

Cahier des charges : Caractérisation et essais en vue de l'application d'un traitement par injection de réactif *in situ*

1. Introduction

1.1. Techniques concernées

Ce cahier des charges concerne l'application de techniques de traitement *in situ* de sources de pollution en zone non saturée et/ou en zone saturée, impliquant l'injection dans le milieu souterrain d'agents chimiques agissant directement ou indirectement sur les sources de pollution par :

- mobilisation ou immobilisation,
- et/ou dégradation, destruction,
- et/ou détoxification, du ou des polluants ciblés.

Les mécanismes en jeu sont chimiques (oxydo-réduction, réactions acido-basiques, etc.), physiques (solubilisation par micelles, modifications des tensions de surface, etc.) ou biologiques (dégradation bactérienne, etc.).

Il existe un certain nombre de risques associés à ces techniques qui demandent pour leur maîtrise de l'attention et beaucoup de savoir-faire de la part des opérateurs. Ces risques peuvent se résumer comme suit :

	Agent chimique injecté	Risques inhérents à la technique
Lavage Chimique en zone non saturée « Soil flushing »	Tensio actifs, acide chlorhydrique, EDTA.	Emissions non maîtrisées dans les sols et les eaux souterraines des agents chimiques et/ou des polluants
Lavage chimique en zone saturée « Surfactant flushing »	Tensio actif	Emissions non maîtrisées dans les eaux souterraines des agents chimiques et/ou des polluants. Remobilisation des phases organiques et leur migration verticale et/ou latérales non contrôlées
Lavage chimique en zone saturée « Co solvent flushing »	Solvants polaires (alcools)	Emissions non maîtrisées dans les eaux souterraines des agents chimiques et/ou des polluants. Remobilisation des phases organiques et leur migration verticale et/ou latérales non contrôlées
Oxydation (ISCO)	Oxydant (permanganate de potassium, H ₂ O ₂ , etc.)	Emissions non maîtrisées dans les eaux souterraines des agents chimiques et/ou des polluants.
Biodégradation anaérobie	Substrat organique biodégradable (mélasse, lactates, acétates), nutriments	Emissions non maîtrisées dans les eaux souterraines des agents chimiques et/ou des polluants. Création et accumulation de métabolites (molécules filles) de plus grande mobilité et/ou toxicité que les molécules mères.
Biodégradation aérobie	Nutriments, oxygène	Emissions non maîtrisées dans les eaux souterraines des agents chimiques et/ou des polluants. Création et accumulation de métabolites (molécules filles) de plus grande mobilité et/ou toxicité que les molécules mères.

Tableau 1 : Risques inhérents à chaque technique de traitement par injection de réactif *in situ*

1.2. Identification des impacts liés à l'absence de maîtrise des flux de réactifs

La maîtrise des impacts potentiels d'une opération de dépollution impliquant des substances à injecter est la condition sine qua non de la faisabilité du traitement.

Les flux de réactifs injectés doivent donc répondre à certaines contraintes :

1. Contraintes d'efficacité : les flux injectés doivent être en mesure de pénétrer l'ensemble du domaine pollué et de réagir avec les polluants cibles durant l'ensemble de l'opération.
2. Contraintes d'innocuité environnementale : les modifications directes (par la nature de réactifs lui-même) ou indirectes (par les effets des réactifs) des caractéristiques hydrogéochimiques, microbiologiques, physico chimiques du milieu eaux souterraines induites par l'injection de réactifs ne doivent pas impacter la ressource en eau et/ou des usages constatés des eaux souterraines.

Il convient donc, dans le cadre des études de faisabilité du traitement et le bilan coûts/avantages, d'identifier les cibles environnementales qui pourraient être potentiellement affectées soit directement soit indirectement par ces opérations d'injection dans les eaux souterraines.

Les contraintes dimensionnantes d'une opération de dépollution in situ :

1. la situation géologique, hydrogéologique et environnementale constatée avec les inévitables incertitudes liées à la nature hétérogène même du milieu souterrain et aux possibilités et limites des diagnostics de site (qui procède par échantillonnage ponctuel de milieux et/ou phénomènes continus dans le temps et l'espace),
2. des objectifs de dépollution/maîtrise des risques exprimés en termes de délais, de teneurs/concentrations/masses résiduelles acceptables,
3. les technologies disponibles et savoir faire en ingénierie,
4. les capacités financières des Maîtres d'ouvrage et sa stratégie financière pour l'opération sur le court et moyen terme.

La maîtrise des flux de réactif d'une telle opération répond à des contraintes à la fois géologiques/hydrogéologiques et technologiques/techniques. Les conséquences d'une absence de maîtrise des flux sont environnementales et économiques.

Impacts sur les usages actuels des sols et des eaux et sur les futures ressources potentielles

- **Mécanismes susceptibles de générer des flux non maîtrisés et un impact (émissions)**

Ces impacts correspondent à une dégradation durable, en général réversible sur le moyen ou long terme des eaux souterraines exploitées ou potentiellement exploitables pour des usages donnés.

Cette dégradation peut être quantitative (perturbation du régime des eaux souterraines) et/ou qualitative (dégradation de la potabilité et/ou du caractère potabilisable des eaux, dégradation de la qualité gustative). Elle est liée à la présence de flux de polluants et/ou de réactifs, voire de sous-produits de dégradation / décomposition non maîtrisés (émissions).

Les mécanismes susceptibles de générer de telles émissions sont les suivants :

1. Effets piston lors de l'injection : l'apport d'une quantité trop importante de solution dans la zone saturée lors de l'injection peut entraîner un effet piston / de chasse et un déplacement divergent d'eau polluée (création d'un dôme piézométrique local avec des écoulements radiaux divergents). La chute des concentrations en polluants en nappe alors observée au niveau du domaine à traiter est liée non pas à la décomposition des polluants mais à la dilution / dispersion de la masse polluante dans un plus grand volume d'eau. La procédure d'injection doit être conçue afin d'éviter ce type de problèmes.
2. Mobilisation de co contaminants : les réactions d'oxydation peuvent modifier de façon notable les conditions hydrogéochimiques du milieu et induire par ce biais une augmentation de la mobilité de certains co contaminants. Ainsi, la dégradation des COHV entraîne un abaissement du pH (acidification liée à la production d'HCl et de CO₂) et une augmentation du potentiel redox (milieu oxydant) dans le domaine traité. Ces modifications peuvent entraîner des changements de valence de certains métaux comme le chrome, l'arsenic, l'uranium, le sélénium, etc. avec pour conséquences des changements de mobilité/toxicité de ces derniers. Le chrome par exemple est bien plus mobile et toxique en solution sous sa forme oxydée Cr⁶⁺ que sous sa forme réduite Cr³⁺. La mobilité et la remobilisation de métaux d'origine naturelle (fond géochimique naturel) et/ou anthropique doivent donc être prises en considération dès la phase de faisabilité (prévision d'une unité de traitement des eaux sur une boucle hydraulique).
3. Effet retard : dans certains cas de figure, il est possible d'observer une augmentation des concentrations en polluants en nappe consécutive à une diminution de ces dernières lors de l'injection. Ce phénomène de « rebond » peut être lié à :

- L'oxydation préférentielle de la matière organique sur laquelle sont adsorbés les polluants ciblés et désorption des polluants cibles et/ou co contaminants,
- La présence d'autres sources de polluants non encore identifiées,
- Oxydant en défaut,
- Traitement incomplet de la zone supérieure de la nappe liée aux fluctuations hautes/basses eaux.

Ces situations sont en général consécutives à un défaut de caractérisation préliminaire aux études de faisabilité.

4. Production d'éléments/substances toxiques et/ou indésirables : si la réaction de décomposition/oxydation des polluants n'est pas complète, d'éventuelles réactions secondaires peuvent conduire à la formation d'autres polluants et/ou substances indésirables dans les eaux souterraines. Les éléments et substances impliqués sont :

- Les sous-produits issus de l'oxydation des polluants et de la matière organique : CO₂, HCl ayant pour conséquences une acidification du milieu,
- Les sous-produits issus de la réduction des réactifs consommés : Na⁺, SO₄²⁻ (persulfate de sodium), KCl + MnO₂ (Permanganate de potassium). Mn²⁺ est considéré comme un polluant des eaux pour la consommation humaine dès 50 µg/l,
- Des molécules filles (métabolites) issues de la décomposition partielle de molécules mères. C'est le cas notamment pour les COHV avec l'exemple du tetrachloréthylène PCE → Trichloréthylène + Cl⁻ → 1,2-dichloréthylène (CIS, TRANS) + Cl⁻ → Chlorure de vinyle monomère (CV) + Cl⁻ → éthène + Cl⁻. La toxicité et la mobilité des molécules filles augmentent globalement par rapport aux molécules mères. Certains métabolites peuvent s'accumuler (« CIS Stall »).
- Production de chaleur car l'oxydation est exothermique avec pour conséquences une augmentation de la volatilité des composés organiques volatils et la création éventuelle d'émissions fugitives de composés volatils vers la surface. Ce phénomène est amplifié par l'utilisation d'H₂O₂ dont la dismutation produit de l'oxygène gazeux qui diminue la conductivité hydraulique de l'aquifère et augmente la pression gazeuse interstitielle du milieu.

- **Impacts sur les usages actuels des eaux souterraines**

Les eaux souterraines peuvent faire l'objet d'usages avérés au moment des opérations de dépollution : usages AEP (alimentation en eau potable), AEA (alimentation en eau agricole), AEI (alimentation en eau industrielle) ou PAC (pompe à chaleur). A noter que bien souvent, seule une partie des puits est déclarée auprès de la DRIRE et inventoriée dans la Base de données du Sous-Sol (BSS gérée par le BGRM). Une enquête/visite de terrain du secteur d'étude est bien souvent nécessaire afin d'identifier la présence de puits privés (généralement superficiels et AEA) dont l'usage est souvent non maîtrisé. L'absence de maîtrise des flux de réactifs sur une zone traitée à proximité des zones à usage des eaux peut conduire à la dégradation de la qualité des eaux par des substances toxiques et/ou indésirables, persistantes ou non.

- **Impacts sur les eaux souterraines, ressources futures**

A noter que certaines masses d'eau peuvent constituer des ressources futures qu'il convient de préserver. Ces masses d'eau peuvent être gérées dans le cadre d'un SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et sa déclinaison locale du SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux). L'absence de maîtrise des flux de réactifs sur une zone traitée peut conduire à la dégradation de la qualité des eaux par des substances toxiques et/ou indésirables, persistantes ou non.

- **Impacts sur les eaux souterraines en communication avec des eaux de surface protégées**

L'émergence et l'affleurement de certaines nappes aquifères sont à l'origine de zones humides au biotope particulier et exceptionnel pouvant faire l'objet de mesures réglementaires de protection (ZNIEFF I ou II).

Enfin, dans certaines circonstances de rivières drainant la nappe, les eaux souterraines se déversent dans les eaux de surface pouvant faire l'objet d'usages sensibles qu'il convient de surveiller et protéger : baignade, pêche de loisir, activités nautiques, etc.

L'absence de maîtrise des flux de réactifs sur une zone traitée peut conduire à la dégradation de la qualité des eaux souterraines et de surface par des substances toxiques et/ou indésirables, persistantes ou non.

Impacts sur les conditions locales d'écoulement

L'absence de maîtrise des flux de réactifs en général, et du dosage du ratio masse de réactifs/masse de polluant à traiter en particulier, peut conduire à des précipitations de sous-produits de réaction, comme les oxyhydroxydes métalliques. Ces précipitats colloïdaux particuliers circulent difficilement dans le milieu poreux et ce d'autant plus que la perméabilité est faible avec pour conséquences, une diminution progressive du volume des vides de la porosité et une diminution de la perméabilité dans le domaine poreux pollué à traiter. Il en résulte un, contournement progressif du domaine pollué par les

filets d'eau souterraine et donc une inefficacité progressive des injections de réactifs en nappe qui contournent le domaine pollué. Cet effet, bien connu des opérateurs de dépollution par bioremédiation, est appelé « clogging ». La diminution de la conductivité hydraulique du milieu poreux peut également être une conséquence de la production d'O₂ gazeux lors de l'oxydation par H₂O₂.

Impacts sur l'efficacité technique et économique de l'opération de dépollution

L'absence de maîtrise des flux de réactifs en nappe peut se traduire par :

- La difficulté de mise en contact des réactifs avec le domaine pollué à traiter, la création de cheminement préférentiels des réactifs
- La dispersion des réactifs en amont du domaine pollué à traiter.

Avec pour conséquences une surconsommation de réactifs, une sous-estimation du budget alloué aux consommables et des objectifs de dépollution/maîtrise des risques non atteints à l'issue de l'opération de dépollution.

Conclusion

La maîtrise des flux de réactifs passe donc par une caractérisation du site dont le degré d'approfondissement dépendra :

- d'une part de l'hétérogénéité du réservoir, du champ des écoulements, de la composition et de la distribution spatiale des polluants,
- d'autre part des enjeux et de la sensibilité environnementale du milieu (ressource et/ou usages) à protéger.

2. Situations de maîtrise et de non-maîtrise des flux rencontrées

Compte tenu de ces contraintes, les situations suivantes, schématisées dans la Figure 38 (cas particulier de l'ISCO), peuvent apparaître :

Flux non maîtrisé

1. Le rayon d'influence du dispositif d'injection n'est pas suffisant pour traiter le domaine pollué.

Le réactif (oxydant dans le cas de l'ISCO) est dispersé / dilué à une concentration inférieure à la concentration efficace et/ou est consommé par les matières réactives (oxydable dans le cas de l'ISCO) du réservoir aquifère. L'injection est inefficace et sans impact sur la ressource ou les usages ;

2. Le rayon d'influence du dispositif d'injection est suffisant pour interagir avec l'ensemble du domaine pollué. L'injection est efficace mais la réaction (oxydation dans le cas de l'ISCO) au sein du domaine pollué engendre une augmentation du flux de polluant cible aqueux qui impacte la ressource ou les usages ;

3. Le rayon d'influence du dispositif d'injection est suffisant pour interagir avec l'ensemble du domaine pollué. La réaction (oxydation dans le cas de l'ISCO) au sein du domaine pollué est efficace sans libérer des flux excédentaires de polluants aqueux. Les réactifs en excès impactent la ressource ou les usages ;

4. Le rayon d'influence du dispositif d'injection est suffisant pour interagir avec l'ensemble du domaine pollué. La réaction (oxydation dans le cas de l'ISCO) au sein du domaine pollué est efficace sans libérer des flux excédentaires de polluants aqueux. La modification des conditions du milieu entraîne (par exemple par la précipitation d'oxy hydroxydes dans le cas de l'ISCO) un colmatage partiel du milieu poreux et réduit la perméabilité du domaine pollué.

Les réactifs et lignes d'écoulement contournent le domaine pollué. Les réactifs en excès impactent la ressource ou les usages. Cette situation générée par la dépollution est semblable à celle que l'on rencontre initialement avant injection en présence d'hétérogénéité du réservoir aquifère. Ces hétérogénéités entraînent une distribution hétérogène du champ des perméabilités et par extension des écoulements chenalés préférentiels des réactifs qui peuvent ne pas interagir avec le domaine pollué. L'hétérogénéité peut être primaire (structure et texture du réservoir aquifère) et/ou secondaire (présence de polluants non miscibles en phase au sein du réservoir).

Maîtrise passive des flux

5. Le rayon d'influence du dispositif d'injection est suffisant pour interagir avec l'ensemble du domaine pollué. L'oxydation au sein du domaine pollué est efficace sans libérer des flux excédentaires de polluants aqueux. Les réactifs en excès n'impactent pas la ressource ou les usages. Il s'agit de la situation idéale dans une configuration de système hydrogéologique ouvert, c'est-à-dire sans pompage des eaux en aval hydraulique du domaine pollué.

Maîtrise active des flux

6. Le rayon d'influence du dispositif d'injection est suffisant pour interagir avec l'ensemble du domaine pollué. La réaction (oxydation dans le cas de l'ISCO) au sein du domaine pollué est efficace sans libérer des flux excédentaires de polluants aqueux. En système hydrogéologique fermé, les réactifs en excès sont récupérés en aval hydraulique par pompage/traitement. Absence d'impact sur la ressource ou les usages ;

7. Le rayon d'influence du dispositif d'injection est suffisant pour interagir avec l'ensemble du domaine pollué. La réaction (oxydation dans le cas de l'ISCO) au sein du domaine pollué est efficace et libère des flux excédentaires de polluants aqueux. En système hydrogéologique fermé, ces derniers sont récupérés en aval hydraulique par pompage/traitement. Absence d'impact sur la ressource/usages.

Ces situations peuvent être illustrées par le Tableau suivant.

•	SYSTEME HYDROGEOLOGIQUE OUVERT			SYSTEME HYDROGEOLOGIQUE FERME		
	Débit de réactif injecté déficitaire	Débit de réactif injecté adapté	Débit de réactif injecté excédentaire	Débit de réactif injecté déficitaire	Débit de réactif injecté adapté	Débit de réactif injecté excédentaire
EFFICACE : critères techniques	☹️	😊	😊	☹️	😊	😊
EFFICACITE : critères économiques	☹️	😊	😐	☹️	😐	☹️
IMPACT : direct	😊	😊	☹️	😊	😊	😊
IMPACT : indirect	😊	😊 ? ☹️	😊 ? ☹️	😊	😊	😊

Tableau 2 : Situations efficacité/impacts rencontrées lors d'injection de réactifs

3. Bonnes pratiques en matière d'ingénierie et de dimensionnement des dispositifs d'injection, de monitoring et/ou de récupération

Les conditions de maîtrise des flux de réactifs font donc appel à un ensemble de bonnes pratiques devant être suivie par les sociétés prestataires maître d'œuvre en matière de dépollution. On rappelle que, compte tenu de la spécificité de chaque site, le dimensionnement d'une opération de traitement par injection de réactifs in situ conduisant à la maîtrise des flux, l'innocuité environnementale, pendant et post traitement, l'atteinte des objectifs de dépollution dans le budget-temps alloué, repose sur des études au cas par cas et à la livraison d'un dispositif clé en main au cas par cas. L'étude de faisabilité et le bon dimensionnement d'un traitement par ISCO relèvent de la responsabilité et du savoir-faire des sociétés prestataires en matière de dépollution.

3.1. Une caractérisation préliminaire du domaine pollué et de son environnement adaptée et proportionnée

Il s'agit de réaliser sur la base d'un diagnostic ciblé, une analyse de risque préliminaire de l'ISCO en se reposant sur les 3 composantes du risque Source de substances dangereuses (S) / vecteur (T) (eaux souterraines) / récepteurs (C) (usages, etc.). Il s'agit d'une étape primordiale à l'étude de faisabilité et au bon dimensionnement (à la maîtrise des flux) des opérations de traitement par injection de réactif in situ. Il s'agit donc de caractériser au mieux, selon les enjeux, les contraintes technico économiques.

1. SOURCE : La nature, la distribution, les quantités, les phases physiques du polluant cible à traiter mais également celles des autres polluants accompagnateurs éventuels (co contaminants) susceptibles d'interférer dans le processus de traitement. La teneur en matière organique du réservoir aquifère et/ou de la zone non saturée au niveau de la zone à traiter devra être caractérisée. Les inévitables incertitudes inhérentes à la zone source doivent être intégrées d'emblée dans l'étude de faisabilité et de dimensionnement du traitement par injection de réactifs.

2. VECTEUR : caractérisation de la perméabilité à l'eau et de la distribution de la perméabilité de la zone saturée entre les puits d'injections et les puits de pompage éventuels prévus. Les inévitables incertitudes inhérentes à la caractérisation des eaux et du réservoir aquifère doivent être intégrées d'emblée dans l'étude de faisabilité et de dimensionnement du traitement par injection de réactifs.

3. CIBLES / RECEPTEURS : identifier et caractériser les usages éventuels des eaux souterraines et/ou des eaux de surface en aval hydraulique de la zone à traiter. Identifier les éventuelles masses d'eau à protéger et considérées comme ressource. Cette identification nécessite bien souvent, en complément à l'approche documentaire, au moins une enquête/visite sur site.

3.2. Des essais et tests de faisabilité adaptés et réalistes

Les essais de faisabilité à l'échelle du laboratoire doivent avoir été menés conformément aux protocoles définis dans les cahiers des charges correspondants (essais d'orientation et d'évaluation des performances)

3.3. Un dimensionnement adapté et réaliste du dispositif d'injection et de maîtrise des flux

Il s'agit de dimensionner le dispositif d'injection (configuration de chaque puits, du réseau de puits, débits et régimes d'injection, dosage des solutions injectées, etc.) afin d'obtenir le rayon d'influence chimique optimal en termes d'efficacité technique et économique (contraintes de coûts, de délais et d'objectif de dépollution = teneurs résiduelles acceptables). Les paramètres primordiaux à considérer pour le dimensionnement du dispositif d'injection sont les suivants :

- Diamètres (selon les débits à injecter) et matériaux constitutifs des puits (se devant d'être résistants chimiquement et mécaniquement de façon pérenne, en général du PEHD (Polyéthylène Haute Densité), PP (Polypropylène) ou PVC (PolyChlorure de Vinyl) selon les polluants et/ou les concentrations en polluants),
- Profondeurs des puits,
- Côtes du haut et du bas de la crépine par rapport aux cotes des toits et murs des horizons les plus et moins perméables : généralement, l'injection s'opère dans les horizons les moins perméables de la succession lithologique afin de ne pas favoriser les écoulements chenalés préférentiels qui pourraient délaier une partie du domaine pollué à traiter. Plusieurs niveaux d'injection peuvent s'avérer être indispensables sur une même verticale (en un seul puits multi niveaux ou dans plusieurs puits en « Flûte de pan »),
- Des contraintes d'encombrement de surface et d'accès peuvent également être prises en considération, pour le positionnement et le dimensionnement des puits du réseau, et, selon les cas, du positionnement des conduites, gaines et câbles desservant chaque puits,
- Le nombre de puits est contraint par le rayon d'influence de chaque puits et les dimensions du domaine pollué à traiter. En général, on procède au dimensionnement d'un réseau en superposant les rayons d'influences unitaires de chaque puits de 10 à 15%.
- Caractéristiques de conductivité hydraulique au niveau et aux abords du domaine à traiter et la distribution des perméabilités : ces paramètres contraignent le débit d'injection (sans dispersion par effet piston de la pollution), le régime d'injection et le rayon d'influence.

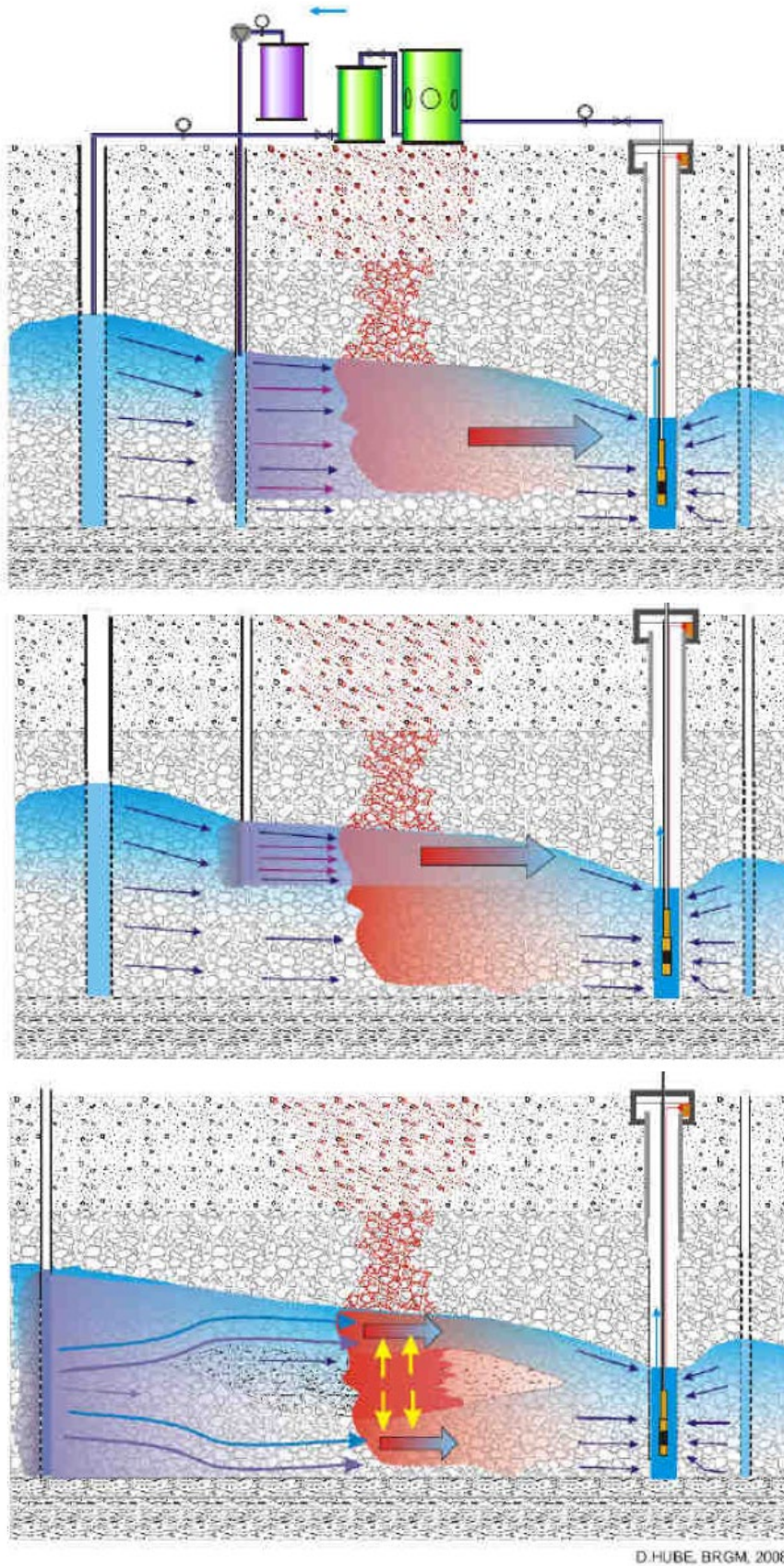


Figure 1 : Schéma de principe d'une unité d'ISCO (en haut, cas idéal pour l'injection) et conséquences d'un mauvais positionnement de la crépine d'injection (au milieu) et de l'hétérogénéité de la distribution des perméabilités (en bas, lentille limoneuse au sein de graviers)

Les configurations du réseau de puits d'injection, ainsi que leur équipement, peut faire l'objet de simulation hydrodynamiques et hydrodispersives itératives pour la recherche du dispositif optimal (simulations exploratoires en régime permanent ou transitoire). Quoiqu'il advienne, la qualité du diagnostic préliminaire et des données acquises sur la zone source et les propriétés du réservoir aquifère est capitale pour le dimensionnement adéquat de l'opération de traitement par injection de réactifs et pour la réussite de cette dernière. Les modèles reposent impérativement sur ces mesures et observations de terrain et de laboratoire.

Cette analyse exploratoire de dimensionnement peut conduire à mettre en évidence la nécessité d'implanter des puits de pompage en aval hydraulique du domaine à traiter (création d'une boucle hydraulique), associés ou non à une unité de traitement des eaux d'exhaure, afin de maîtriser les flux en nappe si :

- les incertitudes sur les termes S (source) et T (transfert) sont jugées trop nombreuses et porteuses de trop de risques vis-à-vis d'enjeux à protéger,
- au regard des connaissances disponibles, un impact, pendant le traitement et/ou post traitement, est pressenti sur des enjeux à protéger et considéré comme inacceptable.

La modélisation doit démontrer que la boucle hydraulique est maîtrisée, c'est-à-dire que les lignes de courant (et donc les substances dissoutes dans la nappe) issues des puits d'injection sont intégralement réceptionnées par les puits de pompage.

La Figure suivante montre l'impact d'un puits de pompage mal positionné par rapport à la trajectoire d'un panache de composés dissous dans la nappe : la capture est incomplète et une partie du flux reste non maîtrisée et est émise par convection / dispersion plus à l'aval.

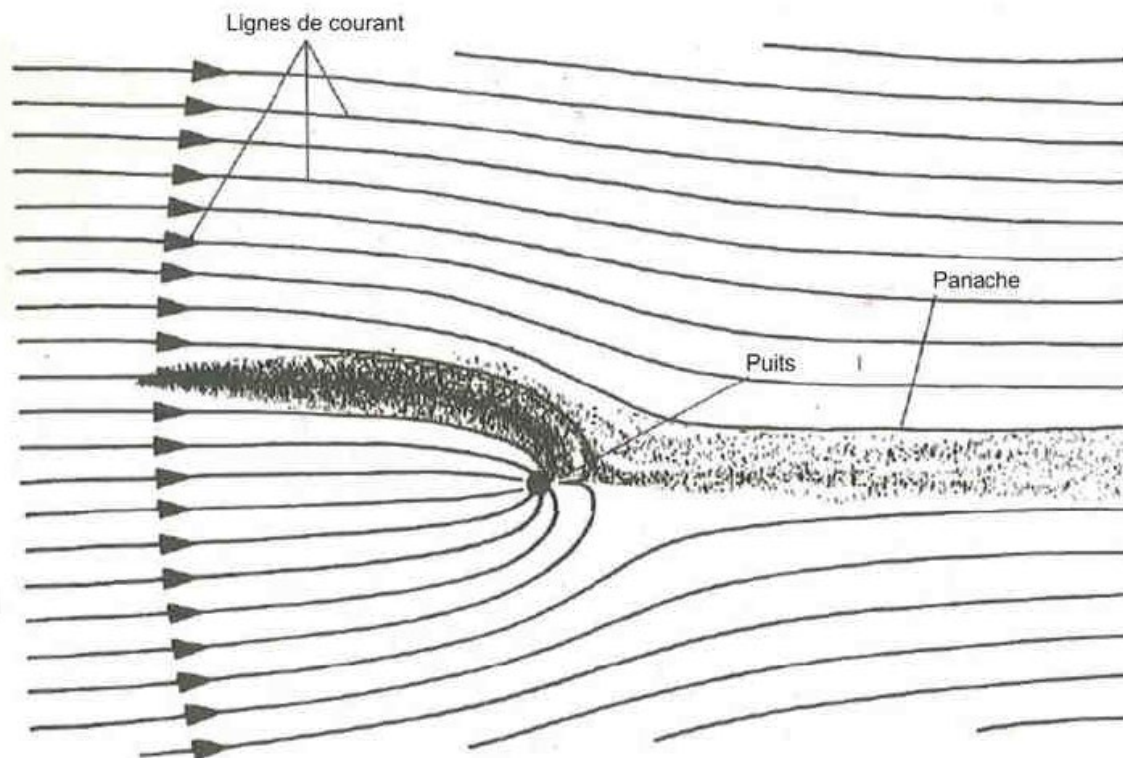


Figure 2 : Impact d'un puits de pompage mal positionné par rapport à la trajectoire d'un panache de composés dissous dans la nappe

Le principe de la boucle hydraulique ainsi qu'un exemple de boucle hydraulique sont donnés sur la Figure 3. A noter que la réalisation de ces puits de pompage se confronte aux mêmes difficultés que pour les puits d'injection notamment en ce qui concerne la position des parties crépinées en présence d'hétérogénéités dans la distribution des perméabilités (création de cheminement préférentiels au sein de la zone d'appel des puits de pompage).

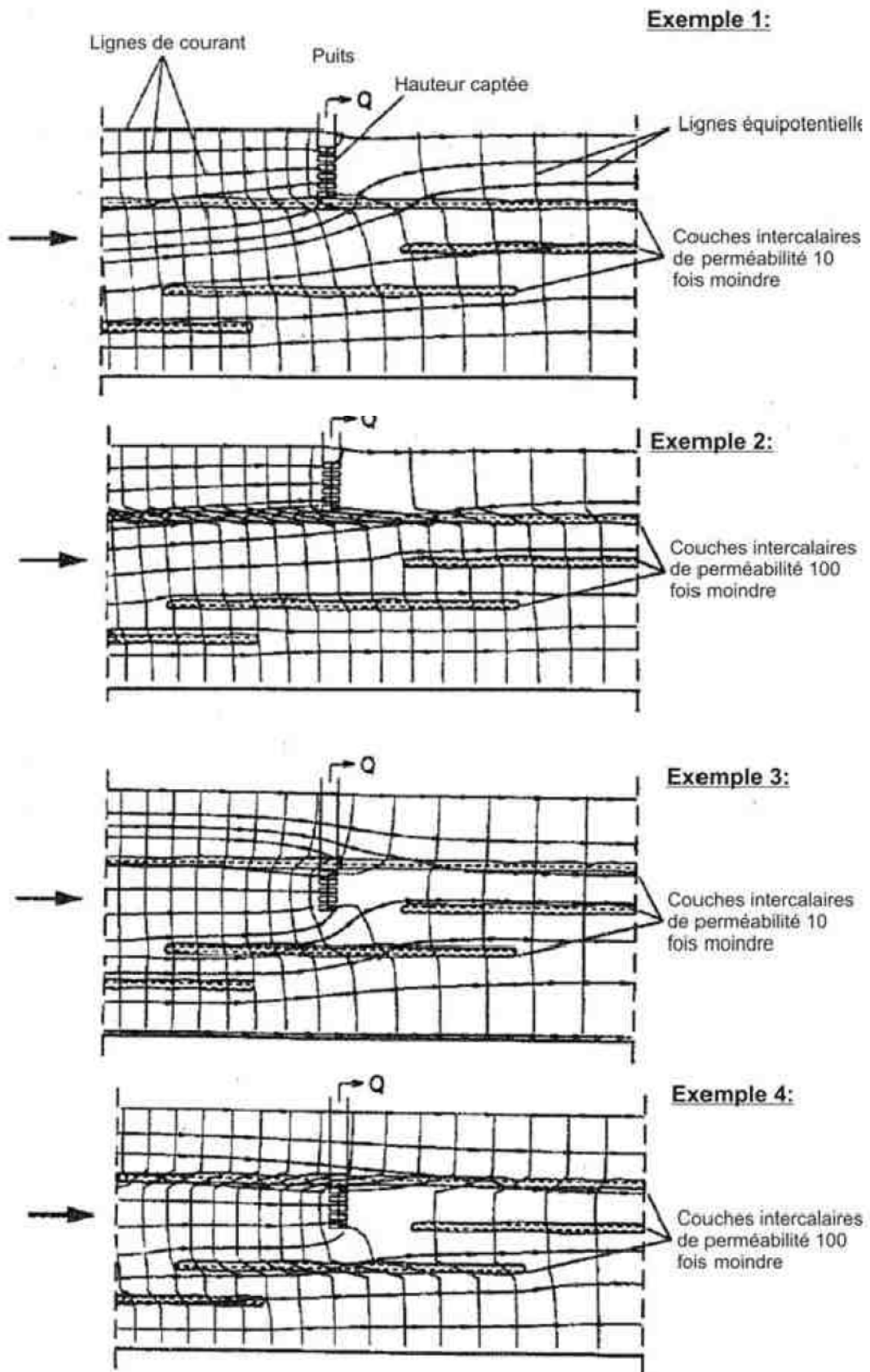


Figure 3 : Principe Modélisation exploratoire 2D de l'influence de la position relative des hauteurs crépinées d'un puits et des intercalaires de perméabilités moindre au sein d'un aquifère

3.4. Des unités de traitement des eaux d'exhaure et de préparation des solutions de réactif dûment dimensionnés

Les contraintes de dimensionnement de ces installations sont celles de toute installation de traitement des eaux et de préparation/dosage :

- Critères techniques d'efficacité afin de pouvoir préparer les solutions avec des volumes, débits et qualités requises par le traitement in situ, et/ou de pouvoir réinjecter et/ou rejeter les eaux traitées dans le respect des normes environnementales en vigueur,
- Critères de sécurité,
- Critères de discrétion et d'intégration environnementale (paysagère, sonore, etc.),
- Critères de flexibilité : les unités doivent être en mesure de traiter les effets rebonds (bouffées) et doivent s'adapter aux variations (diminution) des concentrations avec le temps.

Le traitement couramment mis en œuvre comporte des éléments de filtration (filtre à sable, charbon actif, résines adsorbantes). Le bon dimensionnement de ces unités relève de l'ingénierie des procédés.

3.5. Un monitoring adapté

Une opération de traitement in situ doit intégrer dans sa réalisation un dispositif de monitoring capable de contrôler l'efficacité du traitement in situ et les impacts éventuels sur les milieux.

Le monitoring est l'outil nécessaire :

1. à l'optimisation du fonctionnement du traitement,
2. au pilotage du traitement,
3. à la démonstration de l'efficacité du traitement et des atteintes des objectifs de dépollution,
4. à la maîtrise des flux de réactif, de polluants et sous-produits éventuels en nappe

En ce sens, le réseau et le programme de monitoring ne doit pas être négligé et doit être adapté au contexte et aux enjeux de chaque site à traiter. On rappelle que comme la plupart des technologies in situ, il reste difficile de contrôler l'efficacité de la remédiation et de connaître l'efficacité des réactions chimiques in situ compte tenu de la présence d'hétérogénéité dans le milieu poreux et du caractère ponctuel (dans le temps et l'espace) de l'échantillonnage et/ou la mesure du monitoring.

Le monitoring comprend en général :

1. un monitoring sur les puits/lances d'injections et éventuellement de pompage (débits pompés/injectés, pressions, températures, conductivité électrique, O₂ dissous, etc.)
2. un monitoring sur des piézomètres de contrôle dûment dimensionnés en termes de densité, positionnement et équipement. Y sont contrôlés avec un pas de temps adéquat : les niveaux piézométriques, la qualité des eaux souterraines, etc.
3. un monitoring sur les éventuelles unités de traitement des eaux. La surveillance y est quantitative (débits, débits massiques), etc.) et qualitatif (concentrations en polluants, en réactifs, en sous-produits en entrée et sortie de l'installation, contrôle des éventuels autres rejets au milieu naturel).

Les paramètres à contrôler dans le monitoring dépendent :

- De la nature des polluants à dégrader et de la nature des éventuels sous-produits de dégradation (exemple des COHV où il s'agira de rechercher les molécules mères comme le PCE/TCE mais également les molécules filles Cis-, Trans-1,2-dichloréthylène, chlorure de vinyle monomère, voire les chlorures terme ultime de la minéralisation),
- De la présence éventuelle de matière organique et/ou de co contaminant dans le réservoir aquifère et/ou le domaine pollué,
- De la nature des produits chimiques injectés et de la nature des sous-produits de réaction,
- Du contexte hydrogéochimique des eaux souterraines

Les paramètres généraux (T°C, conductivité électrique, pH, O₂ dissous) ainsi que les polluants primaires, leurs sous-produits, les réactifs primaires et leurs sous-produits devront à minima être recherchés dans le monitoring.

Les débits d'injection et éventuellement de pompage (débits instantanés, débit moyens, quantités pompées/injectées, rythmes « run » des injections en séquences) ainsi que l'évolution spatiotemporelle des niveaux d'eau dans le secteur de la zone à traiter devront être surveillés et renseignés.

La fréquence du monitoring dépend quant à elle :

- Des conditions hydrogéologiques locales,
- Du régime des injections et du pompage éventuel,
- Des cinétiques de dégradation,
- De la mobilité des polluants et de leurs sous-produits éventuels.