

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.

Utilisation d'un nouveau géomatériau pour confiner un site pollué

Use of a new material for confining contaminated site

D.Gouvenot & G. Raillard – Soletanche Entreprise, Nanterre, France

RESUME : Soletanche a réalisé le confinement d'un site pollué par paroi profonde. Un géomatériau nouveau, peu perméable et déformable, a été mis au point pour cette paroi à partir des matériaux locaux. Une excavatrice de paroi de type Hydrofraise, équipée d'un système de contrôles, a permis de réussir cette paroi à 58 mètres de profondeur (en moyenne) présentant une perméabilité globale inférieure à 1.10^{-9} m/s.

ABSTRACT : Soletanche realized a polluted site confinement by means of deep diaphragm wall. A new material, less permeable and deformable, has been carried out for this project, using local materials. A Hydrofraise machine, equipped with a controls system, has reached the following challenge : a cut off depth more than 58 m down with a permeability less than 1.10^{-9} m/s.

1. INTRODUCTION

Pour réhabiliter un site pollué dont le volume de terrain rend inapproprié toutes techniques de nettoyage des terres, la solution consiste alors à laisser en place les terrains contaminés et à les confiner.

Pour maintenir cette pollution dans un espace donné, la réalisation d'une paroi moulée autour du site a pour objet de réduire durablement les échanges entre la zone polluée et l'extérieur.

Ces échanges doivent être contrôlés au moyen de piézomètres placés à l'intérieur et à l'extérieur de la zone confinée. Ainsi, un pompage à l'intérieur du confinement permet de contrôler les sens des écoulements car il faut que les eaux polluées restent à l'intérieur de l'enceinte. Le débit pompé d'eau polluée doit être minimal pour optimiser le fonctionnement du confinement.

Pour cela, la nature du matériau constituant la paroi d'étanchéité est fondamentale : il doit présenter, une fois en place dans la paroi, une perméabilité extrêmement faible, mais surtout une déformabilité élevée, qui permet à la paroi de suivre les déformations du sol sans se fissurer, gage de la durabilité du confinement.

Pour illustrer l'emploi de ce matériau spécial, nous avons choisi le confinement d'un site pollué par une paroi moulée profonde, dont l'excavation a été réalisée avec une excavatrice de paroi de type Hydrofraise.

2. PRESENTATION DU SITE

Situé au milieu de quartiers résidentiels, le site a été occupé entre 1850 et 1960 par une usine à gaz. Lors de son aménagement en parc de loisirs, de fortes pollutions ont été découvertes.

2.1. La pollution

Les polluants sont des métabolites de produits aromatiques et proches du phénol, des cyanures, des huiles minérales (composant mobile), du benzène, et des métaux lourds (plomb, zinc). Ils ont été rencontrés jusqu'à une profondeur de 35 mètres.

En surface, pratiquement toute la surface du parc est affectée par les polluants. Dans le sol, les polluants ont diffusé jusqu'à 400 m au-delà des limites du parc.

2.2. Caractéristiques du site

La coupe géologique du site comprend :

- une première couche de sables, d'une épaisseur d'environ 50 m et caractérisée par une forte perméabilité pouvant atteindre 1.10^{-4} m/s. Cette couche contient le second aquifère sous forme de nappe libre. Seule cette couche est polluée.

- une couche d'argile, qui se présente sous la forme de lentilles discoïdales discontinues. Ces argiles présentent une perméabilité très faible, d'environ 6.10^{-9} m/s. Entre ces lentilles argileuses, on trouve un sable fortement perméable.

- une seconde couche de sable, relativement perméable. Cette couche contient le second aquifère, captif, dont le niveau piézométrique est légèrement inférieur à celui du premier.

Cette différence entre les niveaux provoque des infiltrations d'eau souterraine de la nappe supérieure vers la nappe inférieure, à travers les lentilles d'argile.

Actuellement, aucun effet négatif sur la qualité de l'eau de la nappe inférieure n'a été détecté, malgré les infiltrations naturelles provenant de l'aquifère supérieur à travers les argiles.

3. LE PROJET : CONFINEMENT PAR PAROI MOULEE

3.1. Choix du type de confinement

La grande surface du site à confiner et l'épaisseur de la couche polluée rendent impossible toute solution de décontamination de type excavation et lavage des terres polluées.

La réhabilitation du site par confinement implique de maintenir, dans toute la zone polluée, un niveau piézométrique inférieur au niveau initial de la nappe supérieure pour éviter les écoulements latéraux, et que ce niveau piézométrique soit inférieur à celui de la nappe inférieure pour éviter les écoulements par le fond.

Ce résultat aurait pu être obtenu par un confinement hydraulique, mais du fait de la forte valeur de la perméabilité de la couche sableuse située au-dessus des lentilles d'argiles, la réalisation d'un rabattement permettant le fonctionnement du dispositif de confinement aurait impliqué de pomper en permanence à un débit trop important. Comme le traitement d'un grand volume d'eau polluée n'est pas économique, un confinement hydraulique n'est pas possible.

La solution technique pour limiter les volumes à extraire et à traiter est de réaliser une paroi de faible perméabilité autour du cœur de la zone polluée. Ainsi, un très faible débit pompé à l'intérieur de la paroi permet de rabattre la nappe au niveau requis pour que les écoulements des eaux souterraines soient dirigés vers la zone à confiner (Gouvenot, 1992 et Chereil, 1994).

3.2. Le confinement par paroi d'étanchéité

Pour réaliser un confinement, on a besoin d'ancrer la paroi d'étanchéité dans un niveau géologique présentant une faible perméabilité. Sur le site, le niveau d'ancrage est situé dans les argiles, entre 50 et 60 mètres profondeur.

Le périmètre de la paroi a été défini pour intégrer les zones où la pollution se situe à une profondeur supérieure à 6 m, limité parfois par les infrastructures (bâtiments, routes, etc.).

4. MISE AU POINT ET UTILISATION D'UN BETON SPECIAL

4.1. La nécessité d'un géomatériau spécial

Pour répondre efficacement aux spécifications du projet, nous avons développé et mis en oeuvre un nouveau géomatériau, adapté au site. Le matériau doit remplir les conditions suivantes :

- avoir une perméabilité très faible (inférieure à 10^{-9} m/s), qui est obtenue en partie par la présence de liants hydrauliques et d'argiles dans sa composition,
- être suffisamment déformable pour pouvoir résister à toute déformation du sol sans générer de fissures.
- être pérenne et résistant vis-à-vis des eaux polluées. La pérennité de la barrière étanche est assurée d'une part, en adaptant la nature de ces composants et leurs dosages et, d'autre part, en maintenant toujours le sens des écoulements de l'extérieur vers l'intérieur de la paroi, au moyen d'un pompage dans l'enceinte.

A ces trois obligations concernant les aspects à long terme du confinement, viennent s'ajouter deux autres contraintes :

- le matériau doit posséder des caractéristiques rhéologiques adaptées pour pouvoir être mis en place dans une paroi moulée profonde.
- être économiquement intéressant.

4.2. Principe des bétons plastiques

Une fois en place, le matériau autodurcissant est soumis à la pression hydrostatique et à une étreinte latérale (σ_3) due à la poussée des terres au repos, dont la valeur maximale est ici d'environ 400 kpa.

Des essais triaxiaux effectués en laboratoire ont montré que l'extension du domaine de déformations plastiques d'un tel matériau croît l'étreinte latérale (σ_3) sur la résistance en compression simple (R_c).

La figure 1 illustre cette différence fondamentale de comportement entre un béton de génie civil et un béton plastique en comparant les résultats obtenus en effectuant des essais triaxiaux.

En comparaison, la rupture dans un béton de génie civil, dont la résistance à la compression simple est d'environ 30 000 kpa, survient dès que le taux de déformation atteint des valeurs de 0,1 % à 0,15%.

Dans un tel béton, le rapport pondéral Ciment/Eau est d'environ deux. A l'échelle microscopique, les grains de ciments cristallisés (hydrates) sont si proches les uns des autres que leur enchevêtrement conduit à une structure résistante et très peu déformable. De même, à l'échelle macroscopique, le sable et les graviers s'organisent en un véritable squelette granulaire, où le sable vient remplir les interstices entre les graviers. C'est ce squelette, qui, après la prise du ciment, donnera sa grande rigidité au béton classique. Ce béton de génie civil ne pourra donc pas suivre les déformations du sol et se fissurera.

Pour donner une certaine déformabilité à ce système rigide, il faut disperser les cristaux des grains de ciments (échelle microscopique) et empêcher que les divers agrégats soient jointifs (échelle macroscopique). (Fenoux, 1985 et Gouvenot, 1989).

Pour cela, l'utilisation d'une seule granulométrie d'agrégats peut apporter une partie de la solution. En effet, l'emploi d'une seule granulométrie d'agrégats va multiplier les espaces entre les grains, réduisant ainsi les surfaces de contacts entre les différents grains.

Une autre solution possible est l'augmentation du dosage en eau, mais cet excès d'eau rend instable le béton, et provoque la ségrégation des éléments constituant le matériau par sédimentation.

Pour rendre stable ce mélange, une méthode consiste à ajouter un agent stabilisant. Parmi les différents agents existant, l'emploi de diverses

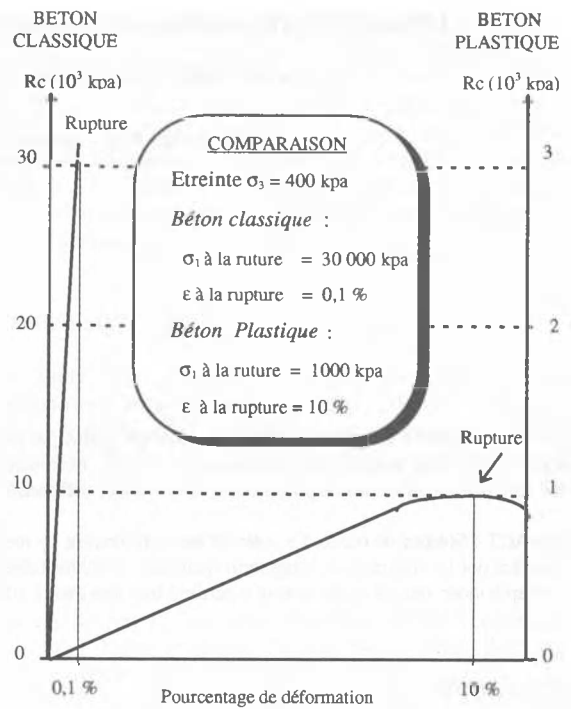


Figure 1 : Comparaison des domaines de déformations d'un béton de génie civil et d'un béton plastique. Essais réalisés sous une étreinte latérale égale à 400 kpa.

suspensions d'argiles est intéressant pour au moins trois raisons :

- l'absence d'action sur la résistance du matériau,
- la bonne connaissance de ces produits, utilisés par ailleurs dans la fabrication du fluide de perforation.
- une action positive sur la réduction de la perméabilité du matériau.

Ainsi, l'ajout d'argile peut permettre d'éviter aux grains d'être jointifs, donnant à ce mélange une forte déformabilité avant toute fissuration.

Ce matériau a un comportement mécanique élasto-plastique : c'est pour cela que ce type de matériau est qualifié de béton plastique.

4.3. Composition du mortier plastique

L'utilisation sur chantier de ce nouveau géomatériau plastique passe par une première phase d'étude, effectuée au laboratoire. En effet, pour rester économique, le béton plastique doit être composé avec les matériaux locaux. Ainsi, cette phase a consisté à tester un grand nombre de matériaux provenant du site ou de ses environs immédiats. Les résultats obtenus ont permis de sélectionner le meilleur compromis entre l'utilisation de matériaux locaux et les spécifications du chantier.

Les caractéristiques mécaniques et hydrauliques obtenues en laboratoire sur le béton plastique sont indiquées dans le tableau n°1.

Tableau n° 1: Caractéristiques du géomatériau plastique

Béton plastique	
Essais triaxiaux	
Contrainte latérale (σ_3)	400 kpa
Contrainte à la rupture	1 000 à 2 000 kpa
Module de Young	45 000 à 70 000 kpa
Taux de déformation avant rupture	9 à 15 %
Essai compression simple (R_c)	
Résistance à 28 jours	de 1 000 à 1 200 kpa
Perméabilités (gradient de 30)	de $5 \cdot 10^{-9}$ à $2 \cdot 10^{-10}$ m/s
Densité	1,70 à 1,85

Il faut noter que, même s'il n'existe pas, pour les bétons plastiques, de compositions-types à l'instar des bétons de génie civil, tous les composants de ce béton plastique proviennent des environs du site à confiner. Cet aspect est très important car il prouve que l'on peut réaliser un géomatériau sophistiqué à partir de produits locaux, ce qui a des conséquences immédiates sur le prix de revient du matériau spécial.

La seconde phase a consisté à transférer les résultats de laboratoire à l'échelle du chantier, en prenant en compte les contraintes liées à la mise en place du matériau dans la paroi.

4.4. Mise en place dans une paroi moulée profonde :

La mise en place du béton plastique s'effectue au moyen d'un tube plongeur en substituant, à partir du bas du panneau, le fluide de perforation. Au cours du bétonnage d'un panneau, l'interface entre le matériau spécial et le fluide de perforation remonte vers la surface, jusqu'à un niveau appelé niveau d'arase.

Pour cela, le matériau doit maintenir constantes ces caractéristiques pendant le bétonnage des panneaux, qui peut atteindre 8 heures. Pendant cette durée, le matériau autdurcissant doit être :

- stable : les grains (agrégats) doivent rester en suspension dans la phase liquide pendant toute la durée du bétonnage. Pour éviter la sédimentation des éléments solides du matériau et pour lutter contre l'action des forces de pesanteur liées au volume des grains, la partie fluide du matériau autdurcissant oppose des forces agissant sur la surface des grains : elle doit donc présenter un seuil de cisaillement suffisamment élevé, afin que les grains soient maintenus en suspension.

- maniable : pour conserver la maniabilité du matériau autdurcissant, plusieurs solutions existent. La plus simple est d'effectuer un surdosage en eau lors de la fabrication. Cette première solution permet d'augmenter la maniabilité mais sans maintenir cet état très longtemps. L'autre solution est d'utiliser divers adjuvants, notamment un produit retardateur couplé avec un fluidifiant, dont les dosages doivent être définis en tenant compte du faible dosage en ciment du géomatériau.

La rhéologie du matériau avant prise est donc un compromis entre le maintien d'un seuil de cisaillement élevé, et la nécessité d'être suffisamment maniable pour être mis en place dans une paroi. L'obtention et l'emploi de ce matériau autdurcissant impliquent de bien maîtriser sa rhéologie et de respecter ce compromis entre viscosité et maniabilité.

La fabrication du mortier plastique s'est effectuée en trois phases :

- réalisation d'un mélange entre la bentonite et de l'eau, qui donne une boue bentonitique,

- cette boue est ensuite mélangée avec le ciment, fabriquant ainsi un coulis de bentonite/ciment.

- le béton plastique est le résultat du mélange des agrégats avec le coulis.

Cette fabrication sur chantier a fait l'objet d'une procédure de contrôle portant sur toutes les phases de la fabrication : suivis des agrégats, mesures des caractéristiques rhéologiques de la boue bentonitique, du coulis et du béton plastique, prises d'échantillons afin de mesurer les résistances à la compression simple à 28 jours et pour contrôler les perméabilités en laboratoire.

Grâce à l'ensemble de ces mesures, la fabrication sur chantier a donné un béton plastique dont les caractéristiques mécaniques ont été remarquablement constantes pendant le chantier.

4.5 Résultats et conclusions

Le matériau constituant la paroi doit répondre à plusieurs types de sujétions, auxquels un béton normal ne peut pas satisfaire. Il a donc été nécessaire de définir un géomatériau autdurcissant spécialement adapté au problème posé, qui présente un domaine de déformations plastiques très étendu et un seuil de cisaillement élevé, tout en étant maniable pour être utilisé pour la construction d'une paroi moulée.

5. REALISATION DE LA PAROI MOULEE AVEC L'HYDROFRAISE

5.1. La machine Hydrofraise

L'excavation de la paroi de confinement, à grande profondeur, est une opération qui nécessite une grande maîtrise technique : l'utilisation de l'Hydrofraise (figure 2), appareil d'excavation puissant et précis et équipé d'un système d'enregistrement électronique, s'est imposée dès les études de faisabilité.

La machine Hydrofraise est une fraise montée à la base d'un bâti métallique (Gouvenot, 1993). A la base de ce bâti, deux moteurs flottants à axes horizontaux entraînent des tambours munis de pics qui désagrègent le terrain en tournant en sens inverse. La perforation est effectuée de manière continue, sans sortir la fraise de la tranchée.

L'Hydrofraise est équipé d'un système complet d'enregistrement, appelé Enpafraise. Grâce à un apport massif d'électronique, ce système multi-contrôles permet d'assurer la précision de la verticalité de la paroi.

Pour traiter la boue chargée des débris de perforation, la centrale se compose d'une unité de criblage et de dessablage. Une filtration permanente de la boue est assurée, ce qui permet de travailler avec un fluide de perforation constamment renouvelé dans la tranchée. Une conséquence directe de ce traitement est que les déblais excavés sont quasiment secs, donc plus faciles à évacuer.

5.2. Réalisation des travaux

Une "boîte d'essai" a été effectuée avant le début des travaux de confinement. Cette boîte d'essai avait une forme rectangulaire, longue de 20 m et large de 8 m.

Les buts de cet essai étaient les suivants :

- vérifier la technique proposée : en effet, la profondeur, supérieure à 58 m, impliquait un soin particulier pour assurer la continuité des différents panneaux. Pour cela, le système Enpafraise permet d'assurer que la verticalité des panneaux excavés reste dans des limites acceptables en fournissant des mesures inclinométriques en temps réel au foreur.

- vérifier si le matériau constituant la paroi correspond à la spécificité du projet.

Un essai de pompage, effectué dans la boîte, a permis de valider l'emploi de la méthode de perforation et le géomatériau spécialement développé.

L'excavation de la paroi a été faite en réalisant des panneaux primaires et des secondaires. Un panneau primaire est un panneau complet, qui est constitué de deux passages de l'Hydrofraise, laissant entre eux un merlon, qui sera excavé en dernier.

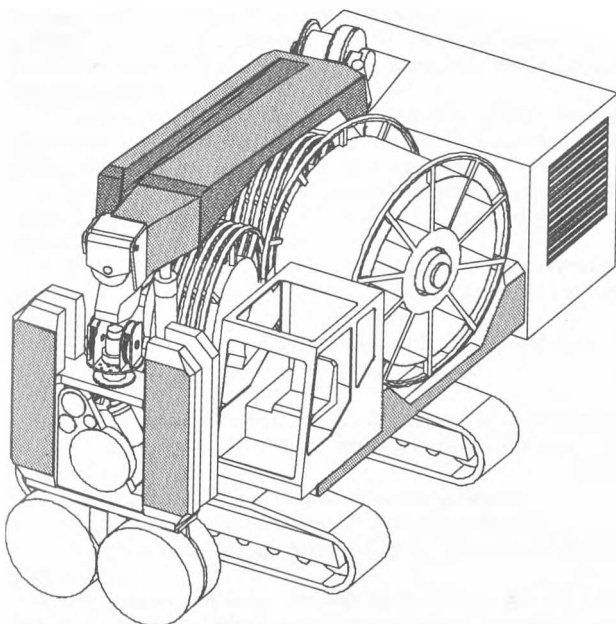


Figure n° 2 : Exemple de machine pour excaver les parois : Hydrofraise compacte.

Les panneaux secondaires viennent s'intercaler entre les panneaux primaires et, lors de leur perforation, ceux-ci "mordent" dans le matériau durci des panneaux primaires adjacents au niveau du joint, assurant ainsi un recouvrement d'au moins 0,4 m entre les panneaux primaires et le secondaire.

Pour assurer la continuité de la paroi moulée, la valeur maximale autorisée pour les déviations latérales a été fixée à 0,2 % de la profondeur. Cette spécification peut apparaître très sévère, mais est justifiée si on veut garantir la continuité de la paroi en profondeur.

Pour respecter cette spécification, un maximum de soin est apporté à la position de départ de l'Hydrofraise, dont la mise en place est réglée au centimètre près.

Ce système fait appel à de nombreux capteurs, qui permettent de mesurer en temps réel et en continu les paramètres suivants :

- la profondeur de l'outil
- l'angle d'inclinaison du bâti de l'hydrofraise dans le plan de la paroi
- l'angle d'inclinaison dans le plan perpendiculaire à la paroi
- la vitesse d'avance de l'outil,
- les couples de rotation des deux moteurs des tambours portant les pics excavateurs.

Ces deux derniers paramètres sont directement liés à la dureté des terrains traversés et permettent de reconnaître les changements dans la géologie des terrains. Ainsi, le système d'enregistrement Enpafraise indique que le forage en cours a atteint la couche d'ancrage de la paroi et que la hauteur d'ancrage, définie par la conception du projet, est respectée.

Toutes ces mesures sont affichées sur un écran dans la cabine du foreur. L'ensemble de ces mesures, transmises en temps réel par le système Enpafraise, permet au grutier de corriger les amorces de déviations en profondeur.

6. CONCLUSION

On trouvera dans le tableau 2 les principaux chiffres de cette opération :

Tableau 2 : Les chiffres de cette opération.

Epaisseur Paroi	0,82 m
Profondeur Moyenne	58 m
Périmètre	1225 m
Surface de la paroi	69 600 m ²
Surface Confinée	85 000 m ²
Perméabilité en grand (sur 1 an) (Spécification pour la perméabilité en grand : 1.10 ⁻⁸ m/s)	1,6 . 10 ⁻⁹ à 6,6.10 ⁻¹⁰ m/s

Ce chantier récent a montré que l'association entre un matériau plastique et une machine excavatrice Hydrofraise est une solution technique intéressante pour réhabiliter des sites pollués. En effet, même en présence d'une géologie défavorable qui imposait une profondeur importante pour ancrer la paroi moulée, cette technique a permis de limiter considérablement le débit d'eau à pomper dans la boîte confinée, cette eau devant subir un traitement onéreux avant d'être restituée au milieu naturel. A long terme, la prise en compte de cette réduction des quantités d'eau à traiter montre l'intérêt économique de la réalisation d'un confinement par paroi moulée profonde.

L'emploi du mortier plastique, par la pérennité de ses caractéristiques mécaniques et hydrauliques, permet d'assurer une constance du débit à pomper. Un nouveau géomatériau a été développé, alliant une perméabilité très faible et une déformabilité importante, qui est un gage de durabilité : en effet, la paroi pourra suivre les déformations du sol sans se fissurer, conservant ainsi toutes ses caractéristiques hydrauliques. D'autre part, ce béton plastique a pu être réalisé à partir de produits locaux, contribuant ainsi à l'obtention d'un matériau correspondant aux spécifications du projet. (Van Wessep, 1996)

Du fait de la profondeur à atteindre, la perforation a été effectuée par une machine Hydrofraise, équipée d'un système Enpafraise pour contrôler les éventuelles déviations latérales. Les travaux de paroi moulée ont été terminés en octobre 1994. En 1995, plusieurs séries d'essais de pompage ont montré que les spécifications sur la perméabilité en grand ont été largement respectées.

L'application des matériaux spéciaux pour confiner par paroi moulée les sites pollués est en pleine évolution : il existe des matériaux spéciaux (Ecosol), qui présentent des caractéristiques hydrauliques et mécaniques semblables à celles des mortiers plastiques, et qui sont capables de retenir les polluants au sein de la paroi, au moyen de réactions physico-chimiques.

La composition de ces matériaux Ecosol peut être adaptée en fonction du type de polluant à retenir (Gouvenot, 1992).

De plus, un nouveau concept faisant appel à des parois drainantes rétentrices vis à vis des polluants est opérationnel. Avec ces barrières, on ne recherche pas à créer un confinement hydraulique pour bloquer l'eau polluée, mais à effectuer un confinement chimique, en retenant les espèces polluantes dans la barrière, tout en laissant passer l'eau. (Bouchelaghem, 1994).

REFERENCES

- Bouchelaghem A. & Gouvenot D. 1994. Barrières ouvragées pour la protection des eaux souterraines. *XIII^{ème} ICSMFE, New Delhi, Inde, Janvier 1994.*
- Chérel A, Willems L. & Rath T 1994. Réhabilitation de site et confinement par paroi moulée profonde. *L'eau, l'industrie, les nuisances n°178, 56-58.*
- Fenoux G. Y. et al. 1985. Matériaux de remplissage pour coupures étanches. *Bulletin 51 de la Commission Internationale des Grands Barrages, 25-40.*
- Gouvenot D 1989. L'utilisation de nouveaux matériaux dans la technique des parois moulées. *XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, 13-18 août 1989.*
- Gouvenot D. 1992. Environnement et Géotechnique. *Premières Assises du Génie Civil, La Défense, 8-10 décembre 1992.*
- Gouvenot D. 1993. L'Innovation Géotechnique au service de la protection de l'Environnement. *Colloque International Environnement et Géotechnique, Paris, 6-8 Avril 1993.*
- Van Wessep B., Schmidt R., Gouvenot D., Raillard G. 1996. Utilisation d'un nouveau géomatériau pour confiner les sites pollués. *Symposium international Exemples majeurs et récents en géotechnique, Paris, 1-2 février 1996.*