



RE.CO.R.D.

ETUDE N° 02-0330/1A

SYNTHESE DE L'ETUDE

FRANÇAIS / ANGLAIS

**ÉTAT DE L'ART SUR LES
BARRIERES PERMEABLES REACTIVES (BPR).
REALISATIONS, EXPERIENCES, CRITERES DECISIONNELS
ET PERSPECTIVES.**

mars 2004

H. GABORIAU - BRGM Orléans

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 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 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.