

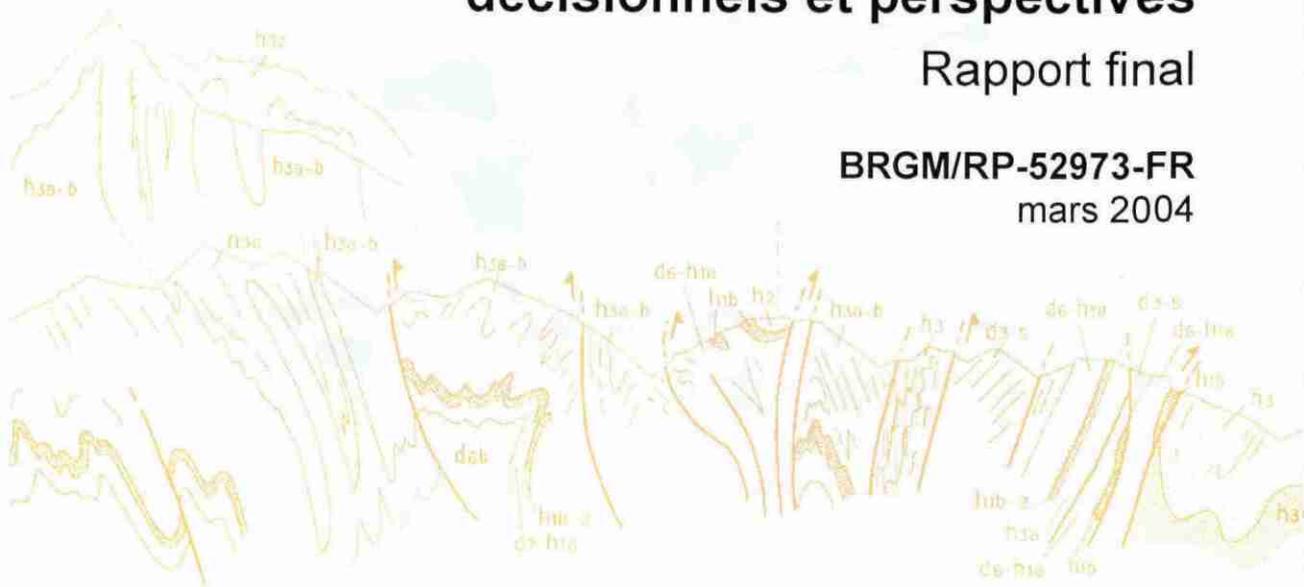
Document confidentiel



Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives (BPR). Réalizations, expériences, critères décisionnels et perspectives

Rapport final

BRGM/RP-52973-FR
mars 2004



Document confidentiel

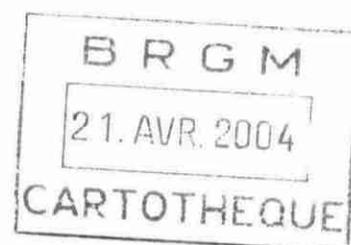
Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives (BPR). Réalizations, expériences, critères décisionnels et perspectives

Rapport final

BRGM/RP-52973-FR
mars 2004

Étude réalisée dans le cadre de l'opération
de recherche en partenariat industriel 124

S. Touzé, R. Chartier, H. Gaboriau



Avertissement

Ce rapport est adressé en recommandé avec accusé de réception, en communication exclusive au demandeur : (Re.Co.R.D.), en 10 exemplaires conformément au cahier des charges.

Le demandeur s'engage à communiquer par écrit dans un délai de 15 jours à dater de la réception du présent rapport, la liste de diffusion des exemplaires de ce rapport et le plan de communication s'y rattachant. Le BRGM, exerçant les droits moraux dont il est titulaire en tant qu'auteur du rapport, validera les conditions de sa diffusion sous huitaine.

Passé ce délai, le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait, et, des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

* * * * *

Mots clés : Barrière Perméable Réactive, BPR, PRB, Pollution, Panache, Eaux Souterraines, Procédé, *In Situ*, Passif, Solvants chlorés.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Touzé S., Chartier R., Gaboriau H. (2004) - Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives (BPR). Réalisations, expériences, critères décisionnels et perspectives. BRGM/RP-52973-FR, 167 p., 15 fig., 11 tabl., 1 ann.

Synthèse

Cette étude, intitulée « Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives (BPR) ; réalisations, expériences, critères décisionnels et perspectives » est réalisée pour le compte de l'association française d'industriels Re.Co.R.D. (réseau coopératif de recherche sur les déchets).

Parmi l'ensemble des techniques développées dans le cadre de la gestion des pollutions des sols et des eaux souterraines, les Barrières Perméables Réactives (BPR) se définissent comme un procédé *in situ* (c'est à dire souterrain) de traitement *passif* (i.e. ne nécessitant pas d'apports en énergie) des eaux souterraines. Les caractères *in situ* et passif ont été à l'origine d'un intérêt croissant pour les BPR depuis quelques années. Cet intérêt se traduit par un nombre assez important de réalisations industrielles à travers le monde (une centaine à ce jour) et une très abondante littérature. Malgré cette nombreuse littérature et les retours d'expériences, les gestionnaires de sites et sols pollués ont des difficultés pour réellement évaluer le champ d'application des BPR.

L'objectif de cette étude est de synthétiser l'information existante, mettre en exergue les intérêts et limites d'application et définir les critères technico-économiques d'applicabilité des BPR.

Le projet a été structuré en deux phases :

- phase 1 : identification des principales sources d'information, collecte des données et établissement d'un état des lieux sur le traitement des eaux polluées par la technique des Barrières Perméables Réactives ;
- phase 2 : analyse de la technologie BPR focalisée sur les retours d'expérience des différents projets de BPR (tout particulièrement en Europe). Cette seconde phase a conduit à privilégier des contacts directs auprès de différents acteurs du domaine : maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprises de travaux, consultants, réseaux d'excellence...

Un concept validé

Le concept de traitement *in situ* d'un panache de pollution par une BPR est désormais largement validé :

- les premières réalisations industrielles ont plus de 10 ans. Les retours d'expériences montrent que les objectifs sont généralement atteints. Les difficultés rencontrées (capture incomplète du panache, trop faible réduction des concentrations) et celles qui subsistent ne remettent pas en cause le potentiel de la technique. Elles découlent souvent d'une caractérisation insuffisante des sites et des pollutions

(écoulements préférentiels non identifiés, hétérogénéité de distribution des polluants...);

- il existe des solutions techniques éprouvées et opérationnelles, en particulier pour le traitement des solvants chlorés par le Fe^0 (déhalogénéation réductrice) ;
- il existe un relatif consensus sur le schéma d'évaluation conduisant à la solution BPR, en particulier sur la nécessité de bien caractériser le site en préalable à la conception et la construction.

Caractéristiques majeures

Parmi les caractéristiques des BPR, nous soulignerons les suivantes :

- s'agissant d'une technique *in situ* et passive qui s'inscrit dans la durée, le champ d'application privilégié des BPR sont les pollutions récalcitrantes avec des sources secondaires mal localisées ou diffuses : c'est typiquement le cas des solvants chlorés qui représentent plus de 50% des réalisations. Le critère « pollutions récalcitrantes » n'est pas le seul. La solution BPR s'avère être une alternative intéressante lorsque le volume de sol pollué est trop important pour être excavé et traité (traitement de la source non économique) et que la pollution a un impact avéré sur les eaux souterraines qui conduit à intervenir. La BPR permet une séparation physique entre un compartiment amont hydraulique pollué et la zone aval. Elle peut constituer une mesure de protection temporaire pendant des travaux de dépollution sur des sources primaires ou secondaires ;
- les BPR permettent de traiter un panache de polluant en empêchant leur transfert à l'aval hydraulique de l'ouvrage. Bien que la technologie BPR est dédiée au traitement des pollutions dissoutes, elle ne peut se résumer à du traitement d'eau. La technologie BPR s'inscrit dans une démarche de protection des ressources hydrauliques et de réhabilitation de sites pollués ;
- la mise en œuvre des BPR est essentiellement dédiée au traitement des solvants chlorés et induit souvent des confusions en généralisant abusivement l'expérience « solvants chlorés » aux autres situations. En parallèle des applications solvants chlorés, il existe encore de nombreux projets à caractère exploratoire dont les objectifs sont i) d'acquérir des données sur les performances à moyen et long terme, ii) de traiter de nouveaux polluants ou combinaisons de polluants, iii) d'éprouver de nouvelles configurations (traitement séquentiel) ou des technologies adaptées à des contextes plus difficiles (par exemple, aquifère profond). En résumé, il existe à la fois des solutions technologiques éprouvées et des concepts au stade du développement ;
- sans remettre en cause la technologie, le colmatage reste un sujet de préoccupation qui conditionne directement la conception de l'ouvrage, la stratégie de maintenance et la longévité de la BPR. Le colmatage des BPR peut être d'origine mécanique (transport particulaire), géochimique par précipitation de phases inorganiques secondaires (en particulier pour les barrières Fe^0 qui conduisent à une augmentation du pH) ou biologique. Des études additionnelles sont nécessaires pour évaluer la longévité des barrières et améliorer la prédiction des durées de vie en se basant sur les conditions spécifiques du site en termes hydraulique,

géochimique et microbiologique. Le développement de techniques permettant de reprendre, à moindre coût, les sections colmatées d'une BPR est reconnu comme un axe important de recherche (en particulier, en Amérique du Nord où la technologie du mur continu est privilégiée) ;

- il existe peu de possibilités techniques d'intervention et/ou de modification sur une barrière en place. Pour pallier cette difficulté, Il est donc nécessaire d'avoir une très bonne connaissance du site sur les plans hydraulique, géochimique et microbiologique en préalable à sa construction. La nécessité de bien caractériser le site avant de concevoir et construire une BPR est unanimement admis, en particulier pour les configurations de type Funnel & Gate.

Le schéma d'évaluation

Sur le plan du processus d'évaluation des BPR, les principes généraux développés dans les différents guides (en particulier, guides nord américains et anglais) ne sont pas remis en cause. En revanche, il y a un décalage important avec la réalité. Il existe peu de cas où l'ensemble des solutions alternatives aux BPR a été étudié et chiffré. Le choix de mettre en œuvre une BPR ne résulte pas systématiquement d'une analyse technico-économique rigoureuse telle que le recommandent les guides. La décision peut également intégrer d'autres critères comme la volonté d'acquérir des données et pousser plus en avant la technologie. Des critères comme la politique de communication de l'entreprise (ou du gestionnaire du site) ou la perception publique des problèmes environnementaux, interviennent également dans la prise de décision. Ce fut le cas par exemple, lors de la mise en place d'une BPR de type Funnel & Gate en Europe. La barrière a été construite à l'aval hydraulique d'une zone résidentielle, la solution palplanche y a été préférée à la technologie coulis pour l'écran. Ce mur physique, et surtout visuel lors de phase de mise en œuvre, a permis de « rassurer » les populations riveraines.

Mur continu et Funnel & Gate

Les deux principales configurations, le mur continu et le Funnel & Gate, ont leurs intérêts et inconvénients respectifs qui reflètent deux approches différentes notamment en terme de maintenance et de comportement à long terme :

- Mur continu : le mur est réactif et perméable sur toute sa longueur. Cette configuration intercepte le panache de pollution sur toute sa section, en minimisant les perturbations hydrauliques. Le réactif est surdimensionné pour limiter la maintenance. Cette approche plus « sécuritaire » de la barrière est moins sensible à un défaut de caractérisation du site. En revanche, elle n'offre pas les mêmes garanties en terme de suivi des performances et de maintenance du média réactif ;
- Funnel & Gate : cette configuration fait converger les écoulements vers des « réacteurs » de traitement, d'où la possibilité (qui n'est pas nécessairement exploitée) d'un meilleur contrôle des performances de la BPR et d'une maintenance facilitée sur les réacteurs. En revanche, elle conduit à une modification du régime d'écoulement. Le dimensionnement de la barrière et l'évaluation de son impact implique une connaissance accrue du fonctionnement du site. Toute déficience d'un réacteur aura des conséquences importantes sur les performances de la barrière.

Si historiquement les premières réalisations nord-américaines de BPR étaient majoritairement de type Funnel & Gate, la configuration mur continu est désormais la solution privilégiée dans ces mêmes pays. L'un des principaux arguments est la moindre sensibilité à des défauts de conception et une limitation des risques pour les sites complexes avec des écoulements et une distribution des polluants hétérogènes (d'où simplification de l'étape de caractérisation). En revanche, en Europe, la technologie de type Funnel & Gate est la solution privilégiée. Les critères en faveur de ce choix technique sont la possibilité d'adapter la configuration de la BPR aux spécificités des sites et d'avoir une plus grande maîtrise du monitoring et de la maintenance. Ainsi, certaines sociétés proposent une stratégie de maintenance basée sur des interventions annuelles, l'intervention pouvant aller du simple décolmatage au renouvellement du matériau réactif (particulièrement indiqué pour des barrières basées sur un mécanisme d'adsorption). Cette approche n'est envisageable que si la conception de la barrière permet un accès facilité au réacteur de traitement. Cette stratégie de maintenance optimisée peut être assortie de garanties sur les performances de la barrière ; les garanties sont le plus souvent proposées pour des durées de 10 et 30 ans.

Le traitement des combinaisons de polluants

Les BPR permettent dans le principe de traiter des combinaisons de polluants par traitement séquentiel avec différents réactifs (concept de multi-barrières). Le bilan des réalisations européennes montre que le traitement séquentiel reste principalement au stade pilote. Si l'on excepte la barrière de Offenbach (Allemagne) qui combine une dégradation microbiologique suivi d'un filtre à charbon actif, la totalité des barrières ne met en œuvre qu'un seul principe réactif. En revanche, plusieurs BPR traitent des combinaisons de polluants avec un réactif unique, la restriction étant que le mécanisme réactionnel mis en jeu soit adapté aux polluants considérés. Ainsi, le traitement par le fer métal peut s'appliquer à la fois à la dégradation des solvants chlorés (déhalogénéation réductrice) et à la réduction du Cr^{VI} en Cr^{III} (exemple de la barrière de Kolding, Pays-Bas). Suivant le même principe, l'utilisation d'un filtre à charbon actif qui met en œuvre un principe d'adsorption peut permettre de traiter des combinaisons de polluants organiques (hydrocarbure, PCB¹, HAP², etc.). Ces exemples montrent que le traitement d'une combinaison de polluants ne pose pas de problèmes majeurs si un seul type de réactif est mis en œuvre. Il en est tout autrement lorsqu'il est nécessaire d'associer plusieurs réactifs en série. Le système devient alors difficile à dimensionner et à maîtriser sur les plans hydrauliques (gestion des pertes de charge) et réactionnels (cinétiques). S'il est donc possible, en théorie, de combiner plusieurs réactifs (en particulier, dans les configurations de type Funnel & Gate), l'analyse des réalisations industrielles montre que la solution multi-barrières reste au stade du concept de laboratoire sans transfert à l'échelle industrielle (aucune réalisation relevée en Europe et en Amérique du Nord).

¹ PCB : polychlorobiphényle

² HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

Maintenance et longévité

Si l'expérience acquise permet de valider le concept, elle ne permet pas de totalement apprécier la longévité des BPR et de bien cerner la stratégie de maintenance. C'est sans aucun doute un frein au développement de cette technique. En effet, 10 ans de recul sont encore bien peu en regard des durées de vie envisagées (30, 40, 50 ans). Ce manque de recul est aggravé par des difficultés pour capitaliser l'expérience sur les réalisations existantes (peu de communication sur les échecs, difficultés à maintenir un monitoring au-delà de plusieurs années de fonctionnement...).

Éléments économiques

Le coût total de la barrière (coûts d'investissement et coûts opératoires et de maintenance) n'est pas le seul critère à prendre en compte. L'analyse comparative des différentes solutions va également dépendre de la situation financière du responsable du site et de la stratégie de gestion du site (cession ou maintien, usage industriel ou non, etc.). Les capacités d'investissement initial, et les liquidités disponibles pour les années à venir peuvent largement conditionner le choix de la technologie. Certains privilégient des technologies avec des coûts d'investissement élevés mais des coûts opératoires faibles, d'autres préfèrent l'option opposée.

Il est admis que le traitement par BPR implique i) des coûts d'investissement supérieurs à ceux des systèmes actifs (en l'occurrence, le Pompage & Traitement) et ii) des coûts opératoires et de maintenance (O&M) inférieurs. En conséquence, le coût cumulé du système BPR peut être inférieur à celui du système Pompage & Traitement (P&T) au-delà de plusieurs années. La position de ce seuil de rentabilité est directement liés aux coûts O&M, en particulier à la longévité de la barrière, tant du point de vue de la réactivité chimique du matériau, que de celui des performances hydrauliques. La variable critique pour déterminer le coût d'une barrière et évaluer le seuil de rentabilité est alors la longévité de la barrière, à savoir la fréquence et l'ampleur des opérations de maintenance sur le matériau réactif.

L'analyse des réalisations nord-américaines et européennes montre un important facteur d'échelle pour les coûts d'investissement (caractérisation du site, conception de la BPR, achat du matériau réactif et construction de la barrière, auxquels s'additionnent d'éventuels frais de licence). Les coûts d'investissement normalisés en fonction de la surface de la barrière (longueur x profondeur) sont généralement inférieurs à 3000 €/m². Dès que l'ouvrage atteint une surface significative (> 1 000 m²), les coûts sont inférieurs à 1 000 €/m². En considérant les ouvrages de plus de 1 000 m² (soit 15 réalisations), le coût d'investissement moyen est de 780 €/m². Les coûts les plus faibles sont de l'ordre de 150 à 200 €/m².

Cadre réglementaire

Les approches européennes en matière de sites et sols pollués sont très diverses. En outre, seuls certains pays ont une réglementation spécifique pour les sites et sols pollués. Aucun pays européen n'a une réglementation ou approche spécifiques pour les BPR. La réglementation française sur les sols pollués s'inscrit dans le cadre

général de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relatives aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), le décret d'application n° 77- 1133 du 21 septembre 1977 et la loi sur l'eau (1999). Ces 2 textes de base (et leurs différentes articulations avec la législation sur l'eau) régissent donc les dispositions réglementaires applicables à la mise en œuvre d'une BPR, en particulier pour la prescription et la détermination des objectifs de réhabilitation.

Spécificités européennes

Bien que le concept ait émergé en Amérique du Nord, cette étude montre que l'Europe est également moteur dans le développement de cette technologie. Après une première réalisation dès 1994 (autoroute A22, France), la technique s'est développée dès 1996 et a pris de l'ampleur à partir de 1998. Le nombre de réalisations européennes est évalué à 35, avec un peu plus de 20 réalisations d'échelle industrielle. Il existe des sociétés européennes proposant des solutions techniques éprouvées et sophistiquées. Il existe de nombreux projets de R&D depuis l'échelle du laboratoire à celle du pilote.

Un des points faibles à l'échelle européenne est sans aucun doute un moindre niveau de communication et d'échange avec, en particulier, une structuration insuffisante de l'effort de R&D et une communication insuffisante sur les réalisations opérationnelles. Le réseau le plus actif et le mieux structuré est sans aucun doute le réseau national allemand RUBIN. Les conséquences de ce manque de communication sont :

- des difficultés pour capitaliser l'expérience ;
- un manque d'information de l'ensemble des acteurs (gestionnaires de sites, prescripteurs, maîtres d'ouvrages, autorités réglementaires ...). Les conséquences peuvent être i) de mettre en œuvre des procédés inadaptés et peu performants sur des sites où la technologie BPR serait particulièrement indiquée (par exemple, traitement par P&T de panaches de solvants chlorés avec sources secondaires diffuses et mal localisées) ou ii) à l'opposé de choisir l'option BPR alors que le site ne s'y prête pas ;
- une mauvaise rationalisation des efforts à la fois en terme de R&D et de solutions industrielles.

Un concept en évolution

Il existe des solutions techniques et commerciales éprouvées que peuvent mettre en œuvre les gestionnaires de sites pollués. En revanche, il s'agit d'une technologie encore en évolution.

La technologie BPR a été développée pour traiter sur le *long terme* des *panaches de pollution*. Les tendances actuelles montrent que les notions de *long terme* et de traitement de *panache* doivent être modulées :

- la technologie BPR a été conçue pour traiter des panaches de polluants dissous sans action directe sur la zone source. L'évolution actuelle est d'élargir le concept de traitement passif *in situ* en y intégrant le traitement des sources. Cette évolution

apparaît très clairement en Amérique du Nord avec l'émergence des techniques de malaxage en profondeur (deep soil mixing) et d'injection direct du principe réactif (solution de fer colloïdal, émulsions,...). Ces techniques agissent directement sur la zone source ;

- la mise en œuvre d'une BPR peut également être envisagée comme une mesure intermédiaire (< 10 ans) de protection des ressources hydrauliques dans le cadre d'une opération de réhabilitation de site pollué avec un risque de remobilisation des polluants.

Executive Summary

This study, entitled "State of the art in Permeable Reactive Barriers (PRBs): achievements, experience, decision-making criteria and prospects", was commissioned by Re.Co.R.D. (*Réseau coopératif de recherche sur les déchets*), an association of French industrialists for cooperative research on industrial wastes.

Among the various techniques developed to support the management of soil and groundwater pollution, permeable reactive barriers (PRBs) are defined as a *passive* (i.e. requiring no external energy) treatment process for groundwater, which functions *in situ* (i.e. underground). These *in situ* and passive characteristics are the main reason for the increasing interest shown in PRBs in recent years, an interest that has given rise to a relatively large number of industrial projects around the world (about a hundred to date) and abundant literature. However, despite the large quantity of available literature and experimental feedback, managers of polluted sites and soils are still finding it difficult to assess the actual field of application of PRBs.

This study aims to provide a synthesis of existing information, to highlight the potential advantages and limitations of PRBs and to define technical and economic criteria for PRB applicability.

The project took place in two phases:

- phase 1: identification of the main sources of information, data collection and reporting on the present state of play regarding the treatment of polluted sites with the PRB technique ;
- phase 2: analysis of PRB technology, drawing on experimental feedback from different PRB projects (especially in Europe). The second phase involved the study team in direct contacts with the different players involved: commissioning organisations, contractors, civil engineering companies, consultants, expert networks and so on.

Validating the concept

The concept of *in situ* treatments of pollution plumes through PRB technology has now been substantially validated:

The first industrial-scale PRB projects have now been running for over 10 years. Feedback shows that their objectives have generally been achieved. The difficulties encountered (plumes not captured entirely, insufficient reduction of concentrations) and those not yet resolved do not lessen the technology's potential. Such problems often result from inadequate characterisation of sites and pollution (unidentified preferential pathways, heterogeneous distribution of pollutants, etc.).

- proven, operational technical solutions already exist, especially for Fe⁰ treatment of chlorinated solvents (reductive dehalogenation);

- there is substantial agreement on the assessment procedure leading to the PRB solution, and especially on the need for adequate site characterisation prior to the design and construction of a PRB.

Main characteristics

The salient characteristics of PRB technology are as follows:

- the PRB technique is a passive, *in situ* concept that is designed to function over the long term. Its main applications are therefore likely to be in treating stubborn types of pollution with secondary sources that are diffuse or not accurately located. This is typically the case for pollution by chlorinated solvents, which accounts for over 50% of PRB installations to date. There are other criteria besides "stubborn pollution", however. PRBs have proved to be of interest as an alternative solution when the volume of polluted soil is too large for excavation or for economically feasible treatment of the pollution source, and when the proven impact of pollution on groundwater is such that it warrants action. The PRB technique physically separates a hydraulic compartment polluted upstream from the downstream zone, and can be used as a temporary protective measure during depollution work on primary or secondary sources;
- PRBs can be used to treat a plume of pollutants by preventing their transfer to the downstream zone. Although PRB technology is dedicated to the treatment of dissolved pollutants, its potential impact goes beyond water treatment alone, since it is effectively a means for protecting hydraulic resources and rehabilitating polluted sites;
- PRBs are essentially used to treat chlorinated solvents. This can be a source of misunderstanding, because experience with chlorinated solvents is often wrongly used as a reference for other situations. In parallel with applications to treat chlorinated solvents, there are many other projects of a more exploratory nature, which aim to: i) acquire data on PRB performance in the medium and long term, ii) treat new pollutants or pollutant combinations, iii) test new configurations (sequential treatment) or technologies for more difficult situations (deep aquifers, for example). In short, there are, at present, both proven technological solutions and concepts that are still in the development stage;
- Although the value of the technology itself is not at issue, clogging is still a matter of concern, since it directly affects the design of a PRB installation, the maintenance strategy adopted and the lifetime of the barrier. The causes of clogging in PRBs can be mechanical (transport of particles), geochemical, through precipitation of inorganic secondary phases (especially with Fe^0 barriers, which increase the pH) or biological. Additional studies are needed to assess the durability of barriers and to improve forecasts as to their expected lifetime, based on site-specific hydraulic, geochemical and microbiological conditions. The development of techniques to clear clogged sections of a PRB at lowest cost is recognised as an important applied research area (especially in North America, where continuous wall technology is becoming a mainstream solution);
- There are few technical possibilities for interventions and/or modifications to an existing barrier. To overcome this problem, the hydraulic, geochemical and

microbiological characteristics of a site need to be thoroughly understood before construction begins. There is unanimous agreement on the need for in-depth site characterisation before designing and building a PRB, especially in the case of configurations of the funnel & gate type.

Assessment procedure

Concerning the PRB assessment procedure, while the general principles described in the various handbooks (especially in North America and Britain) remain valid, the reality in the field is very different. There are few cases where all the alternatives to PRB solutions have actually been investigated and costed. Decisions to install a PRB do not always stem from a rigorous technical and economic analysis as recommended in the handbooks. They sometimes rest on other criteria such as “strategic” policies to acquire data and “push” the technology. Criteria, such as the communication strategy adopted by the company (or the site manager) or public perceptions of environmental issues, may also affect decision-making. This was the case, for example, with the installation of a Funnel & Gate type PRB in Europe. The barrier was built downstream from a residential area, using a sheet pile for the screen rather than slurry wall technology. The physical – and especially visual - presence of the barrier during the installation phase helped to “reassure” the adjacent population.

Continuous wall and Funnel & Gate configurations

The two main configurations, the continuous wall and the funnel & gate, both have advantages and disadvantages that reflect two different approaches, especially with regard to maintenance and long-term behaviour:

- Continuous wall: the wall is reactive and permeable along its entire length. With this configuration, the pollution plume is intercepted across its entire section, with minimal hydraulic disturbance. The reactive medium is oversized to keep maintenance to a minimum. This “maximum security” approach to barriers is less sensitive to errors in site characterisation, but does not offer the same guarantee in terms of performance monitoring and maintenance of the reactive medium;
- Funnel & gate: this configuration funnels flows towards the treatment “reactors”, which offers possibilities (not always used) for better monitoring of PRB performance and easier reactor maintenance. On the other hand, it modifies the flow pattern. Proportioning of the barrier and impact assessments require more in-depth knowledge of the way the site functions. Any flaw in a reactor will have major consequences on the barrier’s performance.

Although the first North American PRB installations were mainly of the funnel & gate type, the continuous wall is now the preferred solution here. One of the main arguments in its favour is its lower sensitivity to design flaws. This means less risk in complex sites with heterogeneous pollutant pathways and distribution (which in turn simplifies the characterisation phase). In Europe, however, funnel & gate technology is the preferred solution. The criteria supporting this technological option are that the PRB can be configured to suit site-specific features and that monitoring and maintenance can be controlled more effectively. Some companies propose a maintenance strategy

based on annual operations that can range from simple clearing of clogged sections to replacement of the reactive medium (particularly recommended for barriers based on the adsorption principle). This approach can only be considered if the design of the barrier allows easy access to the treatment reactor. This optimised maintenance strategy is sometimes backed up with guarantees on the performance of the barrier, usually over periods of 10 or 30 years.

Treatment of pollutants in combination

In principle, PRBs can be used to treat pollutants in different combinations, by means of sequential processes involving different reactive media (multi-barrier concept). Europe-wide results show that sequential treatments are mainly in the pilot stage. With the exception of the barrier at Offenbach (Germany), which combines microbiological breakdown with subsequent filtering over active carbon, all the barriers surveyed only use a single reactive principle. However, several PRBs are being used to treat a combination of pollutants by means of a single reactive medium, the one constraint being that the reactive mechanism involved has to be adapted to the pollutants concerned. Fe treatment can be applied both to break down chlorinated solvents (reductive dehalogenation) and to reduce Cr^{VI} in Cr^{III} (as in the example of the Kolding barrier in the Netherlands). Working on the same principle, an active carbon filter based on the adsorption principle can be used to treat organic pollutants in combination (hydrocarbons, PCB³, PAH⁴, etc.). These examples show that treating a given combination of pollutants does not raise any major problems when only a single type of reactive medium is used. However, the situation is very different when several reactive media are used in sequence. It then becomes difficult to proportion and manage the hydraulics of the system (loss of pressure) and its reactive behaviour (kinetics). Although it is possible, in theory, to combine several reactive media (especially with funnel & gate configurations), our analysis of industrial projects shows that the multi-barrier solution is still in the laboratory concept stage, with no industrial-scale transfer occurring as yet (no industrial projects found in Europe or North America).

Maintenance and service life

Although the PRB concept itself can be validated in view of past experience, the expectancy of its service life cannot yet be fully assessed, nor is it possible to identify an exact maintenance strategy. This is undoubtedly a hindrance to further development of the technique. Ten years of experience are still clearly inadequate in view of the lifetimes under consideration (30, 40 or 50 years). The problem of lack of hindsight is compounded by the difficulty of capitalising on experience with existing projects (lack of communication on failures, problems with keeping up monitoring procedures after several years of operation, etc.).

³ PCB : polychlorobiphenyl

⁴ PAH : Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

Economic aspects

The total cost of a barrier (capital investment plus operational and maintenance costs) is not the only criterion at issue. A comparative analysis of different solutions will also depend on the financial situation of the organisation responsible for the site and its management strategy (transfer or upkeep, use for industrial purposes or not, etc.). Initial investment capacities and available cash flow for the years ahead can also be important factors in the choice of technology. Some may give preference to a technology with high initial investment costs and low operational costs, while others may prefer the reverse.

It is generally agreed that PRB treatments involve higher investment costs than active systems (pumping and treatment), but lower operating and maintenance (O&M) costs. Consequently, the ultimate cost of a PRB system can be lower than for a pumping and treatment (P&T) system after a few years. Where the profitability threshold actually lies depends directly on O&M costs, and especially on the service life of the barrier, both in terms of the chemical reactivity of the medium and its hydraulic performance. When determining the cost of a barrier and assessing the profitability threshold, the critical variable is the barrier's service life, or in other words the scale and frequency of maintenance on the reactive medium.

Our analysis of North American and European PRB projects shows the importance of factors of scale in determining capital investment costs (site characterisation, design of the PRB, purchase of the reactive medium and construction of the barrier, plus any licence fees). Standard investment costs, calculated according to the barrier's surface area (length x depth) usually amount to less than 3000 €/m². Where the surface area is very large (>1000 m²), costs drop to less than 1000 €/m². In projects with a surface area of more than 1000 m² (15 altogether), average investment costs amounted to 780 €/m². The lowest costs were around 150 to 200 €/m².

Statutory framework

European approaches to the question of polluted sites and soils are highly diverse. Only a few countries have developed specific legislation to address the issue, and no country in Europe has any specific approach or regulations concerning PRBs. French regulations on polluted sites are set out under the overall framework provided for under the 19 July 1976 ICPE Act (no. 76-663) on designated installations requiring environmental protection measures, the 21 September 1977 decree (no. 77- 1133) bringing the Act into effect, and the Water Act of 1999. These fundamental items of legislation (and their links with the legislation on water) therefore govern the various statutory provisions applying to the installation of a PRB, especially with regard to prescribing and defining rehabilitation objectives.

Characteristics specific to Europe

Although the PRB concept first emerged in North America, our study shows that European projects have also played a part in the development of this technology. After

an early project in 1994 (A22 motorway, France), the technique was developed in 1996 and began to take off in 1998. The total number of European projects is estimated at 35, including just over 20 on an industrial scale. A number of European companies are offering sophisticated and proven technical solutions, and numerous R&D projects are under way, ranging in scale from laboratory tests to pilot installations.

The main weakness at European level is undoubtedly a lower level of communication and exchange, especially in the organisation of R&D efforts as they do not produce sufficient communication on operational projects. The most active and most efficiently organised network is without doubt RUBIN, in Germany. This lack of communication gives rise to:

- difficulties in building on experience;
- a lack of information among the various parties involved (including site managers, prescriptive and commissioning bodies and statutory authorities). This may result in the implementation of inappropriate and ineffective processes at sites that may be particularly suited to PRB technology (P&T treatment of chlorinated solvent plumes whose sources are diffuse and not accurately located) or, conversely, in choosing a PRB option for sites where this is inappropriate;
- unsound arguments for both R&D efforts and industrial solutions under consideration.

Changing approaches

While proven technical and commercial solutions are already available to managers of polluted sites, the technology is still evolving.

PRB technology was developed as a solution for the *long-term treatment of pollution plumes*. However, in view of current trends, there is a need to reassess the meaning of *long term* as well as the concept of treating a *plume* of pollution:

- PRB technology was designed to treat plumes of dissolved pollutants without acting directly on the source zone. The current view is tending to extend the concept of passive *in situ* treatment by taking in the treatment of pollution sources as well. This change in approach has become clearly evident in North America with the emergence of deep soil mixing techniques and direct injection of the reactive principle (colloidal Fe solution, emulsions, etc.). These techniques act directly upon the source zone.
- Implementation of a PRB can also be considered as a temporary measure (<10 years) to protect hydraulic resources during operations to rehabilitate a polluted site where there is a risk of reactivating pollutant transfers.

Sommaire

1. Introduction	23
1.1. CADRE ET OBJECTIF	23
1.2. MÉTHODE DE TRAVAIL.....	24
1.2.1. Revue bibliographique via les groupes de recherche spécialisés.....	24
1.2.2. Contacts directs.....	26
2. Le concept de Barrière Perméable Réactive (BPR)	31
2.1. DÉFINITION	31
2.2. COMPOSANTE « HYDRAULIQUE » DES BPR	32
2.2.1. Principales configurations	32
2.2.2. Systèmes en développement	34
2.3. COMPOSANTE « RÉACTIVE » DES BPR	35
2.3.1. Principaux procédés.....	35
2.3.2. Le traitement des solvants chlorés par déhalogénéation réductrice	36
2.3.3. Procédés biologiques, les biobarrières.....	38
2.4. ENJEUX : MAINTENANCE ET LONGÉVITÉ DES BPR	39
3. Démarche conduisant à la réalisation d'une BPR	41
3.1. SCHÉMAS GÉNÉRAUX.....	41
3.2. AVANT PROJET SOMMAIRE : APS.....	44
3.2.1. Synthèse des contraintes non techniques.....	45
3.2.2. Synthèse des contraintes techniques.....	47
3.3. AVANT PROJET DÉTAILLÉ : APD	49
3.3.1. Caractérisation complémentaire du site	49
3.3.2. Conception de la barrière	50

3.4. RÉALISATION, MAINTENANCE ET DÉMANTÈLEMENT DES BPR.....	55
3.4.1. Mise en œuvre	55
3.4.2. Maintenance et suivi de performances	58
3.4.3. Démantèlement.....	61
4. Caractéristiques de la technologie BPR	63
4.1. BPR, LE TRAITEMENT DES PANACHES DE POLLUTION.....	63
4.2. BPR VERSUS POMPAGE & TRAITEMENT (P&T).....	64
4.3. MUR CONTINU VERSUS FUNNEL & GATE	65
4.3.1. Conception hydraulique et capture du panache	66
4.3.2. Composante réactive.....	68
4.3.3. Contrôle des performances et maintenance	70
5. Eléments économiques	73
5.1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.....	73
5.2. DÉCOMPOSITION DES COÛTS.....	74
6. Le cadre réglementaire	83
6.1. RÉGLEMENTATION FRANÇAISE	83
6.1.1. Cadre général	83
6.1.2. Prescription et objectifs des travaux de réhabilitation.....	84
6.1.3. Les textes pris en compte	85
6.2. RÉGLEMENTATIONS EUROPÉENNES.....	85
7. Bilan des réalisations à l'échelle industrielle	89
7.1. L'EXPÉRIENCE NORD-AMÉRICAINE	89
7.2. L'EXPÉRIENCE EUROPÉENNE.....	91
7.2.1. Analyse générale	91
7.2.2. Réalisations d'échelle industrielle	97

8. Analyse et discussion	103
8.1. HISTORIQUE ET ÉMÉRGENCE DE LA TECHNOLOGIE BPR.....	103
8.2. EVALUATION DES PERFORMANCES DES BPR, L'EXPÉRIENCE NORD-AMÉRICAINNE	104
8.3. LES SPÉCIFICITÉS EUROPÉENNES.....	106
8.4. ANALYSE.....	109
9. Conclusion	113

Liste des figures

Fig. 1 – Principes généraux des systèmes classiques de BPR (d'après Powell et al., 1998)	33
Fig. 2 – Schéma décisionnel du Royaume Uni (d'après Carey et al., 2002)	42
Fig. 3 – Schéma décisionnel aux USA (d'après Gavaskar et al., 2000)	43
Fig. 4 – Porte filtrante selon le procédé Panneau-Drain® (Solétanche-Bachy).....	58
Fig. 5 – Analyse comparative du coût total des systèmes BPR et P&T (Gavaskar et al., 2000).....	74
Fig. 6 – Coût d'investissement normalisé (€ /m ²) des BPR européennes et nord- américaine en fonction de la surface de l'ouvrage	76
Fig. 7 – BPR et type de polluants aux Etats-Unis et au Canada	90
Fig. 8 – BPR et type de matériau réactif aux Etats-Unis et au Canada	90
Fig. 9 – Classement des BPR européennes (toutes réalisations confondues) en fonction de leur année de mise en fonctionnement.....	91
Fig. 10 – Classement des BPR européennes (toutes réalisations confondues) par type de contaminant.....	92
Fig. 11 – Classement des BPR européennes (toutes réalisations confondues) par type de matériau réactif.....	92
Fig. 12 – Classement des BPR européennes (réalisations industrielles) par type de contaminant.....	99
Fig. 13 – Classement des BPR européennes (réalisations industrielles) par type de matériau réactif.....	99
Fig. 14 – Classement des BPR européennes (réalisations industrielles) par type de configuration.....	100
Fig. 15 – Coût des BPR européennes en € par m ² (surface de la BPR)	100

Liste des tableaux

Tabl 1 – Résumé des différentes techniques de construction des BPR (d'après Gavaskar et al., 2000)	57
Tabl. 2 – Caractéristiques des barrières (d'après Powell et al., 2002)	79
Tabl. 3 – Analyse des principaux postes de coût pour une barrière (d'après Powell et al., 2002)	80
Tabl. 4 – Coût d'une barrière par m ³ d'eau traitée pour une période 30 ans (d'après Powell et al., 2002)	81
Tabl. 5 – Analyse comparée des coûts d'une barrière et d'un système P&T (d'après Powell et al., 2002)	82
Tabl. 6 – Eléments sur la réglementation européenne applicable aux BPR (suite).....	88
Tabl. 7 – Liste des réalisations européennes (1/4)	93
Tabl. 8 – Liste des réalisations européennes (2/4).....	94
Tabl. 9 – Liste des réalisations européennes (3/4)	95
Tabl. 10 – Liste des réalisations européennes (4/4).....	96
Tabl. 11 – Synthèse des BPR européennes d'échelle industrielle	101

Liste des annexes

Annexe 1 - Fiches de renseignement sur les réalisations européennes	117
---	-----

1. Introduction

1.1. CADRE ET OBJECTIF

Cette étude, intitulée « Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives (BPR) ; réalisations, expériences, critères décisionnels et perspectives » est réalisée pour le compte de l'association française d'industriels Re.Co.R.D. (réseau coopératif de recherche sur les déchets).

Parmi l'ensemble des techniques développées dans le cadre de la gestion des pollutions des sols et des eaux, les Barrières Perméables Réactives (BPR), dont l'objet est le traitement des eaux souterraines, se distinguent de procédés plus classiques et anciens que sont le confinement hydraulique ou le Pompage & Traitement (P&T) des eaux par des unités de surface. Les BPR se définissent comme un procédé *in situ* de traitement passif des eaux souterraines.

Le fait que le procédé de BPR soit mis en place en souterrain (avec peu, voire sans structures de surface) et qu'il soit passif (*i.e.* ne nécessitant pas d'apport en énergie) est à l'origine d'un intérêt croissant depuis quelques années. Cet intérêt se traduit par un nombre assez important de réalisations industrielles à travers le monde et une très abondante littérature.

Les publications de caractère scientifique, bien qu'intéressantes sur le plan technique (procédés existants ou innovants, expérimentations, ...), apportent peu d'éléments décisionnels. Les rapports ou notes relatives à des projets pilotes ou industriels de BPR sont à ce titre beaucoup plus riches en enseignements, bien qu'insuffisants là encore. Enfin, les guides déjà édités dans le domaine fournissent une vision synthétique des différentes questions à aborder lors de toute étude sur le sujet. Malgré ces informations nombreuses, les gestionnaires de sites et sols pollués ont des difficultés à réellement évaluer le champ d'application des BPR.

L'objectif de cette étude est de synthétiser l'information existante, mettre en exergue les intérêts et limites d'application et définir les critères technico-économiques d'applicabilité des BPR.

Le projet a été structuré en deux phases :

- l'objectif de la première phase a été d'identifier les principales sources d'information, de collecter les données et d'établir un état des lieux sur le traitement des eaux polluées par la technique des barrières perméables réactives. La recherche documentaire a été orientée en priorité vers les synthèses récentes, en particulier anglo-saxonnes, faisant le bilan des acquis moins de 10 ans après les premières réalisations industrielles ;
- l'objectif de la seconde phase a été d'engager une analyse de la technologie BPR en recueillant des données, si possible quantitatives, sur les principales réalisations

européennes et en engageant des contacts directs auprès des principaux acteurs dans le domaine.

1.2. METHODE DE TRAVAIL

Le programme de travail pour cette étude a comporté plusieurs phases importantes :

- une revue bibliographique ;
- la consultation d'organismes nationaux ou internationaux ;
- le contact direct avec différentes spécialistes du domaine.

Le présent document rend compte au mieux des différentes informations collectées. Pour les raisons évoquées précédemment, cette étude ne prétend cependant pas être exhaustive. Outre le fait que nombres d'expériences sur le sujet restent inaccessibles et n'ont donc pas été analysées, il est apparu préférable de ne préserver qu'une partie des informations disponibles et de les structurer de façon à répondre clairement aux attentes évoquées auparavant.

1.2.1. Revue bibliographique via les groupes de recherche spécialisés

a) Consultation de groupes de recherche spécialisés

Parmi les recherches effectuées, une large partie s'est faite par Internet. En premier lieu elle s'est orientée vers les groupes de recherche spécialisés dans les BPR, les eaux souterraines et les sols pollués, puis vers les agences gouvernementales et enfin les entreprises.

Trois réseaux européens, focalisés sur les BPR, ont été consultés. Ils proposent un grand éventail d'informations sur les BPR et leurs applications ainsi que des liens avec d'autres réseaux ou sites :

- un réseau international : PRB-NET - Permeable Reactive Barrier Network. Ce réseau est animé par la "school of civil engineering" de la Queen's University de Belfast. Son objectif est d'avoir un espace d'échange sur les BPR, et de lister les informations et les différents acteurs travaillant dans ce domaine ;
- un réseau allemand : RUBIN - German BPR network. Ce réseau est animé par le ministère fédéral allemand de l'éducation et de la recherche (BMBF). Son objectif est de coordonner les besoins de la R&D concernant les applications et les opérations à long terme des BPR ;
- un programme européen de recherche (5^{ème} PCRD). PEREBAR: Long-term Performance of PRB. Le coordinateur de ce projet est l'université de Karlsruhe. Ce projet a pour objectif d'évaluer et d'améliorer les performances à long terme des BPR.

En dehors de ces réseaux, les sites de nombreux autres acteurs, notamment nord américains, ont été consultés.

Nom		Pays	Adresse mail
Groupes de recherches et forums			
PRB-NET	Permeable Reactive Barrier Network	International	http://www.prb-net.org
OTAN	Organisation du Traité de l'Atlantique Nord	International	http://www.nato.int
GWRTAC	Groundwater Remediation Technologies Analysis Center	International	http://www.gwrtac.org
CL:AIRE	Contaminated Land:Applications In Real Environments	International	http://www.claire.co.uk
PIRAMID	Passive In-situ Remediation of Acidic Mine / Industrial Drainage	Europe	http://www.piramid.org
PEREBAR	Project; Long-term Performance of PRB	Europe	http://www.perebar.bam.de
CLARINET	Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies in Europe	Europe	http://www.clarinet.at
RUBIN	German PRB network	Allemagne	http://www.rubin-online.de
SERDP	Strategic Environmental Research Development Program	Etats Unis	http://www.serdp.org
ITRC	Interstate technology Regulatory Council	Etats Unis	http://www.itrcweb.org
GRAC	Groundwater Resources Association of California	Etats Unis	http://www.grac.org
RTDF	Remedial technologies Development Forum, permeable reactive barriers action team	Etats Unis	http://www.rtdf.org/public/permbarr
Agences gouvernementales			
EPA	U.S. Environmental Protection Agency	Etats Unis	http://www.epa.gov
USGS	U.S. Geological Survey	Etats Unis	http://www.usgs.gov
FRTF	Federal Remediation Technologies roundtable	Etats Unis	http://www.frtf.gov
DOEGIPO	U.S. Department of Energy Grand Junction Office	Etats Unis	http://www.doegjpo.com/perm-barr
ETCENTRE	Le Centre de technologie environnementale d'Environnement Canada	Canada	http://www.etcentre.org
Clu-in	Technology Innovation Office	Etats Unis	http://clu-in.org

b) Revue bibliographique

Concernant la revue bibliographique des documents disponibles sur le sujet, les résultats permettent de distinguer :

- les publications ou actes de conférences au caractère scientifiques sur les BPR ;
- les rapports ou notes techniques relatives à des réalisations de BPR, que celles-ci soient à l'échelle pilote ou à l'échelle industrielle ;
- les guides déjà édités dans le domaine par différents organismes publics ou privés au niveau international.

On notera cependant que les publications à caractère scientifique, bien qu'intéressantes sur le plan technique (procédés existants ou innovants, expérimentations, ...), apportent peu d'éléments de réponse aux questions posées dans les objectifs généraux de l'étude. Les rapports ou notes relatives à des projets pilotes ou industriels de BPR sont à ce titre beaucoup plus riches en enseignements, bien qu'insuffisants là encore. Enfin, les guides déjà édités dans le domaine fournissent une vision synthétique des différentes questions à aborder lors de toute étude sur le sujet. Pour autant, les informations ne sont pas apparues systématiquement exhaustives.

1.2.2. Contacts directs

a) *Contacts directs via les forums de discussion*

Les forums de discussions sont des lieux de rencontres et d'échanges entre de nombreux professionnels et acteurs d'un secteur donné. Dans le domaine des sites et sols pollués, trois forums sont particulièrement importants :

- GROUNDWATER : ce forum est l'un des plus larges groupes de discussion sur Internet avec plus de 3000 abonnés de 60 pays différents. Hébergé par le *Scientific Software Group*, il porte sur la thématique des eaux souterraines en général (<http://www.scisoftware.com>) ;
- GWCAN : ce forum canadien est hébergé par l'association canadienne d'hydrogéologie et l'Institut national canadien de recherche sur les eaux. Ce forum regroupe les différents acteurs du domaine de l'ingénierie environnementale et de la modélisation dans le domaine de l'eau (<http://www.iah.ca/gwcan-l>);
- BIOREMEDIATION : ce forum, axé sur les problèmes de biotechnologies dans le domaine de la dépollution des sols et des eaux, regroupe plus de 2400 abonnés (<http://www.bioremediationgroup.org>) ;
- UNSATURATED-SOIL : ce forum hébergé par la National Academic Mailing List Service regroupe les personnes travaillant dans le domaine des écoulements non saturés (<http://www.dur.ac.uk/geo-engineering/unsaturated/tc6/email.html>).

Le message envoyé sur ces différents forums de discussion et reçu par l'ensemble des abonnés est le suivant :

« The BRGM, a French public research institute specialized in Earth Sciences, is in charge of drafting a report summarizing true field-scale applications of permeable reactive barriers (PRBs), particularly in Europe but also worldwide.

This report aims at emphasizing key steps in the implementation of PRBs (from site characterization and design to engineering and maintenance of PRBs), but also difficulties, unexpected results, etc. Because the objective is to report on real-world applications, any industrial reference or experimental feed back is welcome, whether successful or not. Projects implemented at an industrial scale for contaminated sites are preferred, including those performed within research programs.

We thus invite industrial firms, engineering companies, and public institutions to forward us information or references they would like to share. Information format could be reports, factsheet, informal information by mails, etc. »

Le message envoyé a donné lieu à différentes réponses. Dans l'ensemble, celles-ci ont été l'occasion :

- d'indiquer différents sites Internet spécialisés dans le domaine ;
- de renseigner sur différentes références bibliographiques pertinentes ;
- de mise en contact avec différents acteurs du domaine ;
- de diffusion de documents spécifiques (articles, études diverses, documents guides...);
- de proposition d'accès à des données réelles.

Des réponses intéressantes ont été reçues par les personnes suivantes :

Dominique Sorel	SSPA (US)
John Vogan	EnviroMetal Technologies Inc. (US)
Bart Faris	Remediation Oversight Section / GW Quality Bureau (US)
Andrés Alcolea Rodríguez	Polytechnic Univ of Catalunya (E)
Diels Ludo	Flemish institute for technological research VITO (B)
Carol A. Hefferan	Remediation and Redevelopment Div , EPA (US)
Hugh Potter	Environment-agency (UK)
Jonathan Maynes,	Cereolworld (US)
Louis Fournier	Star Comany (US)
Dirk Mallants	CEN (B)
Thomas Stafford	Louisiana Department of Environmental Quality (US)
Paul Tratnyek	Dpt. of Env. Sc. & Eng., School of Science & Engineering (US)
DW Hubble	Univ. Waterloo (CA)
Mark R. Noll	Dpt. of Geology & and Water Resources, Brockport Univ (US)
Yoon, Sam	Battelle / Env. Restoration Department Columbus (US)
Liere H. van	Netherlands Institute of Applied Geoscience TNO (NL)
Yvan Pilas	Univ. Croatia (HR)

b) Contacts personnels directs

La deuxième phase de contacts directs a consisté à collecter des informations directement auprès de différents acteurs du domaine : maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvres, entreprises de travaux, consultants, réseaux d'excellence... Ces contacts nous ont permis d'acquérir différents type d'informations :

- des informations synthétiques sur les retours d'expériences des différents projets de BPR en Europe ou en Amérique du Nord ;
- des informations pratiques sur différentes réalisations à des échelles pilotes ou industrielles ;
- des informations sur les perspectives d'évolution des techniques et du marché des BPR.

Les entreprises travaillant sur les BPR sont :

Nom	Pays	Adresse mail
B.P.S Engineering GmbH	Allemagne	http://www.bps-zwickau.de
Solétanche-Bachy	France	www.soletanche-bachy.com
Envirotrat.Ltd	Grande-Bretagne	http://www.envirotrat.com/
GeoDelft	Grande-Bretagne	http://www.geodelft.co.uk/
Keller engineering	Grande-Bretagne	http://www.keller-ge.co.uk/
Geocon	Etats Unis	http://www.geocon.net/over.asp
Groundwater Service Inc.	Etats Unis	http://www.gsi-net.com/
Geo-solution	Etats Unis	http://www.geo-solutions.com
EnviroMetal Technologies Inc.	Etats Unis	http://www.eti.ca
Environmental Construction Service Inc.	Etats Unis	http://yp.bellsouth.com/sites/ecs

Des contacts directs ont finalement été pris avec :

- DRIRE : M Hillewaere, ancien inspecteur des installations classées à la Direction Régionale de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) : informations sur les démarches réglementaires à suivre pour la mise en place et le suivi d'une BPR.
- SOLETANCHE-BACHY : A. Esnault-Filet, J. Kachrillo, Directeur Département Environnement à propos des réalisations européennes de BPR.
- CHARBONNAGES DE FRANCE : Monsieur Gobillot, Chef du Service Sites Arrêtés et Environnement (62420 Billy Montigny) et Monsieur Lagarde, en charge de la BPR,
- ENVIROMETAL TECHNOLOGY INC.: S. O'Hannesin,
- RUBIN : V. Birke (University of Applied Sciences of North-East Lower Saxony in Suderburg, Department of Civil Engineering, Water and Environmental Management)
- IMES GmbH : H. Schad, ing.
- SITA REMEDIATION : J.Y. Richard, C. Chêne

Pour des raisons de confidentialité, les comptes rendus de ces différents entretiens ne sont pas publiés dans le rapport.

2. Le concept de Barrière Perméable Réactive (BPR)

L'objectif de ce chapitre est de fournir les données de base sur les Barrières Perméables Réactives (BPR) : définition du concept, champ d'application, composantes réactives et hydrauliques. Le chapitre suivant traitera plus spécifiquement de la démarche générale conduisant à la réalisation d'une BPR, en particulier des critères et contraintes à prendre en compte.

Ces données de base peuvent être complétées par la lecture des nombreux ouvrages de synthèse existants.

2.1. DEFINITION

Une Barrière Perméable Réactive (BPR) est constituée d'une zone **perméable** de matériaux réactifs (métaux réducteurs, accepteurs ou donneurs d'électrons, adsorbants, lit bactérien,...) située sur le passage d'un panache d'eau souterraine polluée. Par écoulement advectif naturel au travers de la barrière, les polluants présents dans les eaux souterraines sont dégradés en éléments non nocifs (organiques) ou adsorbés/complexés (organiques, métaux et métalloïdes) par le **réactif**.

" An emplacement of reactive materials in the subsurface designed to intercept a contaminant plume, provide a flow path through the reactive media, and transform the contaminant(s) into environmentally acceptable forms to attain remediation concentration goals downgradient of the barrier."(Powell et al, 1998)

"A Permeable Reactive Barrier (PRB) is an engineered treatment zone of reactive material(s) that is placed in the subsurface in order to remediate contaminated fluids as they flow through it. A PRB has a negligible overall effect on bulk fluid flow rates in the subsurface strata, which is typically achieved by construction of a permeable reactive zone, or by construction of a permeable reactive 'cell' bounded by low permeability barriers that direct the contaminant towards the zone of reactive media."(Carey et al., 2002).

Les trois principales caractéristiques d'une BPR, lesquelles différencient cette technique des autres procédés couramment mis en œuvre sur les sites et sols pollués, sont :

- il s'agit d'une technique dont l'action de dépollution concerne exclusivement les panaches de pollution constitués de substances dissoutes. En ce sens, elle se différencie des techniques agissant soit sur les sols pollués, soit sur les sources primaires ou secondaires de pollution (cas des Phases Liquides Non Aqueuses,

légères ou denses, notées par la suite PLNA-l ou PLNA-d, équivalents de l'anglais DNAPL ou LNAPL⁵ ;

- il s'agit d'une technique dite « passive » pour les composantes « transfert » et « réaction ». Pour la composante « transfert » du traitement, les BPR mettent à profit les écoulements souterrains naturels, et aucun système de pompage, d'injection, ou autre n'est nécessaire. Pour la composante « réaction » du traitement, les BPR utilisent des réactifs permettant de dégrader ou d'adsorber les polluants, en minimisant la fréquence de l'entretien et de la maintenance (du moins dans la majeure partie des situations). Il n'est généralement pas nécessaire de traiter d'éventuels effluents gazeux ou sous-produits liés au procédé ;
- il s'agit d'une technique conduisant à une séparation physique entre un compartiment amont hydraulique et un compartiment aval d'un aquitar pollué. La concentration aval de l'eau en polluants doit respecter les seuils fixés par une autorité réglementaire : « confinement » des polluants à l'amont hydraulique de la barrière. En revanche, elle se différencie des techniques de confinement au sens strict dont le but est « d'isoler » la zone polluée et de stopper les écoulements souterrains afin d'éviter des transferts de polluants vers le milieu extérieur.

2.2. COMPOSANTE « HYDRAULIQUE » DES BPR

2.2.1. Principales configurations

Les deux grands types de configuration (Fig. 1) sont :

- le système mur continu (tranchée continue, Continuous Wall, CW ou Continuous Reactive Wall, CRW) ;
- le système Funnel & Gate noté F&G (littéralement, Entonnoir & Porte).

Dans le système mur continu, la barrière est réactive et perméable sur la totalité de sa longueur ; ce type de configuration minimise les perturbations hydrauliques. Au contraire, dans le cas d'une configuration en F&G, le panache est canalisé à l'aide d'écrans étanches vers des portes qui forment les zones réactives. Cette seconde configuration modifie les écoulements en les faisant converger. En revanche, elle offre la possibilité de mieux contrôler les performances de la BPR en terme d'abattement de pollution, la zone réactive étant d'extension limitée. Ces deux configurations couvrent la très grande majorité des applications industrielles.

Pour éviter toute ambiguïté, le terme Funnel & Gate ou F&G sera utilisé de manière générique pour désigner toute barrière constituée d'écrans imperméables faisant converger l'écoulement vers une zone réactive. Ce terme correspond également à une marque déposée par l'université de Waterloo, cette dernière ayant joué un rôle de précurseur dans la technologie des BPR.

⁵ LNAPL/DNAPL : Light or Dense Non Aqueous Liquid Phase

Quelle que soit la configuration adoptée, la barrière est ancrée dans le substratum imperméable sous jacent de telle sorte que le panache ne puisse pas s'écouler sous la barrière. La majorité des BPR est ancrée à des profondeurs comprises entre 10 et 20 mètres. Le volume des zones réactives est éminemment variable (de quelques m³ à plusieurs centaines de m³). Le volume de réactif mis en œuvre est fonction à la fois de la taille de l'ouvrage, de l'extension du panache de pollution, du débit d'eau à traiter, de la cinétique réactionnelle (qui détermine le temps de séjour) et de la capacité d'adsorption (pour les réactifs fonctionnant par adsorption).

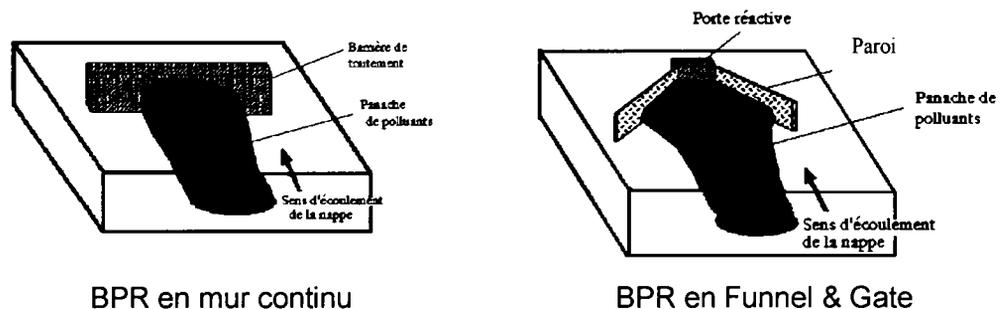


Fig. 1 - Principes généraux des systèmes classiques de BPR (d'après Powell et al., 1998)

Il existe de très nombreuses variantes autour de ces deux configurations de base, en particulier pour la configuration F&G. L'analyse des réalisations européennes illustrera notre propos (chapitre 7).

Parmi l'ensemble des variantes, nous retiendrons en particulier, le système Drain & Porte (Drain & Gate ou Trench & Gate). Dans ce système, les eaux polluées sont « collectées » par des drains qui font converger les écoulements vers les zones réactives. Dans certains cas de figures, le réseau de drains collecte le panache de polluants sans qu'il soit nécessaire de mettre en place un écran étanche de confinement. Outre cette géométrie, des structures drainantes peuvent être mises en place pour optimiser le fonctionnement de la barrière. Ainsi, l'installation de drains à l'amont hydraulique de la barrière peut permettre d'optimiser les écoulements dans les zones fortement polluées ou bien de « corriger » un emplacement non optimal des portes réactives. Ce dernier cas de figure est fréquent lorsqu'il y a des contraintes en surface (présence de bâtiments en particulier) qui imposent l'emplacement des portes. Outre les drains qui font converger les écoulements vers la zone réactive, il est également possible de mettre en place des structures drainantes à l'amont hydraulique de la zone polluée ; ces structures permettent de faire diverger les écoulements et de limiter les débits d'eau polluée à traiter dans la barrière. En plus des drains mis en place à l'amont hydraulique de la barrière, des drains sont fréquemment mis en place à l'aval hydraulique de la barrière ; cette fois, l'objectif est de faciliter les écoulements d'eau traitée à la sortie de la barrière.

2.2.2. Systèmes en développement

Il existe de très nombreux développements dérivés du concept de BPR. Ces systèmes ont comme seules caractéristiques communes d'être passifs et de mettre en œuvre un principe réactif. Les différents systèmes présentés sont au stade du développement, voire du pilote. Ainsi, aucune des réalisations européennes présentées dans cette étude ne fait appel à ces technologies.

a) Procédés réactifs basés sur une injection du matériau réactif

L'injection sous pression du « principe réactif » dans le sous-sol est un concept attractif qui peut potentiellement permettre de traiter des panaches étendus de grande profondeur et de géométrie complexe. Ce secteur pourrait bénéficier du savoir-faire acquis dans différents secteurs industriels, en particulier celui de l'ingénierie pétrolière. Tout système basé sur l'injection met en œuvre des processus de dégradation et non pas d'adsorption, la récupération du matériau réactif étant impossible. Outre des matériaux réactifs, l'injection peut concerner des bactéries, des nutriments, des microbulles d'air, des agents tensio-actifs,...

Les systèmes réactifs avec injection peuvent être classés en deux catégories, selon que l'on injecte dans la porosité existante du sous-sol ou dans une porosité de fracture créée par fracturation hydraulique.

Parmi les techniques en développement, citons l'injection de microparticules de fer (environ 1 μm de diamètre). Les microparticules de fer sont injectables sous forme de coulis, ce qui offre la possibilité (théorique) d'implanter une barrière partout où il est possible de faire un puits d'injection et de traiter des sites profonds ou fracturés. Ces particules, caractérisées par une très forte réactivité (grande surface spécifique), permettraient une dégradation progressive des polluants. Ce concept est encore au stade de recherche et développement, en particulier par Envirometal Technology Inc (ETI, Canada, Ontario).

b) Géosiphon

Les systèmes qui entrent dans cette catégorie sont intermédiaires entre les concepts de BPR et les systèmes P&T. Il s'agit de systèmes passifs qui exploitent les gradients hydrauliques naturels. Dans le cas des géosiphons, le matériau réactif est dans un réacteur placé en surface ou sub-surface ; l'alimentation hydraulique du réacteur est basée sur un siphon dont le point haut est la nappe polluée et le point bas de décharge une surface d'eau libre telle un cours d'eau. Il existe également des variantes où le réactif est mis en place dans un puits ancré dans l'aquitard. La nappe supérieure polluée s'écoule alors au travers du puits réactif dans la nappe inférieure.

c) DART

Les DART (Deep Aquifer Remediation Tools) sont envisagés pour traiter des eaux souterraines profondes où les techniques conventionnelles de BPR ne peuvent pas

être mises en œuvre ; la barrière est constituée d'un réseau de puits contigus, contenant le réactif, vers lesquels convergent les lignes d'écoulement.

2.3. COMPOSANTE « REACTIVE » DES BPR

2.3.1. Principaux procédés

Les matériaux réactifs mis en œuvre dans les BPR peuvent être classés en fonction des processus de traitement. L'action sur le(s) polluants(s) peut résulter d'une :

- dégradation chimique (exemple : dégradation des solvants halogénés au contact du fer métal) ;
- modification de sa forme chimique (exemple : réduction de U^{VI} en U^{IV} ou du Cr^{VI} en Cr^{III} au contact du fer métal),
- adsorption (exemple : adsorption de HAP⁶ ou de BTEX⁷ par des charbons actifs ; adsorption du plomb par des minéraux phosphatés).

Les processus mis en œuvre peuvent être strictement abiotiques ou s'appuyer sur des réactions biologiques (biobarrières).

La principale application du concept BPR est de loin la dégradation des solvants halogénés au contact de fer métal (Fe^0), associé ou non à un catalyseur. Les BPR appliquées au traitement des solvants halogénés représentent un peu plus de 55 % des réalisations industrielles américaines et européennes. Rappelons également que la première application industrielle d'une BPR date de 1994 et concerne le traitement d'une pollution aux solvants chlorés par du Fe^0 sur le site Sunnyvale en Californie. La prédominance du traitement des solvants chlorés par les BPR et la grande quantité d'expériences accumulées sur le sujet sont des éléments à garder à l'esprit. En effet, nombre d'informations ou de données acquises sur le traitement des solvants chlorés sont parfois abusivement étendues au concept de BPR, d'où parfois des confusions.

Si la dégradation des solvants chlorés par du Fe^0 est le cas le plus fréquemment rencontré, le concept de BPR est appliqué à un large éventail de polluants : polluants métalliques et métalloïdes (Cr, As, métaux lourds liés au drainage minier acide), éléments inorganiques non métalliques (nitrate, phosphate, sulfate), polluants organiques (hydrocarbures légers, BTEX, HAP,...). Les BPR sont également utilisées dans le cas de pollutions dites « mixtes », c'est à dire en présence de différents polluants.

Sans être exhaustif, les principaux matériaux réactifs mis en œuvre, outre le Fe^0 , sont les charbons actifs (pollutions BTEX, HAP, Hyd.), les oxy / hydroxydes métalliques (pollutions arséniées), les carbonates (pollutions métalliques liées au drainage minier acide), les zéolites et différentes formes de matière organique (dont le compost).

⁶ HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique

⁷ BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène Xylène

2.3.2. Le traitement des solvants chlorés par déhalogénéation réductrice

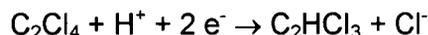
a) Réduction par le fer métal

Compte tenu de son importance, il est important de rappeler le principe élémentaire de traitement des solvants chlorés R-X par déhalogénéation réductrice au contact du fer métal Fe⁰. La réaction globale peut s'écrire comme suit :

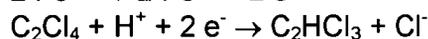
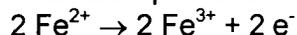


Trois mécanismes sont proposés. Pour l'exemple du tetrachloroéthène, les réactions s'écrivent :

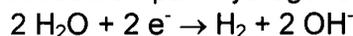
Transfert direct d'électrons



Réduction par le fer ferrique Fe²⁺



Réduction par l'hydrogène



Outre la déhalogénéation du solvant, ces réactions conduisent également à une modification des propriétés physico-chimiques de l'eau avec, en particulier, une augmentation du pH qui favorise la précipitation de certains composés inorganiques (carbonates en particulier). Les problèmes de colmatage qui en résultent sont une des difficultés majeures pour ce type de traitement.

Une autre cause évidente de dysfonctionnement pour ce type de barrière peut être la présence d'oxygène dissous qui conduit à la corrosion du réactif et à la précipitation d'oxy/hydroxydes de fer (rouille). La prévention de ce risque impose de bien isoler le réacteur de l'oxygène. Pour certaines configurations, les industriels mettent en œuvre un préfiltre dont la fonction est de tamponner l'eau, afin de consommer l'oxygène dissous.

Cette réaction de dégradation suit une cinétique du premier ordre :

$$C = C_0 e^{-kt}$$

Où Co est la concentration initiale en polluant, C la concentration au temps t et k la constante cinétique

La cinétique de dégradation est fréquemment caractérisée par le temps de demi-vie ($t_{1/2}$), durée nécessaire pour que la concentration soit égale à la moitié de la concentration initiale :

$$t_{1/2} = \ln(2)/k$$

Le temps de résidence ou temps de séjour nécessaire pour atteindre un niveau de concentration donnée se déduit simplement des lois cinétiques de dégradation des différents polluants. Le temps de séjour sera naturellement calculé pour le composé présentant les cinétiques les plus lentes.

Il existe dans la littérature des valeurs de temps de demi-vie pour les principaux solvants chlorés. Ces valeurs indicatives présentent une importante variabilité pour un même composé. Ainsi Johnson et al., 1996 donnent des temps de demi-vie compris entre 0.14 et 1.16 heures pour le tetrachloroéthène et entre 5.8 et 77.0 heures pour le 1,1-dichloroéthène (valeurs normalisées en fonction de la surface réactive du Fe⁰). La variabilité est fonction de la surface réactive du Fe⁰, de la composition chimique globale des eaux et de la température. Concernant ce dernier point, il est important de garder à l'esprit que les expériences de laboratoire sont conduites à 20°C alors que la température des eaux souterraines est généralement comprise entre 10 et 15°C. En tout état de cause, le dimensionnement des barrières doit impérativement reposer sur les valeurs déterminées en laboratoire (essais colonnes) ou sur pilote avec les eaux du site.

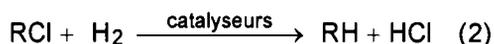
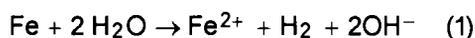
Le procédé utilisant le Fe⁰ a été étudié et développé par l'université de Waterloo au début des années 90 ; la technologie fait l'objet de brevets. L'exploitation commerciale du procédé est assurée par ETI.

b) Réduction catalytique

Le procédé de réduction des solvants halogénés par le fer métal est caractérisé par des cinétiques réactionnelles assez lentes qui imposent des temps de séjour longs. Les temps de demi-vie dépendent de la nature des composés halogénés et de la composition chimique de l'eau ; ils sont généralement de plusieurs heures avec le Fe⁰.

L'utilisation couplée du fer métal et de catalyseurs de déhalogénéation (métaux de transition comme le palladium et le nickel, en moyenne à 1% massique) peut permettre d'accélérer les cinétiques d'un à deux ordres de grandeur par rapport au Fe⁰, avec des temps de demi-vie de quelques minutes seulement.

Le procédé de réduction catalytique combine i) la capacité du Fe⁰ à produire de l'hydrogène au contact de l'eau et ii) la réaction d'hydrogénation des solvants chlorés en présence de catalyseurs :



L'augmentation des cinétiques en présence de catalyseur permet de réduire significativement les volumes de réactifs (facteur 10 du ratio Masse réactif / Volume traité). Ce procédé permet également de travailler avec un fer de granulométrie plus grossière (production uniquement de H₂), d'où une limitation des problèmes de colmatage et une diminution des pertes de charge. Enfin ce procédé offre la possibilité

de moduler la réactivité en adaptant le pourcentage de métaux de transition. En revanche, ce procédé conduit comme pour le procédé Fe^0 à la modification des conditions physico-chimiques de l'eau (baisse du Eh et augmentation du pH entraînant une précipitation de composés inorganiques).

Ce procédé de réduction catalytique est notamment commercialisé par la société SITA dans le cadre du procédé Keops[®] qui désigne la mise en œuvre du réactif Fe^0 + catalyseur (réactif SITA, ex ATE Geoclean) dans la barrière filtrante « Panneau Drain » (Solétanche Bachy).

Les systèmes Fe^0 + catalyseurs permettent d'atteindre des cinétiques élevées qui sont susceptibles de se dégrader au cours du temps. Ce problème ne se pose pas pour les procédés qui préconisent une maintenance annuelle du réactif.

2.3.3. Procédés biologiques, les biobarrières

La réactivité des BPR peut reposer sur des mécanismes biologiques. Il existe un très large champ d'application potentiel pour des barrières qui reposent sur des mécanismes biologiques : dégradation microbologique de composés hydrocarbonés (BTEX, composés aliphatiques), mise en œuvre de bactéries sulfatoréductrices permettant de précipiter les métaux sous forme de sulfures (pollutions de type Drainage Minier Acide, DMA), dénitrification par voie biologique, modification de la valence de métaux/métalloïdes (oxydation de l' As^{III} mobile en As^V , réduction de l' U^{VI} soluble en U^{IV} insoluble...).

Parmi les développements dans le domaine du traitement biologique, citons le développement de réactifs permettant de libérer lentement et de manière ciblée soit de l'oxygène pour les procédés aérobie (Oxygen Release Compound, ORC[®]), soit de l'hydrogène pour les procédés anaérobies (Hydrogen Release Compound, HRC[®]).

Les réalisations industrielles restent marginales. Ainsi, en Europe, nous n'avons relevé qu'une seule barrière industrielle, fonctionnant à partir de mécanismes biologiques (barrière d'Offenbach, Allemagne)

D'une manière générale, les contraintes spécifiques des barrières biologiques sont :

- la maîtrise de l'injection des substrats ;
- la maîtrise de la biomasse, l'objectif étant de la maintenir à un niveau suffisant (réactivité) sans dégradation des propriétés hydrauliques (risque de colmatage) ;
- la capacité de la biomasse à s'adapter aux conditions spécifiques du milieu (température, variations de débit, variation de concentration en polluants).

A noter que le réseau allemand RUBIN fait mention d'un brevet de la Queen's University of Belfast relatif au traitement biologique dans les barrières. Le brevet couvre l'injection et/ou l'ensemencement de l'aquifère et d'une zone réactive par des nutriments et microorganismes spécifiques. Aucune information complémentaire n'a pu être obtenue.

2.4. ENJEUX : MAINTENANCE ET LONGEVITE DES BPR

Les nombreux documents de synthèse existants et les publications sur les réalisations pilotes et industrielles permettent de dresser un premier état des lieux et de bien mettre en exergue les enjeux. Les points abordés dans ce paragraphe seront approfondis dans la suite du rapport.

Avec une centaine de réalisations à l'échelle industrielle, le concept de la technologie BPR est désormais validé, en particulier pour l'application à la dégradation des solvants chlorés. Les difficultés rencontrées et les éventuels dysfonctionnements ne remettent pas en cause l'intérêt de cette approche passive, du moins dans son principe général.

La plupart des problèmes rencontrés au cours des premières années (capture incomplète du panache, temps de séjour insuffisant) dérive d'un défaut de conception de l'ouvrage, qu'une caractérisation hydro-géochimique adéquate aurait permis d'éviter.

La mise en œuvre d'une BPR s'inscrit dans le long terme avec des durées de vie prévisionnelles de 30 à 50 ans. Ces durées doivent être mises en perspective avec la durée de vie des barrières actuelles qui ont tout au plus 10 ans. En raison de ce recul limité, la technique BPR est souvent considérée comme « innovante ».

Tous les acteurs s'accordent donc pour reconnaître que les principales incertitudes pour cette technique sont la maintenance et le comportement à long terme. La longévité ou « durée de vie », d'une BPR est essentiellement fonction des performances à long terme du matériau réactif, sur le plan de la réactivité chimique et du maintien des performances hydrauliques. En effet, l'un des risques est le colmatage progressif, partiel ou total, de la barrière qu'il soit mécanique, biologique ou géochimique (précipitation de nouvelles phases comme la calcite ou la sidérite, induite par la modification locale des conditions physico-chimiques du milieu dans les traitements par le Fe^0).

L'une des principales difficultés pour évaluer les performances à long terme des BPR et leur intérêt technico-économique, reste à ce jour le manque de données sur la stratégie de maintenance du réactif (périodicité, ampleur, méthode, coût) et la gestion de son devenir en fin de vie.

3. Démarche conduisant à la réalisation d'une BPR

L'objectif de ce chapitre est de présenter, dans ses principes généraux, la démarche conduisant à la réalisation d'une BPR. Dans la mesure où il existe un relatif consensus sur les principes de cette démarche, nous présentons la démarche proposée par le Royaume Uni (Carey et al., 2002). Dans le même esprit, les Américains proposent un schéma très voisin (Gavaskar et al., 2000). Les Allemands envisagent également de se doter d'un guide dans le cadre du réseau RUBIN.

La description de la démarche générale conduisant à la réalisation d'une BPR doit donner aux décideurs une vision claire et synthétique du processus dans son ensemble, en distinguant les différentes étapes, et en identifiant celles qui conditionnent la poursuite du projet.

Les schémas présentés ci-après ainsi que l'ensemble des contraintes à prendre en compte ne doivent pas être considérés comme une séquence d'étapes obligatoires pouvant servir d'outil d'aide à la décision, mais plutôt comme une liste des points importants à examiner depuis l'évaluation préliminaire, jusqu'à la mise en œuvre, le suivi et le démantèlement de la BPR.

L'analyse des réalisations industrielles et des pilotes majeurs (chapitre 7) montre qu'il n'y a pas de contradiction entre la réalité et ces schémas de principe. En revanche, ces schémas sont rarement suivis dans leur intégralité ; s'agissant d'une technique récente et encore en développement, d'autres critères que ceux strictement technico-économiques peuvent conduire au choix et à la réalisation d'une BPR. Ainsi, la décision de mettre en œuvre une BPR peut également résulter d'une attitude volontariste, l'objectif étant d'acquérir des données complémentaires, voire de promouvoir la technologie.

Après avoir exposé les schémas décisionnels dans leurs principes, nous présenterons plus en détail les étapes suivantes :

- l'Avant Projet Sommaire (APS) conduisant à la décision de réaliser une BPR. Nous avons inclus une liste indicative des principales contraintes à prendre en compte ;
- l'Avant Projet Détaillé (APD) conduisant à la conception d'une BPR. Cette étape inclut en particulier la caractérisation complémentaire du site, la conception des composantes hydrauliques et réactives des BPR.

3.1. SCHEMAS GENERAUX

Les différents schémas sont structurés comme suit :

- évaluation préliminaire, équivalent de l'Avant Projet Sommaire (APS) ;

- investigation détaillée du site et conception préliminaire, équivalent de l'Avant Projet Détaillé (APD) ;
- conception et dimensionnement détaillés, plan de travail et construction de la BPR ;
- suivi des performances et maintenance ;
- démantèlement.

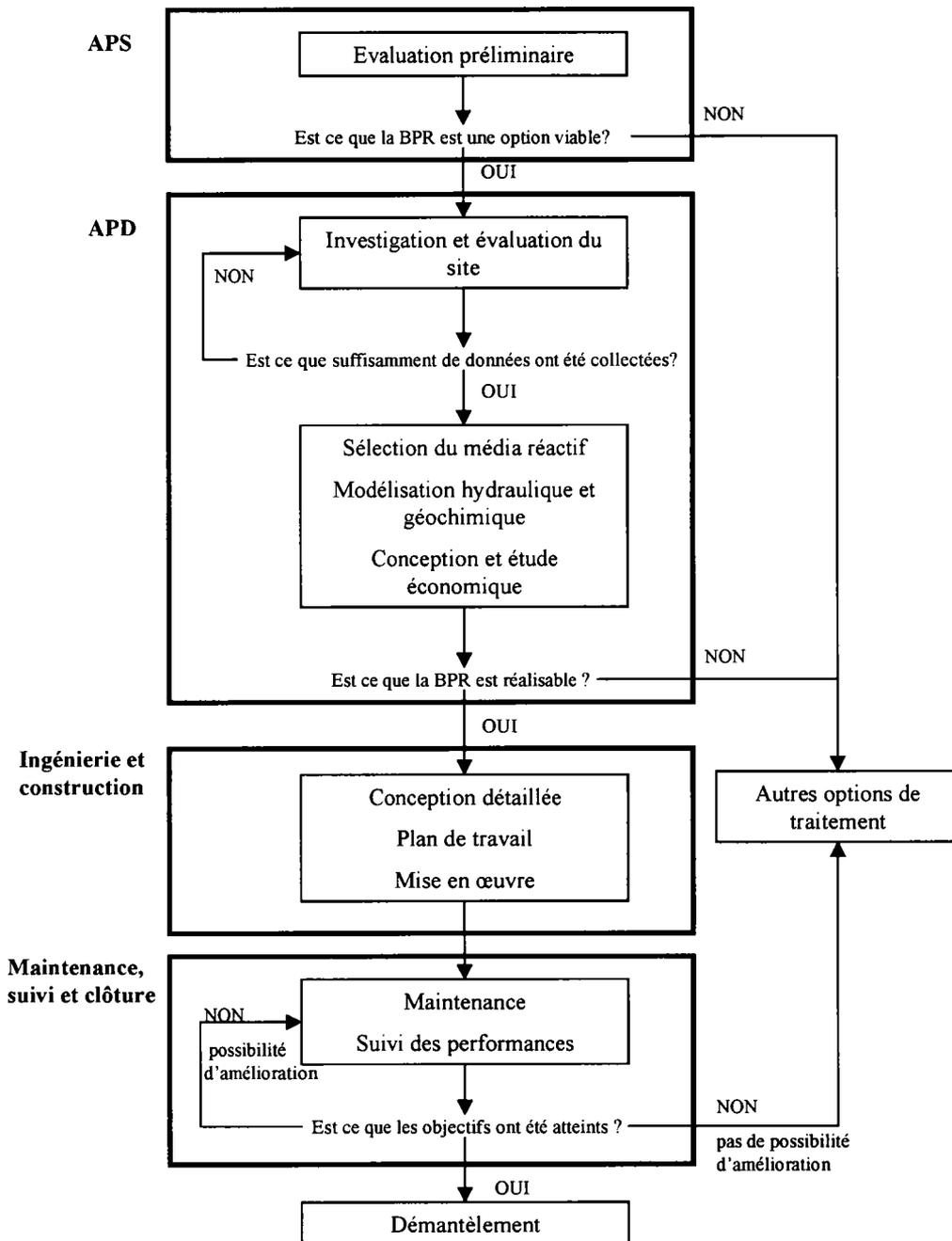


Fig. 2 – Schéma décisionnel du Royaume Uni (d'après Carey et al., 2002)

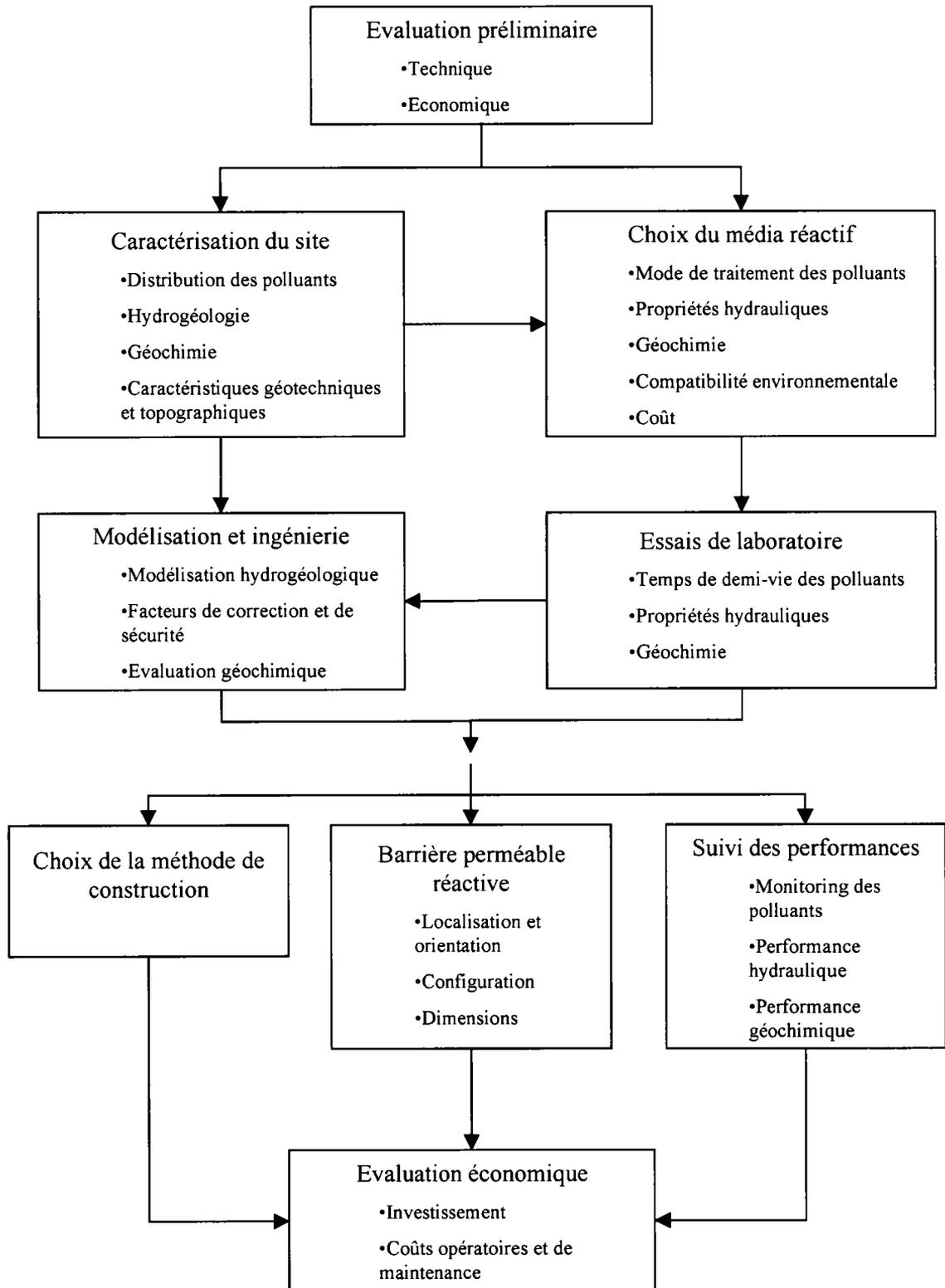


Fig. 3 - Schéma décisionnel aux USA (d'après Gavaskar et al., 2000)

3.2. AVANT PROJET SOMMAIRE : APS

L'APS a pour objectif d'évaluer, à un stade préliminaire et sur la base d'un nombre minimum de données, si la technique BPR est une solution viable et envisageable. Cette étape doit intégrer les contraintes spécifiques du site d'étude ; elle comprend une phase d'acquisition et de traitement de données incluant parfois le développement d'un modèle conceptuel simplifié, et est suivie d'une phase décisionnelle conduisant au maintien ou non de l'option BPR.

La réalisation de cette première étape implique que le site ait fait l'objet d'investigations préliminaires, d'un diagnostic initial et approfondi et d'une Evaluation Simplifiée ou Détaillée des Risques (ESR, EDR).

Il faut noter que pour certaines sociétés, l'avant projet sommaire (APS) consiste certes à vérifier qu'il n'y a pas de contre-indications à la mise en place d'une BPR mais aussi à prendre en compte les résultats des tests préliminaires de laboratoire, en particulier d'essais en colonne.

Les listes suivantes ont pour objet de traiter de manière synthétique mais aussi exhaustive que possible les contraintes qui interviennent dans la décision de réaliser ou non une BPR. Cette évaluation préliminaire doit répondre à la question suivante : la BPR est-elle une solution faisable ? Les aspects suivants sont ainsi abordés :

- les contraintes réglementaires et/ou administratifs (chapitre 6) ;
- les contraintes économiques et financières (chapitre 0) ;
- les contraintes liées à la politique de gestion du site ;
- les contraintes pratiques liées à la configuration du site ;
- les contraintes liées à la politique environnementale de l'entreprise et à l'acceptabilité sociale;
- les contraintes techniques liées soit à la pollution (géométrie du panache, hydrogéologie, composés polluants, ...), soit à la mise en œuvre de la BPR (techniques de construction).

3.2.1. Synthèse des contraintes non techniques

Les contraintes réglementaires et/ou administratives
<p>Contraintes spécifiques aux procédés de traitement de la pollution ou Contraintes administratives en lien avec les performances du procédé</p>
<ul style="list-style-type: none"> - En France, le seul critère est le respect du seuil de concentration fixé par arrêté préfectoral. La DRIRE ne porte pas d'avis sur la solution technique, tout au plus l'arrêté préfectoral précise quelques points spécifiques. La procédure EDR est généralement utilisable pour évaluer la réduction du risque que peut apporter la réhabilitation. - A l'inverse, dans d'autres pays (tels la Belgique ou l'Italie), les autorités réglementaires avalisent à la fois les performances et la solution proposée. - Certaines procédures particulières liées à la phase transitoire de mise en place de la BPR nécessitent des vérifications réglementaires (gestion des terres excavées, stabilité des terres, transport de matériaux et matériels, ...).
Les contraintes économiques et financières
<ul style="list-style-type: none"> - Les coûts d'investissement et de maintenance. - Stratégie financière du client (trésorerie, fiscalité). - Prise en compte des coûts de démantèlement. - Coûts et performances des solutions techniques alternatives.
Les contraintes liées à la politique de gestion du site
<p>Orientations en terme de réhabilitation</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement ou non des sources, en relation avec l'usage ultérieur du site (zone industrielle ou résidentielle). - Délais souhaités pour la remise en état du site et pour l'atteinte des objectifs de qualité des eaux souterraines. - La durée prévisionnelle de fonctionnement de la BPR est-elle en adéquation avec les usages envisagés et les délais de traitement souhaités ?
<p>Aspects fonciers</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Vente éventuelle des terrains et transfert des responsabilités. - Politique foncière : vente du site à court terme ou au contraire conservation du site sur le long terme. <p><i>Exemple : pour les sites sous licence ETI, seul 10 sites sur 100 ont été vendus après la mise en place de la BPR.</i></p>

Les contraintes liées à la politique environnementale de l'entreprise et à l'acceptabilité sociale

- Critères non techniques, volonté de l'industriel.
- Critères d'acceptabilité sociale : perception irrationnelle de la technique par le grand public

Exemple : sur un site industriel pollué ayant une zone d'habitation à l'aval de la pollution, la mise en place d'une BPR type F&G a conduit à la réalisation d'une séparation physique entre l'amont hydraulique pollué et le secteur aval. La séparation a été réalisée au moyen de palplanches enfoncées. Ce mur physique, et surtout visuel lors de la phase de mise en oeuvre, a permis de « rassurer » les populations riveraines.

Les contraintes pratiques liées à la configuration du site

- Accès au site : contrainte essentiellement durant la phase de construction (accès aux engins).
- Infrastructures de surface – existantes et futures envisagées - contraintes principalement liées à la présence bâtiments et infrastructures souterraines (réseau électrique, canalisations ...).

Ces contraintes ont des impacts sur la configuration de la BPR et sa géométrie (mur continu ou F&G, implantation des portes ...) et sur la maintenance (accès au média réactif) et le suivi des performances (forages de contrôle).

3.2.2. Synthèse des contraintes techniques

Les contraintes techniques liées à la pollution et au milieu de transfert	
Contraintes techniques liées aux polluants	
- Nature de la pollution	<ul style="list-style-type: none"> - Type de polluants cibles. - Existence ou non de pollution mixte. - Concentrations en polluants. - Processus d'atténuation des polluants ; aptitude à la dégradation, adsorption, ...
- Géométrie de la pollution	<ul style="list-style-type: none"> - Extension du panache (latéralement et en profondeur). - Hétérogénéité spatiale et variations saisonnières.
- Sources 1 ^{aires} ou 2 ^{ndaires}	<ul style="list-style-type: none"> - Sources bien localisées et concentrées. - Sources dispersées et mal localisées.
- Physico-chimique des eaux (hors polluants)	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'éléments inorganiques susceptibles de précipiter (carbonates, sulfates ...).
Géologie, hydrogéologie, hydrologie et topographie du site	
- Géologie	<ul style="list-style-type: none"> - Distinguer les milieux granulaires et fissurés (problème des écoulements non maîtrisés dans les fractures). - Formations géologiques homogènes ou hétérogènes. - Existence d'un niveau imperméable peu profond et continu pour ancrer la BPR.
- Hydrogéologie	<ul style="list-style-type: none"> - Présence ou non d'hétérogénéités. - Aquifères simples ou multiples superposés. - Profondeur de la surface libre (éventuels risques de remontées de nappes en configuration F&G pour les nappes sub-affleurantes). - Puissance de l'aquifère (aquifères très transmissifs).
- Caractéristiques hydrodynamiques	<ul style="list-style-type: none"> - Perméabilité et porosité de l'aquifère. - Inversion ou non des sens d'écoulements selon les saisons. - Débit de nappe trop élevé : perte de charge trop élevée (risque de contournement de l'ouvrage), flux de polluant trop important avec saturation rapide du filtre.
- Contexte hydrologique	<ul style="list-style-type: none"> - Lien hydraulique entre la nappe et les eaux de surface (cours d'eau à proximité). - Risques d'inondation.
- Contraintes topographiques	<ul style="list-style-type: none"> - Cas des reliefs très contrasté : nécessité de techniques particulières.

Les contraintes techniques liées à la mise en œuvre de la BPR

Faisabilité de la BPR sur le plan réactif

- Existence de réactif « éprouvé » permettant de traiter la pollution.
- En cas de combinaison de polluants, existence de combinaisons de réactifs « éprouvés » (traitement séquentiel).
- Risques de dégradation séquentielle de la pollution avec génération de congénères « dangereux ».
- Existence de mécanismes de réactions induisant une précipitation des inorganiques.
- Compatibilité des concentrations et des flux de polluants avec la gestion et la maintenance du media réactif (*Exemple : saturation rapide des charbons réactifs pour certaines pollutions très concentrées nécessitant une régénération fréquente*).

Faisabilité de la BPR sur le plan géotechnique

- Compatibilité de la profondeur de l'aquitard avec les techniques disponibles de mise en place des parois. Les solutions standards sont mises en œuvre jusqu'à 15-20m de profondeur ; au-delà il existe des solutions techniques spécifiques mais induisant des coûts élevés.
- Accessibilité et manœuvrabilité des engins.
- Compatibilité entre les infrastructures de surface et les opérations de génie civil (génération et stockage des volumes excavés, des déblais, battage des palplanches et désordres induits par les vibrations, aire de préparation des coulis bentonite-sol, ...).
- Compatibilité entre la géométrie des infrastructures de surface et le type de BPR (installations industrielles très denses souvent incompatibles avec la configuration en mur continu).
- les milieux rocheux fissurés, fracturés ou karstiques sont généralement incompatibles avec la mise en place de BPR conventionnelles (les solutions techniques sont très limitées : fracturation hydraulique, création de zones drainantes perméables).

Prise en compte des incertitudes

- Choix de gestion de la pollution : actions possibles si certaines actions programmées se révèlent inefficaces ?
- Environnement hydrogéologique et hydrologique du site : adaptations en cas de modifications imprévues ?
- Géométrie du panache de pollution à traiter : adaptations si le panache s'avère différent de sa caractérisation initiale ?
- Mise en œuvre de systèmes destinés au traitement de la pollution : adaptation en cas de dégradation incomplète / imparfaite des polluants ?

3.3. AVANT PROJET DETAILLE : APD

L'APD doit déboucher sur une évaluation détaillée des possibilités techniques de réalisation. Il doit fournir des solutions techniques et organisationnelles aux objectifs de l'installation. L'APD comprend les étapes de i) caractérisation complémentaire du site et ii) de conception de la barrière. L'APD conduit à la décision ferme d'adopter la BPR comme solution technique pour traiter la pollution. L'APD précède les phases de dimensionnement détaillées et de construction de l'ouvrage.

3.3.1. Caractérisation complémentaire du site

La caractérisation d'un site pour la mise en place d'une BPR, doit être plus détaillée que celle demandée par les méthodes conventionnelles de traitement *in situ*, les performances ultérieures étant très dépendantes des spécificités hydro-géochimiques du site.

Une mauvaise caractérisation initiale du site (hétérogénéités non identifiées, éléments inorganiques susceptibles de précipiter non pris en compte,...) peut conduire à de mauvaises performances. Comme il est, par ailleurs, difficile de changer la géométrie et les caractéristiques de fonctionnement d'une BPR (nombre de portes, épaisseur, longueur,...) pour corriger un défaut de conception ou s'adapter à une évolution des conditions hydro-géochimiques, la présence de défauts majeurs peut conduire à l'échec de la BPR.

Un élément particulièrement important est d'appréhender l'hétérogénéité des écoulements et du panache de pollution. Pour tout aquifère, les niveaux piézométriques s'établissent localement par un équilibre des débits, en fonction des apports hydriques, des conditions limites, et des perméabilités des terrains. Par voie de conséquence, les débits et directions d'écoulements ne sont pas uniformes et varient en fonction des hétérogénéités et de la transmissivité du sous-sol. Ceci entraîne la présence de circulations préférentielles. Pour une nappe alluviale par exemple, les écoulements s'établissent de manière non uniforme selon la présence de dépôts plus ou moins grossiers ou argileux, ou du fait de l'existence de paléochenaux par exemple. L'hétérogénéité des écoulements s'accompagne évidemment de « distorsions » du panache de pollution dans l'espace. Ainsi, en plus des besoins relatifs à la compréhension des écoulements, une délimitation de la géométrie du panache de pollution est nécessaire.

L'objectif de la caractérisation est d'affiner le modèle conceptuel préliminaire en acquérant de nouvelles données sur le panache, l'hydrogéologie, la géochimie du site et les modifications induites par la BPR. Les données à se procurer vont être définies de manière itérative ; les données acquises vont aider à développer le modèle conceptuel qui, en retour, va définir les données manquantes à son évolution. La quantité et qualité des données dépendent du niveau d'incertitude admissible et du coût d'obtention des nouvelles données. Dans l'élaboration du modèle, il est essentiel d'évaluer le niveau de confiance des informations, pour savoir apprécier les résultats.

Même si les données spécifiques du site sont préférables, des données de la littérature peuvent aussi être utilisées en complément. Cependant, il est important de vérifier qu'elles sont transposables au site étudié et de justifier leur utilisation.

Les principales informations nécessaires à l'élaboration d'un modèle d'écoulement et de transport du polluant sont :

- description du site et historique ;
- caractérisation géologique, hydrologique et climatique ;
- caractérisation des flux des eaux souterraines (avec éventuellement des essais de pompage) ;
- sources primaires et secondaires et caractéristiques du polluant ;
- voies privilégiées de transfert et caractéristiques de la migration du polluant ;
- environnement bio-géochimique ;
- localisation des zones en aval hydraulique desquelles s'appliquent les objectifs de réhabilitation.

3.3.2. Conception de la barrière

Cette étape concerne la conception du futur ouvrage avec prise en compte des composantes « réactive » et « hydraulique ». Cette approche implique un couplage entre expérimentation (depuis l'échelle du laboratoire – impératif - jusqu'à l'échelle pilote - non systématique) et modélisation (hydraulique et géochimique). Elle précède l'étape de dimensionnement détaillé et de construction de l'ouvrage.

a) Conception de la composante réactive de la BPR

Pour les barrières basées sur un processus de dégradation ou de modification de la forme chimique d'un polluant, les principaux facteurs qui conditionnent le dimensionnement de la composante réactive sont la cinétique de dégradation et la précipitation des composés inorganiques. Le volume et/ou l'épaisseur des zones réactives doivent garantir un temps de séjour suffisant ; la granulométrie des matériaux et la conception hydraulique doivent limiter les risques de colmatage. Lorsque la barrière s'appuie sur un processus d'adsorption, le facteur clé pour le dimensionnement est, outre la cinétique d'adsorption, la capacité maximale d'adsorption du matériau.

La sélection et l'optimisation du procédé de traitement (et donc du matériau réactif) doivent prendre en compte les paramètres suivants :

- caractéristiques physico-chimique des eaux : les analyses ne doivent pas se limiter aux seuls polluants mais doivent comprendre l'ensemble des éléments organiques et inorganiques pouvant affecter les performances de la barrière. Une attention particulière doit être portée aux éléments inorganiques susceptibles de précipiter dans les barrières avec du Fe^0 ;
- réactivité : la réactivité du média est définie par la capacité du réactif ou d'une combinaison de réactifs à traiter le(s) polluant(s), et par sa cinétique réactionnelle.

Dans le cas d'une combinaison de polluants impliquant la mise en œuvre de réactifs différents, il est nécessaire de s'assurer de la compatibilité entre les mécanismes réactionnels. Les produits de réaction finaux ou intermédiaires doivent également être pris en compte ; leurs impacts éventuels sur le procédé de traitement et/ou l'environnement (métabolites) doivent être intégrés dans l'évaluation du procédé ;

- performances hydrauliques : recherche d'une granulométrie optimale du réactif permettant un compromis entre réactivité d'une part (granulométrie fine conduisant à une surface spécifique élevée), perméabilité et risque de colmatage d'autre part (granulométrie grenue conduisant à une porosité importante) ;
- prétraitement : les performances du procédé peuvent être affectées par des réactions indésirables, comme par exemple l'oxydation du fer métal dans le procédé de déhalogénéation réductrice des solvants chlorés. Dans ce cas, un prétraitement permettant de tamponner les caractéristiques physico-chimiques des eaux peut être mis en place. Il est possible, par exemple, de tamponner l'eau en favorisant la consommation de l'oxygène en excès, dans un pré-réacteur rempli de fer de granulométrie grossière, moins sensible au colmatage ;
- durabilité : la durabilité du matériau réactif va directement conditionner la périodicité et l'ampleur des opérations de maintenance. La durabilité est fonction des propriétés intrinsèques du matériau (par exemple, capacité maximale de rétention pour un procédé d'adsorption) mais également des phénomènes secondaires, en particulier ceux liés au colmatage (précipitation de phases secondaires, colonisation biologique) qui peuvent affecter les performances chimiques et hydrauliques de la barrière. Dans le cas des procédés fonctionnant par adsorption, le piégeage du polluant est souvent un mécanisme réversible (en particulier pour les mécanismes d'échange cationique/anionique) : le risque de désorption doit être pris en compte ;
- gestion du réactif en fin de vie : quel que soit le mécanisme réactionnel, le procédé doit également intégrer le devenir du réactif en fin de vie (filière d'évacuation, cadre réglementaire,...) ;
- compatibilité environnementale : le procédé choisi ne doit pas conduire à des réactions secondaires préjudiciables pour l'environnement et la santé. Ainsi, la dégradation abiotique de solvants chlorés peut être accompagnée d'une réduction des nitrates en ammonium, la concentration limite acceptable de ce second composé dans les eaux étant beaucoup plus faible que celle des nitrates ;
- coût du matériau.

Dans le cas de pollutions mixtes, les limites ne tiennent pas tant aux procédés qu'aux nécessités de mise en place de réacteurs en série, ce qui peut s'avérer difficile à gérer compte tenu des pertes de charges. Dans tous les cas, pour les pollutions mixtes, l'étude sera de fait plus complexe et nécessitera des travaux complémentaires.

b) Essais de laboratoire

Les tests en laboratoire sont une étape clé et quasi incontournable dans la conception du procédé. Ces expérimentations vont i) permettre de confirmer le choix du média, ii)

apporter les réponses aux différents points listés dans le paragraphe précédent et si besoin iii) fournir des données aux modèles de simulation.

Deux types d'essais de laboratoire existent :

- le test batch (isothermes d'adsorption) va donner des premières informations sur la capacité du média à traiter le polluant (capacité à dégrader le polluant, cinétique réactionnelle, capacité maximale d'adsorption) ;
- le test de percolation en colonne apporte des informations plus détaillées qui peuvent servir de base au dimensionnement de la barrière. Les essais en colonnes vont permettre de déterminer la cinétique de la réaction et d'en déduire le temps de séjour compte tenu des objectifs de qualité des eaux. S'agissant d'un essai dynamique, il apporte des informations couplées sur la chimie et le transport du polluant. La possibilité de faire des prélèvements et/ou des mesures sur toute la hauteur de la colonne peut également permettre d'appréhender des phénomènes comme le colmatage (colmatage mécanique par les particules en suspension, précipitation de phases secondaires, colonisation biologique) ou la production de bulles gazeuses (production d'hydrogène dans le procédé Fe^0 ou de CO_2 dans les procédés de dégradation), pouvant conduire à une diminution de la porosité efficace et de la perméabilité.

Quels que soient le type et la complexité des essais considérés, ils doivent être impérativement réalisés avec des échantillons d'eau prélevés dans l'aquifère pollué. C'est la seule manière d'appréhender des phénomènes complexes comme des mécanismes de compétition dans le cas de pollutions mixtes. Cette remarque s'applique également pour des procédés éprouvés comme celui de dégradation des solvants chlorés par le Fe^0 . Bien que la littérature fournisse de nombreuses valeurs de temps de demi-vie, le dimensionnement doit prendre en compte les valeurs expérimentales déterminées sur les eaux polluées prélevées sur le site. Un point important à garder à l'esprit est que les cinétiques réactionnelles dépendent de la température ; les expériences sont les plus souvent conduites à 20°C alors que la température des eaux souterraines est généralement comprise entre 10 et 15°C.

Le niveau de complexité des essais est modulé en fonction du caractère innovant du procédé. Un procédé novateur impliquera nécessairement des recherches approfondies. Pour les procédés commerciaux (en particulier, procédés de dégradation des solvants chlorés), ils sont souvent réalisés selon un protocole standard propre à l'entreprise qui prend la responsabilité du dimensionnement, avec un réactif standard en terme de composition (par exemple, en terme de nature et quantité de catalyseur pour les procédés de réduction catalytique des solvants chlorés) et de granulométrie (propriétés hydrauliques connues). Selon les prestataires, ces tests sont effectués par la société spécialisée dans la conception de BPR ou par des laboratoires indépendants (laboratoires d'Universités par exemple, en Amérique du Nord comme en Europe).

Des tests dits "accélérés" peuvent être menés pour recueillir des informations sur les performances à long terme du réactif. Cependant l'interprétation des données acquises reste sujette à caution.

c) Phase d'essai pilote sur site

La phase d'essai pilote sur site a l'avantage de tester à l'échelle réelle le fonctionnement d'une BPR, sans pour autant nécessiter des aménagements importants en terme de génie civil.

S'agissant d'une phase plus lourde (techniquement et financièrement) et longue (6 mois en moyenne) que les études de laboratoire, les essais pilotes sont engagés lorsque la décision d'engager la construction de la BPR est prise avant de commencer la conception détaillée et la construction de la barrière.

On distingue en fait, là encore, les deux configurations de BPR, en F&G ou en mur continu.

Pour les réalisations avec une configuration en mur continu, la réalisation d'essais sur pilote est de plus en plus rare. Elle n'a lieu que si des problèmes spécifiques sont attendus ou si des innovations du point de vue chimique sont envisagées ; cela peut être le cas lorsque la pollution est mixte. Cette étape peut aussi s'avérer nécessaire sur les sites sensibles où une conception plus fine est nécessaire. La réalisation de cette étape, pour les configurations en mur continu est donc fonction des risques financiers et techniques.

Au contraire, pour les BPR ayant une configuration en F&G, la pratique des essais pilotes tend à se généraliser. Outre que cela semble répondre aux besoins du client qui souhaite être conforté dans le choix d'une BPR, les essais pilotes sont facilités par leur mise en œuvre. Il s'agit en fait, de laboratoires mobiles installés sur site, lesquels permettent d'affiner le traitement des polluants avec les conditions (géo)chimiques les plus proches de celles existant *in situ*. Les essais pilotes permettent pour certaines sociétés de fixer le cadre de la garantie apporté au client, en particulier en terme de fréquence des opérations de maintenance.

d) Conception et modélisation hydrodynamique de la BPR

Toutes les informations acquises au cours de la caractérisation du site (perméabilité des terrains, transmissivité de la nappe et incertitudes ou variations possibles,...) et des essais de laboratoire doivent permettre de concevoir la BPR du point de vue « hydraulique ». Les objectifs de performance à atteindre sont i) de capturer le panache de pollution et ii) d'atteindre les concentrations en polluant(s) fixées par les autorités réglementaires, en minimisant les perturbations biogéochimiques (en particulier, modification des conditions de pH et Eh) et hydrauliques (remontée de niveau de la nappe à l'amont hydraulique, modification du sens des écoulements).

La modélisation hydrodynamique du système constitue un outil de choix pour concevoir la barrière et tester différentes configurations. Les modèles utilisés peuvent être couplés à un modèle de transport réactif de masse prenant en compte les caractéristiques des polluants : coefficients de diffusion, coefficients d'adsorption (K_d) et cinétiques de dégradation. En revanche, l'utilisation de modèles couplés hydro-

biogéochimique prenant en compte l'ensemble des mécanismes biogéochimiques est marginale en raison de la complexité de ce type d'approche.

Cette étape de conception hydraulique de la barrière s'appuie sur des outils de simulation numérique qui permettent de concevoir l'ouvrage et d'évaluer ses performances :

- En testant différentes configurations : localisation et orientation de l'ouvrage, type de configuration (mur continu ou Funnel & Gate), longueur et profondeur de l'ouvrage, perméabilité des zones imperméables et des zones réactives, implantation et nombre de portes dans la cas d'une option F&G, drains amonts et aval,... Ces configurations intègrent les éventuelles contraintes de surface du site (localisation des bâtiments). Ainsi, la modélisation permet d'évaluer différentes solutions techniques et configurations comme par exemple :
 - la mise en place de drains à l'amont hydraulique qui font converger l'écoulement vers les portes et permettent de corriger la position non optimale des portes en cas de contraintes en surface,
 - la mise en place d'un drain à l'amont hydraulique de la zone polluée, qui fait diverger les écoulements et permet de limiter les débits à traiter dans la barrière,
 - l'impact de la BPR sur la contamination en aval hydraulique lorsque la barrière est implantée dans le panache (effet de dilution par l'eau traitée au sein de la barrière) ;
- En évaluant l'impact des fluctuations inhérentes au site (la direction de l'écoulement peut se déplacer de quelques degrés...). Ces changements peuvent aboutir à une dégradation des performances de la BPR, comme un by-pass de la barrière, une remobilisation et/ou un piégeage incomplet du polluant. La nécessité de prendre en compte les fluctuations du milieu dès l'étape de conception (d'où le besoin d'une caractérisation approfondie) est dictée par les caractéristiques mêmes de la technique BPR. En effet, une fois la BPR mise en place, il est difficile de l'adapter à de nouveaux changements. En fonction des incertitudes sur le fonctionnement hydrogéochimique du site, il est souhaitable de prendre un facteur de sécurité lors du dimensionnement.

Ces modélisations hydrodynamique du système permettent pour chaque configuration de barrière et pour des conditions hydrauliques données de déterminer le débit d'alimentation de la barrière, les modifications induites sur le régime d'écoulement (en particulier, remontée du niveau de la nappe dans le cas des nappes peu profondes) et la concentration en polluant à l'alimentation (s'il existe un couplage avec le modèle de transfert de matière). Ces résultats de modélisation associés aux données expérimentales (essais de laboratoire) permettent de déterminer le volume de réactif nécessaire pour atteindre les spécifications de sortie de la barrière (concentration résiduelle).

L'utilisation de la modélisation n'est pas systématique, en particulier pour les barrières de type mur continu appliqué au traitement des solvants chlorés (notamment en Amérique du nord). Dans ce cas, les incertitudes liées aux écoulements et à la géométrie du panache de pollution, sont compensées en pratique par une géométrie

plus « sécuritaire » de la BPR. En revanche, les configurations « pointues » de type Funnel & Gate nécessitent une étude plus poussée, tant sur le plan hydraulique (calculs des débits pour chaque porte) que massive (concentrations par porte et objectifs en aval hydraulique). La conception des BPR de type F&G fait donc souvent appel à la simulation numérique.

Selon les cas, cette étape de modélisation peut être réalisée par les bureaux d'étude intervenant en amont du projet (bureaux privés indépendants ou liés à des structures universitaires, voire universitaires directement) ou par l'entreprise de travaux qui conçoit et met en œuvre la BPR.

e) Modélisation géochimique

L'évaluation du fonctionnement d'une barrière implique d'appréhender l'impact sur la chimie des eaux souterraines. Les modèles géochimiques comme PHREEQC ou EQ3/6 permettent, connaissant la composition chimique des eaux, de i) déterminer la spéciation des polluants et des éléments en solution et ii) de calculer les indices de saturation des minéraux dans la nappe et au contact du réactif. Ce type d'information peut donc être utilisé dans la conception de la barrière pour :

- estimer les modifications géochimiques induites par la BPR ;
- évaluer le comportement à long terme, en particulier la précipitation de phases secondaires conduisant au colmatage de la barrière et/ou la diminution de son potentiel de piégeage.

En revanche, force est d'admettre que la modélisation couplée hydro-biogéochimique reste marginale pour l'application à la conception de BPR. Ce type d'approche implique i) une expertise scientifique très fine en hydrogéologie et en géochimie et ii) de très nombreuses données.

3.4. REALISATION, MAINTENANCE ET DEMANTELEMENT DES BPR

3.4.1. Mise en œuvre

La conception détaillée et la construction de la barrière sont engagées lorsque la conception de la BPR est déterminée. La construction comprend deux étapes, à savoir i) l'excavation et la mise en place de la paroi et ii) la mise en place du matériau réactif.

Le tableau suivant (Tabl 1) résume les différentes techniques existantes et fait une synthèse de leurs coûts et des informations sur les profondeurs qu'elles peuvent atteindre. Ce tableau est adapté de l'étude de Gavaskar et al., 2000. Il a été modifié selon les informations obtenues par contact direct avec les sociétés spécialisées dans ce domaine d'étude.

L'objectif de ce chapitre n'est en aucun cas de fournir une description détaillée des techniques de construction ; ce point est largement décrit dans différents ouvrages sur les BPR. Les techniques les plus courantes d'excavation et de mise en place de la

paroi sont l'excavation avec une pelle rétro (standard ou modifiée) ou une pelle « crapaud ». La mise en place du réactif se fait au moyen de caissons ou de trancheuses continues. Une technique d'excavation également éprouvée pour les systèmes de type tranchée est la technique de stabilisation par boue à base de biopolymère. Cette variante met en œuvre une boue biodégradable à base de gomme guar qui va stabiliser la tranchée. Le matériau réactif, en l'occurrence des granules de fer, est déversé dans la tranchée. Ensuite la boue se dégrade, laissant le matériau réactif en place. Parmi les techniques plus innovantes, citons la fracturation hydraulique, l'injection sous pression ou le « Deep Soil Mixing ».

Différents types d'écran sont utilisés : les parois sol-bentonite (peu utilisées en Europe pour des raisons de manque de place), les parois ciment-bentonite et les écrans de palplanches. La Fig. 4 présente la séquence de construction d'une porte filtrante selon le procédé panneau-drain[®] de Solétanche-Bachy.

Techniques de construction	Profondeur Maximale (m)	Coût (€/m ²)	Remarques
Techniques d'excavation et de mise en place de la paroi			
Construction d'une paroi sol - bentonite			
Excavation avec pelle rétro standard	10	40-110	Nécessite une grande aire de travail. Pas utilisé en Europe par manque de place. Génère un excès de déblais. Peu coûteux si utilisation de pelle rétro
Excavation avec pelle rétro modifiée	25	40-110	
Excavation avec pelle « crapaud » ou benne preneuse	45	65-180	
Construction d'une paroi ciment - bentonite			
Excavation avec pelle rétro standard	10	70-250	Génère une grande quantité de déblais. Plus coûteux que l'option précédente mais qualité du mélange beaucoup plus fiable
Excavation avec pelle rétro modifiée	25	70-250	
Excavation avec pelle « crapaud » ou benne preneuse	60	170-590	Possibilité de substituer mélange performant à une boue bentonitique.
Autres			
Palplanche métallique	20	160-320	Risque de corrosion à long terme (doit être anticipé).
Palplanche avec joint d'étanchéité	20	160-320	Ne produit pas de déblais
Paroi en boue composite	>30	Non disponible	
Géomembrane PEHD	10-15		Perméabilité < 1.10 ⁻⁹
Technique de mise en place du réactif			
Caisson	15	160-1000 €/m vertical	Peu coûteux
Mandrin	12-15	100-260	Peu coûteux et très productif. Mise en place par passe 7 à 13 cm d'ép.
Trancheuse continue	7	50-130	Très productif ; coût élevé de mobilisation.
Injection	60	430-2000	Permet d'installer des barrières au voisinage d'infrastructures
Mélange en profondeur (Deep soil mixing)	45	100-260 €/m ³	Pas très économique en application BPR. Colonne 7 à 13 cm de diamètre.
Fracturation hydraulique	25-35	2300 € par fracture	Peut être utilisé à grande profondeur. Fracture de 7 cm max. d'ouverture

Tabl 1 – Résumé des différentes techniques de construction des BPR (d'après Gavaskar et al., 2000)

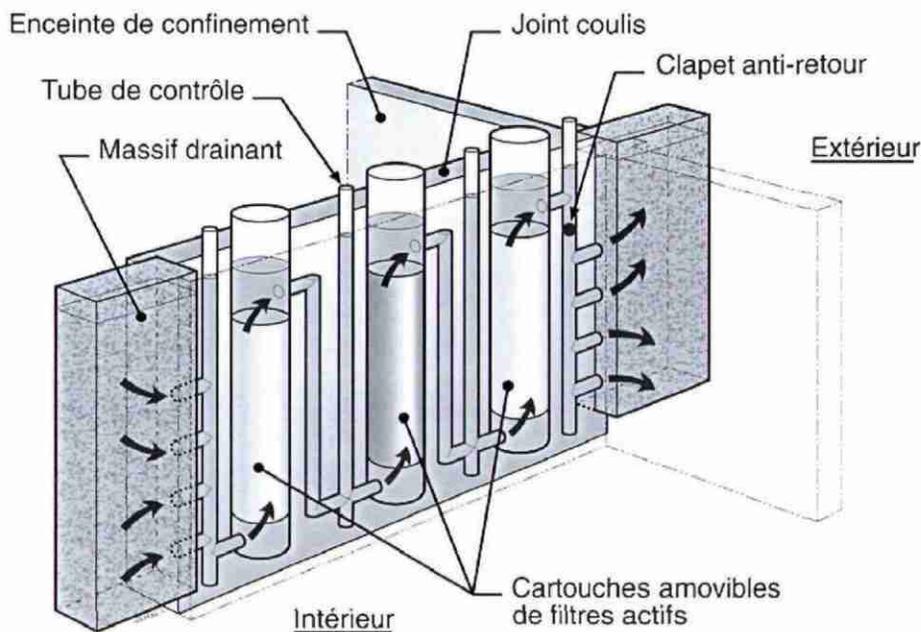


Fig. 4 - Porte filtrante selon le procédé Panneau-Drain® (Solétanche-Bachy)

3.4.2. Maintenance et suivi de performances

a) Suivi des performances

- **Généralité**

L'objectif du suivi des performances est de contrôler si la BPR traite efficacement le panache de pollution et n'induit pas des perturbations inacceptables pour l'environnement. Cette surveillance s'effectue au cours de la construction, puis durant le fonctionnement de l'installation et enfin après son arrêt.

L'organisation de la surveillance se planifie en fonction des propriétés du site, du type de BPR et des objectifs réglementaires en terme de décontamination. L'organisation comprend :

- les installations de prises d'échantillon (forages de contrôle) ;
- les procédures d'échantillonnage et d'analyse ;
- la méthode d'exploitation des données ;
- la planification des contrôles et leur restitution auprès des autorités (DRIRE en France).

Les contrôles peuvent être de deux types :

- le respect des exigences réglementaires : ce contrôle vérifie si la BPR conduit à des résultats conformes à ceux exigés. Vérification qu'il n'y ait pas de contournement de la barrière (by-pass), de sous-produits et plus généralement qu'il n'y ait pas de détérioration de la qualité de l'eau ;
- le contrôle des performances hydro-géochimiques de la barrière : ce contrôle a pour objectif de i) vérifier si les performances concordent avec les prédictions, ii) d'anticiper des actions correctrices.

La fréquence des mesures dépend des spécificités du site ; elle est souvent, au minimum, trimestrielle. La fréquence des contrôles diminuera avec le temps dès lors que la barrière fonctionne convenablement. Les points de mesure utilisés pour la phase de caractérisation serviront naturellement dans la phase de surveillance.

- **Remarque**

L'une des questions importantes relatives aux BPR concerne leurs performances réelles. Pour tenter d'y répondre, il est possible de faire un point sur ce que l'on considère comme l'efficacité d'un système de dépollution.

Selon certains, l'efficacité d'une technique de dépollution implique une « dépollution » complète, telle qu'une dégradation ou adsorption totale des polluants en présence. Cependant, avec l'exemple particulier des organo-halogénés volatils, on sait que ces derniers se dégradent de façon séquentielle : $PCE \Rightarrow TCE \Rightarrow \text{cis-DCE}$, etc. Ainsi, même en cas de dégradation (dé-halogénéation) totale du produit source, il est probable qu'en sortie de barrière, on observe une concentration résiduelle pour différents composés congénères. Ceci peut sembler comme une inefficacité du système. Pourtant, dès lors que l'on compare la performance d'un tel système avec la performance du P&T par exemple, l'intérêt d'une BPR apparaît évident.

La méthodologie française en matière de sites et sols pollués se base sur des principes d'évaluation des risques. C'est au regard de cette évaluation des risques que la performance doit être jugée. Elle ne doit pas nécessairement consister en un abattement de 100% des concentrations en polluants, mais en une réduction satisfaisant aux critères de qualité définis préalablement. Ces critères se doivent d'être réalistes au regard des enjeux sanitaires avant tout, mais aussi des techniques disponibles et des contraintes économiques et financières. Ainsi, en France, il n'existe pas de règles concernant les seuils de concentrations en sortie de BPR. Ils sont fixés par une étude spécifique des risques et en accord avec l'administration.

Il est, dès lors, du rôle des consultants et des sociétés spécialisées de préciser en amont du projet quels objectifs peuvent être atteints, et quelles sont les limites qui ne pourront pas être dépassées. Le caractère encore « innovant » des BPR implique malgré tout une incertitude vis à vis des performances.

b) Maintenance

La conception de la BPR doit anticiper les procédures à mettre en œuvre i) lorsque les performances de la barrière se dégradent de manière prévisible (remplacement ou régénération du média), ii) en cas de dysfonctionnement de la barrière. Les opérations de maintenance s'inscrivent dans la continuité du plan de surveillance.

Les opérations de maintenance sur le matériau réactif peuvent se décomposer comme suit :

- remplacement de la totalité du matériau réactif ;
- remplacement partiel ou ajout de matériau réactif ; ce cas est rencontré lorsqu'il y a consommation ou perte d'une fraction du réactif ;
- régénération *ex-situ* ou *in-situ* du réactif. Différentes voies de régénération *in-situ* sont à l'étude ; l'objectif est de régénérer les fonctions du compartiment amont hydraulique de la zone réactive où se produisent les phénomènes de colmatage. Parmi les systèmes opérationnels, on peut citer l'injection d'eau sous pression, les systèmes mécaniques d'attrition ou les systèmes à ultrasons.

Actuellement, les applications industrielle ont moins de 10 ans et atteignent les objectifs fixés pour la qualité des eaux souterraines. De ce fait, il existe très peu de données fiables sur l'application et le coût réel des procédures de maintenance.

La comparaison des deux configurations de BPR du point de vue de la maintenance est détaillée dans le chapitre suivant. Rappelons simplement que certaines sociétés mettant en œuvre les configurations F&G anticipent systématiquement les problèmes de colmatage ou de pertes de réactivité des matériaux (qui ont été effectivement rencontrés).

Au contraire, d'autres sociétés, mettant en œuvre les BPR en configuration de mur continu notamment, indiquent que les problèmes de colmatage ou de pertes de réactivité sont mineurs, et n'interviennent pas avant 10 à 15 années de fonctionnement. Il est difficile de repérer ces phénomènes, car leur surveillance nécessite un échantillon carotté dans certains tronçons de barrières (ces phénomènes n'apparaissant pas en laboratoire pour des raisons à la fois de cinétiques et de conditions physico-chimiques). Dans les situations où ils ont lieu, ces phénomènes sembleraient se limiter aux premiers centimètres de BPR, ce qui rend leurs effets mineurs. Dans tous les cas, ces phénomènes peuvent être soit limités par la mise en place de procédés actifs (tels que les systèmes d'ultrasons) soit résolus par la régénération ou le changement du réactif. Ces considérations amènent souvent à ne pas considérer la maintenance comme un élément clef du fonctionnement d'une BPR.

3.4.3. Démantèlement

Le démantèlement de la BPR a lieu quand les objectifs de traitement ont été atteints et que les concentrations en amont hydraulique de la barrière satisfont aux critères de qualité (du fait d'un épuisement de la source ou d'un traitement parallèle à celui de la source).

Cette ultime étape de démantèlement doit être planifiée dès la conception de la barrière. Avant de l'effectuer, il sera nécessaire d'évaluer son impact sur les conditions hydro-géochimiques du site. S'il est décidé de la laisser en place, il faut pouvoir démontrer que le polluant ne peut pas être remobilisé. Cette solution oblige à maintenir une surveillance du site.

Pour les mêmes raisons que celles citées précédemment (technique récente), la littérature ne mentionne aucune information sur le démantèlement réelle d'une installation.

4. Caractéristiques de la technologie BPR

Après avoir présenter le concept de la technologie BPR et les étapes clé de la démarche de réalisation, ce chapitre développe trois caractéristiques de la technologie BPR :

- BPR et traitement des panaches de pollution ;
- BPR, comparaison avec le traitement actif par Pompage & Traitement (P&T) ;
- Comparaison des systèmes Mur Continu et Funnel & Gate.

4.1. BPR, LE TRAITEMENT DES PANACHES DE POLLUTION

L'une des questions essentielles à poser dès que la mise en place d'un procédé de dépollution est envisagée, est la nécessité ou non de traiter la source primaire de pollution. Cette question amène à différencier les procédés de traitement des sources de pollution et les procédés de traitements des seuls panaches de composés dissous.

La BPR est destinée au seul traitement d'un panache de pollution, et non au traitement de la source de pollution (bien que certaines évolutions tendent à généraliser le concept au traitement des sources). Le transfert de polluants vers l'aval hydraulique est stoppé à l'aide d'une barrière physique ; la BPR isole la(les) source(s) de pollution, sans agir directement sur le terme source.

On considère comme source primaire, la pollution directe induite par un accident ou une fuite. La source secondaire est souvent considérée dans les eaux : il s'agit des phases non aqueuses ayant migrées dans le sous-sol et accumulées sous formes de poches (« pool » en anglais), lesquelles alimentent la nappe en polluants (PLNAD ou PLNAL).

En premier lieu se pose la question de la faisabilité économique des travaux d'excavation des sources primaires (bien localisées) : profondeur de la source, volumes à excaver, coûts de traitement et/ou de mise en décharge de terres polluées. Des situations particulières ont ainsi amené les responsables de sites à opter pour un traitement du panache de pollution dissous seulement.

Mais la question doit parallèlement être vue sous l'angle de la gestion des risques sanitaires. Une suppression de la source primaire de pollution peut être inévitable du fait d'une exposition inacceptable à des composés volatils en surface. Cela dépend en partie des usages futurs du site.

Dans nombre de cas, le problème ne se résume pas seulement aux sources primaires : se pose aussi la difficulté de localisation de sources secondaires. Le retour d'expérience nord-américain montre que les sources secondaires de pollution n'ont été supprimées que pour un nombre limité de sites sur lesquels une BPR a été mise en place (une dizaine sur près de 100 réalisations d'ETI). Sur les autres sites, la

localisation précise de la source secondaire s'est en fait souvent avérée impossible. C'est en effet souvent le cas pour les solvants chlorés, plus denses que l'eau, qui pénètrent dans l'aquifère en formant des poches mal délimitées en fonction des hétérogénéités du sous-sol. On rencontre des situations similaires dans d'anciennes cokeries ou les goudrons (phase non aqueuse) où les solvants ont pu parfois pénétrer sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur, voire plus, dans les nappes sous-jacentes.

4.2. BPR VERSUS POMPAGE & TRAITEMENT (P&T)

Lorsque l'on aborde le sujet traitement des sources versus traitement des panaches, l'une des questions récurrentes concerne la comparaison des techniques P&T avec les techniques des BPR.

D'une manière générale, le Pompage & Traitement (Pump & Treat ou P&T) intègre l'ensemble des techniques actives qui couplent le pompage dans une nappe avec traitement du produit pompé dans un réacteur en surface (station, stripping, ...). Ces techniques sont très largement utilisées et de longue date (plus de 30 ans en Europe et en Amérique du Nord), en particulier pour le pompage-écrémage des hydrocarbures légers.

Outre l'aspect traitement de la source de pollution, le P&T est également une technique de confinement hydraulique permettant la protection de la zone en aval hydraulique.

La technique P&T couvre aussi bien :

- le pompage d'une eau contenant une pollution dissoute ;
- le pompage de zones très concentrées, voire de sources secondaires (phases non aqueuses) ;
- le pompage écrémage s'il s'agit de composés légers (hydrocarbures).

La technique P&T se différencie par des coûts d'investissement modérés comparativement aux BPR (facteur 5 à 10) mais par des coûts opératoires élevés. En effet, la maintenance des installations (tous les 15 jours ou tous les mois), le changement des pompes, l'alimentation en énergie du système, le traitement des eaux pompées, et des gaz produits ont des postes budgétaires importants. Dès lors, le P&T est d'autant plus performant que la durée de traitement sera courte, ce qui sous-entend que l'on a un épuisement de la source secondaire. La comparaison entre les deux techniques ne peut que résulter d'une analyse de cycle de vie complet des deux techniques, et ce jusqu'à atteindre les objectifs de réhabilitation.

Si le P&T est particulièrement indiqué pour le traitement des coupes pétrolières légères, dans le cas de pollutions de type DNAPL (solvants chlorés ou autres), l'intérêt du P&T sera fonction des situations :

- le P&T est une alternative à la BPR si les termes sources secondaires en phase non aqueuse DNAPL sont d'extension limitée et bien localisés ; le P&T est alors appliqué au droit de la zone source et permet de réduire significativement la masse de polluants dans des délais courts (quelques années). D'une manière générale, le P&T est très performant sur des sources secondaires à la géométrie bien définie et très localisées. Certains exemples indiquent des réductions des concentrations d'un facteur 10 sur moins de 5 ans ;
- en revanche, dès lors que la source de pollution secondaire est étendue et/ou caractérisée par des poches dissimulées mal localisées, le P&T sur la zone source est inadapté ; la seule solution est alors de se placer en aval hydraulique pour confiner/traiter le panache de pollution dissoute. Dès lors, on s'inscrit dans un cadre d'opération à long terme ; la BPR passive prend alors tout son intérêt. A l'opposé, le système P&T présente de multiples inconvénients : cumuls des coûts opératoires, nécessité de rabattements importants avec ou non multiplication du nombre de puits. Le P&T étant dynamique, il génère des débits pompés plus importants avec des concentrations plus faibles. Outre le fait qu'une partie des eaux pompées ne nécessiterait pas de traitement (le cône d'appel concerne des zones non polluées), seule une partie de la pollution peut être extraite à des fins de traitement ; les sources non localisées continuent à alimenter les eaux souterraines en aval hydraulique par d'autres circulations préférentielles. Certaines expériences relatent un pompage souvent maintenu durant des années (20 à 30 ans) sans amélioration notable de la qualité des eaux souterraines. Le pompage a même dans certains cas entraîné une nouvelle mobilisation de solvants chlorés en phase non aqueuse accumulés dans le sous-sol avec pour conséquence parfois une aggravation de la situation. On retiendra aussi qu'en terme d'abattement des concentrations, le P&T conduit à une baisse des concentrations en polluants sur le court terme, ensuite une relative stabilité sur les moyens et long termes (des résultats multiples le démontrent) et une nouvelle augmentation dès l'arrêt du pompage. En revanche, les BPR peuvent dans les cas favorables conduire à une diminution plus complète des concentrations en polluants. Quelle que soit la technique mise en œuvre, elle s'inscrit dans le long terme ;
- cependant, il ne faut pas perdre de vue que le P&T est la seule technique applicable pour des aquifères profonds ou très transmissifs (débits élevés), ou avec des charges en inorganiques élevées..., autrement dit, sans être exhaustif, tout cas de figure qui dépasse le champ d'application des BPR.

4.3. MUR CONTINU VERSUS FUNNEL & GATE

Tel que mentionné précédemment, il existe, principalement, deux types de configurations pour les BPR : la configuration en mur continu et la configuration F&G.

L'analyse des différentes réalisations de BPR existantes montre que le choix de l'une ou l'autre de ces configurations a des conséquences sur les étapes du projet, qu'il s'agisse de la conception de l'ouvrage, de la maintenance du média réactif ou du suivi des performances. Plus globalement, ces deux configurations reflètent des approches

différentes du problème, lesquelles peuvent aussi être vues comme une distinction entre les approches nord-américaines et européennes.

En effet, historiquement, les premières réalisations nord-américaines de BPR sont de type F&G. Ceci semble lié à un élément clef de toute BPR : le système réactif, cœur du procédé de dépollution. La nécessité de « concentrer » les écoulements souterrains vers un réacteur (unité de traitement) bien localisé et délimité a semble-t-il été considérée comme un principe important. A ce jour, l'approche nord américaine privilégie la configuration en mur continu qui est considérée comme une solution plus simple de mise en œuvre et plus « robuste », elle est plus indépendante des hétérogénéités (hydraulique, distribution des polluants) des sites. Au contraire, les Européens privilégient le concept Funnel & Gate, en raison d'une meilleure maîtrise du contrôle des performances et de la maintenance.

Ces deux configurations vont être comparées selon trois critères : la conception hydraulique, la composante réactive et le contrôle des performances et maintenance.

Outre ces critères, il est important de rappeler que le système Funnel & Gate permet d'intégrer des contraintes de surface, comme la présence de bâtiments. En effet, l'infrastructure de surface peut rendre impossible la réalisation d'un mur continu. Sur de nombreux sites européens, il existe de fortes contraintes de surface qui ne permettent pas d'envisager une configuration de type mur continu et conduisent à privilégier la configuration Funnel & Gate. A l'opposé pour de nombreux sites américains, appartenant par exemple au Department of Defense (DoD), les contraintes de surface sont moindres ; sans être déterminant, ce facteur a joué en faveur de la conception mur continu sur ces sites.

4.3.1. Conception hydraulique et capture du panache

La configuration Funnel & Gate modifie significativement les écoulements en les faisant converger vers la/les porte(s) et s'accompagne aussi, du fait de la présence de murs étanches, d'une remontée des niveaux de nappe en amont hydraulique de la BPR. Ces modifications potentielles des écoulements doivent impérativement être prises en compte au moment de la conception de la BPR. Mais toute la difficulté réside précisément dans la prévision du nouveau régime d'écoulement des eaux pour une configuration donnée. Cette difficulté est accrue lorsque le site est caractérisé par une forte hétérogénéité de distribution des polluants et des écoulements avec des voies de circulation préférentielle.

On conçoit donc aisément que l'une des difficultés majeures de la configuration F&G réside dans la nécessité d'une connaissance détaillée du fonctionnement du système hydraulique et de la distribution des polluants. Les éventuelles conséquences d'une conception imparfaite du système peuvent alors être la déviation d'une partie du panache de pollution en dehors de la zone d'emprise du F&G et/ou une remontée excessive du toit de la nappe. A ce titre, cette configuration F&G apparaît plus « risquée » que la configuration en mur continu.

Ces risques de dysfonctionnement sont généralement limités par un niveau de reconnaissance important du sol et du sous-sol, par des essais en forages destinés à identifier les zones de circulation préférentielle et la géométrie du panache, et par l'utilisation systématique de modèles numériques détaillés d'écoulements.

Cette « complexité » des systèmes Funnel & Gate peut devenir un atout sous réserve que le fonctionnement du site soit parfaitement connu. En effet, la configuration Funnel & Gate offre la possibilité d'adapter la géométrie de la barrière aux spécificités du site, notamment en terme d'hétérogénéité des écoulements et de distribution des polluants. Cette optimisation peut concerner le nombre et l'emplacement des portes, la modulation de la masse de réactive dans chaque porte en fonction de la concentration et le flux local en polluants, la mise en place de structure drainante en amont hydraulique dans les zones fortement polluées...

Contrairement à la configuration Funnel & Gate, la configuration en mur continu ne modifie pas ou peu les écoulements ; seul le caractère drainant de la barrière influence très localement les écoulements, sans en modifier *a priori* l'allure générale. La BPR en mur continu est implantée perpendiculairement aux écoulements, avec une extension latérale suffisante pour garantir, sur le principe, une interception de la totalité du panache de pollution. Cette approche plus « sécuritaire » permet dans son principe de limiter les risques de dysfonctionnement, en particulier pour les sites caractérisés par des zones d'écoulement préférentiel ou une forte hétérogénéité de distribution des polluants. Le système mur continu est considéré par les Nord-américains comme beaucoup plus « robuste » qu'une configuration F&G ; il est moins sensible à un éventuel « défaut » de caractérisation du site, simplifie le dimensionnement de la barrière et limite les risques pouvant en découler.

Néanmoins, l'existence de circulations préférentielles peut également entraîner des difficultés pour la configuration en mur continu. Le risque découle du sous-dimensionnement possible de la composante réactive de la barrière dans les zones d'écoulement préférentiel (temps de séjour insuffisant ou saturation rapide de la capacité d'adsorption du réactif), alors qu'à l'opposé, un surdimensionnement peut être constaté dans d'autres secteurs. Pour cette raison, certains considèrent que le système mur continu est inadapté pour les sites avec régimes hydrauliques hétérogènes ou préférentiels marqués.

Cette comparaison entre les deux configurations permet d'insister sur l'importance de la caractérisation du site dans la conception d'une BPR. Seule cette étape de caractérisation permettra d'identifier la présence d'écoulements préférentiels ou l'hétérogénéité de distribution des polluants qui est un problème majeur dans la conception des BPR, quelle que soit la configuration considérée.

4.3.2. Composante réactive

a) Dimensionnement et conception de la composante réactive

Quelle que soit la configuration considérée, le flux de polluants (débit de la nappe x concentration en polluant) à traiter est identique. Dans le système mur continu, le flux de polluants est réparti et traité sur toute la section de la barrière. Au contraire, dans le système Funnel & Gate, le flux de polluants est concentré sur une section beaucoup plus faible correspondant aux réacteurs de traitement présents dans la ou les portes.

Dans le système de mur continu, le flux s'écoule perpendiculairement à l'ouvrage ; le temps de séjour est contrôlé par l'épaisseur de la barrière (pour des conditions de débit). L'épaisseur minimum de la barrière (entre 60 cm et 1 m) est conditionnée en partie par les conditions d'excavation (stabilisation de la tranchée, largeur du godet de pelle). Ainsi, dans de nombreux cas, le matériau réactif utilisé est en fait un mélange entre un produit effectivement réactif et un matériau inerte (tel que du sable grossier ou des gravillons).

Dans le principe, le système mur continu est moins sensible au colmatage. Le flux de composés inorganiques susceptibles de précipiter sous forme de carbonates ou d'oxyhydroxydes est distribué sur toute la section de la barrière. Le colmatage n'affecte qu'une très faible épaisseur et reste généralement d'ampleur limitée (au moins pour les premières années). En outre, dans le cas où les performances d'une section se dégraderaient suite à un phénomène de colmatage plus intense, l'écoulement serait dévié vers une autre section. L'importante surface réactionnelle est donc considérée comme un facteur de sécurité.

En règle générale, le réactif est distribué de manière homogène sur toute la section. Cette caractéristique pose problème lorsque les écoulements et les flux de polluants sont distribués de manière hétérogène. Le risque est d'aboutir à un sous dimensionnement de la barrière dans certains secteurs avec transfert de polluants à l'aval. Ce risque peut être prévenu en optimisant secteur par secteur les proportions respectives de la fraction utile de réactif et de matériau inerte mis en place. En pratique néanmoins, il semble que les quantités utilisées soient telles qu'elles couvrent largement les besoins en terme de réaction.

Comme nous l'avons évoqué dans le paragraphe précédent sur la conception hydraulique, le système de type Funnel & Gate relève d'une conception plus complexe mais ouvre en contrepartie de nombreuses possibilités, les zones de traitement (portes) étant bien localisées et délimitées. Cette configuration permet en particulier d'optimiser la position et le volume des portes réactives selon les hétérogénéités de distribution des flux de polluants, de combiner différents réactifs ou de les modifier au cours du fonctionnement de la barrière, de rationaliser la maintenance (accès facilité au matériau réactif) ou d'optimiser le suivi des performances. En revanche, la conduite des systèmes Funnel & Gate implique une rigueur accrue, toute déficience de l'un des réacteurs (colmatage, en particulier) altère les performances de la barrière.

Le colmatage peut être minimisé par l'utilisation de réacteur en série. Le premier réacteur est alors un réacteur de prétraitement qui sert à « tamponner » l'eau (consommation de l'oxygène dissous, précipitation de phases secondaires) ; ceci passe par la mise en œuvre d'un réactif de granulométrie grossière peu colmatant. Le fonctionnement du réacteur secondaire (principal réacteur de traitement de la pollution) est ainsi optimisé.

b) Le traitement des solvants chlorés par déhalogénéation réductrice

L'analyse des solutions développées pour le traitement des solvants chlorés par déhalogénéation réductrice (chapitre 2.3.2) montre que la distinction entre les deux configurations de BPR est en partie liée aux différences de cinétiques des réactifs utilisés.

- *Le procédé Fe^0 sans catalyseur* est caractérisé par des cinétiques réactionnelles lentes. La configuration F&G apparaît alors comme relativement inadaptée, puisque la taille des portes devrait être surdimensionnée pour avoir des temps de séjour suffisants. Au contraire, la configuration en mur continu, qui ne concentre pas la masse de polluants à traiter, est tout à fait adaptée. Ceci est d'autant plus vrai que l'épaisseur minimale des BPR en mur continu est conditionnée par des aspects géotechniques. Cette épaisseur peut ensuite être adaptée en fonction des concentrations afin d'augmenter le temps de séjour au travers du matériau réactif. L'utilisation d'un mélange avec des matériaux inertes permet alors de limiter la quantité utile de réactif à ce qui est effectivement nécessaire. Les BPR nord-américaines sont essentiellement réalisées avec une configuration en mur continu mettant en œuvre le procédé de Fe^0 . Cette approche est celle préconisée par ETI ;
- *Le procédé Fe^0 avec catalyseur (réduction catalytique)* permet d'accélérer la cinétique de dégradation et donc de réduire plus rapidement la quantité de réactif. Les configurations F&G sont alors particulièrement adaptées. Le volume de réactif étant réduit, il est techniquement et financièrement envisageable d'envisager une maintenance pouvant aller du simple décolmatage au changement du réactif (conditionné sous forme de cartouches). En revanche, la mise en place des procédés avec catalyseur pour des configurations en mur continu s'avère peu intéressante (même si cela a pu être testé) : les quantités nécessaires de réactifs resteraient importantes (du fait des épaisseurs minimales imposées et en dépit d'un recours possible à des mélanges), entraînant ainsi un accroissement des coûts (les systèmes catalytiques étant plus onéreux).

c) Le traitement des pollutions mixtes

La plupart des BPR mettent en œuvre un seul principe réactif permettant de traiter un polluant, ou une famille particulière de polluants (par exemple, combinaison de solvants chlorés). Cependant, dans certaines situations, les polluants caractérisant le panache sont multiples (combinaison de polluants organiques et de métaux lourds) et ne peuvent être traités avec un seul type de réactif. Dès lors, les systèmes de réactifs mis en place doivent pouvoir traiter de manière différenciée, séquentielle ou non, les polluants présents : c'est le concept de multi-barrières.

Dans le cas des BPR en mur continu, la technique ne permet pas de mettre en œuvre des réactifs différents pour un traitement séquentiel des polluants. L'analyse montre que dans le cas où les polluants ne pourraient être traités simultanément, il faudrait envisager de mettre en place deux ou plusieurs BPR, parallèles les unes aux autres, disposées perpendiculairement à l'écoulement. En dehors de contextes très spécifiques (disponibilité de place, faible profondeur d'ancrage des BPR, matériaux faciles à excaver), cette configuration apparaît évidemment peu satisfaisante.

Au contraire, avec la configuration F&G, la mise en place de plusieurs réacteurs en série est tout à fait possible. Dans cette configuration, chaque réacteur a un réactif spécifique et le traitement se fait de manière séquentielle. En terme d'encombrement, la technique des réacteurs en série demeure acceptable : en effet, les écoulements se font alternativement dans les sens verticaux ascendants et descendants, permettant une limitation de la longueur de la porte.

Le bilan des réalisations à l'échelle industrielle (chapitre 7) montre que le traitement séquentiel reste principalement au stade pilote. Ainsi, si le système Funnel & Gate offre la possibilité théorique d'associer plusieurs réacteurs en série, les systèmes deviennent rapidement très difficiles à maîtriser sur les plans hydrauliques (gestion des pertes de charge) et réactionnels.

4.3.3. Contrôle des performances et maintenance

Les distinctions évoquées précédemment entre les BPR avec des configurations en mur continu ou F&G se traduisent par des modalités de contrôle des performances et de maintenance radicalement différentes.

a) Contrôle des performances

La configuration F&G offre une meilleure maîtrise du contrôle des performances du fait même de son mode de conception. L'écoulement étant canalisé vers les portes réactives à l'aide d'écran étanche, le contrôle des performances s'effectue au niveau des portes et à la périphérie de la barrière. Le système Funnel & Gate offre la possibilité d'installer des dispositifs de contrôle *in situ* en amont et aval de chaque porte et au sein du réacteur. Les mesures peuvent être à la fois hydrauliques (détection du niveau de la nappe, mesures de débits) et chimiques (prélèvements et dosages des polluants). Outre le contrôle des performances en fonctionnement optimal (vérification de la dégradation des polluants), ces mesures peuvent servir d'indicateur pour identifier des dysfonctionnements ou une dégradation des performances et engager les nécessaires travaux de maintenance.

La configuration en mur continu n'offre évidemment pas cette facilité : la BPR s'étend latéralement sur quelques dizaines voire centaines de mètres. Des contrôles sont faits en amont et en aval hydraulique de la barrière; cependant le contrôle de l'efficacité de la BPR ne peut pas se faire sur toute la longueur du mur, sauf à un coût prohibitif.

b) Maintenance

Dans les systèmes Funnel & Gate, le matériau réactif est mis en place au sein des portes. Sous réserve que la conception de la barrière l'ait prévue, cette configuration permet d'accéder au matériau réactif. Dans ce cas, la maintenance de la barrière est largement facilitée et vient compenser la plus grande sensibilité des systèmes Funnel & Gate au problème de colmatage et/ou de dégradation des performances du matériau réactif. Ainsi, certaines configurations (exemple du système Panneau Drain de Solétanche Bachy) ont recours à des cartouches de réactifs, sortes de réacteurs pré-assemblés, prêts à être insérés dans l'espace de la porte aménagé à cet effet. La maintenance du matériau réactif, bien que nécessitant un amené - replis d'une grue, s'effectue aisément et consiste en un simple nettoyage jusqu'à un changement partiel ou total du matériau. Cette technique permet généralement de proposer une maintenance annuelle de la barrière à un moindre coût ; elle est généralement prévue dès le stade de conception et est, dans certains cas, intégrée dans l'étude économique de départ. Cette maintenance peut alors être assortie d'une garantie couvrant des durées allant de 10 à 30 ans.

Ces configurations avec cartouches ou réacteurs accessibles nous semblent particulièrement indiquées pour les barrières basées sur un mécanisme d'adsorption et ce, pour deux raisons :

- la capacité d'adsorption du matériau est généralement limitée et implique donc un changement régulier (sauf surdimensionnement de la masse de réactif) ;
- les mécanismes d'adsorption sensu stricto sont réversibles. Il faut donc être en mesure de retirer le matériau si les concentrations en polluants deviennent très faibles et/ou au démantèlement de la barrière. Dans le cas contraire, les polluants adsorbés sont susceptibles d'être remobilisés.

Si le système Funnel & Gate peut faciliter les opérations de maintenance, force est de constater que cet atout n'est pas systématiquement exploité dans les réalisations pilotes ou industrielles. Dans ce dernier cas de figure, la configuration Funnel & Gate nous semble peu judicieuse, dans la mesure où le système présentera les différents inconvénients du système F&G sans en exploiter les principaux atouts, en l'occurrence la facilité de maintenance du matériau réactif.

Là encore, la maintenance des BPR avec une configuration en mur continu est nettement plus délicate, voire impossible. Outre le fait qu'il est difficile de déterminer quel tronçon de barrière nécessite une éventuelle maintenance, cette dernière, si elle a lieu, nécessite une opération de génie civil avec excavation, régénération ou remplacement du matériau, puis remise en place. En pratique, la solution envisagée est plus généralement le remplacement complet de la barrière après un certain nombre d'années de fonctionnement (10-15 ans, voire plus). Ces contraintes de maintenance sont compensées par un dimensionnement plus « sécuritaire » avec majoration des quantités de réactifs. L'expérience acquise à ce jour (en particulier, par les Nord-américains) semble confirmer que la voie barrière continue ne pose pas de problèmes majeurs de maintenance à échéance de 10-15 ans pour le traitement des solvants chlorés par le Fe⁰.

5. Eléments économiques

5.1. CONSIDERATIONS GENERALES

Au cours de la dernière décennie et en particulier des cinq dernières années, la technologie des BPR a été mise en œuvre dans nombre de sites industriels en Amérique du Nord et en Europe. L'analyse en retour de ces différentes réalisations permet de préciser le champ d'application des BPR et les performances prévisibles sur le plan technique. L'objectif de ce chapitre est de préciser l'aspect économique : coût total, répartition entre coût d'investissement et coûts opératoires et de maintenance (O&M), comparaison avec d'autres techniques, en particulier le P&T.

Il est important de préciser à ce stade que le coût total n'est pas le seul critère à prendre en compte. L'analyse comparative des différentes solutions va également dépendre de la situation financière du responsable du site et de la stratégie de gestion du site (cession ou maintien, usage industriel ou non...). Les capacités d'investissement initial, et les liquidités disponibles pour les années à venir peuvent largement conditionner le choix de la technologie, certains préférant privilégier des technologies avec des coûts d'investissement élevés mais des coûts opératoires faibles, les autres l'option opposée.

Il est communément admis que le traitement par BPR implique i) des coûts d'investissement supérieurs à ceux des systèmes actifs (en l'occurrence, le P&T) et ii) des coûts opératoires et de maintenance (O&M) inférieurs. Moyennant cette hypothèse, le coût cumulé du système BPR peut être inférieur à celui du système P&T au-delà de plusieurs années. La position de ce seuil de rentabilité est directement fonction du coût O&M, en particulier de la longévité de la partie active de la barrière, tant du point de vue de la réactivité chimique du matériau, que de celui des performances hydrauliques. La variable critique pour déterminer le coût d'une barrière et évaluer le seuil de rentabilité est donc la longévité de la barrière, à savoir la fréquence et l'ampleur des opérations de maintenance sur le matériau réactif. La Fig. 5 permet de bien mesurer l'impact de ce facteur sur le seuil de rentabilité. Dans le scénario où le matériau réactif est remplacé tous les 5 ans, le seuil de rentabilité n'est pas atteint ; le système BPR demeure plus coûteux que le système P&T. La BPR devient compétitive pour des fréquences d'intervention de 10 ans et plus, une faible fréquence d'intervention permettant logiquement d'atteindre plus rapidement le seuil de rentabilité. Cet exemple illustre très clairement les difficultés actuelles pour faire des prédictions correctes des coûts et du seuil de rentabilité. La grande majorité des BPR ont moins de 10 ans alors que le seuil de rentabilité interviendra entre 5 et 10 ans. On conçoit dès lors que toutes les projections économiques souffrent du manque de retour d'expérience et de données fiables sur la longévité des barrières.

Dans le cadre du réseau RUBIN, les Allemands ont engagé des recherches dont l'objectif est de rationaliser la comparaison technique et financière entre différentes solutions techniques de remédiation, en particulier entre les systèmes de type P&T et Funnel & Gate (Bayer et al., 2002). Le choix des conceptions optimales en termes

technico-économiques repose sur une approche combinant la modélisation des systèmes hydraulique, géochimique et économique avec un processus d'optimisation mathématique permettant de hiérarchiser les différentes configurations. Cette approche reste très académique. Cette procédure qui peut être assimilée à un outil d'aide à la décision rigoureux et transparent, reste encore trop sensible compte tenu des incertitudes sur certains paramètres clés internes (caractérisation de la source, distribution spatiale de la conductivité hydraulique) et externes (contraintes spécifiques à un site, acceptabilité sociale).

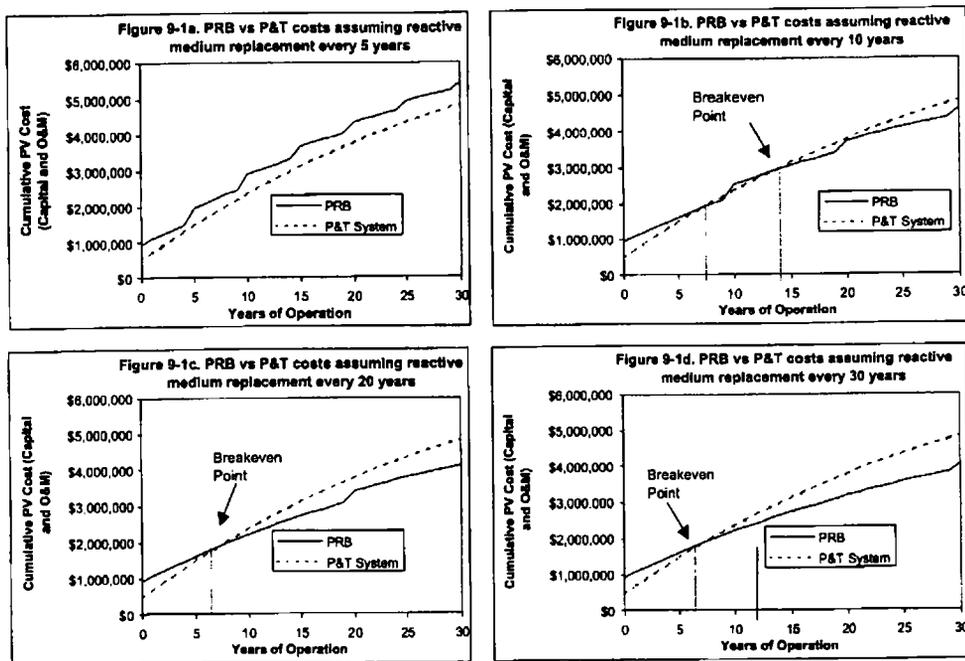


Fig. 5 – Analyse comparative du coût total des systèmes BPR et P&T (Gavaskar et al., 2000)

5.2. DECOMPOSITION DES COUTS

De nombreux éléments de l'analyse sont extraits du rapport de l'USEPA (2002a) (Economic Analysis of the Implementation of Permeable Reactive Barriers for Remediation of Contaminated Ground Water). Les auteurs de l'étude USEPA ont intégré un très grand nombre de données extraites de rapports techniques, de synthèses ou obtenu directement par interview. Les résultats sont synthétisés dans les Tabl. 2, Tabl. 3, Tabl. 4 et Tabl. 5. L'étude porte sur 22 réalisations à l'échelle pilote et industrielle. 19 réalisations portent sur le traitement de solvants chlorés par le Fe^0 ; 13 barrières sont de type barrière continue, 7 de type Funnel & Gate et 2 mettent en œuvre la fracturation hydraulique. Outre le grand nombre d'informations collectées, l'un des intérêts de cette étude est de proposer une méthodologie d'enquête (élaboration d'un formulaire). Dans un souci de comparaison, les auteurs ont proposé de normaliser

les coûts en fonction de la quantité d'eau traitée. Notre propre analyse menée sur les réalisations européennes nous conduit à considérer que ce critère de comparaison n'est pas satisfaisant. Cette position sera justifiée dans les paragraphes suivants.

Comme nous venons de l'évoquer, l'analyse économique est complétée par les données obtenues dans le cadre de cette étude, notamment l'analyse des réalisations européennes à l'échelle industrielle (chapitre 7.2).

a) Coûts d'investissements

Les coûts d'investissements peuvent être décomposés en quatre postes principaux, à savoir i) la caractérisation préliminaire du site, ii) la conception de la BPR, iii) l'achat du matériau réactif, iv) la construction de la barrière. Des données sur le coût des différentes techniques de construction sont apportées dans le chapitre 3.4.1 (Tabl 1). Peuvent s'ajouter à ces 4 postes principaux, les frais de licence, en particulier pour les BPR de traitement de solvant chlorés par le Fe^0 qui mettent en œuvre la technologie ETI.

Le coût d'investissement total s'établit entre 24 000 et 5 045 000 € pour les barrières nord-américaines (Tabl. 3) et entre 120 000 et 4 000 000 € pour les réalisations européennes majeures (Tabl. 11). Ces chiffres bruts sont difficilement interprétables dans la mesure où ils correspondent à des réalisations d'échelles très différentes, de 10 à 600 mètres de longueur. Les coûts d'investissement varient dans une fourchette de 1 à 200 alors que la longueur des ouvrages varie dans un facteur de 1 à 60. Cette différence s'explique par un important facteur d'échelle. Ce facteur d'échelle apparaît très clairement si le coût de la barrière est normalisé en fonction de sa surface (longueur x profondeur de la barrière). Les coûts d'investissement normalisés sont reportés dans la Fig. 6. Excepté deux réalisations, les coûts normalisés sont inférieurs à 3000 €/m². Dès que l'ouvrage atteint une échelle significative (> 1 000 m²), les coûts sont inférieurs à 1 000 €/m². En considérant les 15 ouvrages de plus de 1 000 m², le coût d'investissement moyen est de 780 €/m². Les coûts les plus faibles sont de l'ordre de 150 à 200 €/m².

Les données de l'étude EPA montrent qu'en règle générale les coûts de pré-construction (caractérisation du site et conception) représentent entre 15 et 60 % du coût total d'investissement. Pour les barrières de traitement de solvants chlorés par Fe^0 selon les concepts ETI, le coût du réactif Fe^0 représente 20 à 30 % du coût d'investissement.

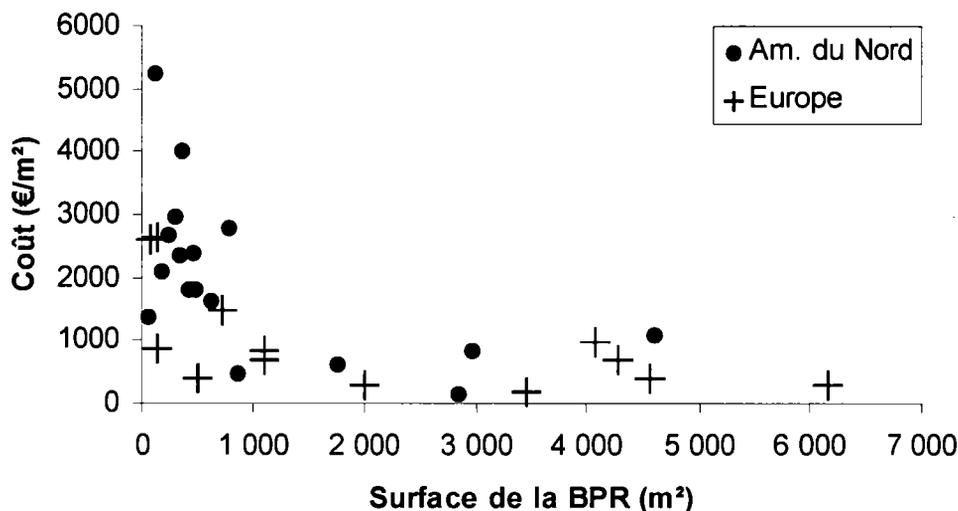


Fig. 6 - Coût d'investissement normalisé (€/m²) des BPR européennes et nord-américaine en fonction de la surface de l'ouvrage

b) Coûts opératoires et de maintenance (O&M)

Les coûts opératoires et de maintenance (O&M) couvrent le contrôle des performances de la barrière (monitoring) et la maintenance de la barrière.

Il est important de préciser que les données de l'étude économique EPA sur les coûts O&M se réfèrent quasi exclusivement au traitement des solvants chlorés par le Fe⁰ selon la technologie développée par ETI. Les coûts O&M (hors remplacement du matériau) présentés dans le Tabl. 3 sont les coûts annuels en monnaie courante. Ces informations n'ont pu être obtenues que pour 10 des 22 sites d'étude. Les informations obtenues concernent principalement le monitoring ; le montant sera fonction du nombre de puits de contrôle, de la nature et la fréquence des analyses. En revanche, les données sur les coûts de maintenance du réactif n'ont pu être obtenues que pour 3 des 22 sites référencés. Cette absence de données validées sur les coûts de maintenance s'explique largement par le caractère récent de la majorité des barrières (moins de 10 ans). Les barrières nord-américaines sont généralement conçues pour fonctionner 10 à 15 ans sans opération de maintenance majeure sur le réactif (Fe⁰ dans le cas présent). En l'absence de données sur les coûts de maintenance, les auteurs de l'étude ont adopté un ratio proposé par ETI qui évalue le coût de l'opération de maintenance du matériau réactif à 20% du coût initial du matériau pour un dispositif F&G et à 30% pour un dispositif mur continu. Ces ratios mériteraient d'être validés. Tous les auteurs admettent que les coûts de maintenance du matériau réactif resteront sujet à caution jusqu'à ce que des données validées aient pu être acquises sur les barrières actuelles.

Des recherches sont en cours pour évaluer des solutions alternatives au remplacement du matériau. En effet, les investigations de terrain montrent que la dégradation des

performances des BPR appliquées au traitement des solvants chlorés est surtout liée à des phénomènes de colmatage (précipitation de phases secondaires) dans le compartiment amont hydraulique des zones réactives ; ces phénomènes se produisent généralement sur une épaisseur de quelques centimètres. C'est pourquoi différentes méthodes sont étudiées pour restaurer les propriétés de cette couche sans remplacer totalement le matériau: i) injection d'eau sous pression (32 à 160 €/m²), ii) système mécanique d'attrition (54 à 160 €/m²), iii) système à ultrasons (160 à 215 €/m²).

La stratégie de maintenance pour l'ensemble des BPR sélectionnées pour l'étude EPA consiste à « surdimensionner » la composante réactive pour n'intervenir qu'à périodicité de 10-15 ans. Les sociétés SITA et Solétanche-Bachy propose une stratégie radicalement différente. Le principe est d'intervenir à une périodicité annuelle, l'intervention pouvant aller du simple décolmatage au renouvellement du matériau réactif. Cette stratégie permet d'assurer une maintenance « préventive » et régulière sans attendre une baisse des performances de la BPR. Cette maintenance de fréquence annuelle est assortie d'une garantie pour des durées allant de 10 à 30 ans. L'accès aisé au réacteur de traitement (technologie Panneau-Drain[®]) et le volume réduit de réactif mis en œuvre (procédé de réduction catalytique des solvants chlorés, chapitre 2.3.2.b) se conjuguent pour faciliter l'intervention. Le coût annuel de l'opération est de 10 000 à 20 000 €.

c) Coûts normalisés en fonction du volume d'eau traitée

L'étude EPA propose de normaliser les coûts en fonction du volume d'eau traitée Tabl. 4 ; cette analyse a été réalisée sur 8 sites. Ce calcul est basé sur une durée de fonctionnement de 30 ans. Les coûts O&M, cumulés sur 30 ans, sont calculés en monnaie courante en admettant une inflation de 4%. Les coûts d'investissement s'établissent entre 0,9 et 6,7 €/m³, les coûts O&M (hors remplacement du matériau réactif) entre 0,8 et 29,2 €/m³, soit un coût total compris entre 1,7 et 34,0 €/m³. Seul pour 3 des 8 barrières, le coût total incluant le remplacement du matériau a pu être calculé (périodicité d'intervention de 10 ans).

Les coûts les plus faibles correspondent aux ouvrages les plus longs (< 2 €/m³) et confirment l'effet d'échelle.

La normalisation des coûts en fonction du volume d'eau traitée conduit implicitement à admettre que les BPR les plus performantes conduisent aux plus faibles coûts de traitement de l'eau. Ce postulat serait réducteur. La technologie BPR s'applique effectivement au traitement de panaches de polluants mais ne peut être assimilée exclusivement à une technique de traitement d'eau. La technologie permet de protéger des ressources hydrauliques dans le cadre d'une stratégie de réhabilitation d'un espace, et ce indépendamment du volume d'eau traité. Ainsi, certains exemples fournis montrent que des barrières mises en place dans des zones au climat méditerranéen ne traitent des débits significatifs que quelques mois par an. Rapporter le coût de la BPR au volume de sol pollué en place serait à ce titre plus informatif. Ce type d'information n'a cependant pas pu être obtenu sur l'ensemble des sites étudiés.

d) Comparaison des coûts de traitement par les systèmes BPR et P&T

La technologie passive BPR est souvent mise en perspective par rapport à la technologie active P&T. L'analyse du chapitre 0 montre que les champs d'application de ces deux techniques peuvent être tout à fait complémentaires. Bien que la comparaison des coûts entre les BPR et les systèmes de P&T soit un exercice contestable, il a semblé intéressant de présenter ici les résultats de l'étude de l'USEPA.

L'option Pompage & Traitement a été envisagée sur 9 des 22 sites considérés. La comparaison ne porte que sur la première année de fonctionnement (Tabl. 5). Les seuls coûts d'investissement considérés sont les coûts de construction ; le coût total de construction est normalisé par rapport au volume d'eau traité en 1 année. Les coûts O&M pris en compte sont les coûts annuels sans les opérations de maintenance du matériau réactif. Cette analyse ne permet pas d'aboutir à des conclusions bien établies sur les coûts de construction des BPR qui peuvent être supérieurs ou inférieurs (voire significativement inférieurs pour l'exemple 3) à ceux des systèmes P&T. Ce dernier résultat est pour le moins surprenant, le coût d'investissement pour un système P&T étant généralement, significativement inférieur à celui d'un système BPR. En revanche, pour les 5 sites où les données étaient disponibles, les coûts O&M des BPR sont inférieurs à ceux des systèmes P&T, du moins lorsque les coûts de maintenance du matériau réactif ne sont pas pris en compte. Une nouvelle fois, les personnes en charge de cette étude sont très prudentes sur leurs conclusions compte tenu du peu de données disponibles.

Site	Type			Contaminants	Réactif		Barrière		Zone réactive		Hydro.		
					Nature	Masse (t)	Prof. m	Long. m	Surf. m ²	Long. m	Surf. m ²	Vélocité m/jour	V. traité ^a m ³ /an
USCG Support Center	1	T	Indust.	TCE; Cr(VI)	Fe ⁰	450	7	46	339	46	339	0.12	10 054
Intersil Site	2	F&G	Indust.	TCE; c-1,2-DCE; VC; Freon	Fe ⁰	220	6	12	74	11	47	0.24	4 410
Watervliet Arsenal	3	T	Pilote	PCE; TCE; cDCE; tDCE; VC	Fe ⁰	166	3	58	177	85	260	0.05	1 964
Moffett Federal Airfield	4	F&G	Pilote	TCE; 1,2-DCE PCE	Fe ⁰	75	8	15	116	3	23	0.11	3 014
Somersworth Landfill SF site	5	T	Indust.	PCE; TCE; cDCE; VC	Fe ⁰	3 552	12	244	2 973	244	2 973	0.38	275 608
Dover AFB, DE	6	F&G	Pilote	PCE; TCE; DCE	Fe ⁰	59	12	21	246	2	29	0.05	3 289
Kansas City Plant, MO	7	T	Indust.	TCE; 1,2-DCE; VC	Fe ⁰	650	9	40	362	40	362	0.18	15 854
Aircraft Maintenance, OR	8	F&G	Indust.	PCE; TCE	Fe ⁰	324	9	198	1 751	30	269	0.09	38 964
Caldwell Trucking, NJ	9	Fr. hyd.	Indust.	TCE	Fe ⁰	250	15	55	836	55	836	0.34	68 213
Former manufact., Fairfield, NJ	10	T	Indust.	1,1,1-TCA; PCE; TCE	Fe ⁰	720	8	39	295	39	295	0.18	13 126
Industrial Site, Coffeyville, KS	11	F&G	Indust.	TCE; 1,1,1-TCA	Fe ⁰	70	9	311	2 843	6	20	0.18	126 504
Industrial Site, NY	12	T	Indust.	TCE; cDCE; VC	Fe ⁰	742	5	113	619	113	619	0.18	27 533
Industrial Site, SC	13	T	Indust.	TCE; cDCE; VC	Fe ⁰	400	9	99	876	99	876	0.04	9 092
Nickel Rim, Ontario Trench	14	T	Indust.	Ni; Fe; SO ₄	M. Org.	425	4	15	65	15	65	0.04	627
Cape Canaveral, FL	15	T	Pilote	TCE; DCE; VC	Fe ⁰	205	14	30	418	43	585	0.02	1 550
MMR CS-10 Plume, MA	16	Fr. hyd.	Pilote	PCE; TCE	Fe ⁰	49	30	15	446	15	446	0.30	33 073
Pease AFB, NH	17	T	Indust.	TCE; cis-1,2-DCE; VC	Fe ⁰	360	10	46	460	46	460		
Vancouver, Canada	18	T	Pilote	Cu, Zn, Cd, Ni	M. Org.		6	10	58	10	58		
Waren AFB Spill Site 7, WY	19	T	Indust.	TCE; DCE; VC	Fe ⁰	1 750	5	173	792	173	792	0.27	52 834
London, Ontario	20	T	Indust.	Phosphate	scories	400							
Moffett, Full-Scale Est	21	F&G	Indust.	TCE; 1,2-DCE; PCE	Fe ⁰	2 518	14	335	4 599	41	652	0.11	119 373
Dover, AFB Full-Scale Est	22	F&G	Indust.	PCE; TCE; DCE	Fe ⁰	108	12	41	493	5	58	0.05	6 578

^a Volume traité : facteur de capture de 2/3

Tabl. 2 – Caractéristiques des barrières (d'après Powell et al., 2002)

Site		Investissements				Coûts opératoires et maintenance			
		Caractérisation du site	Conception	Construction (inclus matériau)	dont matériau	Total (hors licence)	O&M (hors remplacement matériau)	Remplacement Fer (donnée)	Remplacement Fer (ratio ETI ^a)
		(€)	(€)	(€)	(€)	(€)	(€/an)	(€)	(€)
1	T	150 000	145 000	500 000	200 000	795 000	85 000		60 000
2	F&G		254 000	638 000	170 000	892 000	95 000	232 000	34 000
3	T		113 000	257 000	87 360	370 000			26 208
4	F&G	100 000	175 000	332 375	39 375	607 375	90 000		7 875
5	T		340 000	2 100 000	1 200 000	2 440 000			360 000
6	F&G	165 000	200 000	296 000	47 000	661 000			9 400
7	T	150 000	100 000	1 200 000		1 450 000			
8	F&G	350 000	35 000	700 000		1 085 000	50 000		
9	Fr. hyd.								
10	T		150 000	725 000	359 000	875 000	25 000		107 700
11	F&G			400 000	50 000	400 000			
12	T			1 000 000	358 000	1 000 000			
13	T		44 000	356 000	133 000	400 000			
14	T	25 000	30 000	35 000	15 000	90 000	30 000		4 500
15	T		30 900	729 000		759 900			
16	Fr. hyd.								
17	T	400 000	200 000	500 000		1 100 000	35 000		
18	T								
19	T			2 200 000	600 000	2 200 000			
20	T			23 700	8 000	23 700	3 000		2 400
21	F&G	117 820	175 000	4 752 122	881 300	5 044 942	72 278	267 538	176 260
22	F&G	215 000	150 000	520 000	48 000	885 000	148 000	421 000 ?	9 600

^aRatio ETI sur le coût de remplacement du Fe⁰ : i) F&G = 20% coût initial du matériau, ii) mur continu = 30% coût initial du matériau

Tabl. 3 – Analyse des principaux postes de coût pour une barrière (d'après Powell et al., 2002)

Site		Volume d'eau traitée (30 ans) (m ³)	Investissement (€)	Coûts O&M ^{a,b} en valeur actualisée (30 ans)	Total investissement + O&M	Coût normalisé (30 ans)			
						Investissement (€/m ³)	O&M (€/m ³)	Total ^a (€/m ³)	Total ^c (€/m ³)
1	T	301 626	795 000	1 554 822	2 349 822	2.6	5.2	7.8	
2	F&G	132 292	892 000	1 737 743	2 629 743	6.7	13.1	19.9	25.6
4	F&G	90 434	607 375	1 646 283	2 253 658	6.7	18.2	24.9	
8	F&G	1 168 924	1 085 000	914 601	1 999 601	0.9	0.8	1.7	
10	T	393 775	875 000	457 300	1 332 300	2.2	1.2	3.4	
14	T	18 810	90 000	548 761	638 761	4.8	29.2	34.0	
21	F&G	3 581 185	5 044 942	1 322 111	6 367 053	1.4	0.4	1.8	2
22	F&G	197 347	885 000	2 707 220	3 592 220	4.5	13.7	18.2	25.8

^a Hors coût de remplacement du matériau réactif

^b taux d'inflation de 4%

^c avec coût de remplacement du matériau tous les 10 an

Nota : les coûts O&M sont les valeurs actualisées (taux d'inflation de 4 %)

Tabl. 4 – Coût d'une barrière par m³ d'eau traitée pour une période 30 ans (d'après Powell et al., 2002)

Site		Volume d'eau traitée <i>m3/an</i>	Coût de construction s.s.			Coût annuel O&M (année en cours)		
			BPR	P&T	(BPR-P&T)/P&T	BPR	P&T	(BPR-P&T)/P&T
			€/m3	€/m3	%	€/m3	€/m3	%
1	T	10 054	49.7	49.7	0	8.5	19.9	-58
2	F&G	4 410	148.8	73.7	102	21.5	32.2	-33
3	T	1 964	139.5	424.7	-67			
5	T	275 608	7.6	94.3	-92		12.3	
7	T	15 854	78.2				12.6	
10	T	13 126	55.2	26.7	107	1.9	7.5	-74
12	T	27 533	36.3				10.9	
21	F&G	119 373	38.7	11.7	230	0.6	5.8	-90
22	F&G	6 578	88.5	76.3	16	22.5	33.4	-33

Tabl. 5 - Analyse comparée des coûts d'une barrière et d'un système P&T (d'après Powell et al., 2002)

6. Le cadre réglementaire

6.1. REGLEMENTATION FRANÇAISE

L'étude se focalise sur le cadre réglementaire français, l'objectif étant d'identifier les textes régissant les dispositions réglementaires applicables aux Barrières Perméables Réactives.

6.1.1. Cadre général

Contrairement à l'eau et l'air, la France ne possède pas de loi spécifique aux sols. La réglementation sur les sols pollués s'inscrit dans le cadre général de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relatives aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et le décret d'application n° 77- 1133 du 21 septembre 1977. Ce décret prévoit les arrêtés d'application, notamment la limitation des rejets. La loi ICPE et le décret d'application visent toutes les installations, quel que soit leur propriétaire ou détenteur, susceptibles de produire une nuisance ou un danger et s'appliquent à la fois aux sites en activité et aux anciens sites. Ces 2 textes de base (et leurs différentes articulations avec la législation sur l'eau) régissent donc les dispositions réglementaires applicables à la mise en œuvre d'une BPR. Le principal interlocuteur pour l'instruction, la mise en œuvre et le suivi d'une BPR sera donc l'inspecteur des installations classées qui est en charge de l'application de la réglementation ICPE.

L'articulation principale entre la loi ICPE et la loi sur l'eau (loi 92-3 du 3 janvier 1992) est décrite dans l'article 69 de la loi « Barnier » (loi 95-101 du 2 février 1995) : «...Les installations soumises à autorisation ou à déclaration au titre de la loi n 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement sont soumises aux dispositions des articles 2, 3, 5, 12, 22 et 30 de la présente loi. *Les mesures individuelles et réglementaires prises en application de la loi n 76-663 du 19 juillet 1976 susvisée fixent les règles applicables aux installations classées ayant un impact sur le milieu aquatique, notamment en ce qui concerne leurs rejets et prélèvements.* ». Les articles 2, 3, 5, 12, 22 et 30 concernent respectivement les dispositions générales (gestion de la ressource), les SDAGE⁸ et SAGE⁹, l'équipement en moyens de mesures et les sanctions. Les ICPE doivent donc respecter les principes généraux de la loi sur l'eau mais pas les procédures qui sont du ressort des lois ICPE.

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe précédent, la loi ICPE s'applique pleinement lorsque la BPR est mise en œuvre sur un ancien site industriel. L'arrêté d'autorisation pour les installations soumises à déclaration (cahier des prescriptions) est délivré pour une durée illimitée et s'applique donc après arrêt de l'activité. Il n'y a donc ni prescription, ni quitus en cas de dommage lié à l'exploitation du site. La cessation d'activité est visée par l'article 34.1 du décret 77-1133. Cet article précise notamment que « Lorsqu'une installation classée est mise à l'arrêt définitif, son

⁸ SDAGE : Schémas Directeurs d'Aménagement et de gestion des Eaux

⁹ SAGE : Schémas d'Aménagement et de gestion des Eaux

exploitant remet son site dans un état tel qu'il ne s'y manifeste aucun des dangers ou inconvénients mentionnés à l'article 1er de la loi du 19 juillet 1976 susvisée. Le préfet peut à tout moment imposer à l'exploitant les prescriptions relatives à la remise en état du site... ».

6.1.2. Prescription et objectifs des travaux de réhabilitation

Les BPR étant mises en œuvre sur des sites où la pollution est avérée, le préfet prescrira des travaux de réhabilitation (à travers un arrêté) selon les principes de la méthodologie nationale sur le traitement et la réhabilitation des sites et sols pollués qui sont définis dans un ensemble de circulaires du ministère de l'environnement. Rappelons que ces circulaires sont définies dans le cadre de la loi de 1976 sur les ICPE. Les principes applicables pour la prescription des travaux de réhabilitation des sites et sols pollués sont exposés dans la circulaire du 10 décembre 1999. La prescription des travaux fait généralement suite à différentes démarches, notamment celle définie par la circulaire 3 avril 1996, relative à la réalisation de diagnostics initiaux et de l'Evaluation Simplifiée des Risques (ESR).

La fixation des objectifs de réhabilitation d'une BPR sera déterminée en application de la circulaire du 10 décembre 1999. Le diagnostic approfondi et l'Evaluation Détaillée des Risques (EDR) doivent permettre d'apprécier les risques induits par la pollution. Cette étape d'EDR suppose d'une part une caractérisation de la source de pollution, d'autre part un examen des différentes voies de transfert susceptibles d'entraîner une diffusion de cette pollution, et enfin une identification correcte des cibles à protéger et des risques pour la santé humaine. Cette circulaire pose très clairement les principes qui doivent prévaloir pour la définition des objectifs de réhabilitation et la méthode de mise en œuvre. Ces principes s'appliquent pleinement au traitement par BPR :

- « La fixation des objectifs de réhabilitation s'appuiera donc généralement sur la définition et la comparaison de plusieurs scénarios de réhabilitation en terme d'impact sanitaire et environnemental, et de coût. »
- « Les objectifs de réhabilitation seront ainsi fixés de façon à ce que le terrain, une fois traité soit adapté à l'usage envisagé et à ce que le sol et le sous-sol ne présentent pas d'inconvénients, y compris à terme, au regard des intérêts visés à l'article 1 de la loi du 19 juillet 1976. Dans certains cas, vous pourrez constater que la réalisation des travaux sur le site est inutile au vu de l'usage envisagé. »
- « Dans tous les cas, il conviendra d'évaluer au préalable les risques ou les nuisances liés aux travaux de réhabilitation projetés, en particulier lorsque les procédés de traitement sont localisés sur site ou à proximité d'habitations. »
- « Lorsque des terres polluées sont évacuées du site, le responsable doit être en mesure de justifier de la destination de ces dernières et que celles-ci soient éliminées ou réutilisées, s'assurer qu'elles ne sont pas susceptibles de produire d'inconvénients, au regard des intérêts visés à l'article 1er de la loi du 19 juillet 1976. »

Les différents principes énoncés montrent que les objectifs de réhabilitation sont propres à chaque site et fonction de différents paramètres dont les impacts sanitaires et environnementaux et l'usage du site.

6.1.3. Les textes pris en compte

- Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (JO du 20 juillet 1976) ;
- décret n° 77- 1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (JO du 8 octobre 1977) ;
- article 34-1 du décret du 21 septembre 1977 sur la cessation d'activité
- loi n°95-101 du 2 février 1995 (dite loi « Barnier ») relative au renforcement de la protection de l'environnement. Article 69 codifié aux articles L 214-1 à L 214-8 et L 216-13 du code de l'environnement ;
- circulaire du ministère de l'environnement du 3 décembre 1993 relative à la politique de réhabilitation et de traitement des sites et sols pollués ;
- circulaire du ministère de l'environnement du 3 avril 1996 relative à la réalisation de diagnostics initiaux et de l'évaluation simplifiée des risques sur les sites industriels en activité ;
- circulaire du ministère de l'environnement du 10 décembre 1999 relative aux sites et sols pollués et aux principes de fixation des objectifs de réhabilitation.

6.2. REGLEMENTATIONS EUROPEENNES

Les approches européennes en matière de sites et sols pollués sont très diverses. En outre, seuls certains pays ont une réglementation spécifique pour les sites et sols pollués. Aucun pays européen n'a une réglementation ou approche spécifiques pour les BPR. Cette hétérogénéité au niveau de l'Europe rend l'analyse comparative des réglementations délicate. Pour plus d'information sur le sujet, les auteurs renvoient le lecteur au document de Ferguson et al., 1999.

Par la suite, le Tabl. 6 présente succinctement, pour chacun des pays européens : le texte réglementaire applicable pour les sites et sols pollués, les autorités responsables de sa mise en application, et le cas échéant, l'implication des autorités dans le choix et la conception des techniques de réhabilitation.

Il est important de noter que les organismes ou structures administratives en charge de l'application de la réglementation, même s'ils n'ont pas de rôle spécifique sur le choix des techniques de réhabilitation, peuvent avoir (et cela semble généralement le cas), un « droit de regard » sur les techniques à mettre en œuvre.

Il faut par ailleurs noter que le choix des techniques de réhabilitation dépend dans nombre de situations de l'approche en matière de sites et sols pollués. Par exemple, les approches spécifiques (site par site, sans référence à des critères nationaux), basées sur l'évaluation des risques (source-transfert-cibles) se traduisent souvent, en terme de gestion, par des objectifs de performances : la finalité (prescription d'un abattement des niveaux de pollution) importe alors plus que les moyens eux-mêmes.

Dans cette situation (typiquement française), le choix de technique revient au responsable du site ou de la pollution. L'organisme de contrôle veillera essentiellement à l'atteinte des objectifs de réhabilitation, sans généralement se prononcer sur le choix entre plusieurs techniques possibles (toutes choses égales par ailleurs). Au contraire, certaines approches génériques (définies à un niveau régional ou national), basées sur des « critères » de qualité des sols ou des eaux, peuvent se traduire par des objectifs de moyens : la finalité (réduction des niveaux de pollution) importe alors autant que les techniques à mettre en œuvre.

Pays	Cadre réglementaire en matière de sites et sols pollués & Autorité(s) responsable(s) de l'application de la réglementation	Implication des autorités dans le choix et la conception des techniques de réhabilitation
Autriche	<i>Loi fédérale sur la réhabilitation de sites et sols pollués</i> Ministère fédéral de l'environnement	Rien de spécifique
Belgique (F)	<i>Loi sur les sites et sols pollués</i> Agence Publique Flamande pour les Déchets (OVAM)	L'OVAM « accrédite » les consultants aptes à étudier les problèmes de sites et sols pollués, « valide » le procédé envisagé et « supervise » les travaux de réhabilitation
Danemark	<i>Loi sur les sites et sols pollués</i> - Autorités régionales (responsables des études et travaux), - Municipalités (responsables des sites)	Existence de recommandations et de lignes directrices pour les travaux de réhabilitation (élaborées par l'agence de l'environnement)
Finlande	<i>Loi sur les déchets</i> Ministère de l'environnement	Rien de spécifique. Mais, implication croissante des autorités sur les techniques de réhabilitation
Allemagne	<i>Loi fédérale sur la protection des sols</i> Autorités locales (Länders)	Rien de spécifique
Grèce	<i>Loi sur l'environnement</i> -	Rien de spécifique
Irlande	<i>Loi sur les déchets</i> Autorités locales (réglementation déchets) et Agence de l'environnement (guides et recommandations)	Rien de spécifique

Tabl. 6: Eléments sur la réglementation européenne applicable aux BPR

Italie	<i>Loi sur les déchets</i> Autorités locales responsables, avec au besoin, le Ministère de l'environnement & l'agence nationale de l'environnement (pour des sites particuliers)	Les autorités locales sont responsables de l'approbation et de la certification des projets de réhabilitation (sur la base de critères généraux pour la conception de projets de dépollution et les actions de réhabilitation)
Pays-Bas	<i>Loi sur la protection des sols</i> - Ministère de l'environnement (VROM) - Autorités locales (provinces et municipalités) en charge de l'application de la Loi	Les autorités, nationales ou locales, suivent les projets depuis les phases initiales
Norvège	<i>Loi sur le contrôle de la pollution</i> Autorité Norvégienne de contrôle de la Pollution (NPCA) ou autorités régionales (comtés)	Les autorités se réfèrent à un document guide relatif notamment aux lignes directrices en terme de réhabilitation (excavation et techniques <i>in situ</i>)
Portugal	<i>Loi sur l'environnement</i> Centre de développement sur la pollution des sols	Rien de spécifique
Espagne	<i>Loi sur les déchets</i> Gouvernements autonomes régionaux	Les communautés autonomes sont responsables des travaux de réhabilitation et supervisent l'avancement des travaux dans le cadre du Plan National de Réhabilitation des Sites Pollués
Suède	<i>Code de l'environnement (nouvelle loi sur l'environnement)</i> L'agence suédoise de l'environnement	L'autorité se base sur différents guides.
Suisse	<i>Loi fédérale sur la protection de l'environnement, et ordonnance sur la réhabilitation des sites pollués</i>	Rien de spécifique
Royaume Uni	<i>Loi sur la protection de l'environnement</i> Autorités locales	L'agence de l'environnement édite des guides thématiques dans le domaine (dont un spécifiquement sur les BPR).

Tabl. 6 : Eléments sur la réglementation européenne applicable aux BPR (suite)

7. Bilan des réalisations à l'échelle industrielle

La technologie BPR est mise en œuvre depuis une dizaine d'années à une échelle industrielle. Parallèlement, le concept évolue et fait toujours l'objet de développement en R&D. L'objectif de ce chapitre est de fournir un état des lieux factuels des réalisations majeures et, ainsi, de bien différencier les solutions opérationnelles des voies exploratoires en cours de développement.

L'analyse des réalisations nord-américaines s'appuie sur les documents de synthèse récents.

En l'absence de synthèse existante, le bilan des réalisations européennes résulte d'une étude spécifique s'appuyant sur des données de différentes natures : contacts directs avec des sociétés qui conçoivent et/ou construisent des BPR, fiches techniques, réseaux et forums de discussion, articles et rapports,...

7.1. L'EXPERIENCE NORD-AMERICAINE

Pour cette étude, l'objectif n'est pas de produire une analyse détaillée des expériences nord-américaines mais de donner une vision globale de la situation actuelle des BPR aux Etats-Unis et au Canada. De plus, il existe déjà des documents de synthèse récents, présentant des analyses poussées, élaborées à partir d'un large panel d'informations (incluant des contacts directs avec les principaux acteurs du domaine).

Les Etats-Unis et le Canada ont utilisé la technologie des BPR dans un grand nombre de sites. Le nombre de BPR est évalué à une centaine de réalisations, ETI a installé 58 BPR (traitement de solvants chlorés par Fe⁰) aux Etats-Unis.

Ces différentes informations proviennent du rapport de l'USEPA (1999). Ce rapport résume des données générales (polluant, réactif, échelle...) sur 47 sites, principalement aux Etats-Unis et au Canada, complétées par quelques réalisations européennes. Ces sites sont détaillés dans la base de données de RTDF (Remediation Technology Development Forum) accessible sur Internet.

Les éléments suivants permettent de mesurer le champ d'application des BPR :

- 26 sites sont détenus par l'état fédéral et 21 par des sociétés privées ;
- un partage équilibré entre les conceptions de type Funnel & gate et les ouvrages continus : 14 réalisations de type Funnel & Gate, 9 réacteurs enterrés, 20 ouvrages continus et 5 configurations autres. Néanmoins, cette situation a évolué dans les pays anglo-saxons, la tendance actuelle étant de privilégier les ouvrages de type mur continu ;
- les solvants chlorés sont les polluants les plus traités par BPR ; ils représentent plus de 50% des polluants traités (Fig. 7). Ce type de traitement est opérationnel depuis

les premières réalisations de BPR (1995), d'où une importante capitalisation d'expérience ;

- le fer zéro valent seul (55%) ou en combinaison avec d'autres matériaux (21%) est le réactif le plus mis en œuvre dans les BPR (Fig. 8), l'application dominante étant la dégradation des solvants chlorés.

Les principaux acquis nord-américains font l'objet du chapitre 8.2.

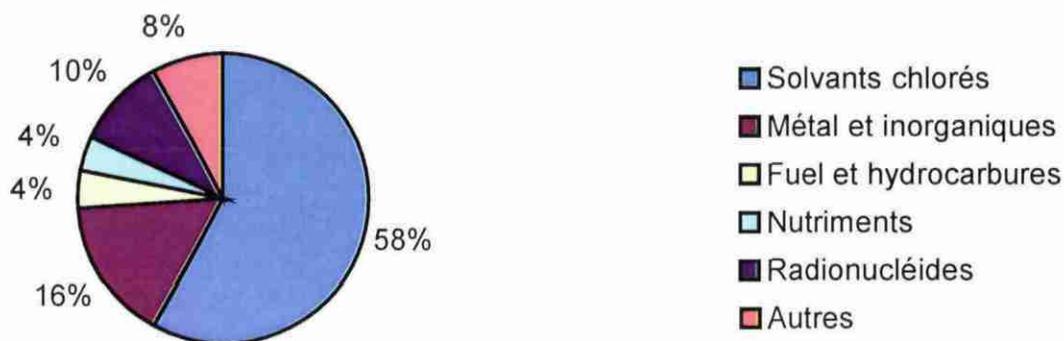


Fig. 7 - BPR et type de polluants aux Etats-Unis et au Canada

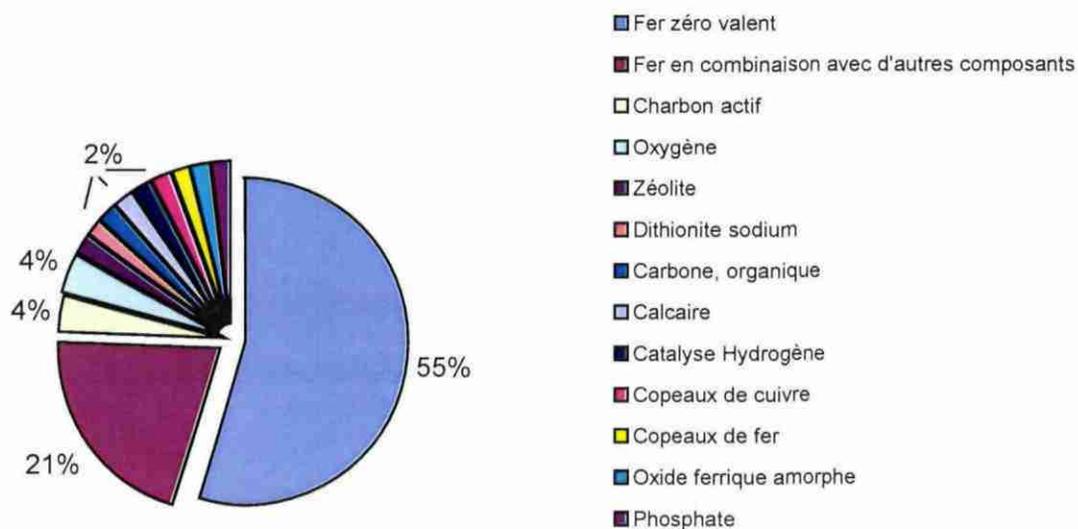


Fig. 8 - BPR et type de matériau réactif aux Etats-Unis et au Canada

7.2. L'EXPERIENCE EUROPEENNE

7.2.1. Analyse générale

Au total, 34 réalisations ont été relevées en Europe, au nombre desquelles 21 réalisations d'échelle industrielle (Tabl. 7 à Tabl. 10). La toute première réalisation industrielle date de 1994 (Autoroute A22, France), mais la technologie s'est réellement développée à partir de 1998-1999 (Fig. 9).

L'Allemagne est le pays européen où la technologie BPR est le plus mise en œuvre (14 réalisations) qu'il s'agisse de réalisations industrielles ou de R&D. Ce dynamisme se traduit également par des projets et réseaux nationaux (réseau RUBIN, projet PEREBAR).

Les deux familles de polluants les plus traités (Fig. 10) sont les solvants chlorés (46 %) et les HAP (18%). Très logiquement, les deux matériaux réactifs les plus mis en œuvre (Fig. 11) sont le fer (Fe^0) avec ou sans catalyseur (45%) et le charbon actif (21%). Ces caractéristiques en terme de polluant et de réactif sont les mêmes que celles observées en Amérique du Nord.

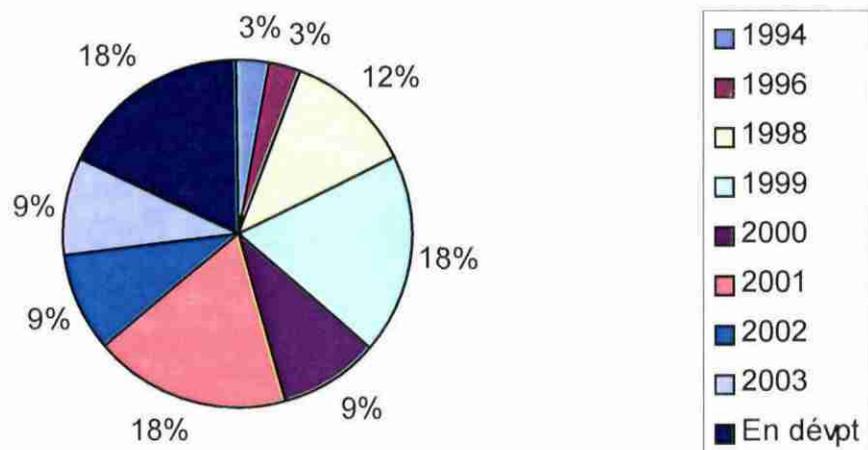


Fig. 9 – Classement des BPR européennes (toutes réalisations confondues) en fonction de leur année de mise en fonctionnement

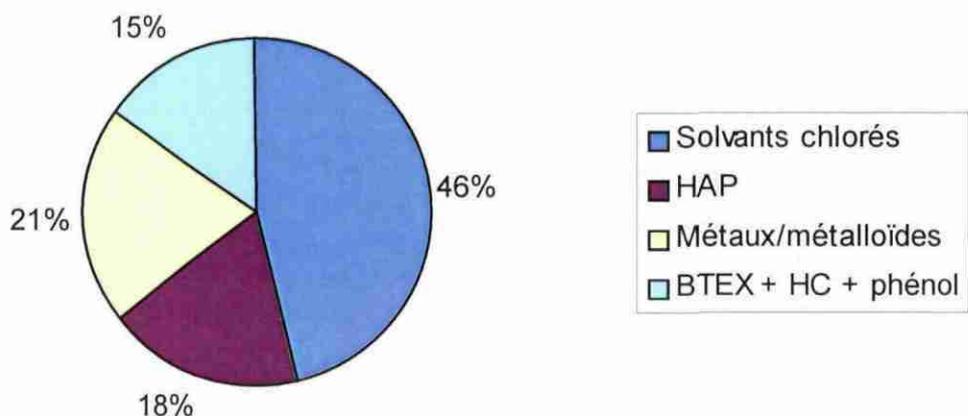


Fig. 10 – Classement des BPR européennes (toutes réalisations confondues) par type de polluant

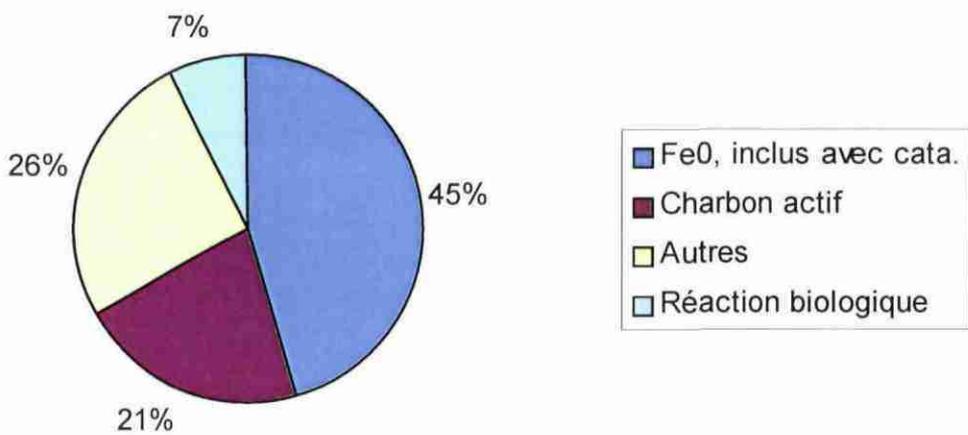


Fig. 11 – Classement des BPR européennes (toutes réalisations confondues) par type de matériau réactif

N°	Site	Ville	Etat	Echelle	Type Barrière	Polluants	Réactif	Date	Source des données
1	Site industriel	Bernau	Allemagne	Pilote	Funnel-and-Gate	TCE 2 aquifères	Fe°	sept-01	RUBIN
2	Site test SAFIRA Exploitation lignite + chimie	Bitterfeld	Allemagne	Pilote	Puits vert. et horiz.	C6H6 + MCB + oDCB + Fe° + Ch. actif +Zéol. 99 pDCB + TCE + cDCE + Palladisées tDCE			SAFIRA + RTDF + Consoil + RUBIN
3	Site industriel	Denkendorf	Allemagne	Industrielle	Drain & Gate	TCE + PCE + cDCE + TCA	Charbon actif	août-01	RUBIN
				Pilote	Réacteur pilote		Zéol. + palladium	sept-02	
4	Ancien site de traitement Uranium	Dresden	Allemagne	En dévpt	Mur adsorbant (investigation)	Uranium	Etude adsorbants alternatifs	En dévpt	RUBIN
5	Site industriel Industrie automobile	Edenkoben	Allemagne	Industrielle	Funnel-and-Gate (écoulement vertical)	TCE + cDCE + 1,1,1-TCA	Fe° (ETI)	fev-01	RUBIN
6	Site industriel	Hanau	Allemagne	R&D Pilote	Zone perméable réactive (injection composés humiques)	HAP	Substances humiques	En dévpt	RUBIN
7	Ancienne cokerie	Karlsruhe	Allemagne	Industrielle	Funnel-and-Gate	BTEX + HAP	Charbon Actif	janv-01	RUBIN
8	Ancienne industrie textile (teinturerie)	Nordhorn	Allemagne	R&D Pilote	Non défini	Solvants chlorés + produits teinturerie	En dévpt : Fe ⁰ + En dévpt matériau adsorbant + microbiologie		RUBIN
9	Site industriel	Oberursel	Allemagne	Industrielle	Funnel-and-Gate	Solvants chlorés	Fe° (ETI)	janv-02	RUBIN

Tabl. 7 – Liste des réalisations européennes (1/4)

N°	Site	Ville	Etat	Echelle	Type Barrière	Polluants	Réactif	Date	Source données
10	Site industriel (traitement goudrons)	Offenbach de	Allemagne	Industrielle	Funnel-and-Gate (1	= BTEX + HAP + phénol (réacteur biologique + filtre charbon actif)	Réacteur biologique + filtre charbon actif	Prévu 2003	RUBIN
11	Usine de traitement de métaux	Reichenbach	Allemagne	Industrielle	B. continue (2 rangées de forages non chevauchant)	PCE + TCE + cis-DEC	Charbon Actif	janv-00	RUBIN
12	Ancien nettoyage à sec	site Rheine	Allemagne	Pilote	Barrière continue avec 2 compartiments	PCE + 1,2-DCE + TCE	Fe° (Fe granulaire + éponge de Fe)	juin-98	RTDF RUBIN +
13	Site BEKA (ancien industriel)	Tübingen site	Allemagne	Industrielle	Funnel-and-Gate	TCE + cDCE + VC	Fe° (ETI)	oct-98	Consoil 2000
14	Ancienne chimique und Schleier	usine Lembach Wiesbaden	Allemagne	Petit pilote + laboratoire	B. continue (amont) Funnel-and-Gate(aval)	As (arsenite, arsenate, pentoxyde et trioxyde d'As)	C org. oxydable + Sulfate solide oxydes de fer adsorbants	aug 02	RUBIN
15	Ancien site industriel (traitement goudrons)	Brunn de Gebirge	am Autriche	Industrielle	Réacteurs d'adsorption + barrière hydraulique (jet grouting)	HAP + BTEX + Phénols + HC + TCE + cDCE	Charbon Actif	oct-99	RTDF PEREBAR +
16	Atelier de réparation de trains	Copenhagen	Danemark	Industrielle	Barrière continue	cisDCE + transDCE + TCE + PCE + VC	Fe° (ETI)	98	RTDF Consoil 2000 +
17	Galvanoplastie	Kolding, Haardkrom	site Danemark	Industrielle	Barrière continue avec recirculation des eaux traitées	TCE + Cr ^{VI}	Fe° (ETI)	99	RTDF Consoil 2000 +

Tabl. 8 – Liste des réalisations européennes (2/4)

N°	Site	Ville	Etat	Echelle	Type Barrière	Polluants	Réactif	Date	Source données
18	Usine pétrochimique, recyclage solvants	Sonderso, Vakopon	Danemark	Industrielle	Funnel-and-Gate	PCE + TCE + TCA + DCE + Fe ⁰ (ETI) DCM + BTEX		99	RTDF + Consoil 2000
19	Site industriel	Amersfoort	Pays-Bas	Industrielle	Funnel (palplanche) et réacteurs multiples		3 matériaux : Fe ⁰ ; fibres d'acier; Hydroxyapatite	sept-03	ETI
20	Ancienne d'uranium	mine Pécs	Hongrie	Pilote	Réacteur	Uranium		En dévpt	projet PEREBAR
21	Ancienne mine de charbon. Stockage de déblais	Renishaw Park	Royaume Uni	Petit échelle		Drainage minier acide		1999	CL:AIRE
22	Ancienne mine de charbon. Stockage de déblais	Shilbottle, comté de Northumberland	Royaume Uni		Barrière continue	Drainage minier acide	Calcite + fumier	En dévpt	CL:AIRE
23	Site industriel		Angleterre nord	du Industrielle	HDPE Funnel-and-gates (3)			oct-01	Licence ETI
24	Site industriel, électronique avec stockage solvants	Monkstown, Belfast	Irlande Nord	Industrielle	Funnel-and-gate réacteur)	(1 TCE + 1,2-cDCE	Fe ⁰ (ETI)	fév-96	RTDF + PRB-Net
25	Site industriel, usine à gaz	Portadown	Irlande Nord	en dévpt	Barrière biologique	HAP, phénol	Barrière biologique	En dévpt	PRB Net
26	Site industriel		Belgique	Industrielle	Funnel (coulis)-and-Gate (1)	Solvants chlorés	Fe ⁰	Oct-03	ETI

Tabl 9 – Liste des réalisations européennes (3/4)

N°	Site	Ville	Etat	Echelle	Type Barrière	Polluants	Réactif	Date	Source données
27	Site industriel	Holvoet	Belgique		Barrière continue	Solvants chlorés	Fe°	2001	Solétanche-Bachy
28	Site industriel		Belgique	Industrielle	Funnel-and-Gate (procédé panneau-drain)	Solvants chlorés	Fe° + catalyseurs (Rhodia, ATE)	juin-2002	SITA Solétanche-Bachy +
29	Autoroute A22 Remblais autoroutier	Neuville en F.	France (59)	Industrielle	Barrière continue	Cr ^{VI}	Coulis Ecosol	94	Solétanche-Bachy
30	Cokerie d'Auby – Auby CDF		France (59)	Industrielle	Funnel-and-Gate (procédé panneau-drain)	HAP	Charbon Actif	jan-98	Solétanche-Bachy
31	Lagune déballastage de Brest		France (29)	Industrielle	Confinement actif (procédé panneau-drain) + stab. <i>in situ</i>	HC	Charbon Actif	jan-02	Solétanche-Bachy
32	Clipper Oil	Lliça de vall., Catalogne	Espagne	Industrielle	Confinement actif (procédé panneau-drain)	HC + PCB + HAP + Phtalates	Charbon Actif	fin 2000	Solétanche-Bachy
33	Activité minière (minerais sulfurés) : rupture bassin à tailings	Aznalcollar	Espagne	Pilote	Mur continu	Drainage minier acide : Zn + As + Cu + Fe + sulfate	Al + Calcite + compost + Fe° (3 formulations)	+ 2000	PIRAMID + PRB-Net
34	Usine Solva Chemie retraitement solvants	Bätterkinden	Suisse (BE)	Industrielle	Drain + paroi porte filtrante	cDCE + TCE + PCE + VC + TCA	Fe° + catalyseurs (Rhodia, ATE)	juin-99	SITA Solétanche-Bachy +

Tabl. 10 – Liste des réalisations européennes (4/4)

7.2.2. Réalisations d'échelle industrielle

Au total, 21 BPR européennes d'échelle industrielle ont été répertoriées. Nous n'avons pu obtenir des informations que sur 18 d'entre elles (Tabl. 11). Les fiches de renseignement complètes sont reportées en annexe 1.

La prédominance des barrières avec Fe^0 (avec ou sans catalyseur) et charbon actif est encore plus marquée lorsque l'on ne prend en compte que les réalisations industrielles avec respectivement 55 et 36 % des réalisations, soit 91% au total. Les solvants chlorés représentent 54 % des polluants traités. La totalité des pollutions par solvant chloré est traitée par du Fe^0 , à l'exception de la barrière de Reichenbach qui met en œuvre un filtre à charbon actif. C'est le seul cas relevé. Nous n'avons pas trouvé d'explication à ce choix technique (faibles concentrations en solvants chlorés, avec une moyenne de 0.5 mg/L ?).

Si l'on excepte la barrière de Offenbach qui combine une dégradation microbologique avec un filtre à charbon actif, la totalité des barrières ne met en œuvre qu'un seul principe réactif. En revanche, plusieurs BPR traitent des combinaisons de polluants avec un réactif unique, la restriction étant que le mécanisme réactionnel mis en jeu soit adapté aux polluants considérés. Ainsi, le traitement par le fer métal peut s'appliquer à la fois à la dégradation des solvants chlorés (déhalogénéation réductrice) et à la réduction du Cr^{VI} en Cr^{III} (exemple de la barrière de Kolding, Pays-Bas). Suivant le même principe, l'utilisation d'un filtre à charbon actif qui met en œuvre un principe d'adsorption peut permettre de traiter des combinaisons de polluants organiques (hydrocarbure, PCB, HAP...). Ces exemples montrent que le traitement d'une combinaison de polluants ne pose pas de problème majeur si un seul type de réactif est mis en œuvre. Il en est tout autrement lorsqu'il est nécessaire d'associer plusieurs réactifs en série. Le système devient alors difficile à dimensionner et à maîtriser sur le plan hydraulique (gestion des pertes de charge) et réactionnel (cinétiques). S'il est donc possible, en théorie, de combiner plusieurs réactifs (en particulier, dans les configurations de type Funnel & Gate), l'analyse des réalisations industrielles montre que la solution multi-barrières reste au stade du concept de laboratoire sans transfert à l'échelle industrielle (aucune réalisation relevée en Europe et en Amérique du Nord).

En terme de configuration (Fig. 14), seules 4 des 18 barrières sont de type barrière continue. Ce constat illustre la tendance européenne à privilégier des barrières incluant à la fois plus de technicité et plus de contrôle ; c'est l'opposé de l'approche nord américaine. Les 14 autres barrières sont de type Drain & Gate ou Funnel & Gate. Il est intéressant de souligner que toutes les barrières étudiées apportent leur propre variante à ces concepts de base. Seul peut être Solétanche Bachy apporte une solution technique bien établie avec le procédé panneau-drain. Le fait qu'il existe autant de variantes en terme de conception de barrière montre que les solutions doivent i) être adaptées aux besoins du client et aux spécificités des sites pollués, ii) que le marché est encore bien récent. En d'autre terme, s'il existe des concepts bien établis, il n'existe pas de solutions toutes faites et standard. En revanche, bien qu'il existe de nombreux concepts novateurs comme par exemple le géosiphon (ETI), les DART (Deep Aquifer Remediation Tools) ou les barrières biologiques, il n'existe pas de

réalisations industrielles utilisant ces technologies (si l'on excepte le réacteur biologique d'Offenbach).

L'analyse des réalisations montre que le concept de BPR peut être adapté à des situations très variées et être combiné avec d'autres techniques. Ainsi dans le cas du site d'Auby, le sol pollué est excavé pour être traité par voie thermique ; ces travaux d'excavation conduisent à une remobilisation des HAP qui migrent en dehors du périmètre du site. La solution BPR avec filtre au charbon actif permet donc de prévenir la migration des HAP à l'aval hydraulique de la zone en cours de réhabilitation. Cette barrière est en place pour une durée maximale de 10 ans.

Dans le cas des lagunes de déballastage de Brest et le site Clipper Oil en Espagne, la barrière est construite sur tout le périmètre de la zone polluée. Le flux entrant se limite aux eaux d'infiltration essentiellement pluviales qui pénètrent dans le confinement. Les pluies lixivient les sols pollués et passent par les portes où les polluants dissous sont piégés. Cette variante, qualifiée de confinement actif représente une solution technique intermédiaire entre le confinement passif et la BPR standard.

S'il n'y a pas d'unicité de solution technique, il existe des limites techniques qui se traduisent par des profondeurs maximales de 20 mètres, les profondeurs moyennes étant de l'ordre de 9 mètres. Il y a plus de variabilité sur les longueurs qui sont comprises entre 15 et 600 m avec une moyenne de 220 m.

Dans l'ensemble des cas étudiés, il ne semble pas qu'il y ait eu d'échec retentissant. Les difficultés rencontrées (du moins, pour celles qui sont relatées) ne sont pas en mesure de remettre en cause le fonctionnement de la barrière. D'autre part, excepté Solétanche Bachy qui propose une stratégie de maintenance bien arrêtée, il existe peu d'informations sur le comportement à terme et la maintenance de ces ouvrages qui ont pour la plupart d'entre eux moins de 4 ans.

Les coûts d'investissement s'établissent entre 120 000 et 4 000 000 €. Le ratio du coût d'investissement par le débit journalier est compris entre 4 400 et 900 000 €/m³/j. La normalisation des coûts en fonction du débit d'eau traitée, n'est pas une bonne base de comparaison. Si la technologie BPR est dédiée au traitement des pollutions dissoutes, elle ne peut se résumer à du traitement d'eau. La technologie BPR s'inscrit dans une démarche de protection des ressources hydrauliques et de réhabilitation d'un site. En revanche, il existe un net effet d'échelle dans les coûts d'investissement. Pour prendre en compte cet effet d'échelle, les coûts ont été normalisés par rapport à la surface de la barrière (Tabl. 11). Assez logiquement, les coûts unitaires les plus faibles correspondent aux barrières industrielles de grande taille avec des coûts d'investissement inférieurs à 500 €/m².

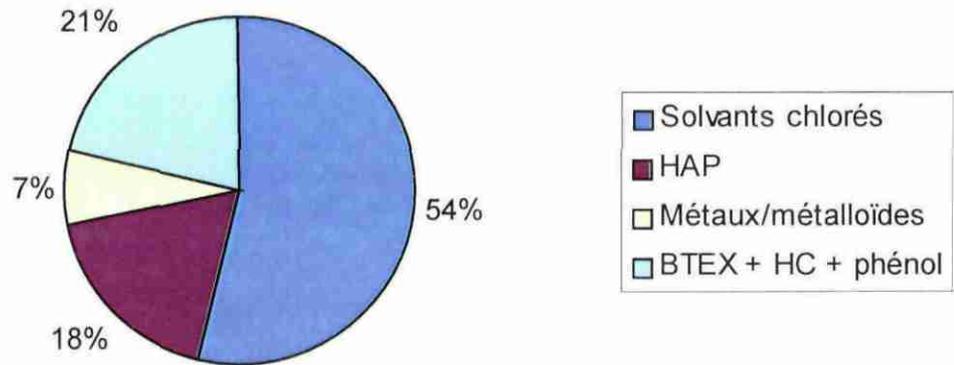


Fig. 12 – Classement des BPR européennes (réalisations industrielles) par type de polluant

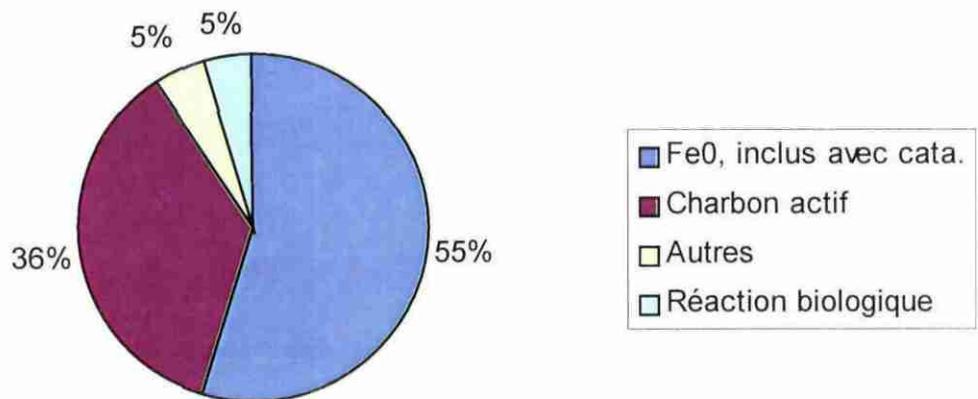


Fig. 13 – Classement des BPR européennes (réalisations industrielles) par type de matériau réactif

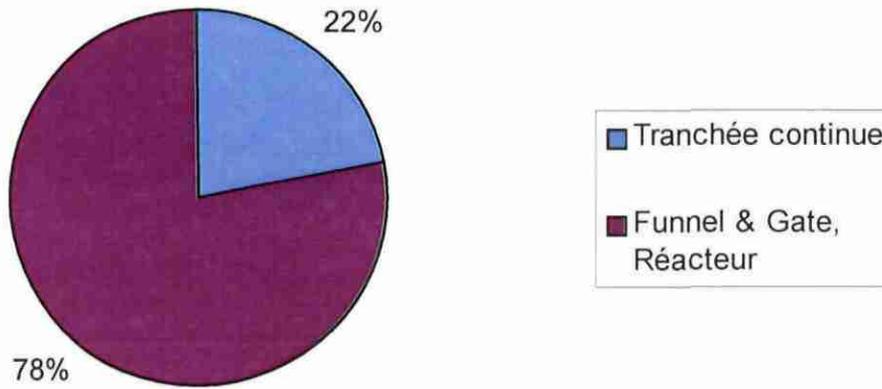


Fig. 14 - Classement des BPR européennes (réalisations industrielles) par type de configuration

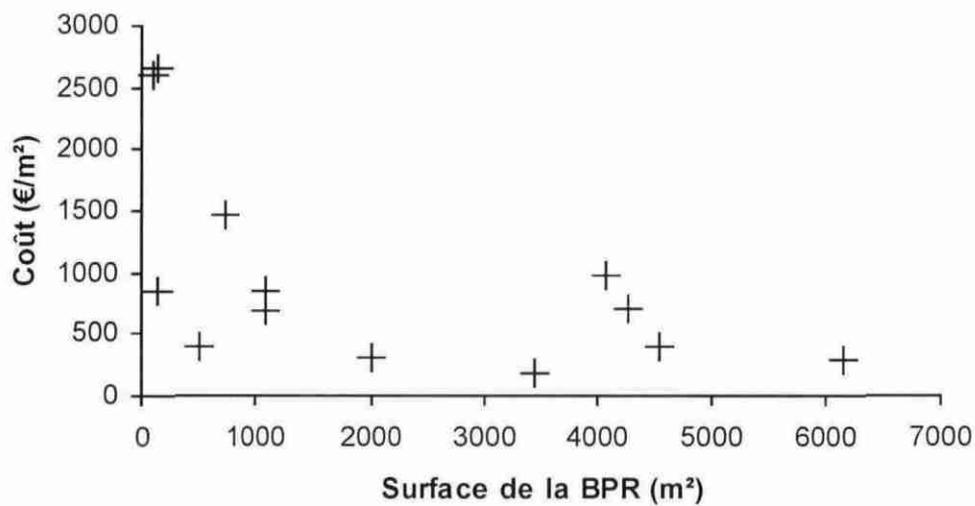


Fig. 15 – Coût des BPR européennes en € par m² (surface de la BPR)

N°	Ville	Type ^a	Polluants		Cmax µg/L	Réactif Nature	Géométrie			Débit m ³ /jour	Coût invest.			
			Date	Nature			Masse t	Long. m	Prof. m		Surf. m ²	€	€/m ²	
3	Denkendorf	All	D&G	aou-01	Chlorés	30000	CA							
5	Edenkoben	All	F&G	fev-01	Chlorés	20000	Fe°	825	440	14	6160	1 750 000	284	
7	Karlsruhe	All	F&G	jan-01	BTEX +HAP	20 600	CA	150	240	17	4080	850	4 000 000	980
9	Oberursel	All	F&G	jan-02	Chlorés		Fe°	310	175	4 à 19	2400			
10	Offenbach	All	F&G	03	BTEX +HAP +Phénol	110E6 13E6	µbio + CA		120					
11	Reichenbach	All	CRB	jan-00	Chlorés	500	CA		20	7	140	120 000	857	
13	Tübingen	All	F&G	oct-98	Chlorés	260	Fe°	275	215	10	2150	30		
15	Brunn am G.	Aut	Réact	oct-99	HAP +BTEX +Phénols	8600 80 340	CA	23	220	5	1100	40 à 170	750 000	682
16	Copenhagen	Dan	CRB	98	Chlorés	4000	Fe°		15	6	90		235 000	2611
17	Kolding	Dan	CRB	99	Chlorés +CrVI	1400 100000	Fe°	200	45	3	135		358 000	2652
18	Sonderso	Dan	F&G	99	Chlorés +BTEX	5000	Fe°	80 m3	123	9	1107		940 000	849
24	Monkstown	Irl	F&G	fév-96	Chlorés	380000	Fe°	25	60	12	720	1 à 6	1 055 000	1465
28		Bel	F&G	juin-02	Chlorés	60000	Fe° + cata	60	350	13	4550	2	1 800 000	396
29	Neuville	Fra	CRB	94	CrVI	0,1E6 à 1,8E6	Ecosol		150	5	750			
30	Auby	Fra	F&G	jan-98	HAP		CA	0,9	430	8	3440	36	600 000	174
31	Brest	Fra	Conft + stabilisation	jan-02	HC		CA	0,8	610	7	4270	< 15	3 000 000 comprend stabilisation	703
32	LLiça de vall.	Esp	Conft	01	HC +PCB +HAP+Phtal.	54E6	CA	0,4	400	5	2000	< 5	600 000	300
34	Bätterkinden	Sui	F&G	juin-99	Chlorés	350	Fe° + cata	5	100	5	500	14	200 000	400

^a : D&G, Drain & Gate ; F&G, Funnel & Gate ; Réact, réacteur ; CRB, Continuous Reactive Barrier ; Conft, confinement actif ; CA, charbon actif.

Tabl. 11 – Synthèse des BPR européennes d'échelle industrielle

8. Analyse et discussion

8.1. HISTORIQUE ET EMERGENCE DE LA TECHNOLOGIE BPR

D'une manière générale, l'émergence de la technique BPR s'inscrit dans la tendance générale du développement des techniques de traitement *in situ*.

Dans le domaine de la dépollution des sols et des eaux, le début et courant des années 80 a été l'occasion de donner une large priorité aux techniques de traitement *ex situ*. A la fin de cette période, les techniques *in situ* ont amorcé leur développement, lequel perdure à ce jour et demeure encore important. Ces développements ont été l'occasion de nombreuses études « pionnières », que ce soit à des échelles pilotes ou industrielles. Parmi celles-ci, seules certaines ont montré leur intérêt et ont donné suite à des développements ultérieurs. En ce sens, l'USEPA a encouragé les différents acteurs à développer mais aussi à valider leurs techniques.

Les raisons ayant amené à la « survie » de seules quelques techniques parmi toutes celles testées sont nombreuses. Il est évident que le retour d'expérience de l'époque, basé sur un nombre limité de projet à l'échelle pilote, restait incomplet. En particulier, on retiendra que la performance « en temps réel » des techniques de traitement *in situ* est plus difficilement vérifiable par rapport aux techniques *ex situ*. Par ailleurs, il apparaît à ce jour évident que les performances, tant techniques qu'économiques, des techniques *in situ* s'évaluent sur des périodes plus longues, pouvant couvrir plusieurs décennies. Cette notion de performances à long terme est l'atout des techniques *in situ*, mais constitue leur point faible en phase de développement.

Concernant les BPR, le développement de cette technique aux Etats-Unis initié fin des années 1980, a bénéficié de l'influence très volontariste de l'industrie américaine : phases d'identification de la problématique, analyse des solutions *a priori* économiques et efficaces, soutien à la réalisation de barrières sur de nouveaux sites pour démontrer leur efficacité ou réévaluer les techniques développées. Si quelques échecs ou difficultés ont été rencontrés sur certains sites, le principe de la technique n'a pas été remis en cause sur le fond, compte tenu de l'évidente complexité des systèmes mis en place et de la grande diversité des situations rencontrées. L'analyse de cette approche américaine est intéressante en ce sens qu'elle montre comment, en dépit de risques techniques et financiers, de nouvelles techniques de dépollution peuvent émerger sur un marché éminemment fluctuant et complexe.

D'une manière générale, toute nouvelle technologie est suspecte par comparaison avec des techniques plus anciennes considérées comme éprouvées (P&T, incinération). S'agissant d'une technique passive et *in situ*, l'efficacité de la BPR ne peut être évaluée qu'à moyen ou à long terme. La recherche d'une efficacité immédiate par des techniques actives comme le P&T (immobilisation du panache par puits de fixation, abattement rapide des concentrations dans la nappe), même si elle est peu performante sur la durée, a pu limiter le développement des BPR.

Une autre difficulté peut être liée à l'attitude des autorités réglementaires. Les performances des BPR ne doivent pas être exclusivement évaluées par le pourcentage d'abattement de la pollution mais en terme de préservation des ressources hydrauliques dans le cadre d'une évaluation des risques.

En pratique, la première application industrielle d'une BPR date de 1994 aux Etats-Unis ; il s'agissait du traitement d'une pollution aux solvants chlorés par du Fe^0 sur le site Sunnyvale en Californie. En Allemagne, si l'intérêt relativement précoce pour le concept BPR date de 1994/1995 (intervention de H. Burmeier et G. Teutsch relatant l'expérience nord américaine), il y eu beaucoup de discussions et d'hésitations avant de lancer la première réalisation allemande en 1998. En France, outre le premier mur continu sur l'A22, la première réalisation significative avec système Panneau-Drain par Solétanche Bachy date de 1998, sur le site de l'ex cokerie d'Auby. Le choix de cette technique alternative au caractère innovant a été fait en étroite concertation avec le propriétaire du site, Charbonnages de France qui a préféré cette technique à un confinement total du site. Cette réalisation est considérée par le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre comme une réussite, laquelle est le fruit d'une collaboration étroite et active entre Charbonnages de France et Solétanche Bachy.

Les données acquises au terme de 10 ans d'expérience (une centaine de réalisations significatives à l'échelle mondiale) permettent de valider le concept sans résoudre toutes les difficultés, notamment en terme de maintenance et de comportement à long terme. La levée de ces verrous implique des recherches et développements complémentaires à l'image de certains programmes engagés dans le cadre du réseau allemand RUBIN (suivi de barrières existantes, outils d'aide à la décision, nouvelles réalisations). En outre, il existe à la fois des solutions techniques éprouvées et des technologies en développement, d'où parfois des confusions. Il est donc évident que dans un tel contexte, la nécessité de guider au mieux les décideurs se voit renforcée. Une meilleure connaissance des contraintes décisionnelles et une maîtrise des différentes étapes d'études devraient favoriser la réalisation de BPR industrielles réussies.

8.2. EVALUATION DES PERFORMANCES DES BPR, L'EXPERIENCE NORD-AMERICAINE

Les informations sont extraites, en majorité, de deux documents nord-américains. Le premier est de l'USEPA (2002b) et a été réalisé sous les auspices de trois agences, le département de la défense (Department of Defence, DoD), de l'énergie (Department of Energy, DoE) et l'agence de protection de l'environnement (US EPA) qui ont décidé de mettre en commun leurs expériences et expertises. L'évaluation n'a porté que sur les technologies éprouvées basées sur une étape d'excavation puis de remplissage (excavate-and-fill). Les concepts plus innovants ou le média réactif est injecté dans le sous-sol n'ont pas été évalués faute d'un recul suffisant pour des installations d'échelle industrielle.

Après avoir rappelé que l'enjeu clé est la longévité des BPR, à savoir la pérennité des performances réactives et hydrauliques, cette étude met en exergue une spécificité fondamentale des BPR. Une barrière est une installation quasi-permanente, les possibilités d'intervention sont limitées et toute modification est très coûteuse. Plus encore que d'autres techniques, la technique BPR qui s'inscrit dans la durée, implique que la conception et l'installation fassent l'objet d'un soin tout particulier.

Le second document exploité est celui du RTDF (2003), il résume des communications présentées lors d'une récente réunion (New-York, 15-16 octobre 2003) organisé par l'équipe thématique BPR du « Remediation Technologies Development Forum, RTDF ». Cette réunion comprend un exposé particulièrement intéressant de ETI qui a engagé l'analyse des performances de 52 barrières d'échelle industrielle. Cette analyse révèle que 43 réalisations atteignent les objectifs fixés ; 6 parmi ces 43 montrent des écarts par rapport aux prévisions. Pour les 9 réalisations qui n'atteignent pas les objectifs réglementaires, une solution de type P&T a été mise en œuvre sur 3 sites et des modifications ont été réalisées sur les 6 autres. Pour les 9 sites, les problèmes sont d'ordre hydraulique (by-pass à la périphérie de la barrière, temps de séjour insuffisant) et résulte d'un défaut de caractérisation du site.

Au terme de 10 ans d'expériences sur l'analyse des performances des BPR, les différents acteurs nord-américains s'accordent sur les éléments suivants :

- si historiquement les premières réalisations nord-américaines de BPR étaient majoritairement de type Funnel & Gate, la configuration mur continu est désormais la solution privilégiée. L'un des principaux arguments est la moindre sensibilité à des défauts de conception et une limitation des risques pour les sites complexes avec des écoulements et une distribution des polluants hétérogènes (d'où simplification de l'étape de caractérisation) ;
- une caractérisation adéquate du site, en particulier l'analyse des régimes hydrauliques, est impérative pour maximiser les chances de succès. Néanmoins, les différents acteurs soulignent que indépendamment de la qualité de l'étape de caractérisation, il subsiste un degré d'incertitude dont doivent être conscients à la fois les autorités réglementaires, les propriétaires des sites et le grand public.
- au delà d'une longue période de fonctionnement, la réactivité du Fe^0 décroît suite à la précipitation des composés inorganiques présents dans l'eau. Si la précipitation est un fait établi pour les procédés de réduction par le Fe^0 , il reste beaucoup d'incertitudes sur la durée prévisible de fonctionnement. Ainsi, ETI annonce des durées de fonctionnement de 10 à 15 ans sans intervention, sans préciser d'ailleurs l'ampleur et la nature des interventions, en particulier pour les barrières de type mur continu ;
- la possibilité d'utiliser des paramètres simples, pH et Eh en l'occurrence, comme indicateur d'une dégradation des performances de la barrière n'est pas établie et nécessite des études complémentaires ;
- pour les environnements géologiques où les écoulements sont faibles (formations faiblement perméables), un soin tout particulier doit être porté à la connexion hydraulique entre l'aquifère et la zone réactive de la barrière ;

- le développement d'une activité microbienne et d'une biomasse (biofouling) est constaté et peut potentiellement conduire à une perte de réactivité et/ou de perméabilité au cours du temps. En revanche, l'analyse conduite par ETI ne relève qu'une seule situation (sur 90) où le développement de la biomasse est tel qu'il pose des problèmes significatifs ;
- des études additionnelles sont nécessaires pour évaluer la longévité des barrières et améliorer la prédiction des durées de vie en se basant sur les conditions spécifiques du site en termes hydraulique, géochimique et microbiologique. Ce dernier point reprend un élément important évoqué par un représentant du réseau RUBIN. Les nombreuses BPR construites depuis le début des années 1990 ont permis de valider le concept et de montrer l'intérêt de cette technologie. Néanmoins, il reste encore beaucoup de choses à apprendre sur le comportement à moyen et long terme, d'où le besoin d'acquérir des données fiables.

Concernant la technologie, deux évolutions se dessinent :

- les méthodes de mise en place par injection directe du réactif commencent à émerger. Un de leurs atouts est de pouvoir mettre en place le matériau réactif à grande profondeur à moindre coût (comparativement aux méthodes conventionnelles impliquant une étape d'excavation) ;
- la technologie BPR a été conçue et développée pour traiter les panaches de polluants dissous sans action directe sur la zone source. L'évolution actuelle est d'élargir le concept de traitement passif *in situ* en intégrant le traitement des sources. Cette évolution conduit à développer des techniques de malaxage en profondeur (deep soil mixing) qui permettent de traiter la zone source avec le réactif. Ainsi, des expériences d'échelle pilote ont été engagées sur le traitement de zones sources de solvants chlorés par malaxage en profondeur avec des coulis argile(bentonite)-fer. L'argile a pour fonction de i) faciliter l'injection du fer en phase de construction et de ii) réduire la perméabilité de la zone source en confinant le polluant. L'autre tendance évoquée dans le paragraphe précédent, est l'injection du principe réactif, en l'occurrence du Fe^0 , dans la zone source (solution de fer colloïdal, émulsions,...). A souligner également, un exemple de traitement de pollution au Cr^{VI} par du fer ferreux (sulfate et chlorure).

8.3. LES SPECIFICITES EUROPEENNES

Cette étude met en exergue des différences sensibles entre les approches nord-américaines et européennes.

Rappelons en quelques lignes que les configurations mur continu et Funnel & Gate reflètent des approches différentes de la technologie BPR de part et d'autre de l'Atlantique (chapitre 4.3).

Historiquement, la technique a émergé en Amérique du Nord, notamment sous l'impulsion de l'Université de Waterloo et de sa structure commerciale ETI qui ont piloté la réalisation des premières barrières industrielles majeures. Comme nous l'avons mentionné, l'Amérique du Nord privilégie désormais l'approche mur continu qui est

considérée comme une approche plus « robuste » et plus « sécuritaire » avec une minimisation des coûts d'investigation et d'étude et un surdimensionnement du réactif pour limiter la maintenance.

En revanche, pour l'Europe, la technologie de type Funnel & Gate est la solution privilégiée. Les critères en faveur de ce choix technique sont la possibilité d'adapter la configuration de la BPR aux spécificités des sites et d'avoir une plus grande maîtrise du monitoring et de la maintenance du média réactif. Ainsi, certaines sociétés proposent une stratégie de maintenance basée sur des interventions annuelles, l'intervention pouvant aller du simple décolmatage au renouvellement du matériau réactif. Cette approche n'est envisageable que si la conception de la barrière permet un accès facilité au réacteur de traitement. Cette stratégie de maintenance optimisée peut être assortie de garantie sur les performances de la barrière ; les garanties proposées sont comprises entre 10 et 30 ans. Un dernier élément est que pour de nombreux sites européens, il existe de fortes contraintes de surface qui ne permettent d'envisager une configuration de type mur continu et conduisent à retenir la configuration Funnel & Gate. A l'opposé pour de nombreux sites américains, appartenant par exemple au Department of Defense (DoD), les contraintes de surface sont moindres.

Les Etats-Unis et l'Europe se différencient également sur le plan des brevets. La politique nord-américaine de protection de la propriété industrielle favorise le dépôt de brevets couvrant un champ très large malgré parfois des antériorités. C'est typiquement le cas de brevets ETI sur le traitement des solvants chlorés par le Fe^0 ou la configuration Funnel & Gate. Ce champ très large rend ces brevets assez faciles à contourner ; il nous a été mentionné des difficultés pour ETI à faire reconnaître ses brevets aux USA. Les procédures européennes de dépôt de brevets sont généralement plus rigoureuses, en particulier en Allemagne, d'où des brevets parfois plus « pointus » (exemple des brevets Solétanche-Bachy portant sur les technologies de mise en place de la BPR avec le système Panneau-Drain®). Dans le cadre du réseau RUBIN, financé par les autorités fédérales, des instructions ont été données aux acteurs en matière de propriété industrielle : évaluation dans un premier temps de l'opportunité de déposer un brevet, puis publication dans un second temps. Les brevets sont un point important. Néanmoins, au-delà des brevets, le point clé est bien l'expertise et le savoir-faire des entreprises et leur capacité à mettre en œuvre les solutions techniques. Ceci explique qu'il n'y a pas à notre connaissance de conflits majeurs liés aux brevets.

Bien que le concept ait émergé en Amérique du Nord, cette étude montre que l'Europe est également moteur dans le développement de cette technologie :

- historiquement : après une première réalisation dès 1994 (autoroute A22, France), la technique s'est développée dès 1996 et a pris de l'ampleur à partir de 1998 ;
- par l'expérience acquise : le nombre de réalisations européennes est évalué à 35, dont un peu plus de 20 réalisations d'échelle industrielle ;
- en terme d'innovation et de technologie, il existe des sociétés européennes proposant des solutions techniques éprouvées et sophistiquées. Il existe de nombreux projets de R&D depuis l'échelle du laboratoire à celle du pilote.

Un des points faibles à l'échelle européenne est sans aucun doute un moindre niveau de communication et d'échange. Il manque en particulier une structuration de l'effort de R&D et une communication sur les réalisations opérationnelles. Le réseau le plus actif et le mieux structuré étant sans aucun doute le réseau national allemand RUBIN. En revanche, les tentatives de réseau européen, notamment sous l'impulsion de réseau irlandais PRB-Net (Queen's University de Belfast) n'ont pas encore abouti à une plateforme dynamique d'échange telle qu'elle existe aux Etats Unis avec le forum RTDF. Les conséquences sont :

- des difficultés pour capitaliser l'expérience acquise à travers les réalisations industrielles ou les différents projets de R&D depuis l'échelle du laboratoire jusqu'à l'échelle pilote ;
- un manque d'information de l'ensemble des acteurs (gestionnaires de sites, prescripteurs, maîtres d'ouvrages, autorités réglementaires,...) qui méconnaissent cette technique. Les conséquences peuvent être i) de mettre en œuvre des procédés inadaptés et peu performants sur des sites où la technologie BPR serait particulièrement indiquée (par exemple, traitement par P&T de panaches de solvants chlorés avec sources secondaires diffuses et mal localisées) ou ii) à l'opposé de choisir l'option BPR alors que le site ne s'y prête pas ;
- mauvaise rationalisation des efforts à la fois en terme de R&D et de solutions industrielles. L'analyse des réalisations européennes montre que, excepté les réalisations Solétanche-Bachy avec le procédé Panneau-Drain, il existe peu de solutions technologiques standard. Au contraire, il existe autant de sites que de variantes de conception.

Cette nécessité de fédérer les efforts et valoriser les résultats acquis est prise en compte dans le 6^{ème} Programme cadre de R&D de la Commission européenne. Cette dernière soutient en priorité les projets permettant de lever les contraintes et les verrous technologiques pour une plus large mise en application des procédés existants et encourage la mise en réseau des expériences. En revanche, la commission ne soutient plus les programmes portant sur le développement de nouvelles solutions techniques, considérant qu'il ne s'agirait que d'une démultiplication inutile des efforts de recherche engagés dans le cadre du 5^{ème} programme cadre.

En France, la technique BPR reste marginale par rapport à des techniques plus conventionnelles comme le P&T qui sont encore très largement mises en œuvre, y compris pour des cas de figure défavorables. Ce particularisme est d'autant plus surprenant que la France dispose d'entreprises pionnières dans le domaine des BPR avec SITA qui a repris les concepts ATE-Geoclean sur la réduction catalytique des solvants chlorés et Solétanche-Bachy qui a développé la technologie Panneau-Drain. Différentes raisons peuvent être évoquées :

- le marché de la dépollution reste un marché en émergence. En outre, une part significative du marché est captive et est traitée en interne au grand groupe ;
- le choix de la technologie revient au responsable du site ou de la pollution. L'organisme de contrôle réglementaire veillera essentiellement à l'atteinte des

objectifs de réhabilitation, sans généralement se prononcer sur le choix de la solution technique ;

- le manque d'information sur la technologie BPR et la faiblesse de la R&D sur les procédés de dépollution par rapport aux thématiques diagnostics et compréhension des mécanismes de transfert.

Notons cependant que l'approche par évaluation du risque prend en compte l'existence avérée ou potentielle de cibles en aval hydraulique de la pollution. Les contraintes réglementaires s'expriment donc comme des concentrations maximales admissibles en aval hydraulique d'un site, et ce à une distance variable, après dispersion, dilution, dégradation "naturelle". Les contraintes réglementaires ne s'expriment pas comme une obligation de "limiter" voir "arrêter" un panache de pollution en aval hydraulique d'un site. Ceci peut être une des raisons ayant freinée, en France notamment, le développement des BPR, lesquelles se justifient trop souvent par l'idée d'empêcher le transfert des polluants en aval hydraulique.

8.4. ANALYSE

Le concept de traitement *in situ* d'un panache de pollution par BPR est désormais largement validé :

- les premières réalisations industrielles ont plus de 10 ans. Les retours d'expériences montrent que les objectifs sont généralement atteints. Les difficultés rencontrées (capture incomplète du panache, temps de séjour trop court) et celles qui subsistent ne remettent pas en cause le potentiel de la technique. Elles découlent souvent d'une caractérisation insuffisante des sites (écoulements préférentiels non identifiés, hétérogénéité de distribution des polluants). Bien au contraire, les résultats acquis conduisent à une généralisation progressive de la technique avec désormais une centaine de réalisations d'échelle industrielle dans le monde ;
- il existe des solutions techniques éprouvées et opérationnelles, en particulier pour le traitement des solvants chlorés par le Fe^0 (déhalogénéation réductrice) ;
- il existe un relatif consensus sur le schéma d'évaluation conduisant à la solution BPR (APS, APD), en particulier sur la nécessité de bien caractériser le site en préalable à la conception et la construction.

Si l'expérience acquise permet de valider le concept, elle ne permet pas de totalement apprécier la longévité des BPR et de bien cerner la stratégie de maintenance. C'est sans aucun doute un frein au développement de cette technique. En effet, 10 ans de recul sont encore bien peu en regard des durées de vie envisagées (30, 40, 50 ans). Ce manque de recul est aggravé par des difficultés pour capitaliser l'expérience sur les réalisations existantes. Deux raisons peuvent être évoquées :

- pour des raisons commerciales évidentes, les entreprises ne souhaitent pas nécessairement communiquer sur les difficultés qu'elles peuvent rencontrer ou leurs échecs ;
- la construction d'une BPR implique un fort investissement financier en phase de conception et de construction. Une fois que la BPR est construite et ses objectifs à

court terme atteints, il est parfois difficile de convaincre le gestionnaire du site de poursuivre les mesures de contrôle et de suivi. Une solution peut être d'engager des projets de R&D focalisés sur l'analyse des performances en relai des projets commerciaux.

Le colmatage des BPR peut être d'origine mécanique (transport particulaire) ou géochimique par précipitation de phases biologique ou inorganiques secondaires (en particulier pour les barrières Fe^0 qui conduisent à une augmentation du pH). Sans remettre en cause la technologie, le colmatage reste un sujet de préoccupation qui conditionne directement la conception de l'ouvrage, la stratégie de maintenance et la longévité de la BPR. Des études additionnelles sont nécessaires pour évaluer la longévité des barrières et améliorer la prédiction des durées de vie en se basant sur les conditions spécifiques du site en termes hydraulique, géochimique et microbiologique. Le développement de techniques permettant de reprendre à moindre coût, les sections colmatées d'une BPR est reconnu comme un axe important de recherche (en particulier, en Amérique du Nord où la technologie du mur continu est privilégiée).

Les deux principales configurations, le mur continu et le Funnel & Gate, ont fait l'objet d'une analyse qui met en exergue les intérêts et inconvénients de chaque configuration. Cette analyse montre que ces deux configurations reflètent deux approches différentes notamment en terme de maintenance et de comportement à long terme. Ce point a été largement analysé tout au long du rapport. La comparaison entre ces deux systèmes nous conduit à deux observations :

- les configurations Funnel & Gate avec cartouches ou réacteurs accessibles nous semblent particulièrement indiquées pour les barrières basées sur un mécanisme d'adsorption et ce, pour deux raisons :
 - la capacité d'adsorption du matériau est généralement limitée et implique donc une maintenance périodique (sauf surdimensionnement de la masse de réactif)
 - les mécanismes d'adsorption sensu stricto sont réversibles. Il faut donc être en mesure de retirer le matériau si les concentrations en polluants deviennent très faibles et/ou au démantèlement de la barrière.
- si le système Funnel & Gate peut faciliter les opérations de maintenance, force est de constater que cet atout n'est pas systématiquement exploité dans les réalisations pilotes ou industrielles. Dans ce dernier cas de figure, la configuration Funnel & Gate nous semble peu judicieuse, dans la mesure où le système présentera les différents inconvénients du système F&G sans en exploiter les principaux atouts, en l'occurrence la facilité de maintenance du matériau réactif.

Parmi les caractéristiques des BPR, nous soulignerons les suivantes :

- s'agissant d'une technique *in situ* et passive qui s'inscrit dans la durée, le champ d'application privilégié des BPR sont les pollutions récalcitrantes avec des sources secondaires mal localisées ou diffuses : c'est typiquement le cas des solvants chlorés qui représentent plus de 50% des réalisations. Le critère « pollutions récalcitrantes » n'est pas le seul. La solution BPR s'avère être une alternative intéressante lorsque le volume de sol pollué est trop important pour être excavé et

traité (traitement de la source non économique) mais que la pollution à un impact avéré sur les eaux souterraines qui conduit à intervenir. La BPR permet une séparation physique entre un compartiment amont hydraulique pollué et la zone aval : elle peut constituer une mesure de protection transitoire pendant des travaux de dépollution sur des sources primaires ou secondaires ;

- les BPR permettent de traiter un panache de polluant en empêchant leur transfert à l'aval hydraulique de l'ouvrage. Si la technologie BPR est dédiée au traitement des pollutions dissoutes, elle ne peut se résumer à du traitement d'eau. La technologie BPR s'inscrit dans une démarche de protection des ressources hydrauliques et de réhabilitation d'un site ;
- il existe un nombre limité de configurations de base : mur continu, Funnel & Gate (avec variante Drain & Gate) et réacteur enterré sont les principales. L'analyse des réalisations montre qu'il existe de très nombreuses variantes dans la manière de les mettre en œuvre. Ce constat traduit la nécessité de s'adapter aux spécificités du site, à son environnement et au client ;
- il existe peu de possibilités techniques d'intervention et/ou de modification sur une barrière en place. Pour pallier cette difficulté, il est donc nécessaire d'avoir une très bonne connaissance du site sur les plans hydraulique, géochimique et microbiologique en préalable à la construction. La nécessité de bien caractériser le site avant de concevoir et construire une BPR est unanimement reconnue, en particulier pour les configurations de type Funnel & Gate.

Ce concept, initié historiquement pour le traitement des solvants chlorés par réduction avec Fe^0 , est très largement validé pour le couple solvants chlorés/réducteur métal. Ce champ d'application domine très largement et induit souvent des confusions en généralisant abusivement l'expérience « solvants chlorés » aux autres situations. En parallèle aux applications solvants chlorés, il existe encore de nombreux projets à caractère exploratoire dont les objectifs sont i) d'acquérir des données sur les performances à moyen et long terme, ii) de traiter de nouveaux polluants ou combinaison de polluants, iii) d'éprouver de nouvelles configurations (traitement séquentiel) ou des technologies adaptées à des contextes plus difficiles (par exemple, aquifère profond). En résumé, il existe à la fois des solutions technologiques éprouvées et des concepts au stade du développement.

Sur le plan du processus d'évaluation des BPR, si les principes généraux développés dans les différents guides (en particulier, guides anglo-saxons) ne sont pas remis en cause, il y a un décalage important avec la réalité. Il existe peu de cas où l'ensemble des solutions alternatives aux BPR ont été étudiées et chiffrées. Ainsi, l'étude de l'USEPA (2002a) dont l'un des objectifs était de comparer les coûts des options BPR et P&T pour 22 sites n'a pu porter son analyse que sur 5 sites, faute de données. Le choix de mettre en œuvre une BPR ne résulte pas systématiquement d'une analyse technico-économique rigoureuse telle que le recommandent les guides. La décision peut également intégrer d'autres critères comme la volonté « politique » d'acquérir des données et pousser plus avant la technologie (cas de plusieurs réalisations allemandes réalisées dans le cadre du réseau RUBIN). Des critères plus « irrationnels » comme la politique de communication de l'entreprise (ou du gestionnaire du site) ou la perception publique des problèmes environnementaux, interviennent également dans la prise de

décision. Ainsi pour une BPR européenne (type Funnel & Gate) construite à l'aval hydraulique d'une zone résidentielle, la solution palplanche a été préférée à la technologie coulis pour l'écran, car considérée comme plus sécurisante pour les habitants de la zone résidentielle (mise en place d'un écran métallique par enfoncement dans le sol lors de l'étape de construction).

9. Conclusion

Cette étude intitulée « Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives (BPR) : faisabilité technico-économique » est réalisée pour le compte de l'association d'industriels Re.Co..R.D. (réseau coopératif de recherche sur les déchets).

L'objectif de cette étude est de synthétiser l'information existante, mettre en exergue les intérêts et limites d'application et définir les critères technico-économiques d'applicabilité des BPR. La finalité de cette synthèse est de fournir des clés pour l'évaluation de l'applicabilité des BPR, mais aussi d'en présenter les limites.

La technologie BPR, solution de traitement *in situ* et passive des panaches de polluants s'inscrit dans une démarche de protection à long terme des ressources hydrauliques et de réhabilitation d'un site pollué. La majorité des BPR a été conçue pour des durées de 30, 40, 50 ans. L'évaluation de cette technique s'inscrit dans la durée.

Les réalisations nord-américaines et européennes (une centaine de BPR majeures) permettent :

- de valider le concept ;
- d'arrêter quelques principes clés dans la démarche d'évaluation et de conception, en particulier l'importance de la caractérisation préliminaire des sites ;
- de préciser le champ d'application privilégié, à savoir les pollutions récalcitrantes avec sources diffuses et mal localisées et plus spécifiquement la dégradation des solvants chlorés par réduction métallique.

Il reste encore des incertitudes sur la longévité des BPR et corrélativement la meilleure stratégie de maintenance de la composante réactive. Le besoin d'acquérir des données fiables sur les barrières existantes et de les analyser sont réels. Les incertitudes sur le comportement à long terme, en particulier sur les problèmes de colmatage, ne remettent pas en cause l'intérêt de la technologie BPR et ne doivent pas être à frein à sa mise en œuvre.

Le nombre de réalisations européennes d'échelle pilote ou industrielle est évalué à 35, soit un nombre significatif. Un des points faibles à l'échelle européenne par rapport à l'Amérique du Nord est sans aucun doute un niveau insuffisant de communication et d'échange. Les conséquences principales sont un manque d'information de l'ensemble des acteurs (gestionnaires de sites, prescripteurs, maîtres d'ouvrages, autorités réglementaires,...) qui méconnaissent cette technique et une mauvaise rationalisation des efforts de R&D. La mise en réseau des connaissances et des expériences serait un élément important de promotion de l'approche BPR, en particulier en France qui accuse un « retard » en terme de nombre de réalisations par rapport aux pays d'Europe du Nord (en particulier, l'Allemagne).

Nous venons de rappeler que la technologie BPR a été développée pour traiter sur le *long terme* des *panaches de pollution*. Cette technique ne cesse d'évoluer. Les tendances actuelles montrent que les notions de *long terme* et de traitement de *panache* doivent être modulées.

La technologie BPR a été conçue pour traiter des panaches de polluants dissous sans action directe sur la zone source. L'évolution actuelle est d'élargir le concept de traitement passif *in situ* en y intégrant le traitement des sources. Cette évolution apparaît très clairement en Amérique du Nord avec l'émergence des techniques de malaxage en profondeur (deep soil mixing) et d'injection directe du principe réactif (solution de fer colloïdal, émulsions,...). Ces techniques agissent directement sur la zone source. La mise en œuvre d'une BPR peut également être envisagée comme une mesure intermédiaire (< 10 ans) de protection des ressources hydrauliques dans le cadre d'une opération de réhabilitation de site pollué induisant un risque de remobilisation des polluants.

Bibliographie

Bayer P., Bürger C., Finkel M. et al (2002) - Technical and economic comparison between funnel-and-gate and pump-and-treat systems : an example for contaminant removal through sorption. In : *Simon F.G., Meggyes T., McDonald C. (2002) - Advanced groundwater remediation. Active and passive technologies. Thomas Telford Publishing, London, UK*

Carey M.A., Fretwell B.A., Mosley N.G. et al. (2002) - Guidance on the use of permeable reactive barriers for remediating contaminated groundwater. *UK Environment Agency. National Groundwater & Contaminated Land Center report. NC/01/51.*

Ferguson C.C., Darmendrail D. (1999) - Evaluation des risques issus des sites pollués : réglementations et pratiques dans 16 Pays Européens. Document CLARINET - MEDD - BRGM. Disponible sur <http://www.fasp.info> (*version française de : Assessing Risks from Contaminated Sites: Policy and Practice in 16 European Countries, Colin C Ferguson, Land Contamination & Reclamation, 7 (2), 1999 EPP Publications*).

Gavaskar A., Gupta N., Sass B. et al. (2000) - Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation. *BATTELLE pour l'U.S. Air Force.*

ITRC (1999) - Regulatory guidance for permeable reactive barriers designed to remediate inorganic and radionuclide contamination. ITRC/PRB-3

Johnson T.L., Scherer M.M., Tratnyek P.G. (1996) - Kinetics of halogenated organic compound degradation by iron metal. *Environmental Science and Technology* Vol. 30, p. 2634–2640.

Naftz D.L., Morrison S.J., Davis J.A. et al. (2002) - Handbook of Groundwater Remediation Using Permeable Reactive Barriers, Applications to Radionuclides, Trace Metals and nutrients. *Academic Press.*

Powell, R.M., Blowes, D.W., Gillham R.W. et al (1998) - Permeable Reactive Barrier Technologies for contaminant Remediation. EPA/600/R-98/125.

Richardson J.P., Nicklow J.W. (2002) - *In Situ* Permeable reactive Barriers for Groundwater Contamination. *Soil and Sediment Contamination*, 11(2), p. 241-268.

Roger N. Richard J.Y. (2003) - Traitement des solvants chlorés dans les nappes phréatiques : nouveaux procédés. *N°260 L'eau, l'industrie, les nuisances* p. 25-29

RTDF (2003) Summary of the remediation technologies development forum permeable reactive barriers action team meeting. RTDF meeting. Disponible sur : <http://rtdf.org/public/permbarr/minutes/101603/index.htm>

Simon F.G., Meggyes T. (2000) - Removal of organic and inorganic pollutants from groundwater using permeable reactive barriers. *Land contamination & reclamation*, Vol. 8, Issue 2, p. 103-116.

Simon F.G., Meggyes T., McDonald C. (2002) - Advanced groundwater remediation. Active and passive technologies. *Thomas Telford Publishing, London, UK*

USEPA (1999) - Field applications of *in situ* remediation technologies: Permeable Reactive Barriers. EPA/542/R-99/002

USEPA (2002a) - Economic analysis of the implementation of permeable reactive barriers for remediation of contaminated groundwater. EPA/600/R-02/034

USEPA (2002b) - Federal Remediation Technologies Roundtable : Evaluation of permeable reactive barrier performance. EPA/542/R-04/004

Ferguson C.C., Darmendrail D. (1999) - Evaluation des risques issus des sites pollués : réglementations et pratiques dans 16 Pays Européens. Document CLARINET - MEDD - BRGM. Disponible sur <http://www.fasp.info> (*version française de : Assessing Risks from Contaminated Sites: Policy and Practice in 16 European Countries, Colin C Ferguson, Land Contamination & Reclamation, 7 (2), 1999 EPP Publications*).

Annexe 1

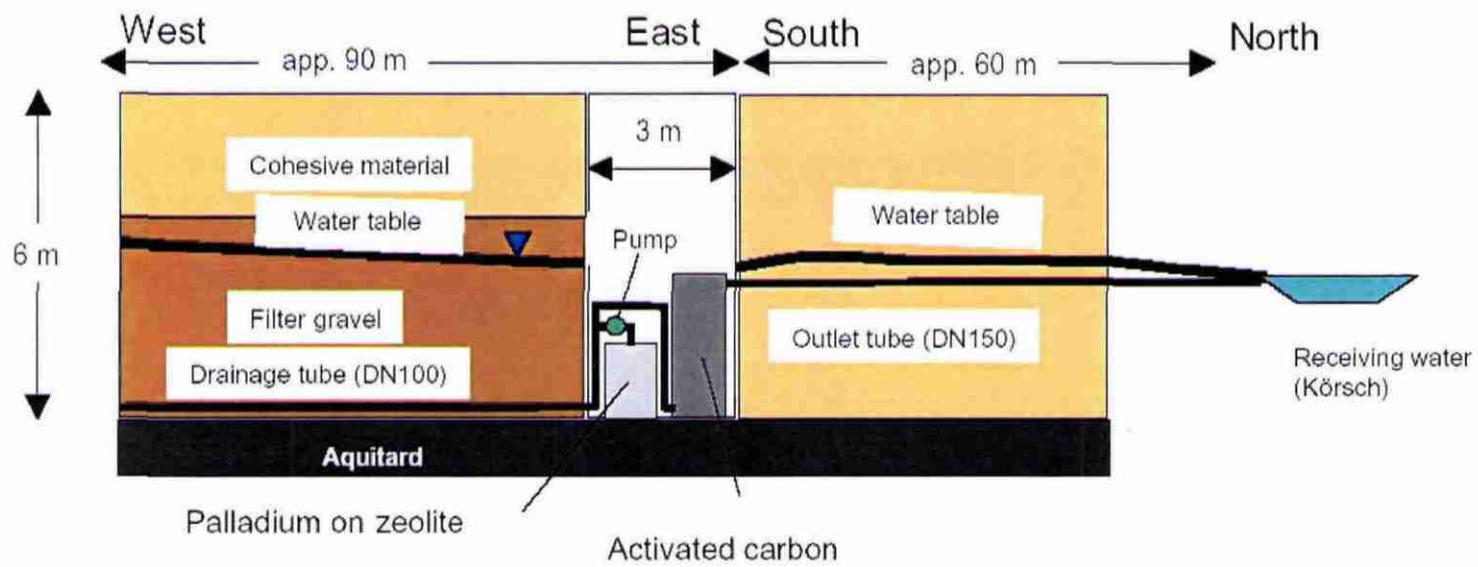
Fiches de renseignement sur les réalisations européennes

Site	Ville	Etat
Site industriel	Denkendorf	Allemagne
Site industriel, Industrie automobile	Edenkoben	Allemagne
Ancienne cokerie	Karlsruhe	Allemagne
Site industriel	Oberursel	Allemagne
Site industriel, (traitement de goudrons)	Offenbach	Allemagne
Usine de traitement de métaux	Reichenbach	Allemagne
Ancien site de nettoyage à sec	Rheine	Allemagne
Site BEKA, (ancien site industriel)	Tübingen	Allemagne
Ancien site industriel (traitement de goudrons)	Brunn am Gebirge	Autriche
Atelier de réparation de trains	Copenhague	Danemark
Galvanoplastie	Kolding, site Haardkrom	Danemark
Usine pétrochimique, recyclage solvants	Sonderso, Vakopon	Danemark
Site industriel, électronique avec stockage solvants	Monkstown, Belfast	Irlande Nord
Site industriel		Belgique
Autoroute A22, Remblais autoroutier	Neuville en F.	France (59)
Cokerie d'Auby – CDF	Auby	France (59)
Lagune de déballastage	Brest	France (29)
Clipper Oil	LLiça de vall., Catalogne	Espagne
Usine Solva Chemie, retraitement solvants	Bätterkinden	Suisse (BE)

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Dekendorf (proche Stuttgart)		
Pays	Allemagne		
Echelle	Full scale pour réacteur charbon actif ; pilote traitabilité pour réacteur Zéolite + palladium		
Maître d'ouvrage	IMES GmbH (applicant) + collaboration Université Tuebingen + GeoRisk Ingenieur GmbH		
Maître d'œuvre			
Entreprise générale			
Autorité réglementaire			
Type de barrière	Drain and gate	1. tube drainant amont : gravier, 90 m de long et 100 mm de diam., collecte le flux et le dirige vers réacteur charbon actif 2. Réacteur CA au sein d'un puits de 6 m de prof. et 3 m de diam. 3. tube drainant aval (150 mm diam.) rejetant eau dans rivière Körsch	
Contaminant(s)	solvants chlorés (TCE, PCE, cDCE, 111TCA, VC résultant dégradation bio de PCE/TCE)		
Type d'activité	actuellement zone commerciale		
Réactif(s)	Charbon actif	+ by pass vers réacteur pilote Rubis avec Zéolite + palladium (0.5 %)	
Superficie du site		m2	
Volume sol pollué		m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	
Durée de travaux de construction		mois	
Date de mise en fonctionnement	août 2001 pour système filtre charbon actif + sept 2002 pour réacteur pilote Zéolite + Pd		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR			
Autres solutions techniques envisagées			
Ces autres solutions ont elles été chiffrées			
Géologie			
Perméabilité du site		m/s	gradient de 2%
Profondeur aquitard		m	
Profondeur nappe		m	
Modélisation hydrogéologique du site			
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site			

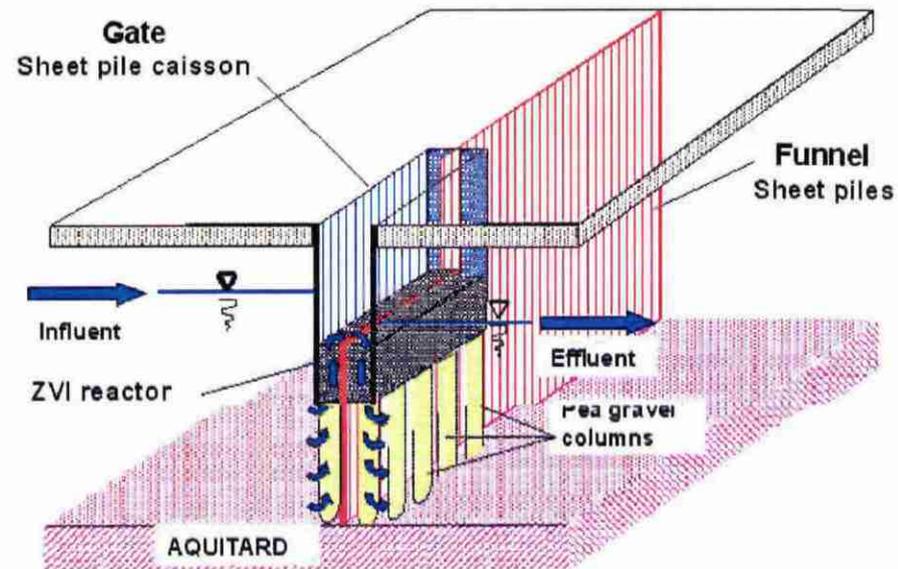
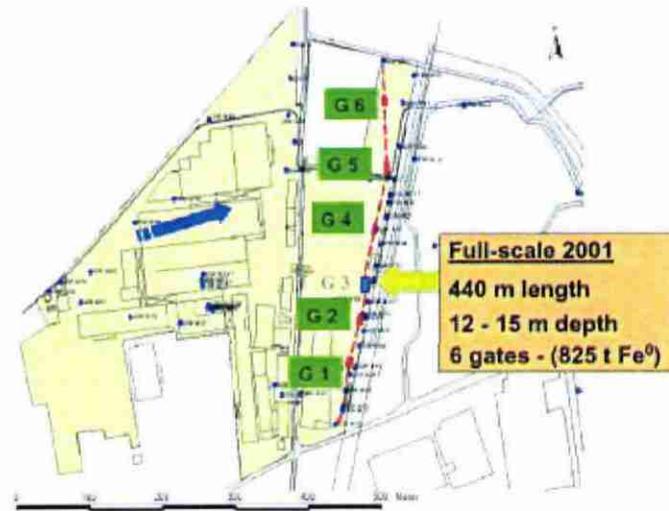
Longeur écran		m	Pas d'écran (cf Drain and gate)
Profondeur écran		m	
Superficie écran		m2	
Technique de mise en place écran			
Massif drainant amont			système Drain & Gate
Massif drainant aval			
Masse totale de réactif		t	
Volume total des zones réactives		m3	
Nombre de portes			
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte			
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m3/jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière	Concentration totale en cVOCs : 200 mg/l maxi sur hot spot ; en moyenne 30 mg/l Eau très dure (présence de carbonate) + sulfate (200 mg/L)		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière			
Concentration seuil réglementaire			
Mise en place d'un monitoring			
Fréquence des analyses de contrôle		mois	
Fréquence des opérations de maintenance		mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour			
Coût total des investissements	120 000	€	Coût du pilote RUBIN avec réacteur Zéolite + Pd
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance		€/an	

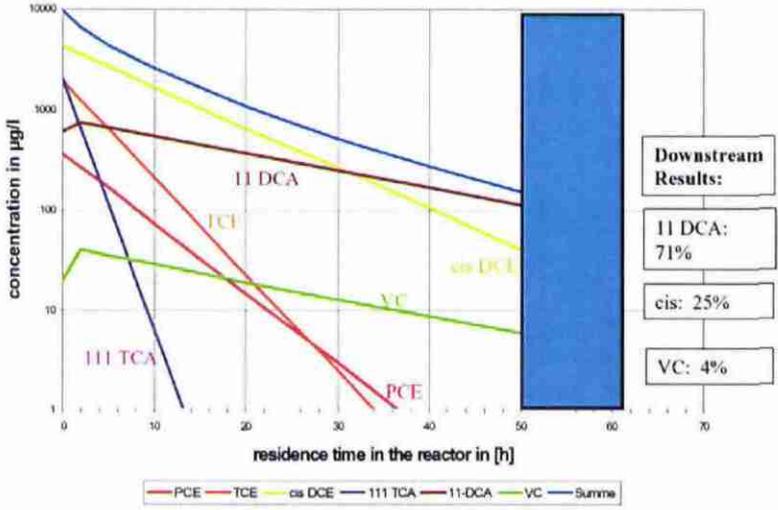
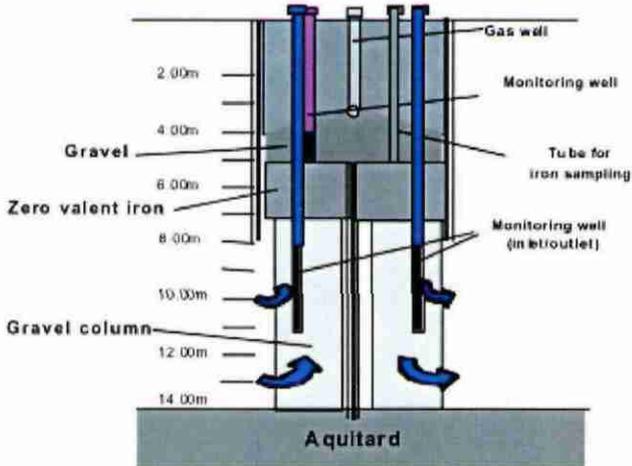


Ville/site	Edenkoben		
Pays	Allemagne		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage			
Maître d'œuvre	Peschla & Rochmes GmbH		
Entreprise générale			
Autorité réglementaire			
Type de barrière	Funnel & Gate avec écoulement vertical ascendant (1ère chambre) et descendant (2ème chambre)		
Contaminant(s)	Solvants chlorés identifiés en 1994 (20% TCE + 50% CisDCE + 30% 1,1,1TCA) au moins trois panaches identifiés avec chevauchement partiel		
Type d'activité	Utilisation historique de solvants chlorés sur site industrie automobile		
Réactif(s)	Fe0 (ETI)		
Superficie du site		m2	
Volume sol pollué		m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	Tests labo colonne + modélisation hydro. + pilote 1998
Durée de travaux de construction	6	mois	(automne/hiver 2000)
Date de mise en fonctionnement	février 2001		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	Pollution très étendue. Protection des propriétés à l'aval du site.		
Autres solutions techniques envisagées	Soil vapor extraction et traitement hydraulique des points chauds. Essais non concluants		
Ces autres solutions ont-elles été chiffrées			
Géologie	Fortement hétérogène 2 aquifères. Seul le supérieur est contaminé. Il est divisé en 2 niveaux très perméables séparés par niveau silteux		
Perméabilité du site	1.4 10 ⁻⁴ à 10 ⁻⁶	m/s	
Profondeur aquitard	14	m	
Profondeur nappe		m	
Modélisation hydrogéologique du site	oui		
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site	Pilote de 6 mois sur site en 1998		

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longeur écran	440	m	
Profondeur écran	14	m	
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran	mur de palplanches		
Massif drainant amont	non		
Massif drainant aval	non		
Masse totale de réactif	825	t	
Volume total des zones réactives		m ³	
Nombre de portes	6		caisson (sheet pile) : 10 m de long, 1.25 m de large
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte	2		2 chambres séparées par palplanche (
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière	concentration maxi de 8000 µg/l dans plume sud et 20 000 µg/l dans plume médiane		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière			
Concentration seuil réglementaire			
Mise en place d'un monitoring	oui		piezo de contrôle amont, réacteur, aval
Fréquence des analyses de contrôle		mois	
Fréquence des opérations de maintenance		mois	accessibilité au média réactif pour maintenance
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour			
Coût total des investissements	350 000	€	pilote 1998
	1 750 000	€	full scale 2001
			Financement majoritairement privé par propriétaire site
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance		€/an	

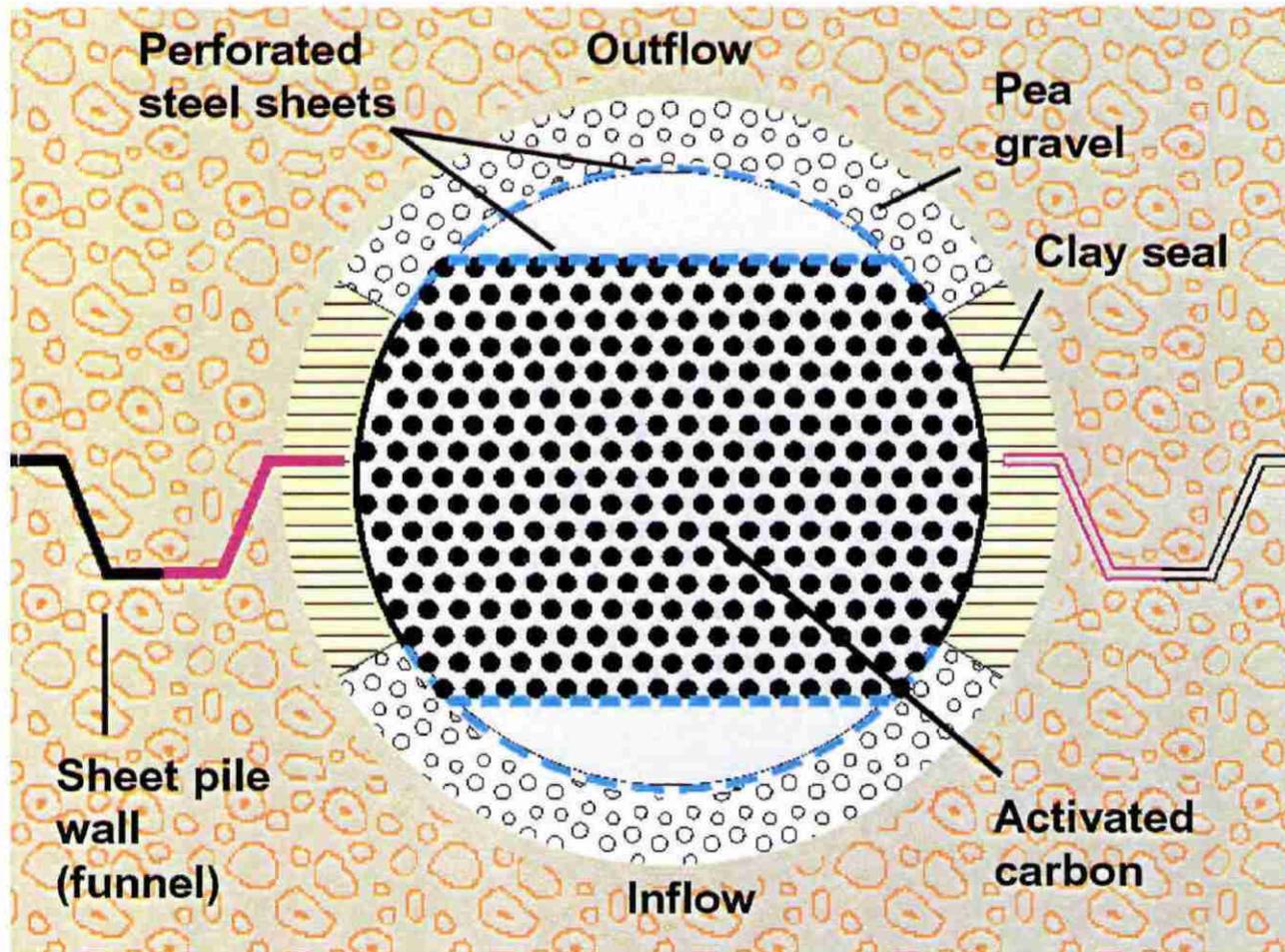




Ville/site	Karlsruhe		
Pays	Allemagne		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage			
Maître d'œuvre			
Entreprise générale			
Collaboration			
Autorité réglementaire			
Type de barrière	Funnel and Gate (barrière linéaire)		
Contaminant(s)	HAP (acenaphtène) Cmax 600 µg/L ; BTEX (benzene 20 µg/L) + Chlorure de Vinyl (100 µg/L)		
Type d'activité	Cokerie avec production gaz, coke, goudrons, benzene et sulfate d'ammonium		
Réactif(s)	Charbon actif (+ 1 porte dédiée à étude de la dégradation du chlorure de vinyl par UV)		
Superficie du site	100 000	m2	large plume de HAP (200 x 400 m) se déplaçant vers Karlsruhe
Volume sol pollué		m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	investigation avec étude géophysique, hydraulique et modélisation + essais colonne
Durée de travaux de construction		mois	
Date de mise en fonctionnement	janv. 2001		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR			
Autres solutions techniques envisagées	P&T, stabilisation in situ, traitement thermique		
Ces autres solutions ont elles été chiffrées	oui		
Géologie	Gravillons sableux (vallée du Rhin)		
Perméabilité du site		m/s	
Profondeur aquitard	16	m	argile
Profondeur nappe	4	m	
Modélisation hydrogéologique du site	oui avec SGSIM (exploitation des données de pompage). Aide dimensionnement BPR		
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site			

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longueur écran	240	m	
Profondeur écran	17	m	
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran	Palplanches (mise en place par pressage pour limiter vibrations p/r habitations et pipeline)		
Massif drainant amont			
Massif drainant aval			
Masse totale de réactif	150	t	
Volume total des zones réactives		m ³	
Nombre de portes	8		Portes équidistantes. Tubes aciers métalliques perforés (diam 1.8 m) Ancrage de 0.5 m dans aquitard Massifs drainants amont et aval pour homogénéiser l'écoulement Portes couvertes pour maintien conditions anaérobies
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte			
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	850	m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière			
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière			
Concentration seuil réglementaire			
Mise en place d'un monitoring	oui		piézo à l'amont et aval de chaque barrière
Fréquence des analyses de contrôle		mois	
Fréquence des opérations de maintenance		mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif	60 - 180	mois	Prévisions avec modélisation
Durée prévisionnelle de fonctionnement	50	ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour			Attente des premiers résultats début 2002
Coût total des investissements	4 000 000	€	3.5 millions € par état fédéral Baden-Württemberg
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance	2 000 000	€/an	changement charbon actif + monitoring



Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Oberursel	
Pays	Allemagne	
Echelle	Full scale	
Maître d'ouvrage	Bostik Oberursel GmbH (Filiale TFE)	
Maître d'œuvre	Arcadis Consult GmbH	
Entreprise générale		
Autorité réglementaire		
Type de barrière	Funnel & Gate (Forme en L). Porte localisée à l'angle	
Contaminant(s)	Solvants chlorés	
Type d'activité		
Réactif(s)	Fe0 (ETI)	
Superficie du site		m2
Volume sol pollué		m3
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois
Durée de travaux de construction		mois
Date de mise en fonctionnement	janv 2002	
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR		
Autres solutions techniques envisagées		
Ces autres solutions ont elles été chiffrées		
Géologie		
Perméabilité du site		m/s
Profondeur aquitard		m
Profondeur nappe		m
Modélisation hydrogéologique du site		
Modélisation géochimique du site		
Réalisation d'un essai pilote sur site		

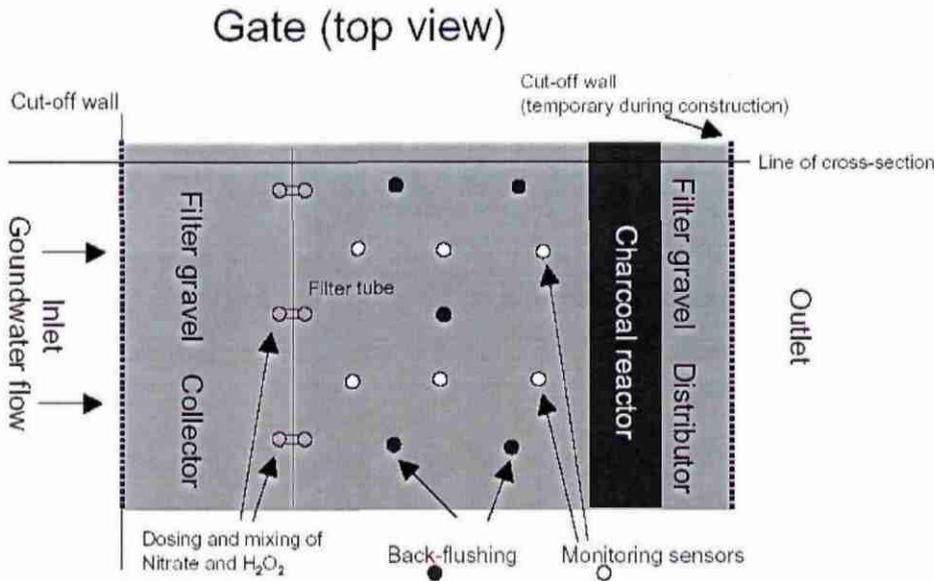
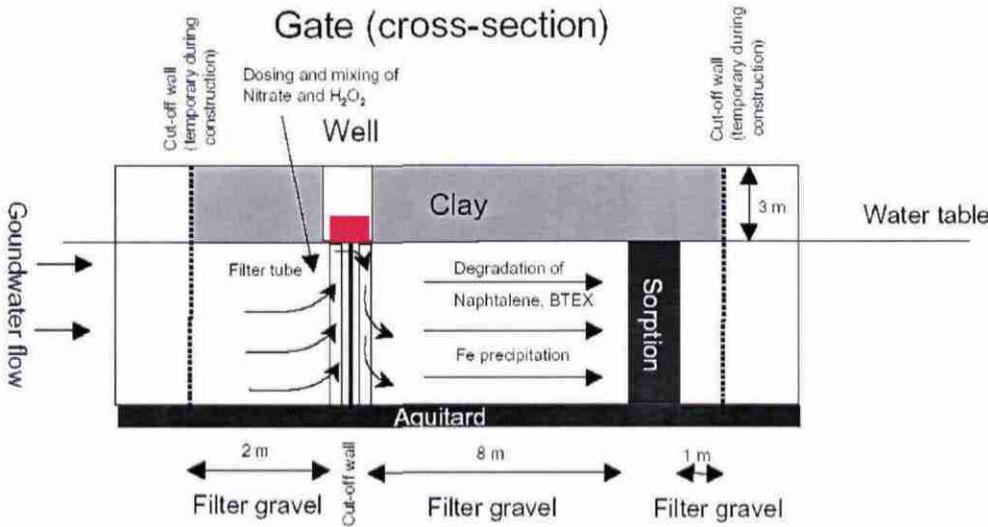
Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longueur écran	175	m	épaisseur écran de 0.6 m
Profondeur écran	4 à 19	m	
Superficie écran	2 400	m ²	
Technique de mise en place écran	paroi couli		
Massif drainant amont	oui	béton perméable à l'eau	
Massif drainant aval	oui		
Masse totale de réactif	310	t	granules de 1 à 1.6 mm de diamètre
Volume total des zones réactives	69	m ³	
Nombre de portes	1	Porte circulaire de 3.3 m de diamètre et 13 de profondeur Réacteur vertical formé de trois sections 1) gravillons à la périphérie pour zone d'alimentation et sortie réacteur 2) cœur du réacteur avec réactif (13 x 1.3 x 3.3 m). Alim horizontale	
Masse de réactif par porte	310 000	Kg	
Nombre de réacteurs par porte	1		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)			m ³ /jour
Concentration en polluant avant mise en place barrière			
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière			
Concentration seuil réglementaire			
Mise en place d'un monitoring			
Fréquence des analyses de contrôle			mois
Fréquence des opérations de maintenance			mois pas d'information sur performances
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif			mois
Durée prévisionnelle de fonctionnement			ans
Garantie			ans
Types de problèmes rencontrés à ce jour			
Coût total des investissements			€
. dont caractérisation site + études			€
. dont construction barrière			€
. dont coût réactif			€
Coût maintenance			€/an

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Offenbach		
Pays	Allemagne		
Echelle	Full scale, projet en cours de conception		
Maître d'ouvrage			
Maître d'œuvre			
Entreprise générale			
Collaboration			
Autorité réglementaire			
Type de barrière	Funnel & Gate		
Contaminant(s)	HAP (naphtalène, acénaphène), BTEX (benzene) dominants + phénols Présence de poches de goudrons purs BTEX (110 000 mg/L) dont benzene (4 000 mg/L) HAP (13 000 mg/L) dont naphtalène (12 000 mg/L) ; phénols (11 mg/L)		
Type d'activité	Usine de traitement de goudrons		
Réactif(s)	Dégradation microbiologique suivi d'un filtre à charbon actif pour HAP non biodégradable		
Superficie du site		m ²	
Volume sol pollué		m ³	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	
Durée de travaux de construction		mois	démarrage opération en août 2002
Date de mise en fonctionnement	Prévision 2003		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR			
Autres solutions techniques envisagées			
Ces autres solutions ont elles été chiffrées			
Géologie			
Perméabilité du site		m/s	
Profondeur aquitard		m	
Profondeur nappe	3	m	
Modélisation hydrogéologique du site			
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site			

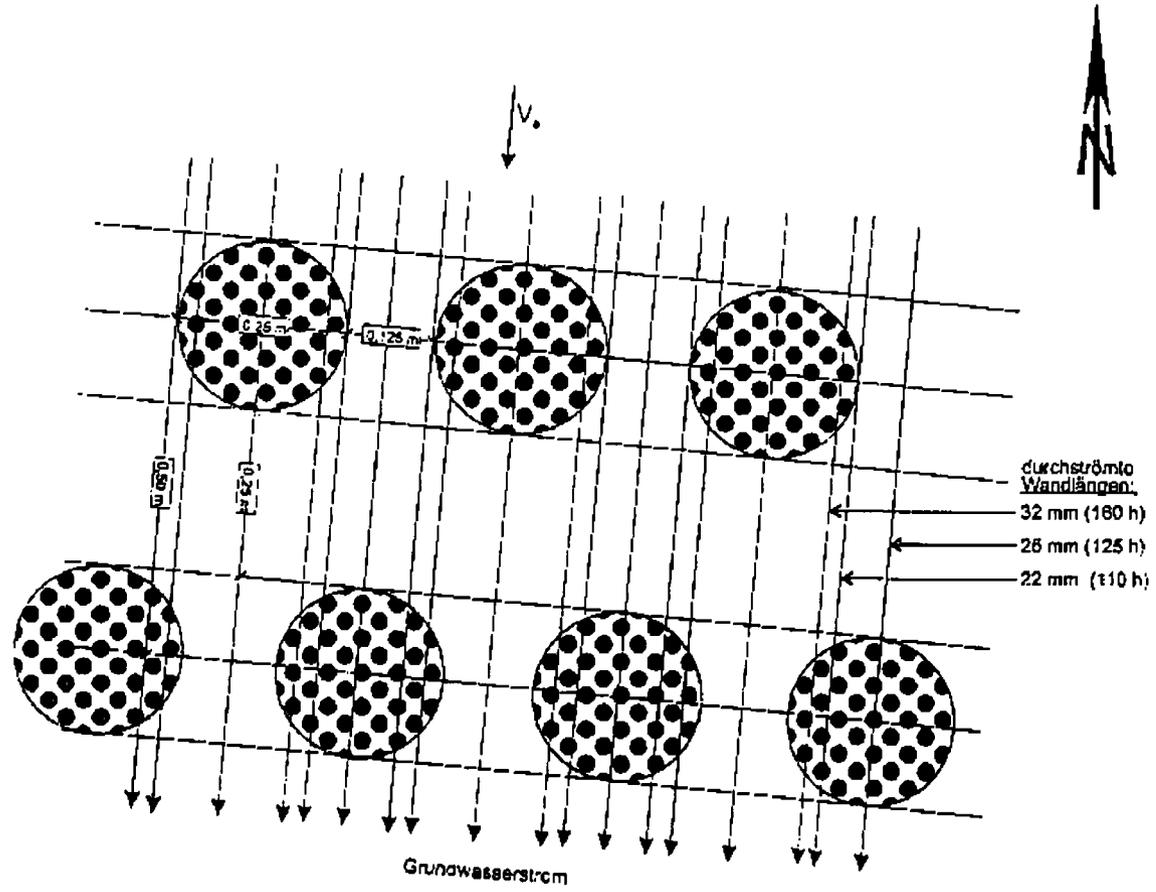
Longueur écran	120	m	
Profondeur écran		m	
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran			
Massif drainant amont			
Massif drainant aval			
Masse totale de réactif		t	
Volume total des zones réactives		m ³	
Nombre de portes	1		Longueur x épaisseur du réacteur : 10m x 10m. Massif de gravillon amont collecteur (2 m d'ép.) + écran palplanche interceptant la nappe et permettant de créer charge hydraulique. Tubes filtrant à l'arrière et avant de l'écran ; injection des donneur d'e ⁻ au sein des tubes. Puis écoulement au sein d'un massif de gravillons (ép. 8m ; temps de séjour 1.5 j) où réaction de dégradation microbio.. Au sein réacteur, équipements pour monitoring et décolmatage si besoin ultérieur. Dernière étape : filtre à charbon actif pour HAP récalcitrants.
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte			
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière			
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière			
Concentration seuil réglementaire			
Mise en place d'un monitoring			
Fréquence des analyses de contrôle		mois	
Fréquence des opérations de maintenance		mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour			
Coût total des investissements		€	
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance		€/an	



Ville/site	Reichenbach (10 km Stuttgart)	
Pays	Allemagne	
Echelle	Full scale	
Maître d'ouvrage		
Maître d'œuvre		
Entreprise générale		
Collaboration		
Autorité réglementaire		
Type de barrière	Variante de tranchée continue formée par deux rangées (perpendiculaires à écoulement) de forages (diam 0.25 m) non chevauchant. Forages remplis de charbon actif entre 4 et 7 mètres de profondeur	
Contaminant(s)	Solvants chlorés (concentration moyenne 0.5 mg/L). Panache faible extension (12 m large) et homogène. Pollution détectée au milieu années 90	
Type d'activité	Usine traitement de métaux, atelier de distillation du PCE.	
Réactif(s)	charbon actif (barrière basée sur adsorption). CA acide pour compenser eau très dure	
Superficie du site		m ²
Volume sol pollué		m ³
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois
Durée de travaux de construction		mois
Date de mise en fonctionnement	janvier 2000	
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR		
Autres solutions techniques envisagées	Pump and treat. Les calculs montrent que la technique BPR devient plus économique que P&T après 6 ans de fonctionnement (seuil de rentabilité)	
Ces autres solutions ont elles été chiffrées		
Géologie	1-3 m silt, 3-7m gravillons. Aquifère dans couche de gravillons	
Perméabilité du site	1. 10 ⁻⁵	m/s
Profondeur aquitard		m
Profondeur nappe	4	m
Modélisation hydrogéologique du site		
Modélisation géochimique du site		
Réalisation d'un essai pilote sur site		

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

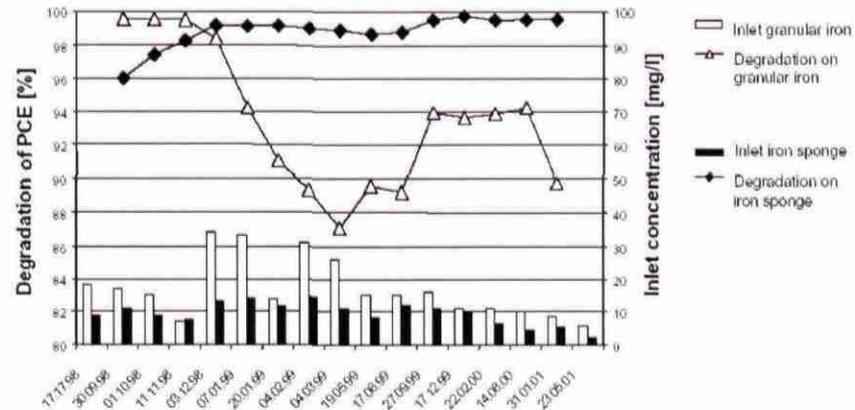
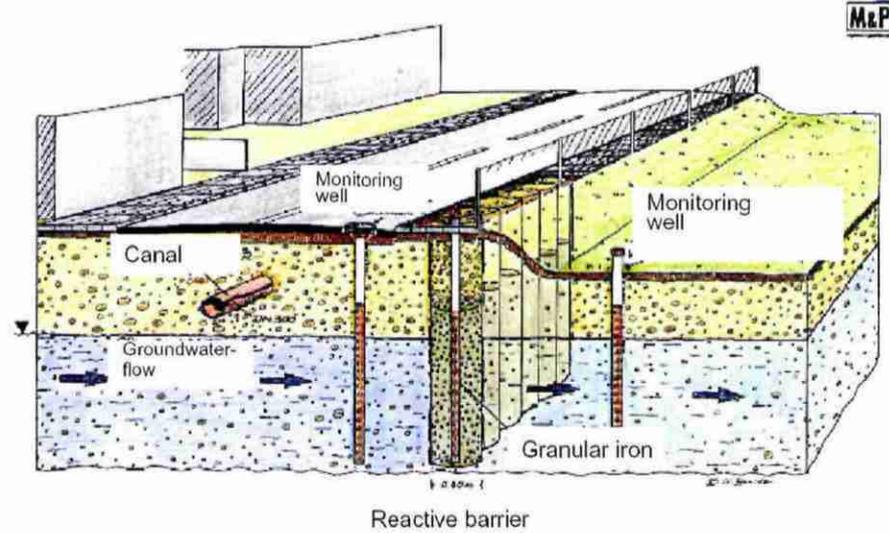
Longeur écran	20	m	construction au sein d'une halle de fabrication
Profondeur écran	7	m	épaisseur comprise entre 0.22 et 0.32 m selon
Superficie écran		m2	
Technique de mise en place écran	Utilisation de caisson cylindrique : enfoncement, excavation matériau, remplissage CA.		
Massif drainant amont			
Massif drainant aval			
Masse totale de réactif		t	temps de séjour dans zone réactive : 110 à 160 h
Volume total des zones réactives		m3	
Nombre de portes			
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte			
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m3/jour	vélocité nappe : 0.002 m/h
Concentration en polluant avant mise en place barrière	0.11 à 0.22	mg/l	
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	0.03 dans puits aval BK2 et 0.008 à 0.02 mg/l dans puits aval BK3 (oct 2000 à jan 2002)		
Concentration seuil réglementaire	0.01	mg/l	
Mise en place d'un monitoring	oui		1 puits amont, 2 puits dans barrière, 2 puits aval
Fréquence des analyses de contrôle		mois	
Fréquence des opérations de maintenance		mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement	10	ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	concentration élevé en Solvant chloré en bordure interne de barrière		
Coût total des investissements	120 000	€	
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière	55 000	€	
. dont coût réactif	25 000	€	
Coût maintenance		€/an	



Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Rheine	
Pays	Allemagne	
Echelle	Pilote : suivi des performances à long terme d'une barrière Fe0 dans projet Rubin. Comprend carottage des médias réactifs + modélisation des écoulements Première réalisation allemande en tranchée continue	
Maître d'ouvrage		
Maître d'œuvre	Mull und Partner GmbH (bureau d'étude)	
Entreprise générale	Bauer und Mourik Umwelt-techni GmbH	
Collaboration	Technical University of Berlin, University of Kiel	
Autorité réglementaire		
Type de barrière	Tranchée continue, 400 m à l'aval hydraulique de l'usine Implantation de la barrière au milieu du panache de pollution	
Contaminant(s)	Solvants chlorés (PCE : 20000 µg/l max ; cDCE : 500 µg/l max, TCE) Plume de 500 m de long et 250 m de large	
Type d'activité	Ancien site de nettoyage à sec. Actuellement zone résidentielle (construction années 80)	
Réactif(s)	2 variétés de Fe0	
Superficie du site		m2
Volume sol pollué		m3
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois
Durée de travaux de construction		mois
Date de mise en fonctionnement	juin 1998	
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	Etude pilote pour acquérir données sur faisabilité et performance à long terme	
Autres solutions techniques envisagées	Actuellement Pump & Treat opérationnel dans zone d'habitation	
Ces autres solutions ont elles été chiffrées		
Géologie	sable avec composante organique	
Perméabilité du site	1 10-5	m/s
Profondeur aquitard	10	m
Profondeur nappe	3	m
Modélisation hydrogéologique du site	oui	
Modélisation géochimique du site		
Réalisation d'un essai pilote sur site		

Longeur écran	22.5	m	(0.6 à 0.9 m d'épaisseur)
Profondeur écran	6	m	
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran	forages circulaires de 0.9 m de diam. se chevauchant Enfoncement de caisson métallique circulaire, excavation sol, Remplissage par matériau réactif en partie inférieure, puis sol décantaminé au dessus nappe		
Massif drainant amont	non		
Massif drainant aval	non		
Masse totale de réactif	69	t	(34.5 t de fer granulaire + 34.5 t de gravier ; écran de 10 m)
	85.000	t	(85 t d'éponge de fer, additif sidérurgie ; écran de 12.5 m) séparation de deux secteurs par forage rempli de béton
Volume total des zones réactives		m ³	
Nombre de portes	0		
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte			
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière	17000 et 14500 µg/l de PCE à l'amont zones fer granulaire et éponge de fer respectivement		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	33 µg/ et 400 µg/l de PCE respectivement (valeurs observées qqes mètres aval barrière, au delà les concentrations à nouveau) Faible quantité de métabolites type DCE Emission H ₂ après mise en place BPR, puis réduction en sulfures) Faible concentration Fe et Mn dans BPR et aval		
Concentration seuil réglementaire	10 µg/L		
Mise en place d'un monitoring	oui	puits de contrôle amont, barrière et aval + drainage gaz	
Fréquence des analyses de contrôle	1	mois	(depuis sept. 1998)
Fréquence des opérations de maintenance		mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Performance constante dans section avec éponge de fer (99% de dégradation depuis 1998) Dégradation performance dans section avec fer granulaire (90% de dégradation) Due à contamination par PCE de l'aquitard crétacé qui est partiellement poreux Transfert d'eau contaminée sous la barrière.		
Coût total des investissements	170 000	€	inclus 14 000 € de monitoring + 25 000 € de mesure gaz
. dont caractérisation site + études	32 000	€	
. dont construction barrière	95 000	€	inclus coût réactif
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance		€/an	



Validation of the PRB performance in Rheine over appr. 3 years (comparing PCE degradation in %, dark rhomboid dots = iron sponge, white triangular dots = granular iron, bars showing upgradient PCE concentration [mg/l], dark bars = iron sponge, white bars = granular iron) courtesy Mull und Partner Ingenieur-Gesellschaft mbH, Dr.-Ing. Möller, Dr. Wegner

Ville/site	Tübingen, site BEKA		
Pays	Allemagne		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage	Financement Hornbach Baumarkt AG + Etat Baden-Württemberg		
Maître d'œuvre			
Entreprise générale			
Autorité réglementaire			
Type de barrière	Funnel and gate		
Contaminant(s)	Solvants chlorés cVOCs (TCE, cis-DCE, VC avec T1/2 = 1.5, 3.5 et 5 h)		
Type d'activité	ancien site industriel		
Réactif(s)	Fe0	licence ETI, IMES GmbH	
Superficie du site		m2	
Volume sol pollué		m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	tests labo colonne pour dimensionnement
Durée de travaux de construction	2.5	mois	
Date de mise en fonctionnement	oct. 1998		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR			
Autres solutions techniques envisagées	P&T : échec (dissolution permanente/continue cVOCs à partir zone imperméable)		
Ces autres solutions ont elles été chiffrées			
Géologie	gravier silteux		
Perméabilité du site	1 10 ⁻⁵ à 1 10 ⁻³	m/s	gradient de 0.17%
Profondeur aquitard	10	m	
Profondeur nappe	3	m	
Modélisation hydrogéologique du site	oui		
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site	non		

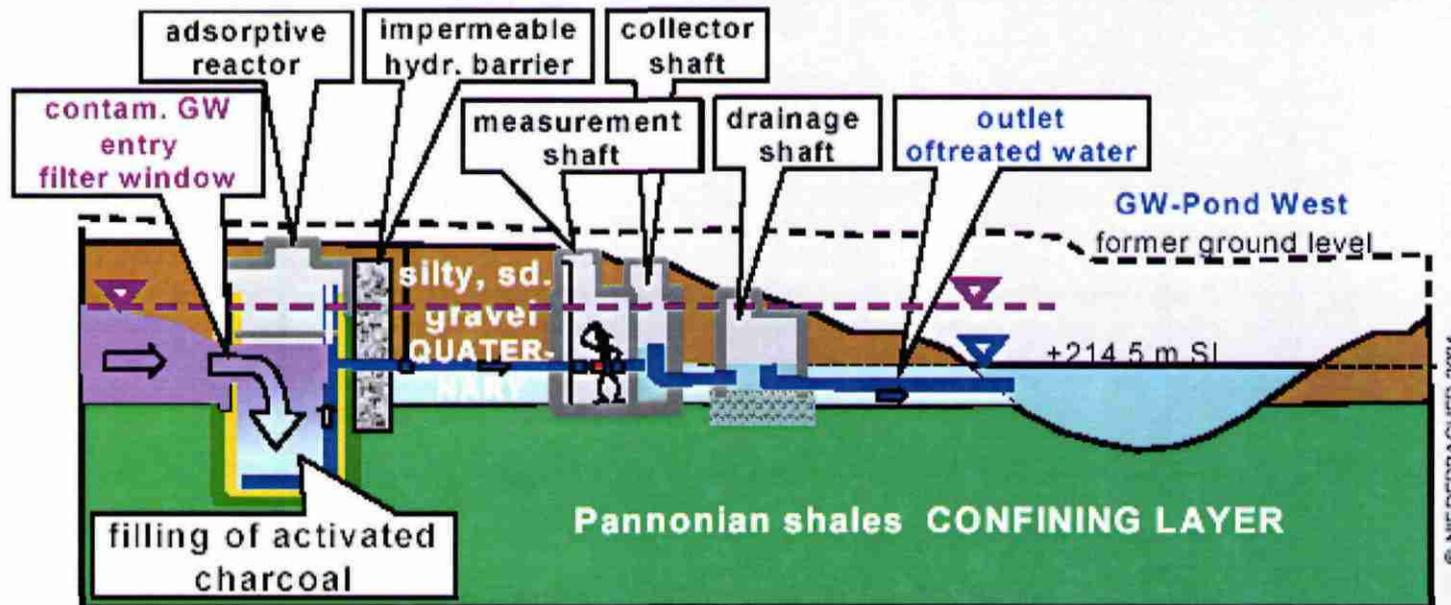
Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longueur écran	215	m	Forme en L
Profondeur écran	8 à 11	m	épaisseur de 0.6 m
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran	Slurry wall		
Massif drainant amont	oui	gravillon grenu (mise en place par forages chevauchant - Ø 90 cm)	
Massif drainant aval	oui	gravillon grenu (mise en place par forages chevauchant - Ø 90 cm)	
Masse totale de réactif	275	t	
Volume total des zones réactives		m ³	(longueur totale : 15 m)
Nombre de portes	3	(5 m long ; 0.6 à 1.6 m d'ép.) , (construct° par forages chevauchant)	
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte	1		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	30	m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière	260 µg/L cVOCs	(porte 1)	
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	< 10 µg/L cVOCs	O ₂ et Eh	
Concentration seuil réglementaire	< 10 µg/L cVOCs		
Mise en place d'un monitoring	oui	Suivi des performances 2002 à 2004 (Univ. Kiel, Rubin) piezos amont BPR, dans réacteurs et aval BPR	
Fréquence des analyses de contrôle	1	mois	(polluants, T, pH, Eh, O ₂ , cond.)
Fréquence des opérations de maintenance		mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	légère augmentat° conc. cVOCs à l'aval p/r au cœur du réacteur (désorpt°, fuite) précipitation de carbonate Ca, Mg et Fe dans zone réactive sans altération observée des performances hydrauliques		
Coût total des investissements		€	
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance		€/an	

Ville/site	Brunn am Gebirge (proximité Vienne), inclus dans projet PEREBAR		
Pays	Autriche		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage			
Maître d'œuvre			
Entreprise générale			
Collaboration			
Autorité réglementaire			
Type de barrière	Réacteur d'adsorption combiné avec barrière hydraulique (Adsorptive Reactor and Barrier, AR & B). Ecoulement des eaux traitées vers bassin artificiel.		
Contaminant(s)	HAP (8.6 mg/L), phénol (0.34 mg/L), BTEX (benzene 29 µg/L, toluène 50 µg/L), HC (6.6 mg/L), solvants chlorés (TCE 0.8 µg/L, cDCE 27 µg/L). Contamination ZNS et ZS		
Type d'activité	Usine de traitement de goudron et production de linoléum. Maintenant parc d'activités.		
Réactif(s)	Charbon actif		
Superficie du site	60 000	m ²	zone contaminée de 35 000 m ²
Volume sol pollué		m ³	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	
Durée de travaux de construction		mois	
Date de mise en fonctionnement	oct 1999		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	Risque environnemental important. Choix du système AR&B car adapté à l'organisation et la géométrie du parc d'activité, opérationnel dans un délai court et beaucoup moins cher que excavation + mise en dépôt (volume de sol trop important)		
Autres solutions techniques envisagées			
Ces autres solutions ont elles été chiffrées			
Géologie	Depuis surface, dépôt anthropique (0 à 2 m ép.), sédiments alluviaux type sable et gravillons (3 à 6 m ép.), schiste (aquitard)		
Perméabilité du site	3. 10 ⁻³ à 1 10 ⁻⁵	m/s	
Profondeur aquitard	3 à 6	m	
Profondeur nappe	2 à 4	m	
Modélisation hydrogéologique du site	oui		
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site	Tests de pompage		

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longueur écran	220	m
Profondeur écran		m
Superficie écran	1 000	m ²
Technique de mise en place écran	Jet grouting	Ecran hydraulique en forme de L. Situé à l'aval des réacteurs. Sépare zone contaminée du bassin artificiel qui collecte les eaux traitées.
Massif drainant amont		
Massif drainant aval		
Masse totale de réactif	23	t
Volume total des zones réactives	40	m ³
Nombre de portes	4 réacteurs	4 puits (2.87 m de diam et 8-9 m de prof.). Unité de filtration en fibres de verre (2 m de diam et 6-8 m de hauteur, ancrée dans les schistes). Alimentation des filtres par fenêtre sous le niveau de la nappe pour éviter pbme d'oxydation. L'eau traitée est collectée à la base des filtres. Elle s'écoule (tuyaux) à travers la barrière vers puits de monitoring et de collecte avec possibilité, à ce stade, de moduler le niveau hydraulique. Ecoulement vers bassin artificiel.
Masse de réactif par porte	5000 à 6000	Kg
Nombre de réacteurs par porte		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	43 à 170	m ³ /jour
Concentration en polluant avant mise en place barrière		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	Traitement efficace avec concentrations conformes aux exigences réglementaires (rapport annuel)	
Concentration seuil réglementaire		
Mise en place d'un monitoring	oui, très exhaustif dans le cadre projet PEREBAR (hydrochimique, échantillonnage des réactifs, hydraulique, tests avec traceurs, etc.).	
Fréquence des analyses de contrôle		mois mensuel, bimensuel ou trimestriel suivant type de mesures
Fréquence des opérations de maintenance		mois
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans
Garantie		ans
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Impact positif : sur le plan hydraulique, a permis de modifier les écoulements en faisant converger l'ensemble de la nappe vers les réacteurs (conforme aux modélisations). Pour l'un des 4 réacteurs, développement microbien important en surface qui a conduit renouvelé la couche concernée. Depuis mise en place d'une couverture de géotextile pour protéger de l'O ₂ ; solution efficace. Observation de précipitation de carbonates sans dégradation de la perméabilité.	
Coût total des investissements	750 000	€
. dont caractérisation site + études	100 000	€
. dont construction barrière	650 000	€
. dont coût réactif		€
Coût maintenance		€/an



Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Copenhague, Copenhagen Freight Yard (site de dépôt de fret)		
Pays	Danemark		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage			
Maître d'œuvre			
Entreprise générale			
Collaboration			
Autorité réglementaire	Danish EPA		
Type de barrière	Tranchée continue		
Contaminant(s)	Solvants chlorés (DCE, PCE, TCE, VC) : concentration totale max de 4000 µg/L dont DCE 3700 µg/L		
Type d'activité	Atelier de réparation des trains, dégraissage		
Réactif(s)	Fe0 (licence ETI)		
Superficie du site		m2	
Volume sol pollué		m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	
Durée de travaux de construction		mois	
Date de mise en fonctionnement	1 998		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR			
Autres solutions techniques envisagées			
Ces autres solutions ont elles été chiffrées			
Géologie	A partir surface : 1 à 2 m de sable ; 2 m argile+tourbe ; 2 à 3 m de sable marin (aquifère sup.) ; 1 à 2 m de till argileux ; 6 m de sable fluvial (aquifère régional)		
Perméabilité du site	6 10-5	m/s	valeur aquifère supérieur. Vitesse 0.1 m/jour
Profondeur aquitard		m	
Profondeur nappe	2.4	m	
Modélisation hydrogéologique du site			
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site			

Longeur écran	15	m	épaisseur 0.9
Profondeur écran	6	m	
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran	Mise en œuvre de palplanches, puis excavation et remplissage par réactif. Le sommet de la barrière est 2.5 m sous la surface et est couverte par géotextile, argile compactée, gravillon puis dallage en surface. BPR mise en place dans zone où concentration totale en chloré > à 100 µg/L		
Massif drainant amont			
Massif drainant aval			
Masse totale de réactif		t	
Volume total des zones réactives		m ³	
Nombre de portes			
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte			
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière			
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	Inférieur au seuil réglementaire (+ de 95% de réduction)		
Concentration seuil réglementaire	< 10 µg/L		
Mise en place d'un monitoring	oui		
Fréquence des analyses de contrôle		mois	
Fréquence des opérations de maintenance		mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	1/5 ème de flux contourne la BPR. Combinaison de facteurs. Localisation non optimale de la barrière (défaut de reconnaissance préliminaire). Dégradation de la conductivité hydraulique de la barrière suite à précipitation d'hydroxydes de fer, carbonates et sulfures de fer. Conductivité barrière a diminué de 5. 10 ⁻⁴ m/s à 1.2 10 ⁻⁵ m/s. Précipitation annuelle de 1000 kg de fe(OH) ₂ , 200 kg de CaCO ₃ , 200 kg de FeCO ₃ et 60 kg de FeS. Problème lié à eau très chargée en inorganiques.		
Coût total des investissements	235 000	\$	
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance		€/an	

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Kolding, site de Haardkrom		
Pays	Danemark		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage			
Maître d'œuvre			
Entreprise générale			
Collaboration			
Autorité réglementaire	Danish EPA		
Type de barrière	Tranchée continue avec dispositif de recirculation des eaux traitées		
Contaminant(s)	Solvants chlorés (TCE : 40 à 1400 µg/L) et CrVI (8 à 110 mg/L)		
Type d'activité	Galvanoplastie		
Réactif(s)	Fe0 (licence ETI)	Les essais de laboratoire montre que 1 à 3 mg CrVI par g de Fe0	
Superficie du site		m2	
Volume sol pollué		m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	
Durée de travaux de construction		mois	
Date de mise en fonctionnement	1 999		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	faible coût et technique disponible au Danemark		
Autres solutions techniques envisagées			
Ces autres solutions ont elles été chiffrées			
Géologie	Formation hétérogène (sable, argile sableuse, etc) de 2 à 5 m d'ép.		
Perméabilité du site		m/s	
Profondeur aquitard		m	
Profondeur nappe	2	m	Aquifère discontinu avec changement direction écoulement suivant saison
Modélisation hydrogéologique du site			
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site			

Longueur écran	45	m	épaisseur 1 m
Profondeur écran	1 à 3	m	
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran	Excavation box		
Massif drainant amont	Réalisation de 3 tranchées amont perpendiculaires à la BPR pour optimiser écoulement au travers d'un aquifère très hétérogène		
Massif drainant aval	Drain collecteur aval. L'eau traitée est recirculée pour améliorer le lessivage des contaminants dans zone contaminée		
Masse totale de réactif	200.000	t	
Volume total des zones réactives		m ³	
Nombre de portes			
Masse de réactif par porte		Kg	
Nombre de réacteurs par porte			
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière			
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière			
Concentration seuil réglementaire			
Mise en place d'un monitoring	réseau de puits/piézo de contrôle (amont, 2 dans barrière, rangée de 10 à l'aval)		
Fréquence des analyses de contrôle	6 à 12	mois	(6 mois pour 2001, puis 12 mois ultérieurement)
Fréquence des opérations de maintenance		mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Barrière inefficace dans partie sud en raison de la distribution très hétérogène des contaminants (en particulier CrVI). Saturation de la capacité de la barrière dans zone à forte contamination CrVI		
Coût total des investissements	358 000	\$	
. dont caractérisation site + études	108 000	\$	
. dont construction barrière	250 000	\$	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance		€/an	

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Sonderso, Vapokon		
Pays	Danemark		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage			
Maître d'œuvre			
Entreprise générale			
Collaboration	licence ETI		
Autorité réglementaire	Danish EPA		
Type de barrière	Funnel and Gate (barrière en L avec réacteur à l'angle)		
Contaminant(s)	Solvants chlorés (PCE, TCE, TCA, DCA, DCE, DCM) et BTEX. Concentration maxi pour chaque solvant chlorés de 5000 µg/L		
Type d'activité	Usine de recyclage de solvants chlorés		
Réactif(s)	Fe0 (licence ETI)		
Superficie du site		m2	
Volume sol pollué		m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	
Durée de travaux de construction		mois	
Date de mise en fonctionnement	1 999		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	faible coût et technique disponible au Danemark		
Autres solutions techniques envisagées			
Ces autres solutions ont elles été chiffrées			
Géologie	Aquifère sableux		
Perméabilité du site		m/s	vitesse de l'écoulement = 1.3 m/jour (élevé)
Profondeur aquitard	13	m	
Profondeur nappe	4	m	
Modélisation hydrogéologique du site			
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site			

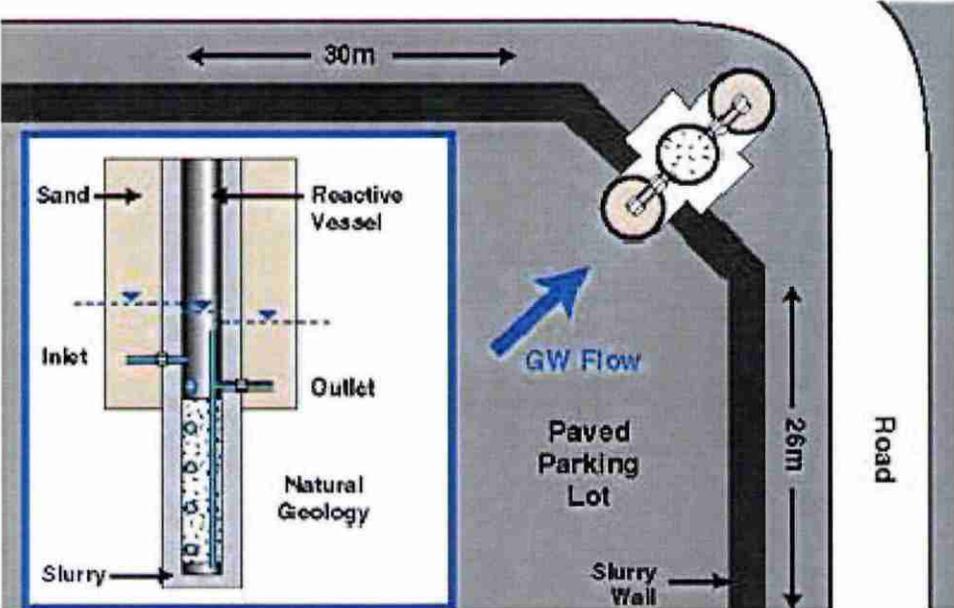
Longueur écran	123	m
Profondeur écran	9	m
Superficie écran		m ²
Technique de mise en place écran	Palplanche	
Massif drainant amont	Drains à l'amont de la zone polluée pour détourner une partie de l'écoulement et réduire débit à traiter	
Massif drainant aval		
Masse totale de réactif		t
Volume total des zones réactives	80	m ³ (volume de FeO)
Nombre de portes	1 zone réactive	Longueur x prof x ép. = 15 x 9 x 0.6 m = 81 m ³
Masse de réactif par porte		Kg
Nombre de réacteurs par porte		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m ³ /jour
Concentration en polluant avant mise en place barrière		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière		
Concentration seuil réglementaire	10 µg/L pour solvants chlorés. Obtention des performances attendues	
Mise en place d'un monitoring	oui. Présence de puits et piézo pour évaluer performances. Analyse tous les 6 mois en 2001, puis une fois par an ultérieurement	
Fréquence des analyses de contrôle		mois
Fréquence des opérations de maintenance		mois
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans
Garantie		ans
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Problème de fuite au niveau des joints entre palplanches pendant mise en place. A conduit provisoirement à traiter des eaux sur filtres à charbon actif. Augmentation des concentrations en chlorés à l'amont de la BPr au cours du temps. Cause : diminution de la vitesse de l'écoulement suite à mise en place drain amont.	
Coût total des investissements	940 000	\$
. dont caractérisation site + études	240 000	\$
. dont construction barrière	700 000	\$
. dont coût réactif		€
Coût maintenance		€/an

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Monkstown		
Pays	Irlande du Nord		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage	Nortel (équipement télécommunication)		
Maître d'œuvre	Golder Associates (consultant)		
Entreprise générale	Keller		
Collaboration	Queen's University of Belfast		
Autorité réglementaire			
Type de barrière	Funnel & Gate		
Contaminant(s)	Solvants chlorés : TCE (Cmax = 380 mg/L)		
Type d'activité	Stockage TCE utilisé dans procédé électronique. Actuellement, parking automobile		
Réactif(s)	Fe0 (licence ETI)		
Superficie du site		m2	
Volume sol pollué		m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)	24	mois	
Durée de travaux de construction	4	mois	
Date de mise en fonctionnement	fév 96		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	Volonté de Nortel qui veut traiter ses sites. Pas exigence réglementaire		
Autres solutions techniques envisagées	1. Confinement passif inadapté, 2. P&T, géologie inadaptée		
Ces autres solutions ont elles été chiffrées	P&T : 1 250 000 à 1 385 000 € suivant options		
Géologie	Dépôts glaciaires, argiles avec lentilles de sable et gravier		
Perméabilité du site	3 10 ⁻⁶ à 5 10 ⁻⁹	m/s	
Profondeur aquitard	18	m	
Profondeur nappe	6	m	avant traitement
Modélisation hydrogéologique du site	Modèle conceptuel avec Flowpath (différences fines) : aide à la conception		
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site	non		

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longueur écran	2 x 30 = 60	m	Forme en L avec réacteur à l'angle
Profondeur écran	12	m	
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran	Paroi coulis		
Massif drainant amont	oui		
Massif drainant aval	oui		
Masse totale de réactif	25	t	Protection pour maintien conditions anaérobie.
Volume total des zones réactives	6	m ³	
Nombre de portes	1		Ecoulement du haut vers base réacteur : permet accès aisé à zone colmatée supérieure
Masse de réactif par porte	25 000	Kg	
Nombre de réacteurs par porte	1		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	1 à 6	m ³ /jour	Temps de séjour 17 à 105 h
Concentration en polluant avant mise en place barrière	TCE max 390 mg/L		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	Respect du seuil réglementaire. Réduction de 99.97%		
Concentration seuil réglementaire	10 µg/L		
Mise en place d'un monitoring	oui	Queen's University of Belfast	
Fréquence des analyses de contrôle		mois	
Fréquence des opérations de maintenance		mois	Remplacement partiel du Fe ₀ : 10-15 ans ; Remplacement important 50 ans
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement	50	ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour			
Coût total des investissements	1 055 000	€	Aide financière européenne Feder
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance		€/an	



Ville/site	
Pays	Belgique
Echelle	Full scale
Maître d'ouvrage	Confidentiel
Maître d'œuvre	ERM
Entreprise générale	SITA
Autorité réglementaire	OVAM
Type de barrière	Funnel and gate (technologie panneau-drain Solétanche-Bachy)
Contaminant(s)	Solvants chlorés
Type d'activité	Usine en activité confidentiel
Réactif(s)	Fe + catalyseurs (procédé SITA)
Superficie du site	60 000 m ²
Volume sol pollué	600 000 m ³
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)	>12 mois
Durée de travaux de construction	6 mois
Date de mise en fonctionnement	juin 2002
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	Site bati avec pollution diffuse sous les bâtiments
Autres solutions techniques envisagées	A priori aucune autre, excepté Fe ⁰ ETI
Ces autres solutions ont elles été chiffrées	non
Géologie	1 à 4 m (sable silteux à argile sableuse) ; 4 à 12,5 (argile silteuse)
Perméabilité du site	1 10 ⁻⁶ à 6 10 ⁻⁷ m/s
Profondeur aquitard	13 m
Profondeur nappe	1 à 1.8 m
Modélisation hydrogéologique du site	Feflow (outil de dimensionnement de la barrière)
Modélisation géochimique du site	non
Réalisation d'un essai pilote sur site	Mise en place d'un pilote de confirmation (essai pompage traitement de 6 mois)

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longeur écran	350	m	
Profondeur écran	13	m	
Superficie écran	4 550	m ²	
Technique de mise en place écran	Palplanches, plus benne à cable pour les portes		
Massif drainant amont	oui		
Massif drainant aval	oui		
Masse totale de réactif	60	t	
Volume total des zones réactives	12	m ³	
Nombre de portes	3		
Masse de réactif par porte	20 000	Kg	
Nombre de réacteurs par porte	3		prétraitement (tampon phy-chimique) + traitement + post traitement (sécurité, non utilisé)
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	2	m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière	Somme des TCE>60 mg/l localement		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	Ci-dessous		
Concentration seuil réglementaire	<5µg/L VCE, <70µg/l TCE		
Mise en place d'un monitoring	oui		
Fréquence des analyses de contrôle	3	mois	15 j à 1 mois la 1ère année
Fréquence des opérations de maintenance	tous les 9 à 12	mois	Essentiellement nettoyage/décolmatage
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif			Non prévu, excès de Fe0. Si besoin ajout éventuel de catalyseur
Durée prévisionnelle de fonctionnement	30	ans	
Garantie	30	ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Les travaux de construction de la barrière ont perturbé le site et l'écoulement, d'où quelques difficultés au démarrage pour atteindre les objectifs. Phénomène transitoire ; depuis équilibre atteint et fonctionnement satisfaisant		
Coût total des investissements	1 800 000	€	
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance	20 000	€/an	0.6 M€ pour 30 ans

Ville/site	Neuville en Ferrain - A22	
Pays	France	
Echelle	Full scale	
Maître d'ouvrage	DDE	
Maître d'œuvre	Solétanche	
Entreprise générale	Solétanche	
Autorité réglementaire		
Type de barrière	Tranchée continue	Première réalisation Solétanche-Bachy (antérieure au concept Panneau-Drain)
Contaminant(s)	Chrome 6	
Type d'activité	remblai avec forte concentration en chrome	
Réactif(s)	granules Ecosol	
Superficie du site		m2
Volume sol pollué		m3
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois
Durée de travaux de construction		mois
Date de mise en fonctionnement	1 994	
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR		
Autres solutions techniques envisagées	Non	
Ces autres solutions ont elles été chiffrées	Non	
Géologie		
Perméabilité du site		m/s
Profondeur aquitard		m
Profondeur nappe		m
Modélisation hydrogéologique du site		
Modélisation géochimique du site		
Réalisation d'un essai pilote sur site		

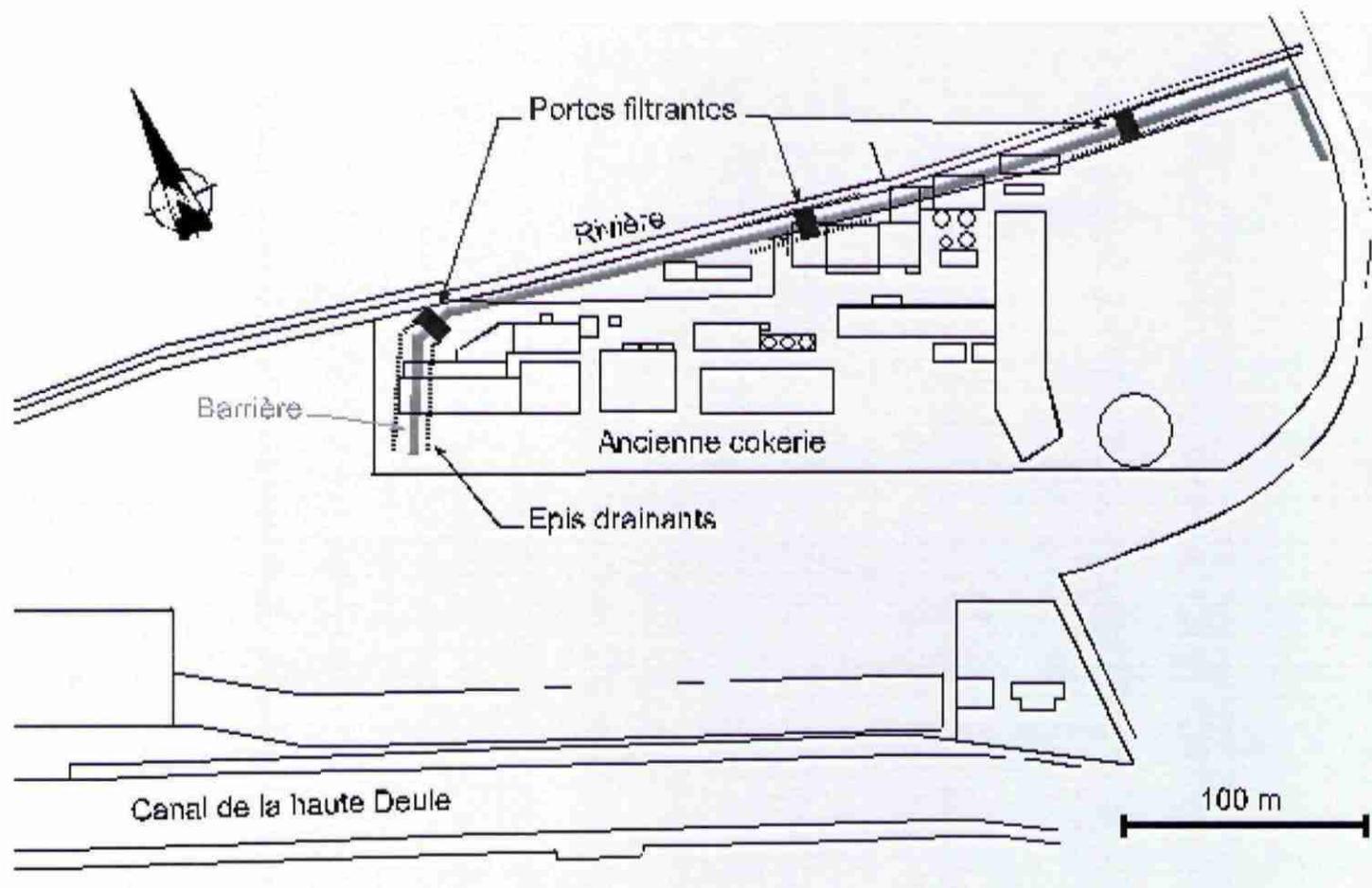
Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longueur écran	150	m
Profondeur écran	5	m
Superficie écran		m ²
Technique de mise en place écran		
Massif drainant amont	non	
Massif drainant aval	non	
Masse totale de réactif		t
Volume total des zones réactives	210	m ³
Nombre de portes		
Masse de réactif par porte		Kg
Nombre de réacteurs par porte		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)		m ³ /jour
Concentration en polluant avant mise en place barrière	100 à 1800	mg/L
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière		
Concentration seuil réglementaire		
Mise en place d'un monitoring		
Fréquence des analyses de contrôle		mois
Fréquence des opérations de maintenance		mois
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif		mois
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans
Garantie		ans
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Première réalisation, pas de suivi actuellement	
Coût total des investissements		€
. dont caractérisation site + études		€
. dont construction barrière		€
. dont coût réactif		€
Coût maintenance		€/an

Ville/site	Auby	
Pays	France	
Echelle	full scale	
Maître d'ouvrage	CdF	
Maître d'œuvre	CdF ingénierie	
Entreprise générale	Solétanche Bachy France	
Autorité réglementaire	DRIRE, inspecteur installations classées	
Type de barrière	Funnel and gate (système Panneau-Drain Solétanche Bachy)	
Contaminant(s)	HAP	
Type d'activité	Cokerie	
Réactif(s)	charbon actif	
Superficie du site	120 000	m ²
Volume sol pollué	500 000	m ³
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois
Durée de travaux de construction	4	mois
Date de mise en fonctionnement	janv. 1998	
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	essentiellement protection ressources hydrauliques locales/réhabilitation du site	
Autres solutions techniques envisagées	Traitement des terres polluées par voie biologique (Est en cours de réalisation en 2003)	
Ces autres solutions ont elles été chiffrées	Non	
Géologie	alluvions + remblai	
Perméabilité du site	37 751	m/s
Profondeur aquitard	5 à 7	m
Profondeur nappe	2à3	m
Modélisation hydrogéologique du site	Non ,uniquement estimation des débits avec loi de Darcy. Calcul et réalité concordent	
Modélisation géochimique du site	Non	
Réalisation d'un essai pilote sur site	non	

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

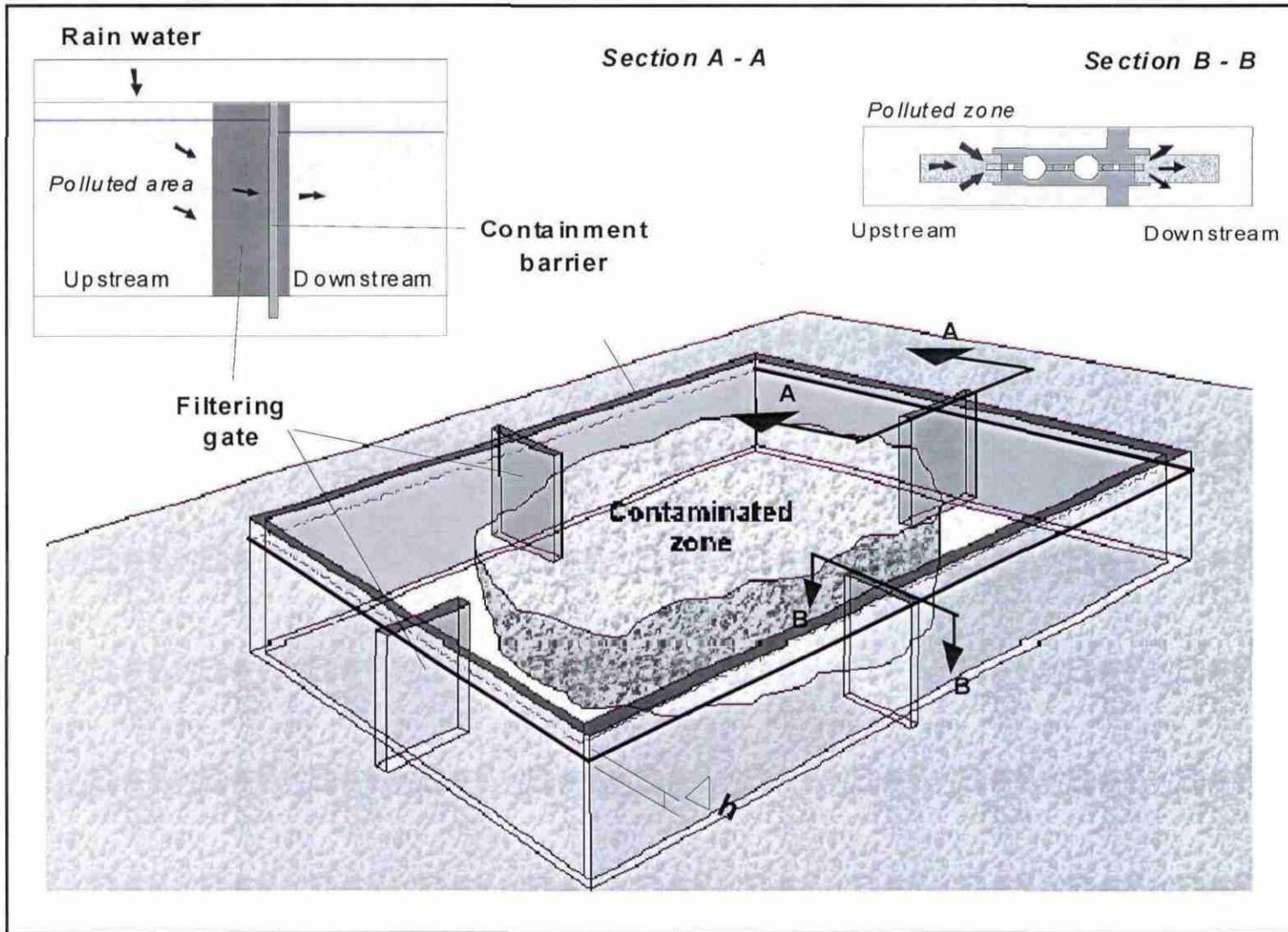
Longeur écran	430	m	
Profondeur écran	6 à 8	m	
Superficie écran	3 520	m ²	
Technique de mise en place écran	Paroi au coulis à la pelle rétro à bras long		
Massif drainant amont	oui	600 ml (amont + aval)	
Massif drainant aval	oui		
Masse totale de réactif	0.900	t	
Volume total des zones réactives		m ³	
Nombre de portes	3		2 filtres par porte
Masse de réactif par porte	300	Kg	150 kg par filtre
Nombre de réacteurs par porte	2		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	36	m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière			
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	<1 mg/l		
Concentration seuil réglementaire			
Mise en place d'un monitoring	oui/pendant 1 an	Soldata + CdF	
Fréquence des analyses de contrôle	semaine	mois	
Fréquence des opérations de maintenance	tous les 9 à 12	mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif	12	mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement		ans	
Garantie	10	ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Colmatage des drains suite à travaux de terrassement à l'amont (en cours de réparation)		
Coût total des investissements	600 000	€	
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance	10 000 à 20 000	€/an	



Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Ville/site	Brest		
Pays	France		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage	CCI Brest		
Maître d'œuvre	Gester (conseil maître d'ouvrage)		
Entreprise générale	ATE Geoclean		
Autorité réglementaire	Drire de Bretagne		
Type de barrière	Stabilisation + enceinte active	Stabilisation (mécanique et chimique) in situ de 23000 m3 de boue hydrocarbonée + enceinte de confinement avec 4 portes à charbon actif pour traitement des lixiviats résiduels (eaux de pluie conduisant à mise en charge au sein de l'enceinte)	
Contaminant(s)	HCT + phénol + métaux lourds		
Type d'activité	lagune de déballastage		
Réactif(s)	charbon actif		
Superficie du site	20 000	m2	
Volume sol pollué	23 500	m3	Volume de sol stabilisé in situ
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)	?	mois	
Durée de travaux de construction	6	mois	
Date de mise en fonctionnement	janv 2002		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	fermeture et réhabilitation du site pour le rendre constructible		
Autres solutions techniques envisagées	alternative à excavation des déchets vers CET.		
Ces autres solutions ont elles été chiffrées	Oui		
Géologie	déchets hydrocarbonés semi liquide à pâteux		
Perméabilité du site	37 751	m/s	
Profondeur aquitard	6	m	
Profondeur nappe	3	m	
Modélisation hydrogéologique du site	Non, car confinement actif très simple à calculer		
Modélisation géochimique du site	Non		
Réalisation d'un essai pilote sur site	Non		

Longueur écran	610	m	Confirmation total de la zone contaminé
Profondeur écran	5 à 7	m	
Superficie écran	3 200	m ²	
Technique de mise en place écran	Paroi au coulis pelle rétro		
Massif drainant amont	oui		
Massif drainant aval	oui		
Masse totale de réactif	0,8 T	t	
Volume total des zones réactives	1.600	m ³	
Nombre de portes	4		
Masse de réactif par porte	200	Kg	
Nombre de réacteurs par porte	2		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	variable (pluie)	<15 m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière	>30%HCT		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	<seuil ci dessous		
Concentration seuil réglementaire	HCT<1 mg/l ; phénol<0.1 mg/l ; Métaux lourds<0.1mg/l (arrêté préfectoral)		
Mise en place d'un monitoring	Non		
Fréquence des analyses de contrôle	1an mini	mois	
Fréquence des opérations de maintenance	12	mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif	12	mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement	10	ans	
Garantie	id	ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Aucun		
Coût total des investissements	3 000 000	€	Attention, le coût indiqué inclus la stabilisation in situ
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance	15 000	€/an	



Ville/site	Clipper Oil, Lliça de vall. (banlieue de Barcelone)		
Pays	Espagne		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage	Junta de residus, gestionnaire des sites pollués dépendant de Generalitat de Catalunya		
Maître d'œuvre			
Entreprise générale	TQMA, RODIO, Solétanche bachy		
Autorité réglementaire			
Type de barrière	Confinement actif : enceinte de confinement + portes réactives (technologies panneau-drain Solétanche Bachy)		
Contaminant(s)	Hydrocarbures, PCB, phtalates, HAP		
Type d'activité	atelier de traitement d'huiles usagées (faillite de l'exploitant)		
Réactif(s)	Charbon actif		
Superficie du site	20 000	m2	
Volume sol pollué	40 000	m3	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)		mois	
Durée de travaux de construction	4	mois	(aout-novembre 2000)
Date de mise en fonctionnement	fin 2000		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	Risque pollution puits de captage+ rivière voisine. Bio rémédiation in situ du site confiné. Permet poursuite activité industrielle sur site		
Autres solutions techniques envisagées	Excavation, confinement total		
Ces autres solutions ont elles été chiffrées	Oui		
Géologie	arkose à 5 m de prof surmonté par alluvions grossières		
Perméabilité du site		m/s	
Profondeur aquitard	5	m	
Profondeur nappe	4	m	
Modélisation hydrogéologique du site	Non		
Modélisation géochimique du site	Non		
Réalisation d'un essai pilote sur site	Non		

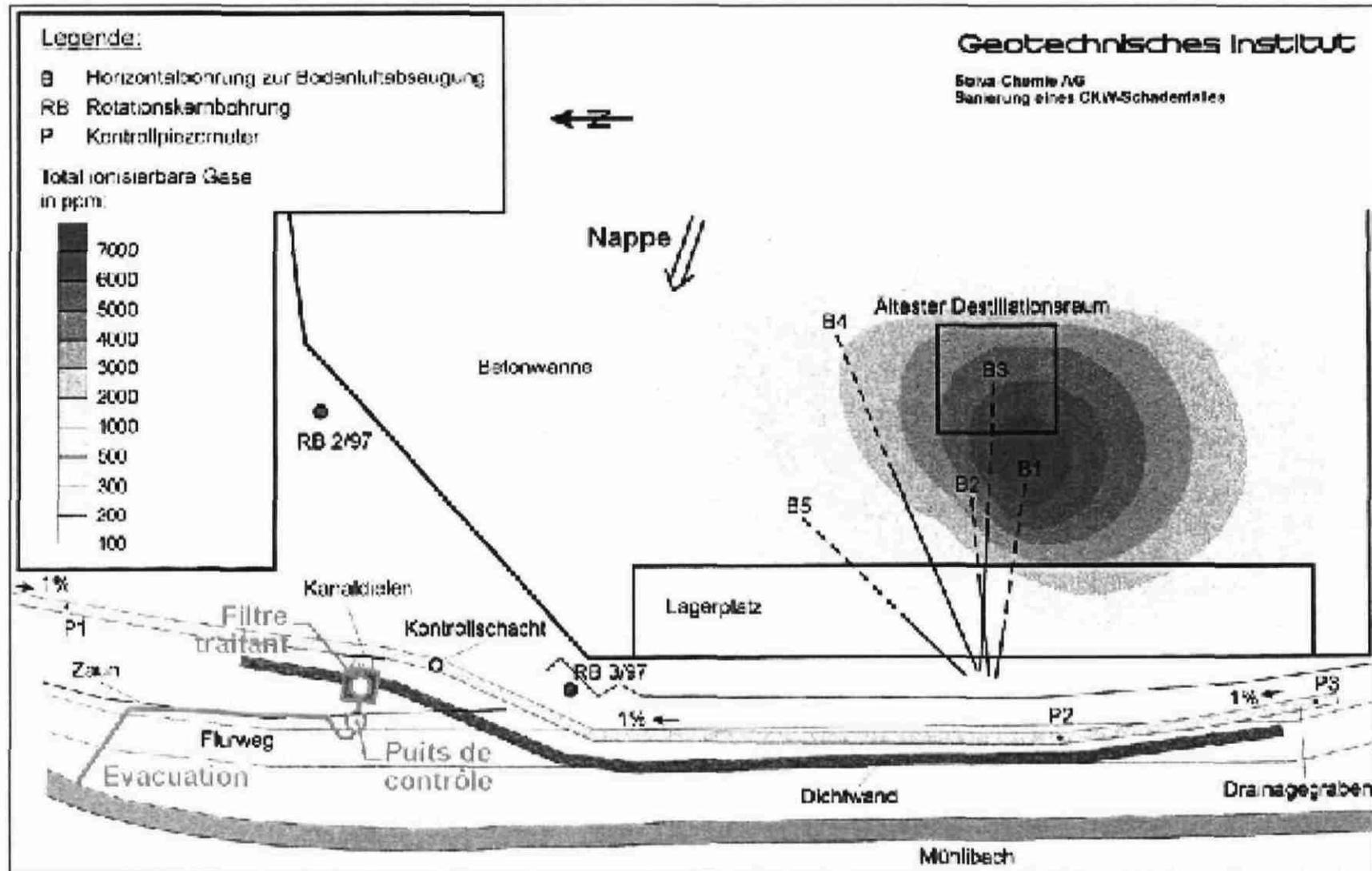
Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longeur écran	env 400	m	
Profondeur écran	5.20	m	
Superficie écran	2 153	m ²	
Technique de mise en place écran	Paroi au coulis pelle rétro bras long		
Massif drainant amont	oui		
Massif drainant aval	oui		
Masse totale de réactif	0.400	t	
Volume total des zones réactives	0.800	m ³	
Nombre de portes	2		
Masse de réactif par porte	200	Kg	
Nombre de réacteurs par porte	2		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	5	m ³ /jour	écoulement 2 mois/an au moment pluies d'automne
Concentration en polluant avant mise en place barrière	HCT ; porte est : 9400 ppm ; porte ouest : 54000 ppm		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	HCT ; porte est : 770 ppm ; porte ouest : 1400 ppm (2001)		
Concentration seuil réglementaire	abattement >95%		
Mise en place d'un monitoring	suivi analytique des piézomètres		
Fréquence des analyses de contrôle		mois	
Fréquence des opérations de maintenance	12	mois	
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif	12	mois	
Durée prévisionnelle de fonctionnement	>10	ans	
Garantie		ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	une porte débite plus que l'autre, Pas prévu mais ne crée pas de problèmes, car dimensionné large		
Coût total des investissements	600 000	€	
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance	10 000	€/an	

Ville/site	Bätterkinden		
Pays	Suisse		
Echelle	Full scale		
Maître d'ouvrage	Solva Chemie		
Maître d'œuvre	Geotechnisches Institut Solothurn		
Entreprise générale	SIF Groutbor (réalisation travaux) ; Réactif + dimensionnement (Rhodia ATE)		
Autorité réglementaire	Autorités cantonales (ordonnance fédérale sur sites contaminés du 01/10/98)		
Type de barrière	Drain (tranchée drainante amont) + écran + porte filtrante		
Contaminant(s)	Solvants chlorés (cDCE + TCE + PCE + VC +TCA)		
Type d'activité	Usine de retraitement de solvants		
Réactif(s)	Fe + catalyseurs (métaux précieux) : brevet SITA (ex Rhodia ATE Geoclean)		
Superficie du site	10 000	m ²	
Volume sol pollué	20 000	m ³	
Durée de l'étude (APS, APD, labo, pilote, ingénierie)	inconnu	mois	
Durée de travaux de construction	1	mois	
Date de mise en fonctionnement	juin 2000		
Principales raisons ayant conduit au choix d'une BPR	contamination nappe et rivière Mühlbach		
Autres solutions techniques envisagées	Aucune, pollution diffuse sous une usine en activité		
Ces autres solutions ont elles été chiffrées			
Géologie	Alluvions puis marne		
Perméabilité du site		m/s	sous sol moyennement perméable
Profondeur aquitard	5	m	
Profondeur nappe	3	m	
Modélisation hydrogéologique du site	Oui		
Modélisation géochimique du site			
Réalisation d'un essai pilote sur site	Non		

Etat de l'art sur les Barrières Perméables Réactives

Longueur écran	100	m	
Profondeur écran	5	m	
Superficie écran		m ²	
Technique de mise en place écran	Paroi au coulis pelle rétro		
Massif drainant amont	oui	Tranchée drainante (long 150 m) qui collecte les eaux et les dirige vers	
Massif drainant aval	Puits de visite + écoulement gravitaire vers rivière Mühlbach		
Masse totale de réactif	5	t	
Volume total des zones réactives	1	m ³	
Nombre de portes	1		
Masse de réactif par porte	5 000	Kg	
Nombre de réacteurs par porte	1		
Débit total traité (valeur adoptée pour dimensionnement)	14	m ³ /jour	
Concentration en polluant avant mise en place barrière	VC (3 µg/L) ; TCE (94 µg/L) ; cDCE (199 µg/L) ; PCE (25 µg/L)		
Concentration aval en polluant après mise en place de la barrière	voir ci-dessous		
Concentration seuil réglementaire	<1µg/l en VC		
Mise en place d'un monitoring	Non		
Fréquence des analyses de contrôle	env 2/mois	mois	
Fréquence des opérations de maintenance	8 à 10	mois	nettoyage partie basse du filtre
Fréquence des opérations de remplacement du media réactif	nettoyage tous les 8 à 10 mois		
Durée prévisionnelle de fonctionnement	10	ans	
Garantie	10	ans	
Types de problèmes rencontrés à ce jour	Colmatage due à oxygénation de la tranchée drainante (résolu)		
Coût total des investissements	200 000	€	
. dont caractérisation site + études		€	
. dont construction barrière		€	
. dont coût réactif		€	
Coût maintenance	<10000	€/an	





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
Service environnement industriel et procédés innovants
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34