

# Influence de la présence d'argile et d'eau sur l'efficacité de la SVE en colonne de laboratoire

**Khaoula Esslimani<sup>1,2</sup>, Mariem Kacem<sup>1</sup>, Otmane Boudouch<sup>2</sup>, Belkacem Benadda<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Université Lyon, ENISE Saint-Etienne, Lab. de Tribologie et Dynamique des Systèmes LTDS, France

<sup>2</sup> Équipe Procédés Agro-Industriels & Environnementaux EPAIE, Faculté des Sciences et Techniques, Université Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal Maroc

<sup>3</sup> Laboratoire DEEP : Déchets, Eau, Environnement, Pollution, INSA, France

## RESUME

Dans ce travail, des propriétés du sol (composition et degré de saturation en eau) ont été testées afin de déduire leurs effets sur l'extraction sous pression réduite (Soil Vapor Extraction SVE). Le but étant d'apporter une analyse de suivi complet de la SVE au niveau des gaz sortants mais aussi au niveau de l'hydrodynamique des écoulements dans le sol au cours de l'extraction. Deux sols-modèles sont testés dans ce travail: le premier est composé à 100% de sable et le deuxième est composé de 95% de Sable plus 5% de Kaolin en masse. Les expériences sont réalisées avec des échantillons à l'état sec et avec un apport de 13% en masse d'eau. Le polluant utilisé est le n-décane. Les résultats montrent que le sol modèle composé de sable permet d'extraire une plus grande quantité de polluant qu'un sol contenant de l'argile. La diminution de la saturation du sol en phase aqueuse due à l'extraction ainsi que l'influence de la présence de l'eau sur le rendement de la SVE ont été mises en évidence.

**Mots-clefs** : SVE, sable-argile, COV, multipolluants organiques, dépollution des sols

## I. INTRODUCTION

La dépollution par extraction sous pression réduite ou Soil Vapor Extraction (SVE) est une technique in-situ très employée pour dépolluer la zone non saturée des sols. Elle est utilisée essentiellement pour les composés organiques volatils (COV) et certains composés semi-volatils (COSV). Le sol est décontaminé en induisant un flux d'air à travers ses zones contaminées. Ce flux d'air perturbe l'équilibre existant entre les contaminants et leur milieu de fixation, en les poussant à se vaporiser et à se déplacer avec le flux d'air extrait qui sera traité ultérieurement. Le bon fonctionnement de la méthode est lié à la nature du sol, aux propriétés physico-chimiques des contaminants et aux paramètres d'application de la méthode. Certains travaux ont fait l'objet d'étude de l'influence de la nature des sols (Albergaria et al., 2012), la saturation en eau [Albergaria et al., 2012 ; Kacem et al., 2017] ainsi que la nature du polluant (Albergaria et al., 2012). Il a été démontré que lorsque la teneur en eau est importante, le sol devient très peu perméable à l'air ce qui influence négativement l'efficacité de l'extraction des polluants (Albergaria et al., 2006).

La première partie de l'étude présentée ici concerne l'impact de l'application d'une dépression sur l'évolution de l'eau dans le sol. La deuxième partie concerne l'effet de la présence de particules

argileuse dans un sol sableux ainsi que la présence de l'eau sur le rendement de l'extraction d'un polluant.

## II. Matériels et Méthodes

Le dispositif expérimental utilisé permet de suivre les concentrations des polluants dans le gaz extrait ainsi que le suivi de l'état du sol (saturation en eau, pression et température) (figure 1).

La colonne utilisée est une colonne en plexiglass, un thermomètre et un tensiomètre T5 (METER) sont introduits au milieu de la colonne. Une pompe à vide de type « KNF Neuberger N840 FT-18 » est raccordée à la sortie en haut de la colonne. Un débitmètre volumique de type DK37 muni d'une vanne de régulation assurant un débit de 0 à 40 L/min sont installés à la sortie de la pompe. Le gaz extrait est analysé avec un chromatographe en phase gaz avec un détecteur à ionisation de flamme GPC-FID de type « Clarus 590 » (Perkin Elmer).

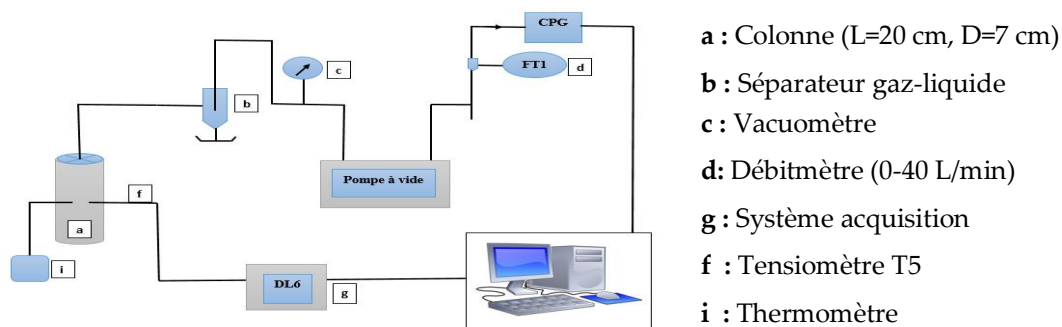


FIGURE 1. Dispositif expérimental de la SVE à l'échelle de laboratoire

Deux sols-modèles sont testés dans ce travail: le premier est composé à 100% de sable HN31 (Sol 1) et le deuxième est composé de 95% de Sable HN31 plus 5% de Kaolin en masse (Sol 2). Les propriétés de ces matériaux sont présentées sur le tableau 1.

TABLEAU 1. Caractéristiques physiques des matériaux utilisés pour former les sols modèles

	kaolin	sable
Masse volumique sèche ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,45	2,65
Masse volumique spécifique des grains solides ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,65	
Diamètre moyen $d_{50}$	2 $\mu\text{m}$	0,34 mm
Coefficient d'uniformité $C_u$		1,39
Capacité d'adsorption du bleu de méthylène (valeur de bleu du sol VBS)	1,75	

Le sol 2 a été préparé de la manière suivante : dans un récipient contenant le sable, on rajoute la quantité d'argile calculée, ensuite on mélange à la main pendant 10 minutes et attentivement pour éviter la perte des particules d'argile. Cette méthode permet d'obtenir un mélange homogène dans lequel les particules de kaolin sont déposées en surface des grains de sable. Pour les échantillons humides une autre étape est ajoutée ; l'eau est introduite avec un mélange manuellement jusqu'à l'obtention d'un milieu homogène.

Une humidité du sol de teneur massique 13 % est adoptée pour un premier test et un sol sec est utilisé pour un autre test pour chaque sol. Une masse de 3,64 g de n-décane est introduite par mélange manuel avec l'échantillon sur sol humide et sur sol sec.

Le remplissage de la colonne se fait par introduction du sol en couches successives de 3 cm d'épaisseur chacune. Chaque couche est tassée trois fois à l'aide d'une masse cylindrique de 500 g. Après la mise en place de l'échantillon, il a été vérifié pour chaque configuration les pertes possibles en eau et en polluant dues à cette procédure. Les pertes d'eau sont inférieures 1% de la quantité d'eau introduite initialement. Le polluant étant volatil les mesures des quantités restantes suite à la préparation de la colonne montrent des pertes non négligeables. Ainsi les valeurs trouvées seront considérées comme les concentrations initiales de polluant. La perméabilité à saturation des échantillons est mesurée par le dispositif KSAT(METER). Les caractéristiques des échantillons utilisés sont résumées sur le tableau 2. Une moyenne de trois essais effectués est considérée pour chaque mesure avec une évaluation de l'incertitude expérimentale (tableau 2).

**TABLEAU 2. Propriétés des échantillons utilisés**

Sol-modèle	Porosité du lit de particule	Perméabilité à saturation (m/s)	Degré de saturation en eau	n-décane présent dans la colonne (g)
Sol 1 sec	0,45 ± 1,56 10 <sup>-3</sup>	3,27 10 <sup>-4</sup> ± 3,74 10 <sup>-5</sup>	0%	2,7
Sol 1 humide			47,6%	2,6
Sol 2 sec	0,44 ± 1,68 10 <sup>-3</sup>	5,95 10 <sup>-5</sup> ± 2 10 <sup>-6</sup>	0%	3,4
Sol 2 humide			49%	2,4

Afin de déterminer l'effet d'une application de la SVE sur un sol partiellement saturé, une première série de test a été réalisée avec uniquement du sol partiellement saturé sans existence de polluant. A la fin de l'expérience, des échantillons de sol à différentes hauteurs de la colonne sont récupérés et analysés afin d'identifier la teneur en eau restante. La deuxième série d'expériences concerne la SVE appliquée à un échantillon pollué avec du n-décane. Le débit d'extraction est de 16 L/min.

Tous les résultats représentent une moyenne sur trois essais effectués avec l'estimation de l'erreur expérimentale par calcul de l'incertitude-type.

### III. Résultats et discussion

#### A. Etat du sol partiellement saturé soumis à une SVE

Les résultats (figure 2.a) montrent que le potentiel de l'eau diminue jusqu'à atteindre des valeurs stables ce qui montre la désaturation en eau du milieu. La dépression est instantanément constante pour le sol 1 alors qu'elle nécessite plus de temps dans le cas du sol 2. Cette observation est due aux valeurs de perméabilité des sols ainsi qu'à la présence d'eau retenue par l'argile avec des liaisons plus fortes que celles avec le sable. Dès les premières minutes qui suivent le démarrage de l'extraction le séparateur gaz liquide extrait des quantités d'eau correspondant à 6,51 % et 0,46 % des 13% de teneur en eau massique initiale respectivement du sol 1 et du sol 2.

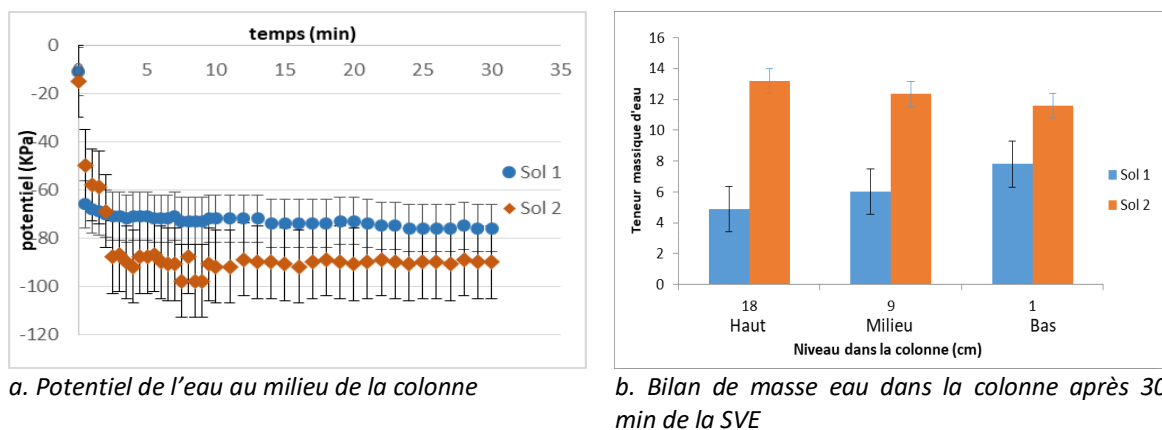
Dans le cas du sable l'eau initialement ajoutée est majoritairement une eau mobile, l'eau ne s'adsorbe pas d'une manière importante sur ce matériau contrairement à l'argile. Ainsi la dépression permet de mobiliser l'eau du sable qui atteint rapidement un régime constant alors que dans le sol 2 la dépression mobilise en plus de l'eau mobile -qui est en plus faible quantité-, de l'eau liée. La stabilisation du potentiel d'eau nécessite alors plus de temps.

La température est restée constante le long de l'expérience. La pression à la sortie de la colonne se stabilise instantanément pour le sol 1 et au bout de 1 à 2 min pour le sol 2. Cette observation est due aux perméabilités différentes des deux sols.

Les analyses des sols effectuées 30 min après la fin de la SVE à différentes hauteurs de la colonne (bas, milieu et haut) ont donné les résultats présentés sur la figure 2.b. Partant d'une condition initiale d'humidité homogène à tous les niveaux de la colonne, à la fin de l'expérience les sols présentent des humidités différentes. Dans le cas du sol 2, la teneur en eau en haut de la colonne est plus importante qu'en milieu et qu'en bas. L'échantillon dans ce cas reste plus proche de son état suite à l'application de la dépression, soit avec une quantité d'eau plus importante en haut de la colonne à côté du point d'extraction. L'observation est inversée pour le sol 1. Il est possible que cette évolution soit due à l'effet de la gravité où l'eau descend rapidement dans le sable pour lequel la porosité et la perméabilité sont importantes.

Dans le cas du sol 2 avec la présence d'argile, une plus grande quantité d'eau est restée retenue par le sol. Un bilan de moyenne des résultats de la figure 2 indique 5,48 % et 12,30% de teneur en eau restante respectivement dans le sol 1 et dans le sol 2. La capacité de rétention de l'eau du sol 2 est plus importante que pour le sol 1 dû à la présence de l'argile qui induit une succion plus importante.

Le bilan de l'eau recueillie dans le séparateur et celle restée dans les sols donne une teneur en eau massique de 11,99% et 12,76 % respectivement pour sol 1 et sol 2. La différence avec la quantité initiale introduite d'eau est celle de l'eau partie par évaporation sous l'effet de la dépression appliquée.



**FIGURE 2. Résultats des tests d'application de la SVE sur un sol humide**

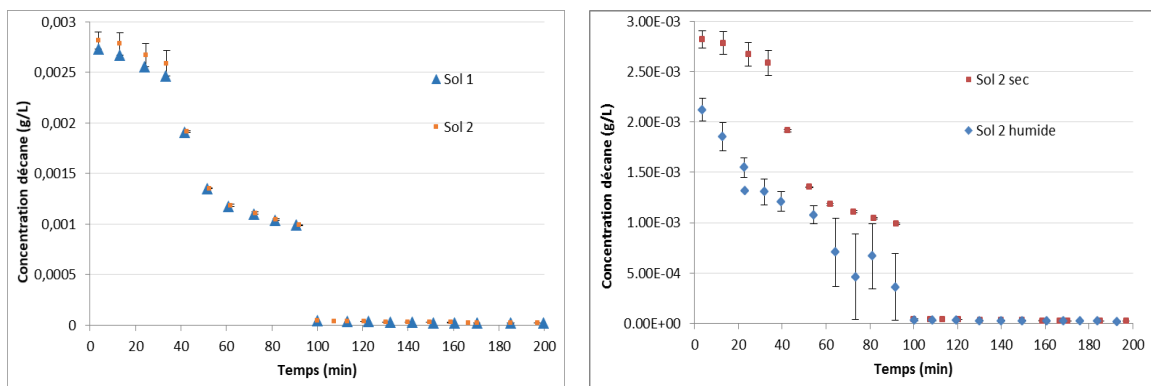
### *B. Influence de la composition du sol et du degré de saturation sur l'extraction du polluant*

Pendant la préparation des sols, des tests par mesure de masse ont permis de déterminer les pertes du n-décane dues à l'étape de préparation de l'échantillon avant d'appliquer la SVE. Il a été observé une perte de l'ordre de 25,8% en masse de décane pour le sable. Cette valeur est à peine plus importante pour le sable mouillé (28,6%). Dans le cas du sol 2 cette perte ne dépasse pas 6.6% pour sol sec et a augmenté à 34% pour le sol mouillé. Ces différences peuvent être dues au fait que la présence de l'argile implique une adsorption du n-décane sur sa surface et donc une

rétenion plus importante que dans le cas du sable sec. D'un autre coté, la présence de l'eau dans le milieu empêche la rétenion du n-décane sur les particules. Ceci est observé d'une manière plus importante dans le cas du sol 2 où la surface de l'argile va être chargée d'eau empêchant ainsi le n-décane de s'y fixer.

Les courbes de concentration du n-décane extrait en fonction du temps sont présentées sur la figure 3.a. La concentration du polluant dans le gaz extrait diminue au cours du temps jusqu'à devenir constante. On obtient une forme de courbe équivalente aux trois étapes d'une extraction SVE classique définie par l'étape phase initiale d'évacuation avec une diminution faible de la concentration en fonction du temps, suivie par une phase d'évaporation où la concentration diminue d'une manière plus importante au cours du temps et une dernière phase de diffusion, où la concentration extraite devient faible (USEPA, 1994; Kacem et al., 2017). La quantité de décane extraite du sol 2 est plus importante que celle extraite du sol 1. Cette différence est due à la présence initiale dans le sol 2 d'une quantité de n-décane plus importante qu'en sol 1. Le calcul du rendement de la SVE montre une extraction de 85,6% du polluant injecté dans le sol 1 contre 78,8% du polluant injecté dans le sol 2. Ainsi Les résultats montrent que le sol modèle composé de sable permet d'extraire une plus grande quantité de polluant qu'un sol contenant de l'argile. La raison possible de cette observation peut être le phénomène d'adsorption du polluant sur l'argile, ce qui rend son extraction plus difficile (Yang et al., 1999). Une diminution importante de concentration a été observée pour tous les échantillons de sol sec indiquant un passage rapide vers la phase de diffusion de la SVE.

Les courbes de concentration dans le cas de sol humide ont la même allure légèrement différente des sols secs. En effet la phase initiale d'évacuation est absente, ceci peut être dû au fait que la présence de l'eau perturbe l'évaporation naturelle du n-décane. La quantité extraite correspond alors à l'effet de la dépression appliquée. Dans notre cas, le rendement de l'extraction du sol partiellement saturé diminue pour le sol 1 et le sol 2 respectivement vers 55,8% et 68,3%. La diminution du rendement d'extraction est plus importante pour le sol 1 par rapport au sol 2.



a. Concentration du n-décane extrait en fonction du temps pour les deux sols secs

b. Concentration du n-décane extrait pour le sol 2 sec et humide

**FIGURE 3.** Résultats des tests d'application

### III. Conclusion

Les résultats des tests SVE pour différentes conditions aboutissent aux conclusions suivantes.

- La SVE influence l'évaporation de l'eau en plus du polluant dans un sol. La présence d'argile diminue l'évaporation de l'eau.
- Il est important d'évaluer les pertes en polluant par évaporation pendant la préparation de l'échantillon. Le sol fin retient plus de polluant, cela peut être expliqué par le phénomène d'adsorption.
- L'humidité diminue le rendement de l'extraction, cela est dû à l'hydrodynamique de la colonne en présence d'eau pendant SVE.

### REFERENCES

J.T. Albergaria, M. Conceicao, & C. Delerue-Matos, (2006). Remediation efficiency of vapour extraction of sandy soil contaminated with cyclohexane: Influence of air flow rate water and natural organic matter content, *Environmental Pollution*, 143, p. 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.10.040>

J.T. Albergaria, M. Maria da Conceição, & C. Delerue-Matos, (2012). Remediation of sandy soils contaminated with hydrocarbons and halogenated hydrocarbons by soil vapor extraction. *Journal of environmental management*, 104: 195-201, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.033>.

M. Kacem, D. Esrael, & B. Benadda, (2017). Flowrate and water presence effect on venting/SVE process efficiency. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 8(3), 209-217, <https://doi.org/10.1007/s40095-017-0238-4>.

U.S. Environmental Protection Agency (1994). Innovative site remediation technology vol.8: Vacuum vapor extraction. Retrieved from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000ITX8.PDF?Dockey=2000ITX8.PDF>

Y. J. Yang, T. M. Gates, & S. Edwards, (1999). SVE design: Mass transfer limitation due to molecular diffusion. *Journal of environmental engineering*, 125(9), 852-860, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1999\)125:9\(852\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:9(852)).