

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.



BARRIERES OUVRAGEES POUR LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES ENGINEERED BARRIERS FOR UNDERGROUND WATER PROTECTION

D. Gouvenot A. Bouchelaghem

Solétanche Entreprise
Nanterre, France

Résumé

La réalisation de barrières ouvragées dans le sol s'applique au confinement de sources de contamination diverses tels que d'anciens sites contaminés. Ces barrières assurent une protection efficace des eaux souterraines.

Actuellement, cette protection repose essentiellement sur l'imperméabilité de la barrière, en réalisant des dispositifs associant plusieurs éléments en insérant par exemple des membranes PEHD dans des parois moulées. En fait la migration des espèces polluantes peut être plus efficacement maîtrisée en conférant au matériau de la barrière des propriétés de rétention spécifique. Sur ce principe SOLETANCHE a mis au point des matériaux spéciaux destinés à la réalisation de barrières anti-pollution.

Dans une première partie, les propriétés de rétention de ces matériaux et les méthodes utilisées pour les caractériser seront présentées. Ces propriétés de rétention sont alors prises en compte pour simuler le fonctionnement d'une barrière anti-pollution. Un exemple d'application numérique conclura cette présentation.

INTRODUCTION

Les procédés de confinement et de drainage utilisant des matériaux adaptés s'appliquent à :

- la réhabilitation, par isolation complète, d'un site contaminé
- la mise en sécurité d'un centre de stockage

Les matériaux utilisés dans ces procédés sont :

- des matériaux de remplissage (coulis, bétons)
- des géomembranes (PEHD ou PVC)

Les techniques de mise en place de ces matériaux sont celles des travaux spéciaux dans le sol déjà bien décrites dans la bibliographie (Gouvenot et al (1989)). Depuis une dizaine d'années, d'importantes recherches sur les propriétés des matériaux utilisés ont été effectuées notamment en ce qui concerne leurs interactions avec des polluants en solution. Ces recherches ont permis de mettre au point une gamme de matériaux capables de ralentir ou d'empêcher la migration des espèces polluantes en solution. Ces matériaux, dits rétenteurs de polluants, sont brevetés et commercialisés sous la marque Ecosol.

Ils ont déjà été utilisés pour réaliser dans le monde de nombreux ouvrages destinés à la protection de l'environnement.

LES MATERIAUX RETENEURS

Mode d'obtention

Ces matériaux, obtenus à partir de mélanges classiques eau-liants hydrauliques, sont fluides au moment de leur fabrication et vont se rigidifier au cours du temps.

Dans le mélange encore à l'état fluide, différents agents peuvent être introduits : - argiles spéciales, ajouts siliceux, composés adsorbants ...

Le choix des agents se fait en fonction des propriétés recherchées pour le matériau final.

La mise au point d'une formulation se fait en laboratoire. Le matériau après durcissement subit une série de tests afin d'évaluer ses propriétés de rétention dans les conditions de l'application. Cette mise au point n'est pas faite par tâtonnement mais repose sur la connaissance des

mécanismes physico-chimiques susceptibles d'affecter la mobilité des polluants en solution.

Mécanismes de rétention

Il existe de nombreux mécanismes physico-chimiques susceptibles d'agir sur des espèces chimiques en solution. Ils sont d'ailleurs à la base des techniques de traitement d'effluents dans les stations d'épuration : précipitation, oxydation, complexation ...

D'autres mécanismes mettent en jeu des propriétés spécifiques de certains matériaux : filtration-adsorption sur charbon actif

Tous se produisent dans la porosité - à l'interface liquide/solide - du matériau et, plus la surface spécifique est grande, plus l'efficacité est améliorée. Des minéraux à très grandes surfaces spécifiques entrent ainsi dans la composition des matériaux Ecosol :

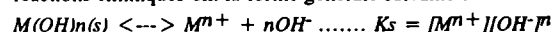
- fumées de silice, argiles ...

Mais l'essentiel de l'efficacité repose en fait sur deux mécanismes non antagonistes : la précipitation et l'adsorption.

La précipitation

La précipitation chimique est notamment utilisée pour traiter les effluents industriels acides contenant des ions métalliques en solution, tels que fer, zinc, nickel, cuivre, plomb, chrome trivalent ...

Ces cations sont essentiellement précipités sous forme d'hydroxydes métalliques selon des réactions chimiques contrôlées par le pH. Ces réactions chimiques ont la forme générale suivante :



K_s produit de solubilité, où M désigne : Zn, Pb, Cd, Cu, Hg

Dans le cas du zinc, du nickel, du plomb et du cadmium la zone de précipitation optimale de l'hydroxyde se situe vers pH 10.

Dans les matériaux à base de ciment, le pH = 12-12.5 est essentiellement imposé par la solubilité de la chaux et le contact avec des cations métalliques conduit à la précipitation d'hydroxydes. Cette réserve alcaline des ciments bien que très grande n'est pas infinie.

L'incorporation de tampons alcalins dans les matériaux Ecosol prolonge effectivement leur capacité de rétention dans le temps. De plus d'autres agents de précipitation sont utilisés, certains conduisant, suivant l'espèce métallique, à des composés insolubles quel que soit le pH.

L'adsorption

L'adsorption est un mécanisme physico-chimique reposant sur les propriétés de matériaux poreux à surface spécifique élevée comme le charbon actif (500-1000 m²/g), ou des argiles à 100 m²/g.

Sur les surfaces spécifiques internes de ces matériaux, il existe des sites particuliers où certaines espèces chimiques en solution peuvent se trouver attirées et liées selon différents mécanismes :

- *liens physiques*, dans des pores de tailles comparables aux molécules.
- *interactions de Van der Waals* dues à la polarisation de certaines molécules situées sur la surface spécifique.
- *échange ionique*: les argiles peuvent échanger leurs ions compensateurs avec les ions de la solution.
- *affinité de surface* : les molécules organiques hydrophobes ont des affinités pour des sites du charbon actif.

En général ces mécanismes ne sont pas irréversibles. Et de manière générale, l'adsorption peut être décrite par une relation d'équilibre entre la concentration d'un élément X dans la phase liquide et sa concentration dans la phase solide :

$$[X]_{(sol)} \longleftrightarrow [X]_{(liq)}$$

L'équilibre se traduit par une relation entre $Q = [X]_{(sol)}$ et $C = [X]_{(liq)}$, appelée isotherme d'adsorption.

Cette équation peut prendre plusieurs formes :

- Linéaire* $Q = K_p \cdot C$
- Langmuir* $Q = K_1 \cdot C / (1 + K_2 \cdot C)$ $K_1, K_2 > 0$
- Freundlich* $Q = K \cdot C^{1/n}$ $K > 0, n > 1$

Evaluation de l'efficacité des matériaux rétenteurs

Description des essais

L'évaluation de la capacité de rétention repose sur deux types d'essais : le "batch test" (Figure 1)

Une fois durci, le matériau Ecosol est séché à l'étuve et broyé à 200 microns. Une masse m de cette poudre est dispersée dans un volume V d'eau contaminée à la concentration Co. L'ensemble est maintenu en agitation le temps que la concentration décroisse et se stabilise à une valeur d'équilibre Ce. Après séparation des phases liquide et solide, par centrifugation et filtration, la concentration Ce est mesurée. Une certaine quantité de polluant, donnée par $(Co - Ce) \cdot V$, a alors été retenue par une masse m de poudre.

La concentration dans la phase solide est donc $Q_e = (Co - Ce) \cdot V / m$.

Dans le cas de l'adsorption, le test fournit un point de l'isotherme.

En faisant varier Co et le rapport V/m, on obtient d'autres points de l'isotherme.

l'essai de percolation (Figure 2)

Une fois durci, une éprouvette cylindrique de matériau Ecosol est introduite dans une cellule de perméabilité.

Une solution de polluant à la concentration Co est injectée sous pression à une face d'entrée de l'éprouvette. La concentration de la solution qui a traversé l'éprouvette est mesurée en fonction du temps. Le tracé de cette concentration en fonction du volume percolé fournit la courbe de restitution. L'aire située au-dessus de cette courbe représente la quantité Qe de polluant retenue dans l'échantillon. La concentration Co correspondant aussi à la concentration d'équilibre Ce, cette quantité fournit explicitement un point de l'isotherme.

Bien qu'il soit long, de un à plusieurs mois, cet essai présente l'avantage de reproduire à un facteur d'échelle près les conditions d'utilisation du matériau dans une barrière. En effet rien n'empêche d'utiliser des solutions de percolation complexes et d'analyser plusieurs éléments simultanément.

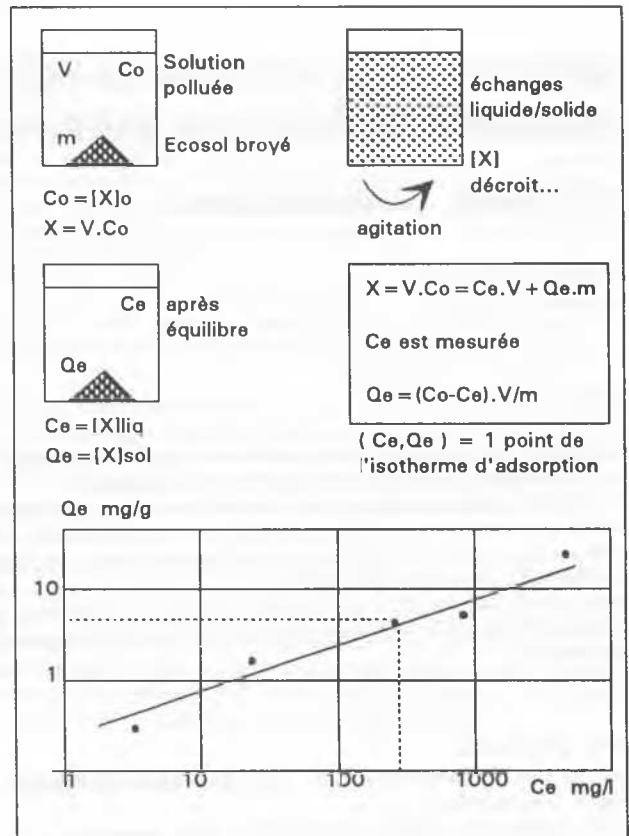


Figure 1 : le "batch test"

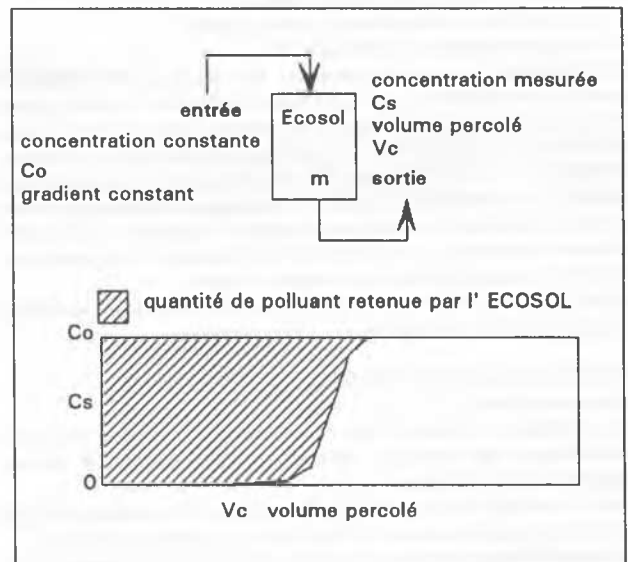


Figure 2 : le test de percolation

Exemples de résultats

Rétention des métaux lourds (Figure 3)

Cet exemple présente les résultats obtenus lors de la percolation d'une solution de cadmium à 1 gramme/litre à travers un échantillon de matériau Ecosol, contenant une forte proportion de montmorillonite.

La courbe de restitution montre clairement que la concentration en cadmium reste nulle tant que le pH ne chute pas. Au voisinage du point de neutralisation le pH chute rapidement, et la solubilité du cadmium devient très grande. A ce stade pratiquement 10 g de cadmium ont été déjà retenus par précipitation. Le matériau conserve encore une capacité de rétention non négligeable grâce aux propriétés d'adsorption et d'échange cationique de la montmorillonite. Finalement environ 25 g de cadmium sont nécessaires pour atteindre la saturation.

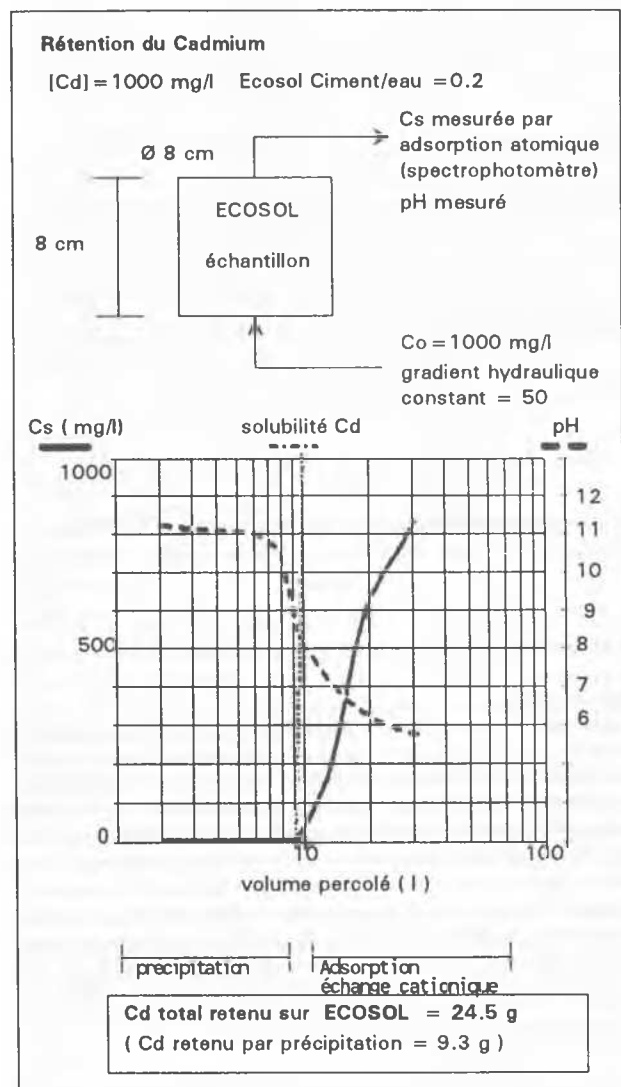


Figure 3 : Percolation du cadmium

Rétention de micropolluants organiques (Figure 4)

Le dichloroéthane (DCE 1-2) est un composé organique hydrophobe et volatil ce qui entraîne des précautions particulières lors des expérimentations :

- une étanchéité renforcée du dispositif afin d'éviter les fuites
- une détection par chromatographie en phase gazeuse (HPGC)

L'exemple présente une courbe de restitution sur un échantillon de matériau Ecosol, contenant du charbon actif.

La rétention repose surtout sur un mécanisme d'adsorption. Il est intéressant de comparer cette courbe de restitution avec celle obtenue

sur un coulis classique sans charbon actif. Dans ce cas aucune capacité de rétention particulière n'est observée.

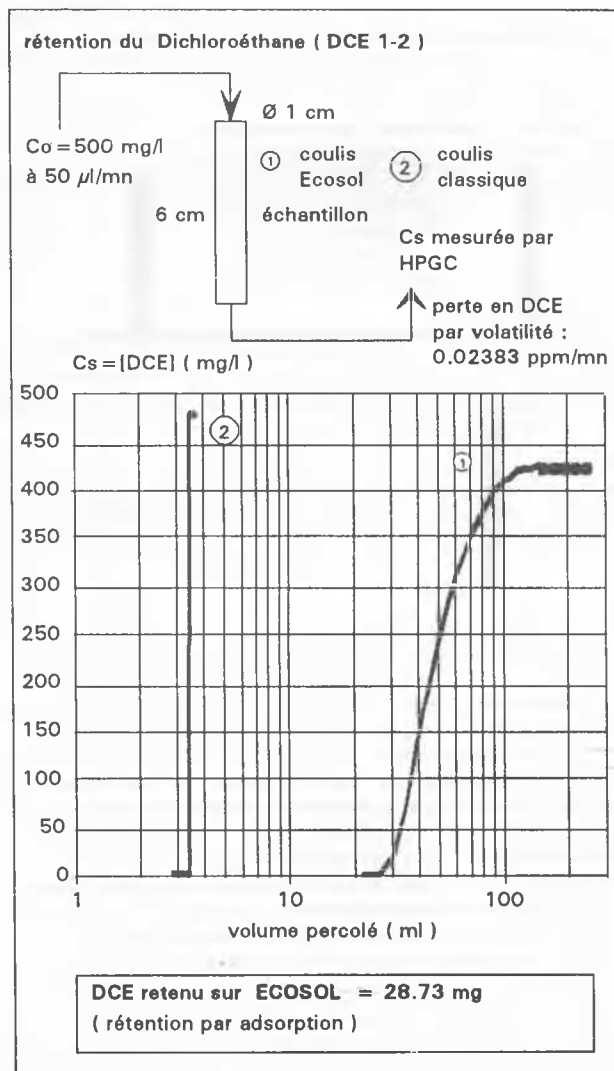


Figure 4 : percolation du dichloroéthane 1-2

Applications aux barrières souterraines anti-pollution

Les matériaux décrits jusqu'à maintenant, trouvent naturellement une application dans le domaine de la protection des eaux souterraines. Les sources de contamination du sous-sol sont multiples et résultent d'implantations industrielles en activité ou d'anciens sites contaminés.

Ces derniers sites ne reçoivent plus de substances polluantes mais représentent déjà une source de contamination pour l'environnement souterrain. Pour éviter l'extension de la pollution, des solutions de confinement de ces sites sont le plus souvent adoptées.

Le confinement a pour objectif la réduction et la maîtrise des flux entrant et sortant du site contaminé. Ce résultat est obtenu par la mise en place d'un complexe d'étanchéité comportant plusieurs éléments.

La figure 5 résume très schématiquement ces éléments. Le complexe d'étanchéité est associé à un dispositif drainant pour collecter les effluents issus du site. Ces effluents doivent alors être traités si leurs teneurs en éléments toxiques dépassent les autorisations de rejet en vigueur. Cette maintenance durera tant que les effluents présenteront un caractère nocif pour l'environnement. L'utilisation de barrières à base de matériaux possédant des propriétés de rétention spécifique

trouve ici une application évidente par leur rôle actif sur la migration des polluants.

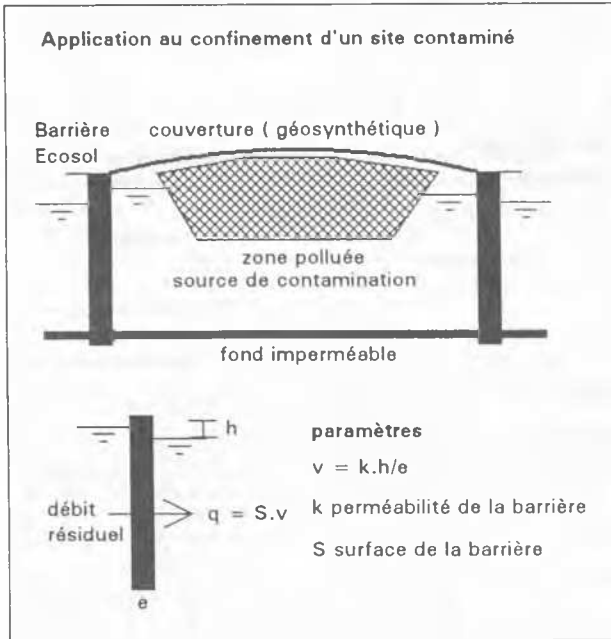


Figure 5 : Confinement d'un site contaminé

Pour comprendre l'intérêt de la barrière, il est possible d'en simuler numériquement le fonctionnement à partir de différents paramètres : le régime hydraulique (figure 5) le gradient hydraulique est supposé constant. Le débit résiduel fait intervenir la perméabilité du matériau et l'épaisseur de la barrière. la nature et l'évolution de l'effluent

L'élément polluant retenu est le dichloroéthane 1-2.

Par dilution, la concentration décroît progressivement dans le temps.

des propriétés de rétention du matériau constitutif

Elles sont obtenues à partir des essais effectués au laboratoire.

Les paramètres de la simulation sont résumés dans le tableau 1.

D	1E-10	m ² /s	coefficient de dispersion
u	1E-09	m/s	vitesse d'écoulement
e	0.5	m	épaisseur
n	0.8		porosité
tau	25	ans	constante de temps
CO	100	mg/l	concentration initiale
Ef	0.67		coefficients de l'isotherme de Freundlich
Kf	0.18		

Tableau 1 : paramètres de la simulation

Le résultat de la simulation est reproduit sur la figure 6. La ligne fine correspond à l'évolution de concentration en dichloroéthane 1-2 dans l'effluent sur la face interne de la barrière. Une barrière classique sans propriétés de rétention aurait restitué cet effluent au bout de quelques années seulement (ligne en pointillés) .

L'utilisation d'un matériau possédant des propriétés de rétention vis à vis des polluants organiques a un effet très net. La barrière diffère dans le temps la migration du dichloroéthane, à tel point que sa concentration maximale n'excède pas 5 % de la concentration initiale soit 5 ppm !

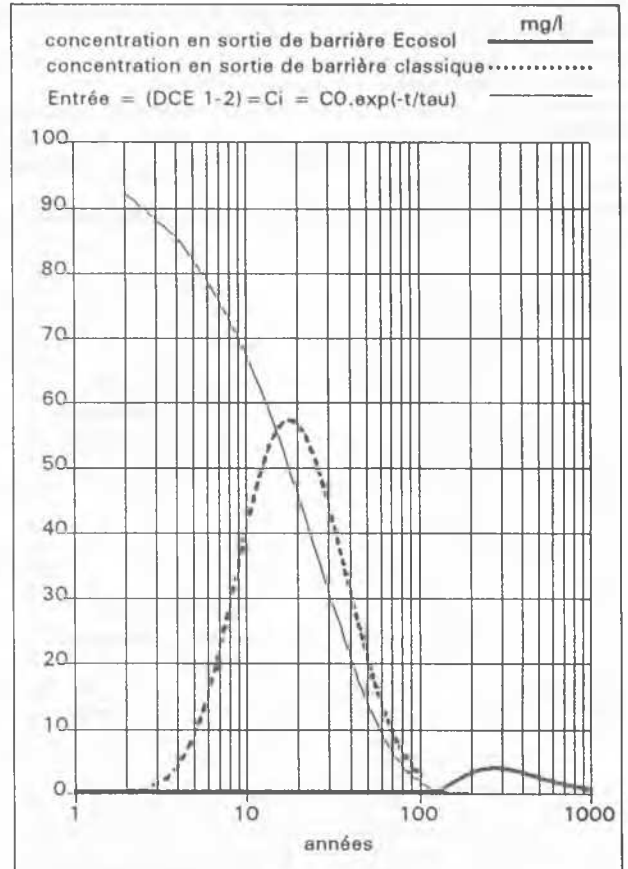


Figure 6 : Résultat de la simulation d'une barrière

CONCLUSION

Le passage des propriétés de rétention des matériaux de l'échelle du laboratoire à celle d'une barrière s'effectue sans difficultés notables. Les mécanismes de transport des espèces chimiques sont modélisables. La prise en compte d'une isotherme d'adsorption et de la nature chimique de l'effluent percolant à travers la barrière sont hors de portée des calculs classiques basés sur les seuls paramètres hydrauliques. Mais à l'heure où tous les bureaux d'études possèdent des stations de calcul puissantes, rien n'interdit plus des modélisations plus complexes. Au contraire, couplée à l'utilisation de matériaux nouveaux possédant des propriétés spécifiques, cette approche du dimensionnement explique l'intérêt de ces barrières pour la protection des eaux souterraines.

REFERENCES

- Clément, C. (1988), Etude de coulis hydrauliques pour la rétention de cations polluants, Pb, Cd, Hg, Sr, Cs, *Thèse de docteur-ingénieur Ecole des Mines de Paris/ SOLETANCHE 150 p.*
- Gouvenot, D., Cherel, A. and Bouchelaghem, A. (1989), Les techniques spéciales de génie civil appliquées à la protection de l'environnement, *L'eau, l'industrie, les nuisances-Juin 1989.*
- Gouvenot, D. and Cherel, A. (1991), Techniques de pointe de travaux spéciaux dans le sol pour la protection des eaux souterraines contre les polluants minéraux et organiques, *XXIème journées de l'hydraulique, Sophia-Antipolis, Janvier 1991.*
- de Marsily G. (1981), *Hydrogéologie Quantitative*, Masson 215 p.