

# Étude expérimentale d'une technique de filtration radiale pour une application au sein de Barrières Perméables Réactives (BPR)

## Experimental study of radial filtration in Permeable Reactive Barriers (PRB)

Courcelles B.

École Polytechnique de Montréal

**RÉSUMÉ:** Les Barrières Perméables Réactives (BPR) constituent une technique de réhabilitation environnementale utilisant le gradient naturel de l'eau souterraine pour la diriger vers un filtre réactif capable de traiter les contaminants. Une des principales configurations géométriques consiste à canaliser l'eau vers un filtre réactif dans lequel l'écoulement est vertical ascendant. La traversée de plusieurs mètres de filtre peut toutefois générer des pertes de charges importantes, qui perturbent l'écoulement régional et conduisent au contournement du système. Afin de limiter ces pertes de charges, un nouveau filtre à écoulement radial visant à réduire la longueur de cheminement dans le matériau réactif a été conçu à l'École Polytechnique de Montréal. La présente étude vise à vérifier expérimentalement les hypothèses du concept de filtre radial et à caractériser ses performances hydrauliques comparativement aux filtres traditionnels. Les résultats démontrent que les filtres radiaux permettent effectivement de limiter les pertes de charges, améliorant ainsi substantiellement l'hydraulique des filtres et augmentant le champ d'application des BPR, en particulier aux aquifères n'autorisant que peu de pertes de charges sous peine de contournement du système de traitement.

**ABSTRACT:** Permeable Reactive Barriers (PRB) constitute an environmental remediation technique in which natural gradients are exploited to channel the groundwater towards a reactive filter. One of the main geometric configurations consists in realizing an upward vertical filtration in a reactive filter able to treat the contaminants. Crossing several meters of filter can however generate excessive head losses, modify the regional flow and lead to a bypass of the system. To minimize these head losses, a new radial-flow filter consisting in reducing the filtration length has been developed at Polytechnique Montreal. The present study aims to experimentally verify the assumptions of the radial filtration and characterize its hydraulic performances compared to traditional filters. The results show that radial filters can effectively reduce head losses, improve substantially the hydraulic of filters and increase the scope of PBRs, in particular to aquifers allowing few head losses to prevent any bypass.

**MOTS-CLÉS:** barrières perméables réactives, filtration, milieux granulaires, réseau d'écoulement, décontamination.

## 1 INTRODUCTION

Pour faire face aux problèmes d'augmentation des sites contaminés, les Barrières Perméables Réactives (BPR) constituent une technique de réhabilitation in situ efficace pour le traitement des eaux souterraines (Blowes et al. 1995). Leur originalité réside dans l'exploitation des gradients naturels pour diriger l'eau souterraine vers un matériau réactif capable de la décontaminer par dégradation, adsorption ou précipitation. Cette technique ne nécessite ainsi aucun apport d'énergie externe, ce qui réduit considérablement les frais d'exploitation lors de la réhabilitation d'un site contaminé (RECORD, 2010).

Les BPR sont habituellement mises en œuvre selon trois grandes configurations géométriques: (1) un mur continu constitué de tranchées remplies de matériau réactif ou de puits d'injection de réactifs (Blowes et al. 1995), (2) une configuration avec porte filtrante (usuellement dénommée « funnel-and-gate ») composée de deux parois imperméables canalisant le panache contaminé vers une zone réactive (Starr et Cherry 1994), et (3) une configuration en caisson qui est une variante de la précédente dans laquelle la filtration s'effectue de manière verticale ascendante (Porter 1998, Warner et al. 1998).

Les murs continus représentent la configuration la plus commune pour les BPR (Blowes et al. 1995). Ils sont habituellement composés de matériaux réactifs installés en aval d'un panache de contamination, perpendiculaire à l'écoulement des eaux souterraines. Comme ils constituent la configuration historique de BPR, ces murs continus ont été largement mis en œuvre et leur efficacité a été documentée dans la littérature (O'Hannesin et Gillham 1998). Une méthode de conception est

également dédiée à cette configuration et s'appuie sur le temps de séjour des polluants dans le milieu réactif (Gavaskar et al. 1998, Powell et al. 1998).

Dans la configuration « funnel-and-gate », deux parois imperméables sont préalablement réalisées dans le sol. Il peut s'agir de parois minces, de parois composites, de palplanches ou encore de murs en coulis bentonite-ciment. Un matériau réactif est ensuite mis en place à l'exutoire de ces parois imperméables après excavation, sol-mixing ou tranchage. Dans cette configuration, le support réactif est placé verticalement et perpendiculairement à l'écoulement des eaux souterraines et la filtration est réalisée horizontalement.

Comme variante de la géométrie précédente, une configuration avec écoulement vertical ascendant dans un caisson réactif a été mise au point. Ces caissons sont la plupart du temps de forme cylindrique ou parallélépipédique et deux configurations différentes ont été développées et brevetées par Soletanche-Bachy (filtres cylindriques) et l'Université de Waterloo (filtres parallélépipédiques). Cet écoulement vertical ascendant dans des filtres réactifs manufacturés est ainsi plus uniforme (Elder 2000) et facilite la maintenance (Courcelles 2007).

La conception de BPR repose principalement sur trois aspects techniques: (1) le milieu réactif doit être adapté aux contaminants et sa sélection doit tenir compte de facteurs tels la géochimie, les conditions biologiques et hydrogéologiques du site, (2) la taille des filtres doit être sélectionnée pour assurer un temps de séjour suffisant et garantir des réactions complètes (Shoemaker et al. 1995, O'Hannesin et Gillham 1998, Warren et al. 1995), et finalement (3) le matériau réactif doit avoir une

conductivité hydraulique supérieure à celle de l'aquifère environnant pour empêcher tout contournement du système (Starr et Cherry 1994). Afin de répondre aux contraintes hydrauliques et limiter les pertes de charges dans les filtres, un nouveau concept de filtre radial pouvant être mis en œuvre dans les caissons a été développé à l'École Polytechnique de Montréal. Sur le plan théorique, ce filtre permet, à volume de réactifs égaux, de diminuer les pertes de charges par rapport à un filtre classique et d'en améliorer les performances chimiques (Courcelles 2012). Toutefois, des expérimentations étaient nécessaires pour vérifier la principale hypothèse du filtre radial, à savoir la parfaite verticalité des équipotentielles dans le filtre. Les résultats d'essais de laboratoire visant à vérifier cette hypothèse sont présentés dans la suite du document.

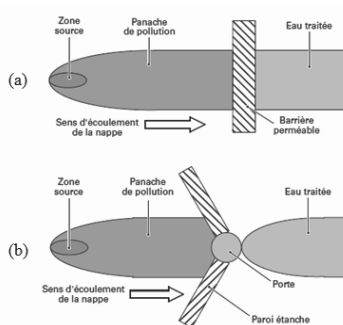


Figure 1. Principe des Barrières Perméables Réactives : (a) configuration en mur continu, et (b) configuration « funnel-and-gate » ou en caisson, d'après Roudier (2005).

## 2 PRINCIPE DU FILTRE RADIAL

La conception du nouveau filtre repose sur l'application directe de la loi de Darcy, qui énonce que le débit traversant une section d'un milieu granulaire est proportionnel au gradient hydraulique et à sa surface. Ainsi, à débit et volume de filtre constants, les pertes de charges sont moindres lorsque la section du filtre est augmentée et sa longueur proportionnellement réduite. Le filtre radial est ainsi un cylindre réactif où l'écoulement peut se faire de son axe central vers la périphérie ou inversement. De fait, la longueur de filtration se limite au rayon du cylindre, ce qui est très intéressant compte-tenu des dimensions classiques des filtres, qui peuvent être particulièrement élancés avec des diamètres compris entre 0,5 et 1 m et des longueurs pouvant atteindre plusieurs mètres.

Comme illustré sur la Fig. 2, le filtre cylindrique est composé de trois matériaux coaxiaux : un matériau grossier inerte au centre, entouré un matériau réactif et d'un autre matériau inerte à l'extérieur. Les matériaux grossiers au centre et à la périphérie du filtre constituent les zones d'entrée ou de sortie d'eau dans le filtre, selon les pertes de charges appliquées. Les avantages d'un tel filtre sont multiples comparativement à la configuration classique et touchent l'hydraulique, mais également les performances chimiques des filtres.

Considérant que le filtre radial et le filtre classique de la Fig. 2 ont des longueurs identiques et un même volume de matériau réactif ( $R_{ext}^2 - R_{int}^2 = R^2$ ), les pertes de charges sont, à débits égaux, plus faibles dans le filtre radial car la longueur de filtration est réduite ( $R_{ext} - R_{int}$  comparativement à  $L$  dans une filtration classique). Un filtre radial permettrait ainsi d'augmenter la durée de vie hydraulique des BPR, puisqu'il permet de limiter les contraintes sur la conductivité hydraulique minimale du matériau réactif.

Sur le plan chimique, les temps de contact des deux filtres de la Fig. 2 sont identiques puisque les volumes des vides sont les mêmes. Par ailleurs, même si l'écoulement dans un filtre radial peut être centripète ou centrifuge, l'étude théorique a permis de démontrer qu'un écoulement centripète améliore les performances chimiques des filtres des BPR. En effet, la vitesse

relative de l'eau contaminée par rapport aux grains réactifs est plus faible à la périphérie, c'est-à-dire là où les concentrations en contaminants sont les plus fortes dans le cas d'un écoulement centripète (Courcelles 2012). Dans le cas d'une rétention par adsorption des contaminants, la percée du filtre peut ainsi être retardée.

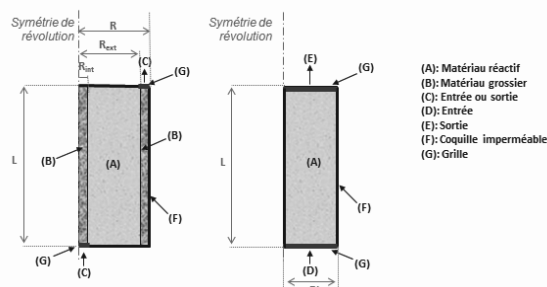


Figure 2. Concept de filtre radial

## 3 MATÉRIEL ET MÉTHODE

Afin de vérifier les conditions d'écoulement dans les filtres radiaux, des essais de laboratoire ont été réalisés sur un filtre miniature. Les conditions d'essais sont précisées dans la présente section.

### 3.1 Géométrie de filtration

Le filtre possédait une hauteur de 30 cm et un rayon de 15 cm. Tel que représenté en axisymétrie sur la Fig. 3, il comprenait un cylindre de matériau grossier de 15 mm de rayon au centre et un autre matériau grossier sur 15 mm d'épaisseur à la périphérie.

La filtration a été réalisée de manière centripète, soit du matériau grossier extérieur vers le matériau grossier intérieur. L'exutoire du filtre radial se situait au sommet de ce matériau grossier central.

Les charges hydrauliques ont été mesurées à l'aide de piézomètres implantés dans le matériau réactif sur une section verticale. Ces piézomètres constituent un maillage réparti selon trois rayons, de 15, 75 et 135 mm, et trois hauteurs de mesure, à 6, 15 et 24 cm. Chaque piézomètre est identifié par son rayon (1 à 3), suivi de son niveau (a à c).

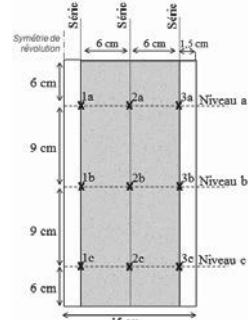


Figure 3. Localisation des mesures de pression sur une section verticale de filtre radial

### 3.2 Matériaux réactifs et solution filtrée

Le matériau réactif sélectionné pour les essais est de l'oxyde de magnésium, FlowMag<sup>®</sup> PWT de la compagnie Magnesia Specialties. Habituellement utilisé pour le traitement de l'eau potable, ce matériau permet de relever le pH de la solution filtrée et de retenir les contaminants métalliques par précipitation d'hydroxydes. Durant les essais, le pH est resté constant à une valeur de 9.8, particulièrement propice à la précipitation d'hydroxydes à partir d'ions métalliques divalents (Zn, Mn, Cu, Pb, Ni, Co ou Cd). La granulométrie du matériau

réactif était comprise entre 1,2 et 3,35 mm, ce qui permettait d'assurer une bonne surface spécifique sans pénaliser la conductivité hydraulique. Le matériau grossier était quant à lui constitué de graviers inertes, de diamètres compris entre 3 et 10 mm.

L'objectif des essais étant de caractériser le comportement hydraulique des filtres radiaux, ces derniers ont été réalisés sur une eau non contaminée. Toutefois, la dureté de cette eau a été ajustée par adjonction de  $\text{NaHCO}_3$  à une concentration de 500 mg/L. En effet, les eaux particulièrement chargées en ions carbonates sont particulièrement préjudiciables au fonctionnement des filtres d'oxyde de magnésium, puisque l'augmentation du pH conduit à la formation de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), pénalisant ainsi la conductivité hydraulique des filtres (Courcelles 2007). Des conditions pénalisantes ont ainsi été sélectionnées pour ces essais hydrauliques afin d'observer l'évolution de la conductivité hydraulique du matériau réactif et son influence sur le réseau d'écoulement dans le filtre radial. En effet, l'étude théorique des filtres radiaux avait démontré qu'il existait un rapport de conductivité hydraulique minimal  $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}$  permettant de garantir un écoulement parfaitement radial (Courcelles 2012). La mise en œuvre d'un matériau à conductivité hydraulique évolutive en fonction de la quantité de précipités formés permet ainsi de déterminer expérimentalement le rapport minimal permettant de garantir l'hypothèse d'écoulement radial. Les essais ont été réalisés grâce à une alimentation par une pompe péristaltique à un débit constant de 150 mL/min.

#### 4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les mesures des charges hydrauliques totales en fonction du temps sont présentées dans la présente section et interprétées grâce à une interpolation spatiale par krigeage et une modélisation numérique de l'écoulement dans le filtre de laboratoire.

##### 4.1 Évolution de la charge hydraulique totale

L'évolution de la charge hydraulique totale en fonction du renouvellement des vides est présentée sur la Fig. 4 pour les différents piézomètres. À l'entrée du filtre radial, c'est-à-dire au droit du rayon 3, on remarque que la charge hydraulique est identique pour les trois niveaux de mesure. Le matériau grossier assure donc son rôle de conducteur hydraulique permettant de limiter les pertes de charges à l'extérieur du matériau réactif. On notera toutefois l'augmentation simultanée de la charge hydraulique pour les piézomètres 3a à 3c en fonction du renouvellement des vides, ce qui traduit un colmatage progressif du filtre réactif.

Au droit des rayons 1 et 2, l'évolution de charge hydraulique totale est toutefois différente pour chacun des trois niveaux de mesure. Les charges diminuent en effet avec l'élévation dans le filtre, ce qui démontre que l'écoulement n'est pas parfaitement horizontal, mais possède également une composante verticale.

Tout comme pour le rayon 3, la charge au droit des rayons 1 et 2 présente une augmentation progressive avec le renouvellement des vides suite au colmatage par la formation de  $\text{CaCO}_3$ . Des régressions polynomiales d'ordre 2 ont été réalisées pour chacun des piézomètres afin d'illustrer l'augmentation de la charge hydraulique en fonction du renouvellement des vides.

##### 4.2 Interprétation par krigeage et modélisation

Afin de représenter l'évolution spatiale des charges hydrauliques totales, les équipotentielles ont été interprétées par krigeage et sont fournies sur la Fig. 5 pour le début et la fin de l'essai de filtration.

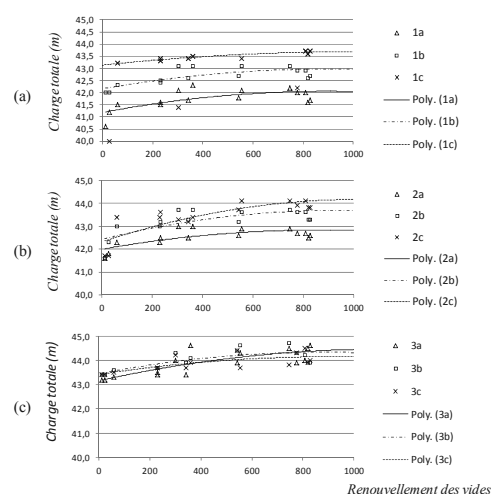


Figure 4. Évolution de la charge hydraulique totale en fonction du renouvellement des vides du matériau réactif pour : (a) la série 1, (b) la série 2 et (c) la série 3.

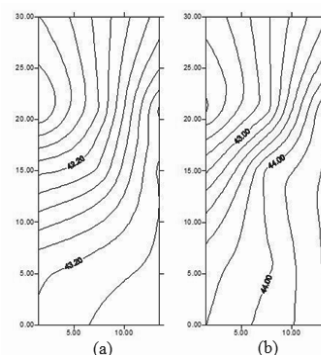


Figure 5. Interpolation des équipotentielles par krigeage : (a) début de la filtration et (b) après 900 renouvellement des vides. Échelle des axes et charge hydraulique totale en cm.

La localisation des équipotentielles sur la Fig. 5 démontre ainsi que l'écoulement n'est pas parfaitement radial, mais plutôt orienté vers le sommet du matériau grossier au centre du filtre. En ce sens, cette orientation n'est pas conforme aux hypothèses du modèle théorique, puisque la longueur de cheminement n'est pas, en moyenne, réduite par rapport à un écoulement vertical classique. Toutefois, après un renouvellement des vides de 900 fois et la diminution de la conductivité hydraulique, les équipotentielles deviennent plus verticales et l'écoulement s'approche d'un écoulement radial. Le rapport entre des conductivités hydrauliques des matériaux grossier et réactif ( $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}$ ) joue donc un rôle prépondérant dans l'orientation des lignes d'écoulement. Afin d'illustrer ce comportement, une modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics pour les dimensions du filtre expérimental et différents rapports de conductivités hydrauliques.

La Fig. 6 présente les résultats de la modélisation numérique pour des rapports  $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}$  de 5, 50 et 500. Le rapport de 5 correspond au début de la filtration, puisque des essais de perméabilité ont permis de déterminer des conductivités hydrauliques respectives de  $10^{-1}$  et  $2.10^{-2}$  m/s pour le matériau grossier et le matériau réactif. Au début de la filtration, la théorie corrobore ainsi les résultats expérimentaux puisque l'écoulement est essentiellement orienté vers le sommet de l'axe central. Après réduction de la conductivité hydraulique du matériau réactif ( $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}=50$ ), l'écoulement est moins oblique et son allure générale est semblable aux observations faites après un renouvellement des vides de 900 fois. Finalement, l'écoulement ne devient parfaitement radial que lorsque le rapport de conductivités hydrauliques atteint 500 (Fig. 3c).

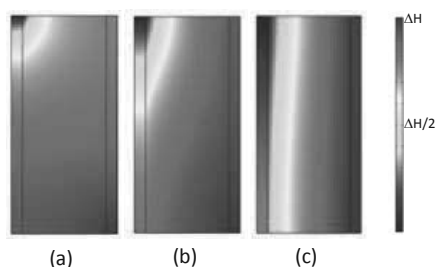


Figure 6. Résultats des simulations numériques pour différents ratios  $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}$ : (a) 5, (b) 50 et (c) 500. (Bleu foncé: pression atmosphérique, rouge foncé: charge imposée à l'entrée du filtre).

Ces résultats expérimentaux assortis de la modélisation numérique démontrent ainsi que le rapport minimal  $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}$  permettant de garantir l'hypothèse d'écoulement radial est supérieur à 50. Au-dessus de ce rapport, le filtre radial commence à remplir sa fonction de limitation des pertes de charges.

#### 4.3 Estimation de la conductivité hydraulique après colmatage

Dans le cas d'équipotentiels parfaitement verticales dans un filtre radial et en négligeant les pertes de charges dans le matériau grossier, le débit en fonction de la perte de charge dans le filtre peut être calculé selon l'équation 1 par analogie avec un puits dans un aquifère captif.

$$Q = k_{\text{réactif}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{H_{\text{ext}} - H_{\text{int}}}{\ln\left(\frac{R_{\text{ext}}}{R_{\text{int}}}\right)} \quad (1)$$

où  $Q$  représente le débit dans le filtre et  $H_{\text{ext}} - H_{\text{int}}$  la différence de charge appliquée entre l'entrée et la sortie du filtre.

Cette expression peut toutefois se réécrire selon l'équation 2, qui où  $k'$  représente la conductivité hydraulique apparente du filtre, c'est-à-dire celle qu'un observateur calculerait s'il ignorait que l'écoulement était radial dans le filtre.

$$Q = k' \cdot \pi \cdot (R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2) \frac{H_{\text{ext}} - H_{\text{int}}}{L} \quad (2)$$

$$k' = \frac{2 \cdot k_{\text{réactif}} \cdot L^2}{(R_{\text{ext}}^2 - R_{\text{int}}^2) \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{ext}}}{R_{\text{int}}}\right)} \quad (3)$$

Afin d'évaluer l'état de colmatage du filtre radial à la fin de la filtration et l'ordre de grandeur de la conductivité hydraulique, des équipotentiels quasi-verticales ont été considérées et la conductivité hydraulique  $k_{\text{réactif}}$  calculée à partir de l'équation 1 et des mesures au niveau b. En moyenne, les pertes de charges étant plus importantes au niveau a et plus faibles au niveau c, le calcul ne donne qu'une approximation de la conductivité hydraulique moyenne du filtre. Considérant la perte de charge de 1,48 cm au niveau b, nous obtenons ainsi une conductivité hydraulique de  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s pour le matériau réactif. Cette valeur corrobore les résultats expérimentaux obtenus en filtration axiale avec un matériau réactif et des concentrations en  $\text{NaHCO}_3$  identiques, à savoir un rapport de  $2 \cdot 10^{-2}$  entre les conductivités hydrauliques initiale et finale du matériau réactif (Courcelles 2011).

Le filtre radial "apparaît" cependant 4,5 fois plus perméable qu'un filtre classique puisque, d'après l'équation 2, les pertes de charges mesurées correspondent à une conductivité hydraulique  $k' = 9 \cdot 10^{-4}$  m/s pour une même hauteur de filtre et des sections identiques de matériau réactif.

## 5 CONCLUSION

Les essais physiques réalisés sur un filtre à écoulement radial ont permis de confirmer les avantages hydrauliques de ce dernier, puisqu'un matériau réactif possédant une conductivité hydraulique après colmatage de  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s permet de réduire les pertes de charges d'un facteur de 4,5 lorsqu'il est soumis à une filtration radiale au lieu d'une filtration verticale ascendante classique. Toutefois, ce résultat est strictement dépendant du rapport entre les conductivités hydrauliques  $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}$ . Dans les essais, un rapport minimal de 50 était nécessaire pour assurer un écoulement pseudo-vertical. Cette observation permettra de parfaire le dimensionnement des filtres radiaux pour des essais à l'échelle pilote, pour lesquels le rapport  $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}$  sera évalué numériquement en fonction de la géométrie retenue. D'une manière générale, les avantages hydrauliques du filtre radial permettent de sélectionner des matériaux réactifs plus fins, ce qui est avantageux sur le plan chimique et qui permet de respecter plus facilement le critère de rapport minimal  $k_{\text{grossier}}/k_{\text{réactif}}$ .

## 6 REFERENCES

- Blowes D., Ptacek C., Cherry J., Gillham R., et Robertson W. 1995. Passive Remediation of Groundwater Using In Situ Treatment Curtains. *Geoenvironment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics*, Daniel, D. and Acar, Y. (Eds.), ASCE, GSP 46, 1588-1607.
- Courcelles B. 2007. *Étude du comportement physico-chimique des filtres de barrières perméables réactives : Modélisation et expérimentation à l'échelle pilote*. Thèse de doctorat, École Centrale Paris.
- Courcelles B., Modaresi A., Gouvenot D., Esnault-Filet A. 2011. Influence of precipitates on hydraulic performance of permeable reactive barrier filters, *International Journal of Geomechanics*, April 2011, Vol. 11, Iss. 2, p.142-151.
- Courcelles B. 2012. Filters of Permeable Reactive Barriers: A new design approach. *2<sup>nd</sup> International Conference on Environmental Pollution and Remediation, Montreal, Quebec, Canada*, 28-30 August.
- Elder C. R. 2000. *Evaluation and Design of Permeable Reactive Barriers amidst Heterogeneity*. PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison.
- Gavaskar A., Gupta N., Sass B., Janosy R., O'Sullivan D. 1998. *Permeable Barriers for Groundwater Remediation: Design Construction, and Monitoring*. Battelle Press, Columbus, OH.
- O'Hannesin S. and Gillham R. 1998. Long-Term Performance of an In Situ "Iron Wall" for Remediation of VOCs. *Ground Water*, 36(1), 164-170.
- Porter J. 1998. Greener Process. *Ground Engineering*, July, 32-33.
- Powell R., Blowes D., Gillham R., Schultz D., Sivavec T., Puls R., Vogan J., Powell P., and Landis R. 1998. *Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation*. EPA/600/R-98/125, Washington DC.
- RECORD 2010, *Barrières Perméables réactives (BPR) : Retours d'expériences, perspectives d'application et enjeux de recherche pour le traitement des pollutions métalliques. Actualisation de l'état de l'art RECORD 2004*, 2010, 272 p, n°08-0331/1A.
- Roudier 2005, Techniques de réhabilitation des sites et sols pollués : Fiches de synthèse, *Techniques de l'ingénieur*, TIB551DUO.
- Shoemaker S., Greiner J., and Gillham R. 1995. "Permeable Reactive Barriers". Assessment of Barrier Containment Technologies: A Comprehensive Treatment for Environmental Remediation Application, Rumer, R. and Mitchell, J. Eds., *International Containment Technology Workshop, Baltimore, Maryland*, August 29-31, 301-353.
- Starr R. and Cherry J. 1994. In Situ Remediation of Contaminated Ground Water: The Funnel-and-Gate System. *Ground Water*, 32(3) 465-476.
- Warner S., Yamane, C., Gallinatti, J. and Hankins, D. 1998. Considerations for Monitoring Permeable Ground-Water Treatment Walls. *Journal of Environmental Engineering*, 124(6), 524-529.
- Warren K., Arnold R., Bishop T., Lindholm L., and Betterton E. 1995. Kinetics and Mechanisms of Reductive Dehalogenation of Carbon Tetrachloride Using Zero Valent Metals. *Journal of Hazardous Materials*, 41, 217-227.