

Réalisation de pilotes industriels pour la bioremédiation

Lazar Avram*, Gilles-Claude Dussap**, Julien Troquet**

- * Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, Bd. București, 39, Ploiești
e-mail: lavram@upg-ploiesti.ro
- ** Université Blaise Pascal, 24 avenue des Landais, Clermont-Ferrand, França
e-mail: g.dussap@polytech.univ-bpclermont.fr
- *** Biobasic Environnement, Clermont-Ferrand, França
e-mail: jtroquet@biobasicenvironnement.com

Résumé

Un procédé de bioremédiation a été analysé à deux échelles différentes, d'une part sur une ligne de réacteurs pilotes d'une capacité de 15 kg de terre polluée humide [1-3, 10, 11] et d'autre part sur un réacteur de grande capacité chargé à 1,8 tonne. Le but de cette étude est de comparer deux échelles de traitement afin de progresser dans la détermination des critères d'extrapolation qui doivent permettre, à partir d'expériences en laboratoire, de fixer les conditions opératoires sur un site pollué. La première échelle est celle de réacteurs colonnes de quelques litres : elle est appelée Ligne pilote de laboratoire BIOrem. La deuxième échelle, qui fait l'objet de cette étude, est un réacteur de plusieurs mètres cube ; elle est désignée Pilote industriel BIOsol.

Mots clefs: *bioremédiation, réacteur pilote, site pollué*

Introduction

Le suivi de la remédiation a été réalisé par bilan gazeux à partir de la mesure du débit d'air introduit dans la couche de terre polluée et la mesure en ligne des fractions molaires de sortie en CO₂ et en oxygène. Ceci a permis d'établir et de valider une stœchiométrie globale rendant compte de la dégradation des polluants. Le protocole expérimental permet donc de suivre en ligne l'abattement de la pollution.

Aux deux échelles concernées, les résultats d'abattement de pollution sont similaires pour les deux opérations au bout de 100 jours de traitement et avec une vitesse superficielle de gaz identique dans les deux cas. Le dispositif expérimental utilisé sur le pilote de grande échelle, plus sensible que le dispositif mis en place sur les installations de taille réduite, a permis en outre de mettre en évidence l'importance des phénomènes transitoires lors des premiers jours de traitement. Ceci doit conduire à une modélisation plus fine des étapes qui limitent les cinétiques d'abattement de la pollution et mettre une optimisation du procédé [1-16].

Ligne pilote de laboratoire BIOrem

Cette ligne pilote a été décrite dans les travaux précédents [1-3, 10-14]. Il s'agit de 5 réacteurs colonne en PVC. Ces réacteurs contiennent une certaine masse de terre à traiter disposée en lit fixe. L'air est injecté par le bas de la couche. L'eau ou une solution nutritive est envoyée par le haut à contre courant pour éventuellement augmenter l'action des micro-organismes.

Différents paramètres sont contrôlés et/ou mesurés :

- le débit d'air en entrée;
- la quantité totale de CO₂ produit au cours du temps;
- la vidange et/ou l'ajout de liquide;
- la masse de terre à traiter;
- la pollution résiduelle par prélèvement.

Le suivi du cumul de CO₂ en sortie est réalisé par dosages successifs d'une solution de potasse (solution 0,1M ; pH 13) dans laquelle le CO₂ produit est absorbé. Les dosages sont effectués toutes les 24 heures. Pour éliminer tout artéfact, le CO₂ dans l'air injecté est éliminé de la même façon. Le schéma de principe d'une colonne BIOrem© Biobasic Environnement est présentée dans la figure 1.

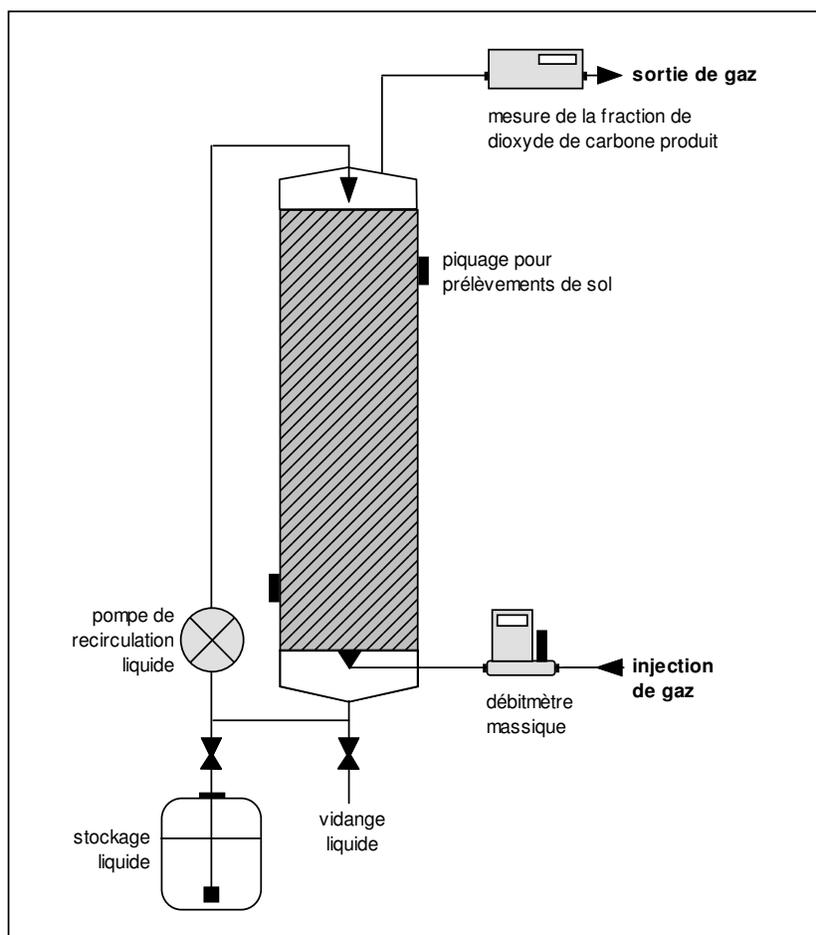


Fig. 1. Schéma de principe d'une colonne BIOrem © Biobasic Environnement®

Pilote industriel BIOSol

Le réacteur BIOSol a été spécifiquement conçu pour reproduire une couche de sol pollué dont l'épaisseur représente la profondeur moyenne de pénétration de la pollution sur les sites contaminés. La décision de reproduire cette imposante couche de sol *ex-situ* dans le hall d'essais de la plate-forme Bio-up® a été prise afin de pouvoir contrôler précisément l'ensemble des paramètres physico-chimiques, biologiques et hydrogéologiques du sol et du procédé pendant les différents tests de traitement. La figure 2 présente le schéma de principe du pilote industriel BIOSol © Biobasic Environnement®

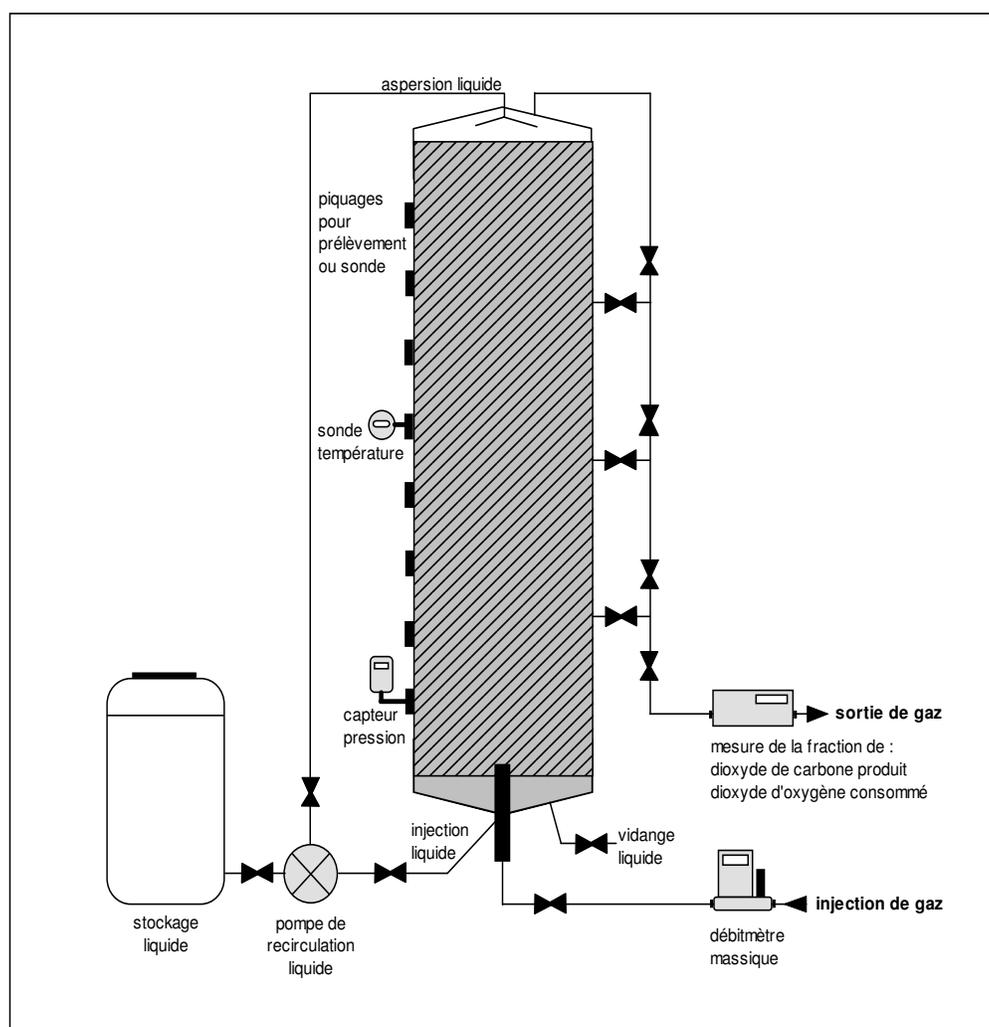


Fig. 2. Schéma de principe du pilote industriel BIOSol © Biobasic Environnement®

Comme on peut le voir sur la figure 2, le pilote est équipé d'une rampe de 8 piquages espacés de 50 cm chacun et pouvant recevoir différentes sondes de mesures (température, pression, potentiel rédox, humidité...). Le procédé de bioremédiation est intégralement suivi et contrôlé en continu par l'analyse des gaz produits et consommés lors du processus de dégradation.

L'abattement de la charge polluante est suivi en continu par la méthode des bilans gazeux (voir ci-dessous) et en discontinu par prélèvement, extraction et analyse des polluants. Les analyses effectuées permettent de mettre en évidence l'élimination de la pollution mais également l'apparition éventuelle de sous-produits de dégradation d'origine biotique ou abiotique.

Ceci constitue un progrès très sensible par rapport à la ligne de réacteurs BIOrem puisque les concentrations (ou pressions partielles ou encore fractions molaires) en O₂ et en CO₂ sont mesurées en continu. Ceci permet d'avoir un calcul des vitesses instantanées de production de CO₂ et de consommation de l'oxygène. L'intégration numérique de la vitesse de production de CO₂ donne, comme pour la ligne BIOrem, le cumul de la quantité produite. L'intégration de la vitesse de consommation de l'oxygène fournit le cumul de l'oxygène assimilé.

Les *coefficients géométriques de comparaison* entre la ligne pilote de laboratoire BIOrem et le pilote industriel BIOSol sont reportés dans le tableau 1.

La terre testée est identique dans les deux expériences. Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- pollution : 15 000 ppm;
- humidité : 20 % (80 % de matière sèche);
- masse volumique de la terre humide : 1 800 kg m⁻³;
- masse volumique de la terre sèche : 2 250 kg m⁻³;
- degré de compaction de la terre humide dans les réacteurs : 95 % (5 % de gaz).

La vitesse superficielle du gaz dans la couche de terre est calculée comme le rapport du débit volumique du gaz à l'entrée sur la section de la colonne vide :

$$U_{\text{superficielle}} = Q_{\text{air}} / S . \quad (1)$$

Tableau 1. Passage de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle

Paramètres	Ligne BIOrem, colonnes 1, 2, 3 et 4	Pilote BIOSol	Coefficient multiplicateur
Matériau	PVC	Inox 316 L	
Hauteur totale, m	0,5	4,5	9
Hauteur utile, m	0,48	1,28	2,7
Diamètre, m	0,15	1,0	6,7
Section, m ²	0,0177	0,785	44
Volume utile, m ³	0,0085	1,0	117
Charge utile, kg terre humide	15,5	1800	117
Charge utile, kg terre sèche	12,4	1440	117
Débit d'air entrée, l·min ⁻¹	0,1	5	50
Degré de vide supposé	5 %	5 %	
Vitesse superficielle de l'air, m·h ⁻¹	0,34	0,38	1,1
Vitesse réelle de l'air, m·h ⁻¹	6,8	7,6	1,1
Temps de séjour du gaz dans la couche de terre, min	4	10	2,5
Temps de séjour du gaz dans le réacteur, min	5	600	120

La vitesse réelle dans la couche de terre est calculée comme le rapport entre la vitesse superficielle et le degré de vide de la couche (5 %).

Les temps de séjour dans la couche de terre sont calculés en divisant la hauteur de la couche par la vitesse réelle de traversée de la couche.

Les temps de séjour dans les réacteurs sont calculés en tenant compte des volumes de gaz totaux dans les réacteurs. Comme le réacteur industriel n'est rempli que sur le premier mètre, au tiers de sa capacité totale, le temps de séjour dans le réacteur est relativement long (environ 10 h). On

estime en général que les résultats relevés en sortie sont représentatifs du régime stationnaire lorsqu'on attend environ 3 temps de séjour (soit dans ce cas environ 2 jours).

Signalons que l'on peut mettre en place une stratégie de déconvolution des signaux observés en sortie à partir d'une mise en équations complète du problème en régime transitoire (intégration d'un système d'équations différentielles). A ce stade de l'étude qui se limite pour l'instant à une simple comparaison des résultats obtenus dans les deux types de réacteurs ce travail lourd peut être évité.

Conclusions

1. Le passage de l'échelle laboratoire à l'échelle industrielle doit permettre, en reproduisant une couche de terrain pollué moyenne, de valider les résultats obtenus à petite échelle et de vérifier les critères d'extrapolation des modèles cinétiques définis sur la base des résultats de laboratoire, afin d'autoriser une adaptation rapide de tests de laboratoire aux conditions du terrain, et de proposer une gamme de traitement adaptée.
2. Les objectifs du changement d'échelle des pilotes sont variés et sont principalement: la validation des résultats obtenus à l'échelle laboratoire; l'évaluation de différents systèmes d'injection ; la vérification et la validation des critères d'extrapolation en hauteur.
3. Afin de comparer les expériences, nous avons choisi de fonctionner à vitesse superficielle du gaz identique dans les deux cas (tableau 1).

Bibliographie

1. Avram L., Troquet J. – *Situation actuelle de la décontamination des sols et des sous – sols en Roumanie*, En volume, Simposion ONU, Paris, mars 2001;
2. Avram L., Troquet J. – *Etude microbiologique préliminaire concernant la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures*, Jurnalul de petrol și gaze nr. 10 (28), 2001;
3. Avram L., Troquet J. – *Etude critique des différentes techniques de dépollution des sols et des sous-sols*, Jurnalul de petrol și gaze nr. 10 (52), pp. 62...66, 2003;
4. Eberhardt, C., Grathwohl, P.: *Times scales of organic contaminant dissolution from complex source zones*, Journal of Contaminant Hydrology, 59, 2002, pp 45...66;
5. Eguchi, M and co-workers – *A field evaluation of in-situ biodegradation of trichloroethylene through methane injection*, Water Research, 35, 9, 2001;
6. Lecomte, P. – *Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines*, Editions Tec & Doc, Paris, 1995;
7. Mihopoulos, P.G., Suidan, M.T., Sayles, G.D., Kaskassian, S. – *Numerical modelling of oxygen exclusion experiments of anaerobic bioventing*, J. of Contaminant Hydrology, 58, 3-4, 2002, pp. 209...220;
8. Mulder, H., Breure, A.M., Rulkens, W.H. – *Application of a mechanistic desorption-biodegradation model to describe the behaviour of polycyclic aromatic hydrocarbons in peat soil aggregates*, Chemosphere, 42, 2001, pp. 285...299;
9. Ruberto, L and co workers – *Effectiveness of the natural bacterial flora, biostimulation on the bioremediation of a hydrocarbon contaminated Antarctic soil*, 52, 2, 2003, pp. 115...125;
10. Troquet J., Avram L. – *Stadiul actual al tehnicilor și procedelor de decontaminare ale solurilor și subsolurilor poluate cu hidrocarburi*, Jurnalul de petrol și gaze, nr. 10(16), februarie 2001;
11. Troquet J., Avram L. – *Effet des surfactants sur la dégradation de polluants en bioremédiation*, Jurnalul de petrol și gaze, nr 13(19), februarie 2001;
12. Troquet, J., Larroche, C, Dussap, C-G. – *Evidence for the occurrence of an oxygen limitation during soil bioremediation by solid-state fermentation*. Biochemical Engineering Journal, 13, 2003, pp. 103...112;

13. Troquet, J., Troquet, M. – *Economical aspects of polluted soil bioremediation*, Brownfields 2002, Cadiz, 2-4 September 2002;
14. Troquet, J., Creuly, C., Dussap, C-G. – *Limitations of biodegradation rates for in-situ bioremediation processes*, 10th European Congress on Biotechnology, “Biotechnological challenges in the new millennium”, Madrid, 8-11 July 2001;
15. Van Gestel, K. and co workers – *Bioremediation of diesel oil-contaminated soil by composting with biowaste*, Environmental Pollution, 125, 3, 2003;
16. Yang, Y., Ratte, D., Smets, B.F., Pignatello, J.J., Grasso, D. – *Mobilization of soil organic matter by complexing agents and implications for polycyclic aromatic hydrocarbon desorption*, Chemosphere, 43, 2001, pp. 1013...1021.

Realizarea unei instalații pilot la scară industrială pentru bioremediere

Rezumat

Procedul bioremedierii a fost analizat, într-o primă fază, în cadrul unei linii de bioreactoare pilot (Ligne pilote de laboratoire BIOrem), cu o capacitate de 15 kg teren umed poluat [1-3, 10, 11]. În cele ce urmează este prezentat un reactor de mare capacitate (1,8 tone) denumit Pilote industriel BIOSol. Scopul studiului de față este acela al comparării celor două scări de tratament în vederea realizării de progrese în ceea ce privește determinarea criteriilor de extrapolare care trebuie să permită, pornindu-se de la experimentele de laborator, fixarea condițiilor operatorii într-un sit poluat.