence de fer en solution.

Les mesures de gestion permettant de favoriser l'oxydation du manganèse peuvent être de deux types. La première consisterait à augmenter le temps de séjour des eaux dans le bassin. Pour permettre la mise en place de l'oxydation du manganèse par catalyse microbienne inhibée dans un premier temps par la présence de fer en solution. La deuxième solution serait d'oxygéner le bassin

pour favoriser l'oxydation du manganèse par catalyse hétérogène sur les oxy-hydroxydes de fer ou d'aluminium par exemple présents dans les couches inférieures dans le bassin.

Modélisation des écoulements

Le modèle hydrodynamique du site après réhabilitation permet de rendre compte de la piézométrie et des flux d'eau observés sur le terrain. Ce modèle pourra servir d'outil afin d'optimiser le système de gestion des eaux, en permettant notamment de dimensionner les aménagements permettant d'augmenter le temps de séjour dans le bassin d'aération.

D'un point de vue méthodologique, l'ensemble des modélisations a mis en évidence l'importance des données (en qualité et en quantité), pour la construction du modèle (données d'entrée : modèle géologique, données relatives aux relations nappe /rivière) et pour le calage du modèle (données de calage : données piézométriques sur tout le domaine d'étude, données relatives à l'état de saturation de la ZNS à différentes profondeurs).

Le passage du modèle en mode saturé au modèle prenant en compte la ZNS a mis en évidence les contraintes numériques associées à la modélisation de la ZNS. Il existe en particulier une difficulté dans la définition verticale des différentes couches. En effet, la précision des résultats (notamment ceux liés à l'estimation de la saturation dans le ZNS) sera d'autant plus grande que la hauteur des couches sera faible ; mais une hauteur de couche trop faible conduit à des problèmes numériques. Or sur le site, il existe une forte variation d'épaisseur de la couche des résidus miniers qui est liée à la présence du terril. La nécessité imposée par l'utilisation de FEFLOW de définir des couches continues (non biseautées) conduit à des variations d'épaisseur de couches très importantes (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Il y a alors un compromis à trouver dans le nombre de couches à utiliser afin d'obtenir des résultats convergents et suffisamment précis.

Suite aux difficultés rencontrées pour obtenir un calage satisfaisant du modèle préliminaire (Béranger, 2007), la définition d'un domaine de plus faible superficie montre l'importance de la phase de conceptualisation. Face aux contraintes numériques et aux difficultés liées à l'acquisition et à la représentativité des données (géologiques, hydrogéologiques), la définition des limites du domaine est à traiter avec attention.

L'ensemble des modélisations a également mis en évidence l'intérêt de modéliser en premier lieu le site en mode saturé. En effet, les contraintes numériques associées à la modélisation en zone saturée sont moins importantes et les paramètres à caler sont moins nombreux. Si les matériaux aquifères présentent des caractéristiques proches de celles des matériaux de la ZNS, modéliser d'abord en ZS seulement permet de préciser indirectement les caractéristiques de la ZNS.

7.2 Site 2 : Site de stockage de sédiments en zone alluvionnaire

7.2.1 Contexte du site :

Le site 2 est un site de dépôt de sédiments de curage. En amont et en aval du dépôt sont implantés deux ensembles métallurgiques dont les rejets ont largement influencé la qualité des sédiments mis en dépôt par la suite. Des sédiments plus ou moins chargés en éléments traces (Pb, Zn, Cd et As) ont été déposés en plusieurs phases entre 1965 et 1976 sur le terrain naturel argilo-sableux, correspondant à plusieurs phases de travaux d'élargissement, d'approfondissement et de curage. Sous cette couche argilo-sableuse se trouve la craie du sénonien qui porte une nappe d'enjeu majeur puisqu'elle représente la ressource d'alimentation en eau potable de la région.

L'épaisseur de la zone non-saturée est au total d'une dizaine de mètre avec une forte stratification héritage du passé du site. Cette stratification est à l'origine de la présence d'une nappe perchée fortement contaminée car située au sein de la couche de sédiment la plus superficielle qui est aussi la plus contaminée.

→ Dans le cadre du projet CAPHEINE, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'interaction argile-zinc dans la couche située avant la nappe phréatique, en développant un modèle d'échange d'ions prenant en compte les modifications chimiques du milieu (pH, cations majeurs). Ce modèle a ensuite été implémenté dans des simulations chimie-transport prenant en compte le transfert en ZNS.

7.2.2 Problématique :

Après 30 ans de lessivage par les eaux météoriques, la nappe ne présente aucune atteinte. L'objectif de cette étude est d'estimer à l'aide d'un modèle d'interface solide solution complexe, le temps de migration d'un polluant (Zinc ici) entre la couche polluée et la nappe phréatique.

7.2.3 Méthodologies mise en œuvre :

Pour répondre à cette question, mais aussi dans un objectif de comparaison et d'évaluation les méthodes suivantes ont été mises en œuvre.

Du point de vue chimique, les caractérisation et expérimentations suivant ont été réalisées :



| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Caractérisation du contexte du site | 1 | - granulométrie - pH - carbone organique - calcaire total | Potentiel de rétention des ETM |
| | 2 | - CEC | Caractérisation des réactions de surface |
| | 3 | - Isothermes rétention en fonction du pH et cations majeurs | Caractérisation des réactions de surface |
| Caractérisation de la mobilité des ETM dans les conditions actuelles du site | 3 | Expérience de vieillissement | Mise en évidence des processus responsables de la mobilité des ETM |

Du point de vue hydrique, les investigations suivantes ont été menées :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|--------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Bilans hydriques | 1 | Achat des données météo pluviométrie plus évapo-transpiration locale à la station la plus proche | Pluviométrie efficace annuelle |
| | 2 | Travail sur estimation d'EP réel sur site et mesure sur site de la pluviométrie | Travail sur évolution niveau nappe perché avec la pluviométrie |
| Détermination de la courbe de rétention | 1 | Utilisation de bases de données et de loi empiriques sur base analyse granulométrique | Estimation des paramètres de formes des lois $h(\theta)$ |
| | 3 | Mesure conjointe sur site ou au laboratoire de l'humidité et de la succion Réalisation d'essai au laboratoire d'établissement | Estimation des paramètres de formes des lois $h(\theta)$ |
| Détermination de la conductivité hydraulique à saturation | 1 | Utilisation de base de données et lois empirique sur base analyse granulométrique | Estimation de K_s |
| | 2 | Essai d'infiltration en surface (best, persan) Essai en microforage Essais Lefranc, | Estimation de K_s |
| | 3 | Essais de Darcy en laboratoire sur carotte de sol intègre. | Estimation de K_s |

Du point de vue modélisation, les modèles suivant ont été mis en œuvre :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|---------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Estimation des risques vis-à-vis de la ressource en eau | 2 | Ecoulement et transport en ZNS – approche KD (Porflow) | Profil de concentration vertical en fonction du temps |
| | 3 | Ecoulement et transport en ZNS – transport réactif (HYTEC) | Profil de concentration vertical en fonction du temps |

7.2.4 Retour d'expérience :

De manière générale, on note que l'approche de modélisation couplée chimie-transport permet une description satisfaisante de la migration du zinc après 30 ans de dépôt. Des essais de simulation ont par ailleurs été réalisés avec l'approche du transport généralisé, qui ont montré que les profils expérimentaux et simulés présentent des différences au niveau du terme source ainsi qu'au niveau du profil de migration.

Les données de terrain obtenues lors des essais de caractérisation des flux hydriques ont été utilisées pour orienter le choix des données d'entrée et en vérifier les ordres de grandeur. Les données de terrains sont en effet ponctuelles et sur ce site ne permettaient que partiellement de prendre en compte les variabilités locales liées à la mise en place de fissure. Ce site nous a permis aussi de tester les limites de certain des outils mis en œuvre tels que l'essai Best et le perméamètre de Guelph, sur ce terrain très peu perméable présentant une très forte succion.

En simulation chimie-transport, à partir du terme source actuel, un temps de migration d'environ 120 ans est ainsi estimé pour le zinc pour commencer à atteindre la nappe de la craie. Cet exercice de modélisation a montré que la fraction argileuse présentait le pouvoir d'immobilisation le plus important en regard de celui de la fraction calcite.

La prise en compte de la chimie (complexation des métaux en solutions, précipitation, sorption) s'est donc révélée importante dans cette étude pour caler le modèle correctement et estimer un temps de migration en prenant en compte d'éventuelles modifications chimiques du milieu. Il est à noter que bien que l'approche chimie-transport donne des résultats plus satisfaisants, beaucoup de simplifications ont déjà dû être réalisées pour la mettre en œuvre.

7.3 Site 3 : Site industriel en zone alluvionnaire

7.3.1 Contexte du site :

Le site 3 a pour activité le traitement de bois et de poteaux destinés aux lignes téléphoniques et électriques. Cette activité a démarré en 1929 et différents types de traitement se sont succédés, impliquant l'utilisation de différents composés chimiques, en particulier du CCA (cuivre, chrome et arsenic) et de la créosote. Les composants du CCA (Cuivre, Chrome, Arsenic) sont fortement solubles dans l'eau et présentent une forte propension à se fixer et à s'accumuler dans le sol, l'humus et les déchets organiques dans les cours d'eau. Les sels d'arséniates (As_2O_5) constituent l'élément le plus soluble de la solution. Par conséquent, leur pouvoir de migration est plus fort. Actuellement, les produits utilisés sur site pour le traitement du bois sont les solutions de CC (CrO_3 , CuO et eau) et de créosote (mélange de HAP, 5 % du volume des bois traités). L'arsenic n'est donc plus un intrant de l'entreprise.

➔ Dans le cadre du projet CAPHEINE, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'arsenic ainsi qu'à son transfert des sols vers les eaux souterraines, puisque le suivi réglementaire de la qualité des eaux souterraines a montré que seul l'arsenic est détecté à des concentrations supérieures aux limites de qualité fixées pour les eaux de consommation (arrêté du 11 janvier 2007) et ce uniquement au droit du puits de l'usine.

Sur le site, la zone non saturée (ZNS) est composée d'un sol caillouteux, limono-argilo-sableux, jusqu'à 3 m de profondeur environ. La partie inférieure de cette ZNS (3 – 6 m environ) est composée d'alluvions sablo-graveleuses. Il s'agit du matériau constitutif de l'aquifère. Le toit de la nappe se situe en moyenne à 6 m de profondeur en hautes-eaux et 7 m de profondeur en basses-eaux.

7.3.2 Problématique :

Les résultats du suivi réglementaire de la qualité des eaux souterraines ont montré que les concentrations en arsenic dans le puits de l'usine étaient très corrélées à la piézométrie : les concentrations en arsenic étaient d'autant plus élevées que le niveau de la nappe était élevé, ce qui indiquerait qu'en saison de hautes-eaux, les eaux souterraines seraient en contact avec la pollution, permettant ainsi son passage en solution. La problématique sur ce site était de mieux comprendre les variations de concentrations en As dans les eaux souterraines au droit du puits de l'usine en acquérant une connaissance fine des mécanismes physico-chimiques impliqués dans la mobilité de l'As.

7.3.3 Méthodologies mise en œuvre :

Pour répondre à cette question, mais aussi dans un objectif de comparaison et d'évaluation les méthodes suivantes ont été mises en œuvre :

Du point de vue chimique, les caractérisations et expérimentations suivant ont été réalisées :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractérisation du contexte du site | 1 | - granulométrie - pH - carbone organique - calcaire total | Potentiel de rétention des ETM |
| | 2 | - CEC | Caractérisation des réactions de surface |
| | 3 | - Minéralogie : DRX - Extractions séquentielles | Phases porteuses d'ETM pour modélisation géochimique |
| Caractérisation de la mobilité des ETM dans les conditions actuelles du site | 1 | Estimation d'un K_D sur base de la désorption (essai de lixiviation normalisé) | Estimation chiffrée du potentiel de rétention/mobilisation des ETM |
| | 3 | Colonnes non normalisées avec contraintes imposées représentatives du site 3 (infiltration d'eau de pluie et remontée de nappe) | Mise en évidence/discussion des hypothèses concernant les processus responsables de la mobilité des ETM |

Du point de vue modélisation, les modèles suivants ont été mis en œuvre :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|----------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Compréhension des mécanismes responsables du relargage de l'As | 2 | Modélisation géochimique sans transport | Mécanismes physico-chimiques responsables de la rétention/mobilité des ETM |
| | 3 | Modélisation couplée géochimie/transport | Mécanismes physico-chimiques responsables de la rétention/mobilité des ETM |

7.3.4 Retour d'expérience :

Les investigations sur site sur les sols et les eaux souterraines ont montré que la source de pollution en As était très localisée et située en amont immédiat du puits de l'usine. Du matériau contaminé en As a été prélevé entre 2,5 et 3 m de profondeur, niveau que la nappe n'atteint jamais. A cette profondeur, les sols sont limono-sablo-argileux. Le niveau statique à cet endroit est d'environ 6 m en hautes-eaux et 7 m en basses-eaux. Cependant, les prélèvements d'eaux souterraines réalisés au droit du puits de l'usine ont mis en évidence une corrélation entre le niveau de la nappe sur le site et les concentrations en arsenic dans les eaux souterraines : en période de hautes-eaux, la nappe serait en contact avec la pollution, permettant ainsi son passage en solution. Ceci a permis de proposer le schéma de fonctionnement du site suivant :



- relargage d'arsenic des couches supérieures limono-sablo-argileuses de la ZNS suite à une infiltration d'eau de pluie ;
- fixation « transitoire » de l'arsenic sur les couches inférieures de la ZNS (alluvions sablo-graveleuses) avec lesquelles la nappe est en contact ;
- relargage d'arsenic suite au contact entre la nappe et les alluvions sablo-graveleuses polluées en arsenic en période de hautes-eaux.

Afin de mettre en évidence les mécanismes physico-chimiques responsables de la mobilité de l'As sur le site, une caractérisation physico-chimique du matériau constitutif de la zone non saturée a été effectuée (partie supérieure : matériau limono-sablo-argileux contaminé en As et partie inférieure : alluvions sablo-graveleuses, constitutives de l'aquifère). Des extractions séquentielles ont notamment été réalisées sur le matériau contaminé en As. Par ailleurs, 2 types d'expériences ont été menées au laboratoire :

- des expériences de lixiviation en batch selon les normes européennes de qualité du sol ISO/TS 21268-1 et 2, sur du matériau contaminé en As et prélevé entre 2,5 et 3 m de profondeur ;
- des expériences en colonne non normalisées. Elles ont été menées sur les deux matériaux constitutifs de la ZNS afin de simuler des infiltrations d'eau de pluie ainsi que des battements de nappe puisque ces deux phénomènes ont été identifiés comme responsables du relargage de l'As sur le terrain. Ces expériences en colonne plus complexes ont volontairement été conduites afin d'identifier leur valeur ajoutée par rapport à des expériences plus simples, normalisées, en batch.

La caractérisation physico-chimique des matériaux constitutifs de la ZNS couplée à ces expériences de laboratoire a permis de définir le modèle conceptuel du relargage de l'As dans ce sol. Ainsi la sorption de l'As(V) sur la ferrihydrite ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ (am)) a été identifiée comme le mécanisme de rétention le plus probable dans ce cas. Le relargage de l'As est contrôlé par un équilibre de sorption entre l'As(V) et la ferrihydrite. Afin de valider ce modèle conceptuel, une modélisation géochimique simple et une modélisation couplant géochimie et transport ont été réalisées respectivement pour les expériences en batch et en colonne. Les résultats ont montré que dans le cas du site 3, des expériences en batch couplées à une caractérisation physico-chimique complète du matériau constitutif de la ZNS et à des extractions séquentielles étaient suffisantes pour mettre en évidence les mécanismes physico-chimiques principaux responsables du relargage de l'arsenic sur le site. Cependant, dans d'autres cas, des expériences en colonne pourraient s'avérer utiles si toutes les informations nécessaires à la compréhension des mécanismes n'ont pas été obtenues grâce à des expériences plus simples.

Par ailleurs, ces résultats montrent que les concentrations que l'on observera dans la nappe ne vont pas augmenter au cours du temps puisque la rétention de l'arsenic est gouvernée par un équilibre de sorption entre l'As(V) et la ferrihydrite, si les conditions physico-chimiques (notamment pH, Eh, force ionique de l'eau de la nappe) et naturelles (direction et sens d'écoulement) restent similaires. On pourrait même s'attendre à une diminution des concentrations dans ce cas sur le très long terme au vu du faible relargage. En effet, une diminution des teneurs dans le sol impliquera une

diminution des concentrations en solution selon le mécanisme de rétention identifié. En outre, l'impact sur les eaux souterraines est faible puisque le suivi réglementaire a montré que l'impact de la pollution à l'extérieur du site était négligeable. De ce fait, l'une des mesures de gestion qu'il serait possible de prendre pourrait être de faire évoluer la surveillance des eaux souterraines sur ce site et de passer à une fréquence d'un prélèvement d'eau souterraine par an dans tous les piézomètres, en période de hautes-eaux. Cependant, à ce stade de l'étude, une quantification de l'évolution des concentrations en As dans la nappe resterait trop imprécise, même au droit du puits de l'usine. En effet, de nombreuses hypothèses simplificatrices ont été faites pour la modélisation et il subsiste encore des incertitudes sur la composition minéralogique exacte des échantillons et notamment la quantité de ferrihydrite et d'autres minéraux qui pourraient être responsables du relargage de l'As.

7.4 Site 4 : Site industriel en zone alluvionnaire

7.4.1 Contexte du site :

Le site d'investigation N°4 est un site industriel - propriété d'EDF – implanté sur une large superficie (plusieurs dizaines d'hectares). Les activités industrielles du site induisent l'utilisation de composés chimiques dissous.

Dès l'implantation du site, des investigations ont été mises en œuvre, améliorant la connaissance du contexte géologique, hydrogéologique et hydrologique du site. En particulier, des travaux relatifs à la caractérisation hydrique de la zone non saturée du site ont été entamés ces dernières années, visant notamment à améliorer les aspects méthodologiques (projets ANR-TRANSAT, ADEME-Caphéine, GGP-Environnement, programmes de recherche EDF R&D).

Le site repose sur une base d'alluvions sur laquelle les ouvrages ont été implantés. Auparavant ont eu lieu des travaux importants de terrassement (sols décaissés puis remis en place par compactage en couches). Les sols recréés sont ainsi constitués dans leur grande majorité d'alluvions remaniés et compactés. La zone non-saturée du site, d'une épaisseur moyenne d'environ 5 m, est ainsi composée de remblais anthropiques surmontant les alluvions sablo-graveleuses de la rivière. Si du fait des remaniements successifs et du compactage, ces formations sont considérées comme relativement plus homogènes et moins perméables que les formations en place, il existe en revanche des zones où il est difficile de compacter correctement (voisinage immédiat des murs extérieurs des bâtiments, des canalisations ou galeries). Ces zones de plus faible densité apparente et de moins grande compacité ont constitué au cours du temps des voies d'écoulement privilégiées.

→ **Dans le cadre du projet CAPHEINE**, nous nous sommes plus particulièrement intéressés au **comportement hydrique de la ZNS du site, dans un contexte de transferts depuis la surface jusqu'à la nappe**, mettant en œuvre des **méthodes de caractérisation à l'échelle locale et globale** (échelle de la ZNS).

7.4.2 Problématique :

L'objectif de l'étude est d'améliorer la prévision du transfert de polluants dans la zone non saturée (ZNS) sur ce site industriel, dont la couche supérieure du sol est très largement constituée de remblais. L'enjeu est ainsi d'améliorer la prévision du devenir à court ou long terme de polluants répandus accidentellement à la surface du sol, notamment dans les zones à forte vulnérabilité (proximité des lieux de stockage, zones décompactées). L'enjeu est aussi de se donner les moyens d'apporter rapidement les réponses aux questions relatives à l'enjeu environnemental dans le cas d'incidents/accidents de production.

L'existence d'un risque à plus ou moins long terme pour les eaux souterraines doit ainsi se faire en tenant compte :

- des usages actuels : définition des scénarios : déversement, typologie des polluants, contexte hydrogéologique (hautes/basses eaux) ;
- d'éventuelles modifications physico-chimiques ultérieures du site d'étude.

A l'échelle des problèmes abordés (zone non saturée d'épaisseur quelques mètres), l'hétérogénéité marquée de la ZNS et différents scénarios de rejets (modification du régime hydraulique) se traduisent par une large disparité des temps d'arrivée et des concentrations des polluants au toit de la nappe. Pour mieux apprécier les risques au regard de l'usage du site, il est nécessaire de disposer d'un nombre suffisant de données hydriques et chimiques qui peuvent nécessiter des essais de laboratoire.

Ceci demande notamment une connaissance fine des caractéristiques hydriques de la zone non saturée. Ainsi, d'un point de vue méthodologique, l'étude a également adressé les questions suivantes :

- quelles méthodes de mesures peut-on mettre en œuvre dans le cas particuliers de remblais et d'alluvions ?
- quelle validité accorder aux résultats obtenus (comparaison des résultats obtenus) ?

7.4.3 Méthodologies mise en œuvre :

Pour répondre à cette question, mais aussi dans un objectif de comparaison et d'évaluation les méthodes suivantes ont été mises en œuvre :

Du point de vue hydrique, les investigations suivantes ont été menées :

| | Niveau | Méthodes mises en œuvre pour l'acquisition des lois de rétention | Méthodes mises en œuvre pour l'acquisition de la conductivité à saturation | Méthodes mises en œuvre pour l'estimation des temps de transfert à travers la ZNS |
|----------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractérisation du contexte hydrique du site | 1 | Utilisation de bases de données et de loi empiriques sur base analyse granulométrique | Utilisation de base de données et lois empirique sur base analyse granulométrique | Interprétation « analytique » de l'essai « grand infiltromètre » (cf. « Modélisation ») |
| | 2 | Réalisation d'essai Best sur site | Infiltrométrie in-situ : Porchet, microforage / miniPorchet, BEST | |
| | 3 | Réalisation d'essai au laboratoire d'établissement de courbe de rétention | Essais en laboratoire à l'oedomètre sur carotte de sol intègre. | Essai « grand infiltromètre » |

Du point de vue modélisation, les modèles suivants ont été mis en œuvre :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Acquisition des propriétés de la ZNS : « Retard », « Atténuation », « Emission » | 1 | Modélisation analytique 1D | Paramètres équivalents ZNS (Temps de séjour, Vitesse, Dispersion, Atténuation) |
| | 2 | Modélisation transport sans géochimie | Validation des données acquises, Vérification d'hypothèses, Optimisation de la mise en œuvre de l'essai « Grand Infiltromètre » (scénarios de déversement) |

Du point de vue chimique, aucun travail de caractérisation ni d'expérimentation n'est présenté dans ce guide.

7.4.4 Retour d'expérience :

Les investigations sur le site avaient pour objectif principal d'améliorer la méthodologie de caractérisation hydrique et d'apporter un retour d'expérience quant à l'acquisition des paramètres hydriques. Les méthodes d'acquisition des paramètres hydrodynamiques déployées impliquent différents niveaux de représentativité et génèrent des résultats propres à la méthode, sa mise en œuvre ou son modèle d'interprétation. Il n'apparaît ainsi pas possible de mettre en avant une méthode plutôt qu'une autre, le retour d'expérience sur chaque méthode permet toutefois d'appréhender les avantages / inconvénients de chacune :

- BDD / PTFs (échelle -) : des bases de données intégrant de nombreux travaux de caractérisation sont librement disponibles. Des Fonctions PédoTransferts (PTFs), dérivées de ces bases de données, permettent d'estimer l'ensemble des paramètres hydrodynamiques à partir d'une information réduite / facilement accessible : granulométrie, teneur en eau à saturation, masse volumique. Ces bases de données sont généralement bien renseignées pour les sols du site N°4, à savoir de type sableux, sableux-limoneux. Les estimations des conductivités par PTFs se révèlent pertinentes ici malgré la présence importante de fractions grossières dans les échantillons. Les teneurs en eau à saturation ont souvent été surestimées, une mesure de terrain est préconisée (paramètre influent sur les courbes de percée dans le cas de régime mixte ou capillaire). Les PTFs sont sensibles à la représentativité de l'échantillon, plusieurs échantillons sont nécessaires afin de fiabiliser l'information,
- Laboratoire (échelle dm³) : les essais en laboratoire (Darcy, TDR, BEST) sont souvent mis en œuvre sur des échantillons déstructurés et / ou remaniés pour des volumes de sols de l'ordre de quelques dm³. L'acquisition en laboratoire a permis de s'affranchir de limitations inhérentes au terrain (ex : humidité initiale et temps d'infiltration pour BEST) et a offert la possibilité de caractériser les échantillons prélevés en profondeur (essais Darcy sur échantillons carottés). Toutefois, les conductivités acquises par essais Darcy sur carottes non remaniées se sont révélées inférieures d'un à trois ordres de grandeur aux valeurs acquises in-situ,
- BEST In-situ (échelle dm³) : la procédure BEST déployée in-situ permet d'acquérir l'ensemble des paramètres $h(\theta) / k(\theta) + K_s$ en conservant la structure et la texture des sols. Elle investit toutefois un faible volume de milieu poreux (dm³). Si cette méthode est en théorie applicable à tout type de matériaux, sa mise en œuvre semble toutefois plus adaptée à des sols de type sableux, sableux-limoneux (temps d'infiltration). Les estimations des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ ont été pertinentes en regard des informations fournies par d'autres méthodes (BDD, acquisition en laboratoire, mesures d'humidité après carottage) ou même modélisation,

- Infiltrométrie in-situ (échelle dm^3 à m^3): les méthodes d'infiltrométrie sous charge (variable ou pas) apparaissent plus robustes pour l'acquisition de la conductivité hydraulique à saturation (mise en œuvre simple, interprétation analytique), paramètre prépondérant dans l'évaluation des flux. La méthodologie d'interprétation est toutefois moins poussée que le modèle BEST : seule l'asymptote (régime permanent) de la courbe d'infiltration est utilisée, lorsque BEST évalue en plus les effets capillaires lors du transitoire des premiers instants de l'infiltration.

En conclusion, les courbes déterminées par la méthode BEST apparaissent cohérentes pour les typologies de sols étudiées ici (i.e. des sols plutôt sableux). Au même titre que les PTFs, l'information pertinente pour l'établissement des lois $h(\theta)$ et $k(\theta)$ est pour une grande part basée sur les données texturales à l'échelle locale (essai / échantillon). Les restitutions de BEST sont marquées par plus d'hétérogénéités, liées d'une part à l'hétérogénéité intrinsèque du sol mais aussi à une sensibilité de la méthode quant à la mise en œuvre de l'essai (humidité initiale, atteinte du régime permanent). Les méthodes restent sensibles toutefois à la question de la représentativité de l'échantillon (granulométrie, présence d'éléments grossiers), notamment dans les sols grossiers.

Une parcelle du site a fait l'objet d'un essai grand infiltromètre. La mise en œuvre de cet essai d'infiltration et traçage permet d'être représentatif d'un évènement de déversement de plusieurs m^3 d'eaux polluées, en impliquant ainsi toute l'épaisseur de la ZNS et ceci sur des volumes de plusieurs m^3 de milieux poreux. L'infiltration est couplée à un traçage non réactif afin d'estimer le temps de transfert et l'atténuation des concentrations du traceur entre la surface du sol en place et le toit de la nappe. Les résultats rendent compte de transferts rapides, à l'échelle d'une journée dans la ZNS, et présentent une atténuation du signal à travers la ZNS est de l'ordre de 96%.

Les conditions de mise en œuvre de l'essai induisent un régime hydraulique principalement gravitaire et ne rendent pas forcément compte du comportement de la zone pour des scénarios différents de rejets (volume rejeté plus faible, suintement). Si l'essai est à réserver aux zones présentant de forte vulnérabilité, il reste la seule méthode à rendre compte d'un fonctionnement global (hydrodynamique, hydrodispersif) à l'échelle de la ZNS entière.

Sur la base des informations fournies par les travaux de caractérisation (essai grand infiltromètre compris), un modèle numérique à l'échelle locale a été construit et calé sur les restitutions de l'essai grand infiltromètre (niveaux piézométriques et courbes de percée dans trois ouvrages). Même à l'échelle locale, la démarche de validation peut être longue :

- de par la lourdeur du modèle numérique (taille du domaine, maillage, convergence),
- et de par l'amélioration continue du modèle malgré d'importants degrés de liberté des paramètres (corrélations entre paramètres, incertitudes sur les données d'entrée).

La validation du modèle local est considérée d'un point de vue hydrodynamique (niveaux piézométriques) et hydrodispersifs (courbes de percée). Si le modèle restitue de façon acceptable les temps d'arrivée et les ordres de grandeur, la traînée dans chaque ouvrage est largement surestimée.

L'amélioration du modèle nécessiterait d'avoir une meilleure information quant au profil de saturation du terrain avant essai (pluie importante les jours précédents).

Le modèle a permis de vérifier la qualité des informations acquises en amont (notamment conductivité à saturation équivalente de l'ordre 3 à 4 10^{-5} m/s). Le modèle a permis d'invalider certaines hypothèses, notamment la formation d'un dôme au droit de l'infiltromètre qui pourrait induire un biais dans l'estimation des fonctions de transfert. Un continuum hydraulique, accompagné d'un dôme, ne semble en effet se mettre en place que lors de phases intermédiaires où le maintien de la charge n'était plus assuré. Une première évaluation de la sensibilité du modèle aux paramètres a été conduite, mettant en exergue la sensibilité du modèle à la teneur en eau à saturation (~porosité efficace) ainsi qu'à la taille de la frange capillaire (assez faible ici).

En définitive, il apparaît pertinent de combiner des méthodes à échelle locale (dm^3) à des méthodes plus globales (Porchet, grand infiltromètre) pour affiner la compréhension des mécanismes de transfert et ce jusqu'à l'échelle de la ZNS. Les mesures ponctuelles permettent d'affiner l'information sur l'hétérogénéité spatiale (et notamment verticale). Toutefois, la plupart des paramètres acquis ne sont valorisables que par la mise en œuvre d'un modèle numérique.

7.5 Site 5 : Site de fabrication d'engrais en contexte calcarénitique

7.5.1 Contexte du site :

Le site 5 est une usine de fabrication d'engrais minéraux (azotés, phosphatés), dont l'activité a débuté il y a plus de 100 ans, qui a fait appel au cours de son histoire à différents procédés induisant la production d'acide sulfurique par grillage de sulfures (oxydation thermique de la pyrite avec ses impuretés). Son activité a engendré le rejet atmosphérique des gaz de grillage de la pyrite par des cheminées sur site et au-delà. Les déchets de la production d'engrais (résidus de grillage de la pyrite et des résidus de neutralisation) ont été déposés ou enterrés au droit du site.

Différentes campagnes d'investigation sur les sols ont été menées sur le site, elles ont permis d'identifier la présence de sols constitués de résidus de grillage de la pyrite, riches en éléments traces (arsénopyrite (Arsenic, As), blende (Zinc, Zn), chalcopryrite (Cuivre, Cu), galène (Plomb, Pb), etc.). La localisation des zones présentant de fortes teneurs pouvant engendrer un risque pour les populations et l'environnement a ainsi pu être appréciée sur la base de ces investigations. Néanmoins, de nouvelles investigations seront vraisemblablement nécessaires pour affiner ces résultats.

7.5.2 Problématique :

→ Dans le cadre du projet CAPHEINE, nous nous sommes intéressés aux conséquences en terme de mobilité des ETM de différents scénarios possible de gestion (confinement, utilisation en sous-couche routière, ...)

La problématique sur ce site est d'explicitier les conséquences d'une mise en confinement des matériaux et aussi d'évaluer leur stabilité. Pour conforter les possibilités de gestion de ces résidus, des essais de lixiviation simulant des modifications de pH ou d'Eh du milieu seront réalisés et une modélisation simplifiée des mécanismes géochimiques impliqués sera réalisée. Ces essais auront pour objet d'évaluer quelles pourraient être les conséquences d'une modification des conditions physico-chimiques du milieu suite à une excavation des matériaux. Les échantillons étudiés sont prélevés dans les zones susceptibles de présenter un risque de transfert. Les deux zones identifiées sont les sols situés au niveau du terril situé à l'ouest de l'usine (Sol T ; dépôt pluri métrique de résidus de pyrite grillée très hétérogène) et les sols situés en surface sur une zone dénué de végétation (Sol S) au niveau de la friche industrielle.

7.5.3 Méthodologies mise en œuvre :

Sur ce site, seuls les aspects relatifs à la mobilité des ETM ont été abordés. Il s'agissait de mettre au point les essais CNAB et les essais à EH imposé proposés dans le guide « Caractérisation de la mobilité des ETM dans la ZNS du sol ». Aussi aucun travail sur le transfert hydrique et aucune modélisation n'ont été effectués.

Aussi, les caractérisations et expérimentations suivantes ont été réalisées :

| | Niveau | Paramètres acquis / Expériences réalisées | Informations fournies |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractérisation de la mobilité des ETM dans les conditions actuelles du site | 2 | Essai de lixiviation selon la norme XP CEN ISO/TS 21268-2 | Potentiel de rétention des ETM |
| Caractérisation de la mobilité des ETM suite à une modification des conditions physico-chimique | 3 | <ul style="list-style-type: none"> - Capacité de Neutralisation Acide et Basique (CNAB) selon la norme XP CEN/TS 15364 - Réduction du potentiel redox (Eh) du sol | <ul style="list-style-type: none"> - Etude du comportement à la lixiviation lors de la réduction (milieu acide) et de l'augmentation (milieu basique) du pH - Etude du comportement à la lixiviation lors de la réduction du potentiel redox du sol |

7.5.4 Retour d'expérience :

Les essais CNAB ont pour but d'évaluer les modifications induites par des changements des conditions de milieu (acidifications liées aux pluies, à l'installation d'un couvert végétal, ...)

Tandis que les essais EH réducteurs ont pour but d'évaluer la modification des conditions physico-chimique sur la mobilité des ETM, dans le cadre d'un confinement envisagé.

Pour le sol T (un terril) seule l'option de confinement a été retenue (compte tenu de l'impossibilité de le déplacer) et donc seul l'essai E_H réducteur a été réalisé. Tandis que pour les sols de surface plusieurs options de gestion sont possibles : les regrouper avec les sols du terril ou les utiliser en sous-couche. Aussi les 2 types d'essais ont été réalisés sur ce sol.

Pour les deux types de sols étudiés, les solutions de gestion envisagée sont différentes, on n'a donc pas réalisé les mêmes essais.

L'essai CNAB a montré que le sol S pourrait être sensible à une acidification du milieu i.e. cela pourrait engendrer une mobilité accrue des ETM. Aussi, dans le cadre des techniques de remédiation envisagées, il sera nécessaire de prendre en compte l'importance de la mobilité des ETM étudiés (zinc, arsenic, cadmium et plomb) lorsque les conditions du milieu deviennent acides. Il pourrait s'avérer nécessaire de chauler le sol S si ce dernier était laissé en place ou utilisé en matériaux de construction (sous-couche routière par exemple) pour limiter la mobilité des ETM.

Le mode de gestion par encapsulation favorise le passage en milieu réducteur des sols. Pour le sol T une encapsulation favorisera la mobilité de l'arsenic et du plomb alors qu'il favorisera la fixation du zinc et du cadmium. Pour le sol S, ce mode de gestion favorisera la mobilité de l'ensemble des ETM étudiés (zinc, arsenic, plomb et cadmium).

Les conséquences environnementales d'une encapsulation seront donc à prévoir. Un suivi devra permettre de s'assurer de l'efficacité des mesures de confinement mises en place. Il pourra consister à prélever des échantillons dans l'eau souterraine juste en aval hydraulique du confinement et de suivre son évolution (conditions du milieu, quantité en ETM visés).

8 Conclusion générale

Actuellement, la réactivité du compartiment sol, milieu multiphasique à forte hétérogénéité spatiale et temporelle, reste difficile à appréhender surtout à grande échelle. Les travaux scientifiques dans ce domaine sont très nombreux mais il existe un profond décalage entre ces derniers et la mise à disposition de méthodes de caractérisation opérationnelles des sites pollués.

Des travaux récents visent toutefois à combler ce vide. Sur le plan normatif, l'ISO 15175 de 2011 propose une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des nappes qui tient compte des propriétés des sols sus-jacents. Pour cela, elle établit une liste de paramètres physiques et chimiques à caractériser comme les pourcentages d'argile et de matière organique (MO). Les résultats sont utilisés pour définir des facteurs de pondération permettant d'établir la vulnérabilité de la nappe au droit des sites.

Le projet **CAPHEINE** propose des guides permettant d'améliorer la prévision des flux d'ETM dans la zone non saturée, dans la situation actuelle du site mais aussi en prévision d'évolutions de celui-ci. L'approche est graduelle : les investigations à mener sont de complexité croissante en vue de répondre aux enjeux du site (risque pressenti, pression socio-économique) et selon que l'on vise à prendre en compte son contexte actuel ou futur.

Pour cela le projet s'est attaché à développer des guides méthodologiques pour une meilleure caractérisation de la mobilisation des ETM en considérant, à la fois, l'aspect chimie dans le guide "caractérisations de la mobilité des éléments traces minéraux dans la zone non saturée des sols : diagnostic du site" et les aspects de transfert dans le guide "Caractérisation hydriques de la ZNS". Le projet a aussi évalué les potentialités des modèles de simulation du transfert (réactif ou non). Le développement de ces outils de calcul géochimique devrait permettre une estimation de plus en plus fidèle du comportement des polluants dans le temps et l'espace. Ces outils seront particulièrement utiles pour établir des tendances suite à des modifications des conditions de milieu pouvant être engendrées par les changements globaux.

La mise en œuvre de la méthodologie suppose préalablement :

- la réalisation d'un schéma conceptuel du site et la définition des incertitudes liées à ce dernier et des points demandant un approfondissement ;
- l'esquisse du modèle de fonctionnement du site dans sa situation future : définition des différents scénarios envisagés et les interrogations sur l'évolution du système ;

Cela demande notamment la définition des conditions externes (hydrique et physico-chimiques) qui ont une influence directe sur la mobilisation des ETM présents en ZNS.

La méthodologie proposée dans le cadre de **CAPHEINE** a été élaborée en considérant l'existence d'un « principe de proportionnalité » entre les enjeux environnementaux et sanitaires du site et le

programme de caractérisation de la ZNS. Ce principe explique le choix d'une méthodologie par niveau qui permet d'adapter l'effort de caractérisation à chaque contexte d'étude. Les investigations sont optimisées et la pertinence des données qu'elles permettent d'acquérir, c'est-à-dire leur utilité et la façon de les exploiter, sont présentées.

Les investigations de niveau 1 et 2 sont opérationnelles. Elles font appel pour la plupart à des protocoles de caractérisation normalisés. Elles peuvent être mise en œuvre afin de résoudre des problèmes urgents grâce à une prise de décision basée sur une caractérisation optimisée.

Les investigations de niveau 3 sont beaucoup moins répandues. Elles sont encore difficiles à envisager dans le cadre d'étude de site contraintes sur le plan financier et temporel. Elles sont toutefois à encourager une fois la situation du site « stabilisée », c'est-à-dire une fois que les mesures d'urgences ont été prises et que tout risque étant écarté, un consortium constitué de responsables du site, d'ingénieurs de bureau d'étude et de scientifiques, peut prendre le temps d'une étude plus complète, intégrant de la R&D, moins soumise à la pression des résultats attendus.

Certaines des méthodes préconisées dans les guides techniques ont été mises en œuvre sur les sites d'étude du projet CAPHEINE, ainsi le lecteur peut voir : (i) dans quel contexte ces méthodes ont été mises en œuvre ; (ii) le type de résultats auxquels elles donnent accès et (iii) l'interprétation / utilisation qui peut en être faite.