

## PARAMÈTRES GOUVERNANT L'INFILTRATION D'UNE POLLUTION ACCIDENTELLE D'HYDROCARBURES VERS DES RESSOURCES D'EAUX SOUTERRAINES

EDDY EL TABACH, LAURENT LANCELOT, ISAM SHAHROUR

Laboratoire de Mécanique de Lille (UMR CNRS 8107),  
Université des Sciences et Technologies de Lille (USTL), Ecole polytechnique universitaire de Lille,  
Département Géotechnique – Génie Civil, Avenue Paul Langevin,  
59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France.  
Tel.: +33 (0)320 434 657. E-mail: laurent.lancelot@polytech-lille.fr

**Résumé:** L'étude présentée ici vise à identifier les risques dans un projet routier qu'une pollution accidentelle fait courir sur la ressource en eau souterraine. Après une brève description du phénomène d'écoulement polyphasique, et la simulation numérique de ces phénomènes, on illustre l'influence de certains paramètres sur la profondeur de migration d'un polluant. On montre en particulier que l'épaisseur et la perméabilité de la couche de couverture, le temps de contact du polluant à la surface du sol et la profondeur de la nappe jouent un rôle déterminant. L'outil numérique décrit permet de constituer une base de données en faisant varier ces paramètres prépondérants. Un outil de prédiction à partir d'un réseau de neurones artificiels est construit sur cette base de données. Il a pour but d'établir une cartographie des zones où le risque existe pour un polluant d'atteindre la nappe exploitée par les captages d'eau potable. On étudie enfin l'effet d'un événement pluvieux après le déversement du polluant, sur la migration de celui-ci vers la nappe.

### LISTE DES SYMBOLES UTILISES

- $a$  – paramètre de calage dans l'équation de Van Genuchten,  $m^{-1}$ ,
- $D$  – profondeur de la zone contaminée, m,
- $e$  – charge de polluant à la surface du sol, m,
- $f$  – fonction d'activation de type sigmoïde,,
- $g$  – accélération gravitationnelle,  $m \times s^{-2}$ ,
- $H_c$  – épaisseur de la couche de couverture, m,
- $K$  – perméabilité de la couche de couverture,  $m \times s^{-1}$ ,
- $n$  – paramètre de calage dans l'équation de Van Genuchten,
- $P_{cij}$  – pression capillaire entre les fluides  $i$  et  $j$ , kPa,
- $P_N$  – profondeur de la nappe phréatique, m,
- $Q$  – quantité de polluant injectée dans le sol,  $m^3$ ,
- $t_c$  – temps de contact polluant–surface du sol, j,
- $W_{ij}$  – poids de connexion entre deux neurones  $i$  et  $j$ ,
- $X_i$  – vecteur de valeurs d'entrées du réseau de neurones artificiels,
- $Y_k$  – vecteur de valeurs de sorties du réseau de neurones artificiels,
- $z$  – profondeur, m.,
- $\alpha$  – représente les phases eau, air ou polluant,
- $\beta_{ij}$  – facteur d'échelle propre à la paire de fluide  $i$  et  $j$ ,
- $\rho_\alpha$  – densité de la phase  $\alpha$ ,  $kg \times m^{-3}$ ,

- $\phi$  – porosité du milieu poreux ,
- $P_\alpha$  – pression de la phase  $\alpha$ , kPa,
- $K_{r\alpha}$  – perméabilité relative à la phase  $\alpha$ ,
- $S_\alpha$  – saturation de la phase  $\alpha$ ,
- $\bar{S}_\alpha$  – saturation effective de la phase  $\alpha$ ,
- $\mu_\alpha$  – viscosité de la phase  $\alpha$ , Pa  $\times$  s.

## 1. INTRODUCTION

La construction de route sur une zone de champs captants peut provoquer un risque de pollution accidentelle résultant d'un déversement suite à un accident routier impliquant des véhicules transportant des produits dangereux.

Les produits pétroliers ou les polluants à base d'hydrocarbures chlorés, qui sont des fluides non-miscibles avec l'eau (*non aqueous phase liquids*, NAPL), sont parmi les matériaux transportés les plus dangereux. Les NAPL plus denses que l'eau (DNAPL) déversés à la surface du sol migrent verticalement dans la zone non saturée sous l'effet de la pesanteur et des phénomènes capillaires (dûs à la tension superficielle). Tant que le produit continue sa migration dans la zone non saturée, une partie sera piégée dans les pores du sol. Cette partie résiduelle est extrêmement difficile à enlever en raison de sa faible mobilité sous des gradients hydrauliques courants [12] et de sa dissolution faible et lente [9]. Si la quantité de produit déversé est assez grande, la partie non piégée dans la zone non saturée atteindra la frange capillaire et contaminera les eaux souterraines (zone saturée).

L'impact d'un projet routier sur l'environnement doit donc être étudié avec attention dans le but d'une part d'optimiser son tracé lors de la phase de conception en fonction de diverses contraintes, dont la vulnérabilité des zones traversées à la pollution accidentelle, et d'autre part en exploitation d'élaborer un plan d'intervention dans le cas d'un accident mettant en jeu une pollution. Cette communication s'inscrit donc dans une étude impact d'un projet routier dans le Nord de la France sur une zone de champs captants d'eau potable et les mesures de protection de ces captages contre une pollution accidentelle [2], [3]. Elle comporte principalement une étude de la diffusion de polluants de type hydrocarbures dans les sols non saturés et l'influence de différents paramètres et scénarios de pollution. On y décrit brièvement le phénomène d'écoulement polyphasique couplé aux phénomènes de transport et de transfert de masse, et la simulation numérique de ces phénomènes au travers d'une approche couplée calcul par élément fini et réseaux neuronaux. La constitution du réseau de neurones nécessite une étude paramétrique où sont identifiés les paramètres prépondérants. Après avoir identifié les zones à risque le long de l'axe de la route, différents scénarios de pollution ont été étudiés, parmi lesquels l'influence de l'occurrence d'un événement pluvieux après le déversement du polluant, qui sera présenté ici.

## 2. MODÉLISATION DES TRANSFERTS

### 2.1. FORMULATION MATHÉMATIQUE DES TRANSFERTS ET RÉOLUTION NUMÉRIQUE

La description mathématique de l'écoulement simultané des phases fluides (eau, air, polluant) présentes dans un milieu poreux, isotrope et incompressible est régi par le système d'équations [1]:

$$\phi \frac{\partial(S_j \rho_j)}{\partial t} = \nabla \cdot [(\rho_j K K_{rj} / \mu_j)(\nabla P_j + \rho_j g \nabla z)]. \quad (1)$$

Dans l'équation (1) l'indice  $j$  représente les phases eau (E), air (G) ou polluant (P);  $\phi$  est la porosité du milieu poreux;  $S_j$  et  $P_j$  sont respectivement la saturation et la pression de la phase  $j$ ;  $K$  est la perméabilité intrinsèque;  $K_{rj}$  est la perméabilité relative à la phase  $j$ ;  $\mu_j$  et  $\rho_j$  sont respectivement la viscosité et la masse volumique de la phase  $j$ ;  $g$  est l'accélération gravitationnelle et  $z$  est la profondeur.

Nous avons utilisé le programme NAPL-Simulator développé par GUARNACCIA et al. [4]. Ce programme fait appel aux relations perméabilité relative – saturation-pression dans les milieux poreux bi- ou tri-phasiques et prend en compte les hystérésis et le piégeage des fluides. Ce programme est basé sur l'extension des données bi-phasiques au cas triphasique, en adoptant la fonction de PARKER et al. [11], basée sur la formulation de Van GENUCHTEN [13]:

$$\bar{S}_j = \left[ 1 + \left( \frac{a \times \beta_{ij} \times P_{cij}}{\rho_E \times g} \right)^n \right]^{\frac{1}{n}-1} \quad (2)$$

où  $\bar{S}_j$  est la saturation effective en phase mouillante  $j$ ,  $P_{cij}$  est la pression capillaire entre les fluides  $i$  et  $j$ ,  $g$  est l'accélération de la pesanteur,  $a$  et  $n$  sont les paramètres de calage de Van Genuchten,  $\beta_{ij}$  est le rapport des tension interfaciales  $\sigma_{GE}/\sigma_{ij}$ ,  $\rho_E$  est la masse volumique de l'eau. Les perméabilités relatives régissant l'écoulement polyphasique sont obtenues à partir des courbes de rétention eau-air [5].

La technique de résolution utilisée dans le programme Napl-Simulator est basée sur la méthode des éléments finis avec un schéma implicite en temps [4].

### 2.2. ETUDE PARAMÉTRIQUE

L'étude paramétrique vise à guider les choix concernant les scénarios de pollution à prendre en considération, et à mesurer l'impact sur la migration du polluant des inexactitudes ou des erreurs qui peuvent exister dans la détermination de certains paramètres.

## 2.2.1. CAS DE RÉFÉRENCE

Le sol considéré dans la zone d'étude est constitué d'une couche de couverture (limon) d'une épaisseur  $H_c = 4,5$  m surmontant une couche de craie aquifère. La profondeur de la nappe est très variable dans l'espace et dans le temps. Elle est prise égale à  $H_w = 2$  m dans le cas de référence. Le polluant choisi est le trichloroéthylène (ou TCE). Il appartient à la famille des solvants chlorés, qui présentent un risque important de pollution dû à leur mobilité, en raison de leur basse viscosité et de leur forte densité [10]. Les propriétés des sols, des fluides et les paramètres de relation de saturation-pression sont données dans le tableau 1. Les simulations sont effectuées en trois phases. La première phase consiste à déterminer le profil de saturation initiale en eau qui est conditionné par le niveau de la nappe et les propriétés de rétention des sols. La deuxième phase concerne le rejet du polluant, qui est simulé par l'application d'une charge constante de polluant à la surface du sol ( $e = 5$  cm) pendant un certain laps de temps ( $t_c = 7$  jours). La troisième phase correspond à l'infiltration et à la redistribution du polluant sous les forces de gravité et capillaires.

Tableau 1

Propriétés hydrodynamiques retenues pour l'exemple traité

	Eau	TCE	Air
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	998,2	1456	1,17
$\mu$ (Kg/(m.s))	0,001	0,000556	0,00002
$\sigma$ (dynes/m)	7275	3174	4750
Propriétés du milieu poreux			
Type de sol	$\phi$	$K$ (m/s)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
Couverture (Limons)	0,36	$10^{-6}$	1760
Craie	0,42	$10^{-5}$	1600
Relations pression capillaire-saturation			
Saturations résiduelles			
$S_{wr}$	$S_{Gr}$	$S_{nmwR}^*$	$S_{mwR}^*$
0,068	0,02	0,16	0,12
Paramètres de l'équation de Van Genuchten (1980)			
Type de sol	$a_D^{**}$ (cm <sup>-1</sup> )	$a_I^{**}$ (cm <sup>-1</sup> )	$n$
Couverture (Limons)	0,004	0,008	1,25
Craie	0,02	0,04	1,3

\*  $S_{NNWR}$  et  $S_{NWR}$  sont, respectivement, saturation résiduelle pour la phase polluant comme phase non-mouillant (avec l'eau) ou phase mouillante (avec l'air).

\*\*  $D$  pour drainage et  $I$  pour imbibition.

La figure 1a donne le profil de saturation en polluant à la fin de la 2<sup>ème</sup> phase (phase de contact du polluant avec la surface du sol,  $t_c = 7$  jours) ainsi que pour deux

autres temps de simulation (37 jours et 127 jours) correspondant à la troisième phase (phase de migration du polluant sous les forces de gravité et capillaires). Durant la phase d'injection, le polluant s'infiltré dans le sol à une vitesse élevée (de l'ordre de 0,3 m/jour). Après cette phase, la fraction mobile de polluant continue sa migration jusqu'à la surface de la nappe. Au bout de 127 jours la migration s'arrête car le polluant est totalement piégé. On note une accumulation de celui-ci à la surface de la nappe (figure 1): la rétention capillaire de l'eau qui s'oppose à la migration du TCE libre doit être surmontée par une pression appelée pression capillaire d'entrée, correspondant à une certaine épaisseur d'accumulation, qui n'a pas été atteinte ici.

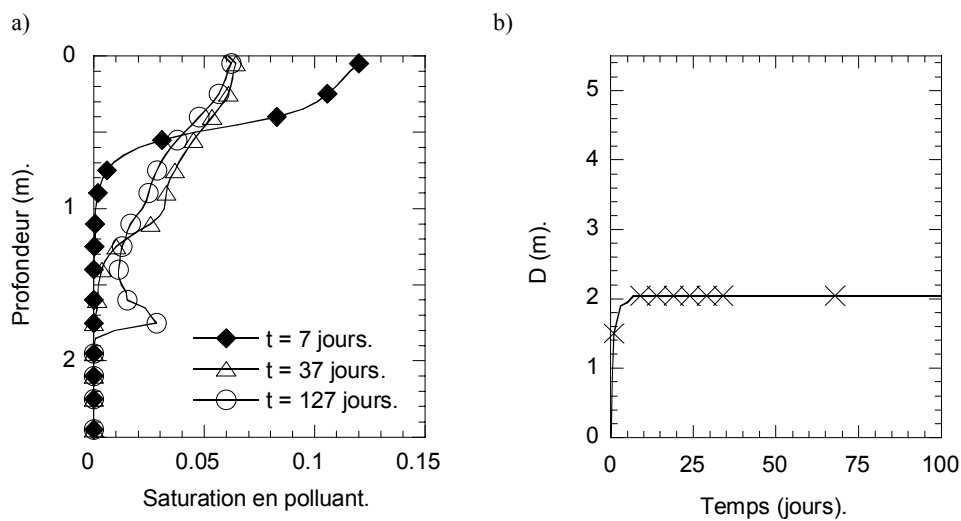


Fig. 1. Exemple de référence: profil de saturation en TCE pour différents temps de simulation (a), et évolution de la profondeur de la zone contaminée en fonction du temps (b)

La figure 1b donne l'évolution de la profondeur de la zone contaminée (la profondeur maximale pour laquelle la saturation calculée de polluant est non nulle). On remarque qu'à partir de la fin de l'injection ( $t = 7$  jours), il n'y a plus d'évolution notable de la profondeur de la zone contaminée, qui se stabilise à une profondeur de 2 m.

#### 2.2.2. EFFET DE LA PERMÉABILITÉ ( $K$ )

Nous donnons figure 2 les résultats obtenus avec une perméabilité du sol de couverture de dix et de cent fois inférieure à celle du cas de référence ( $10^{-6}$  m/s), la perméabilité de l'aquifère crayeux étant la même que dans le cas de référence ( $10^{-5}$  m/s). On note que la perméabilité du sol de couverture affecte significativement la migration du polluant. La réduction de cette perméabilité a pour effet de réduire la quantité de polluant infiltrée dans le sol et la vitesse de migration du polluant durant la

phase d'injection.

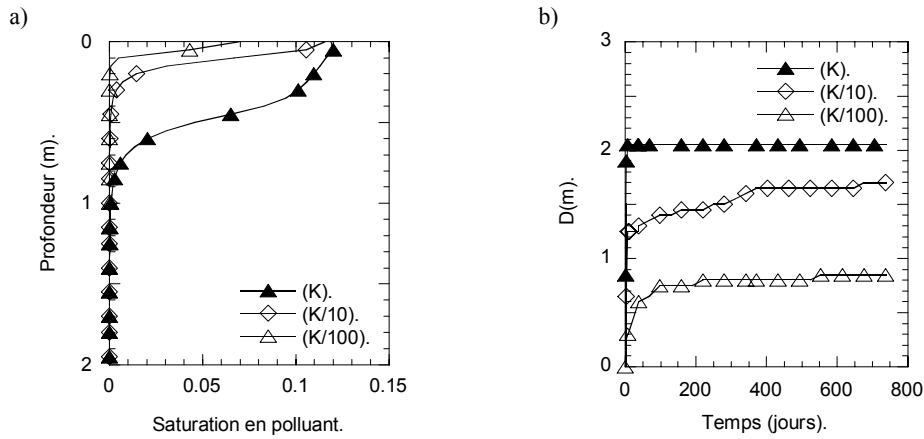


Fig. 2. Influence de la perméabilité  $K$  de la couche de couverture sur (a) la migration du polluant durant la phase d'injection (contact polluant-surface du sol  $t_c = 7$  jours), et (b) l'évolution de la profondeur de la zone contaminée en fonction du temps

Une bonne prévision du transfert de polluant exige donc une bonne connaissance de ce paramètre à partir de mesures in situ ou de laboratoire.

### 2.2.3. INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE COUVERTURE ( $H_c$ )

La figure 3 donne les résultats des simulations pour deux cas différents d'épaisseur de couverture ( $H_c = 4,5$  m, cas de référence, et  $H_c = 1$  m). Il faut noter que dans ce dernier cas, la couche de couverture de limon est entièrement en zone non saturée.

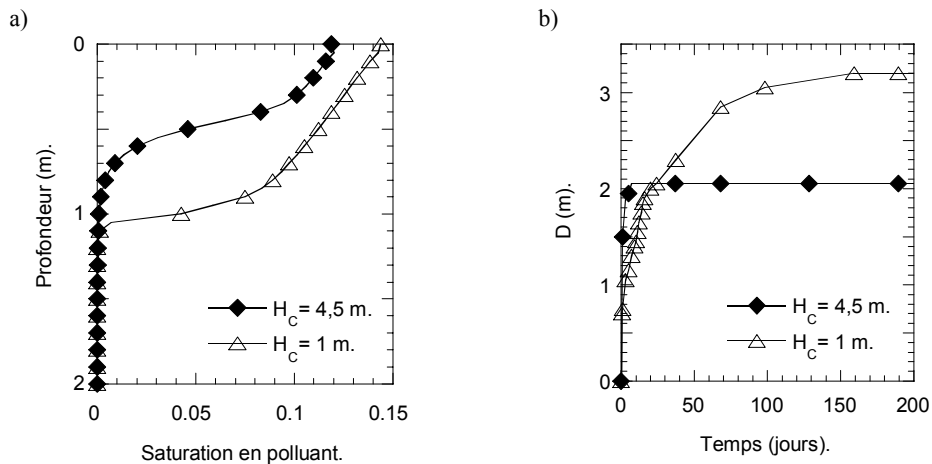


Fig. 3. Influence de l'épaisseur de la couche de couverture  $H_c$  sur la migration du polluant

(phase d'injection) pour 7 jours de temps de contact polluant-surface du sol (a),  
et évolution de la profondeur de la zone contaminée en fonction du temps (b)

On note que l'épaisseur de la couche de couverture affecte d'une manière très significative la migration du polluant: lorsque  $H_c$  diminue, la quantité de polluant injectée dans le sol augmente alors que la vitesse pendant la phase d'injection diminue.

#### 2.2.4. INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE ( $P_N$ )

Plusieurs simulations (figure 4) ont été effectuées en faisant varier la profondeur de la nappe  $P_N$  par rapport au cas de référence (2 m). On note qu'une nappe plus basse a pour effet d'augmenter la profondeur de migration du polluant durant la phase d'injection. De même pendant la phase d'infiltration due aux forces de gravité et aux forces capillaires, la profondeur de contamination est plus grande pour une nappe plus profonde, mais la migration est alors plus lente.

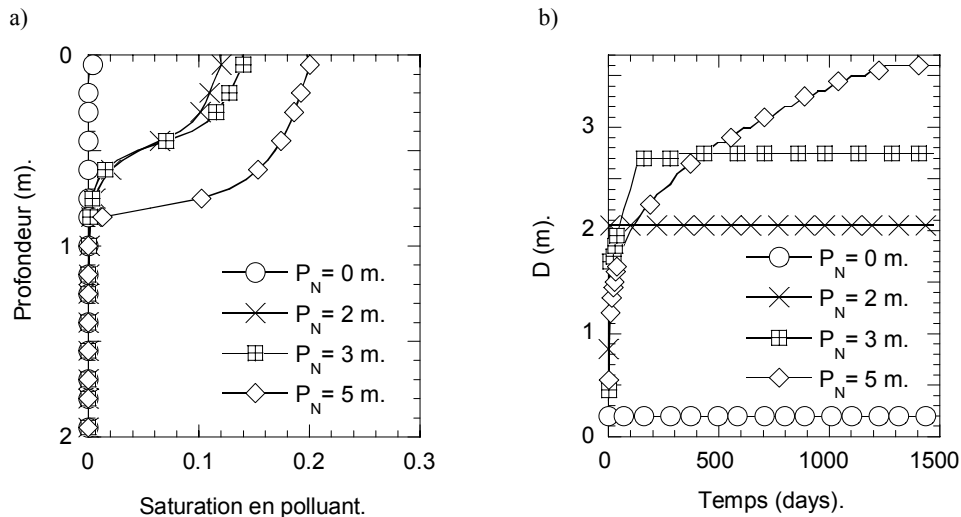


Fig. 4. Influence de la profondeur de la nappe  $P_N$  sur (a) la migration du polluant pendant la phase d'injection, et (b) sur la profondeur de la zone contaminée ( $t_c = 7$  jours)

#### 2.2.5. INFLUENCE DU TEMPS DE CONTACT SOL-POLLUANT ( $t_c$ )

La figure 5a montre l'influence du temps de contact du polluant à la surface du sol sur le profil de saturation en TCE pendant la phase d'injection: plus le polluant reste longtemps à la surface du sol, plus le front d'injection descend profondément. De même, la figure 5b montre que pendant la phase d'infiltration, après avoir retiré la charge de polluant en surface, pour de faibles temps de contact ( $t_c = 0,5$  à 1 jour) la migration du front de pollution se stabilise avant d'atteindre la nappe, quand il atteint

très rapidement celle-ci pour des temps de contact plus élevé.

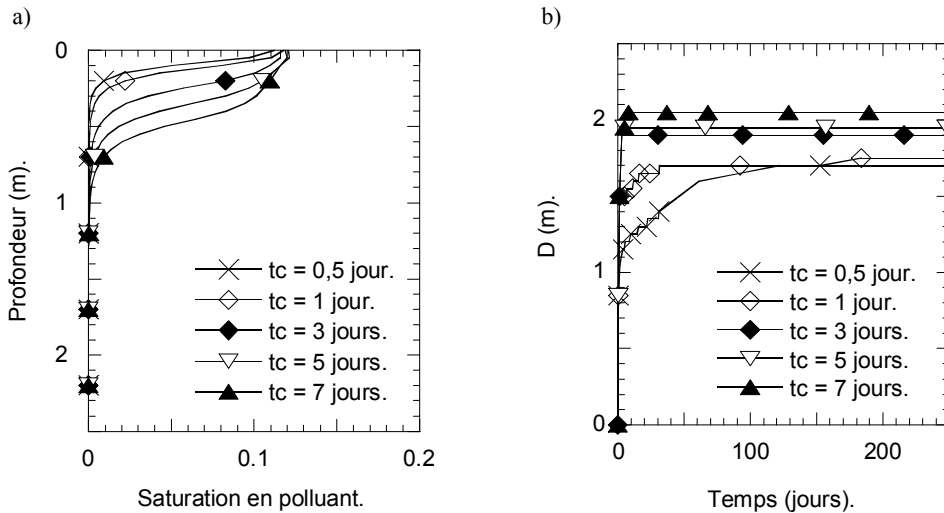


Fig. 5. Influence du temps de contact polluant-sol sur la migration du polluant (phase d'injection) (a), et évolution de la profondeur de la zone contaminée en fonction du temps (b)

Ces résultats illustrent donc le fait qu'une intervention rapide peut considérablement restreindre le risque d'atteinte de la nappe et la profondeur de sol à traiter.

### 2.3. PRÉDICTION DE LA CONTAMINATION

Afin d'estimer la contamination du sol dans la zone d'étude, on a utilisé une approche couplée calcul par élément fini et réseaux neuronaux [3]. L'étude paramétrique a permis de dégager les paramètres physiques les plus pertinents sur ces transferts (épaisseur  $H_c$  et perméabilité  $K$  de la couche de couverture, profondeur de la nappe  $P_N$  et temps de contact entre le polluant et la surface du sol  $t_c$ ). Ensuite une banque de cas a été développée en considérant des intervalles représentatifs de ces paramètres, puis sur cette banque de cas on a construit un réseau de neurones artificiels, afin de simuler la profondeur de sol contaminé et la quantité de polluant injectée dans la zone d'étude.

#### 2.3.1. RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des modèles mathématiques non linéaires de type «boîte noire», n'exigeant aucune information détaillée sur les paramètres physiques du système. Au lieu de cela, ils "apprennent" la relation entre les paramètres d'entrées et de sortie à la fin d'une phase d'apprentissage avec des données



précédemment collectées. Ils ont la capacité de manipuler des systèmes grands et complexes avec beaucoup de paramètres en corrélation [6]–[8].

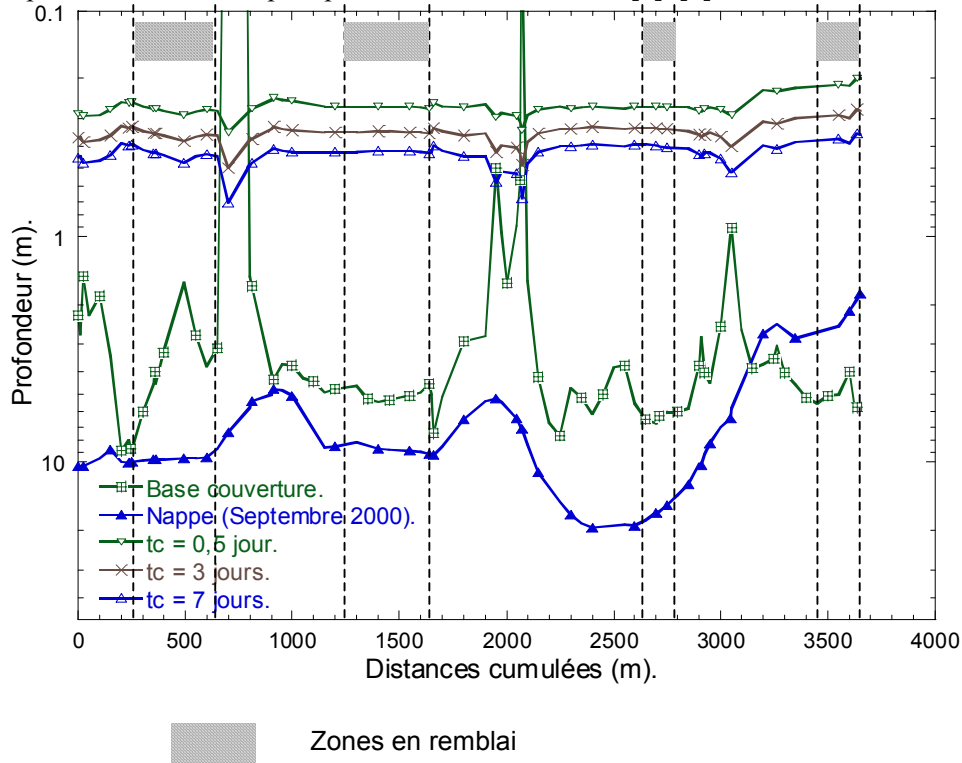


Fig. 6. Simulation de la profondeur de contamination par le trichloroéthylène dans l'axe de la route, pour différentes valeurs du temps de contact sol-polluant  $t_c$

Le schéma de principe du réseau utilisé dans cette étude est illustré en figure 6. Il comporte 3 couches de nœuds (neurones): la couche d'entrée (4 neurones), la couche de sortie (2 neurones), et une couche cachée. Les nœuds de chaque couche sont reliés aux nœuds de la couche suivante, chaque raccordement portant un certain poids  $w$  (ces poids constituent les paramètres du réseau).

Mathématiquement, un réseau avec trois couches, où  $n$  est le nombre de nœuds d'entrées,  $m$  le nombre de nœuds cachés et  $k$  le nombre de nœuds de sorties, est basé sur l'équation suivante:

$$Y_k = f_1 \left( \sum_{j=1}^m w_{jk} f_2 \left( \sum_{i=1}^n w_{ij} X_i \right) \right) \quad (3)$$

où  $f_1$  et  $f_2$  sont les fonctions d'activation de type sigmoïde pour la couche de sortie et

pour la couche cachée, les facteurs  $w_{jk}$  étant les poids des connexions entre les neurones de la couche cachée et la sortie, les  $w_{ij}$  les poids des connexions entre les neurones de la couche d'entrée et ceux de la couche cachée, les  $Y_k$  sont les valeurs de sortie du réseau tandis que les  $X_i$  symbolisent les entrées.

Au cours de la phase d'apprentissage, des données d'une même population sont divisées en trois sous-ensembles: le premier pour la phase d'apprentissage, le deuxième pour la phase de test et le dernier pour la phase de validation. Le sous-ensemble d'apprentissage est employé pour ajuster les paramètres du réseau. Le processus d'apprentissage est accompli en ajustant les poids entre les couches pour produire des résultats qui sont près des valeurs réelles obtenues dans la base de données, en minimisant l'écart entre les valeurs calculées par le RNA et les valeurs réelles connues. Le sous-ensemble de données réservé à la phase de test est ensuite utilisé pour décider quand le processus d'apprentissage est terminé. Le sous-ensemble de données employé pour la phase de validation est indépendant constitue une mesure réelle de la performance du RNA.

Dans notre cas, la banque de cas est obtenue en calculant la profondeur contaminée  $D$  et la quantité de polluant infiltrée  $Q$  par éléments finis pour des valeurs des paramètres d'entrée choisis dans un intervalle représentatif des variations observées dans le secteur d'étude:  $K = 10^{-6}$ ,  $10^{-7}$  et  $10^{-8}$  m/s,  $t_c = 1/2, 1, 3, 5, 7$  jours; 15 valeurs de  $H_c$  comprise entre 0 et 20 m et des valeurs de  $P_N$  s'étendant entre 0 m et 40 m. Au total, la banque inclut 2005 cas différents.

Le nombre optimum de nœuds dans la couche cachée (27 nœuds) est déterminé en réduisant au minimum une erreur moyenne totale entre les sorties prévues par le réseau de neurones et les sorties connues pour le sous-ensemble de test.

Tableau 2

Performances du réseau de neurones artificiels utilisé pour les différentes phases de simulation

$R^2$	RNA	
	$D$	$Q$
Phase d'apprentissage	0,976	0,993
Phase de test	0,974	0,984
Phase de validation	0,947	0,984

Les coefficients de corrélation  $R^2$  entre les valeurs connues et les valeurs prévues pendant les différentes phases de simulation sont présentés dans le tableau 2. Les performances du réseau utilisé sont bonnes ( $R^2 \approx 1$ ). En particulier, les valeurs élevées du coefficient de corrélation pour la phase de validation démontrent l'aptitude du réseau à généraliser les simulation à des cas non utilisés pour sa construction, ce qui

constitue son principal intérêt.

### 2.3.2. APPLICATION

Les résultats fournis par le réseau de neurones pour le polluant trichloroéthylène sont donnés en figure 6. Sur cette figure sont reportées les profondeurs de contamination après différents temps de contact  $t_c$ . On constate sur cette figure une pénétration relativement uniforme du polluant pour un temps de contact donné le long du profil de la route. La profondeur moyenne de pénétration passe d'une vingtaine à une cinquantaine de centimètres pour des temps de contact variant de 0,5 à 7 jours.

C'est dans les zones en remblai qu'il y a risque que le véhicule quitte la route et se retrouve au niveau du terrain naturel. On a donc effectué dans ces zones une étude plus poussée de différents scénarios de pollution, prenant notamment en compte le délai d'intervention et les conditions climatiques.

## 3. ETUDE DE DIFFÉRENTS SCÉNARIOS D'ACCIDENTS

Nous avons estimé la profondeur de contamination en un point du profil pris dans la section en remblai de la zone d'étude située entre 250 m et 550 m (figure 6) pour certains scénarios d'accidents. Dans cette zone, l'épaisseur de la couche de couverture limoneuse varie entre 2 et 6 mètres et la nappe se trouve à une profondeur fluctuant entre 4 et 10 mètres. On se place dans l'hypothèse la plus basse en terme d'épaisseur de couche de couverture, et pour des profondeurs de nappes minimales et maximales. L'étude a été menée pour 3 polluants couramment transportés par route: le trichloroéthylène (TCE), le benzène et le 1,1-dichloroéthane.

On a étudié l'influence du temps de contact  $t_c$  (0,5 et 3 jours), lié au délai d'intervention sur le site, et de l'occurrence d'un épisode pluvieux ( $t_p$  de 0,5 à 7 jours de pluie) survenant avant ou après le déversement, sur la profondeur de pénétration des polluants.

### 3.1. INFLUENCE DU DÉLAI D'INTERVENTION

La figure 7 représente la profondeur de pénétration pour les 3 polluants étudiés en fonction du temps pour les deux positions extrêmes de nappe et deux temps de contact  $t_c = 0,5$  jour et  $t_c = 3$  jours.

Pour une position donnée de la nappe, on constate logiquement que la profondeur atteinte pendant la mise en contact est plus grande quand cette dernière a une durée plus élevée. Cette figure permet également d'analyser la propagation après la phase de mise en contact, ce qui peut se présenter si on se contente d'un nettoyage en surface, sans retirer la couche de sol contaminé, ou si le décapage de ce sol n'est pas complet. On voit alors que la migration peut se poursuivre sur des durées importantes, de l'ordre d'une année. A l'issue de cette phase de propagation, la profondeur conta-

minée est d'autant plus grande que la nappe est plus basse, mais le processus est alors plus lent.

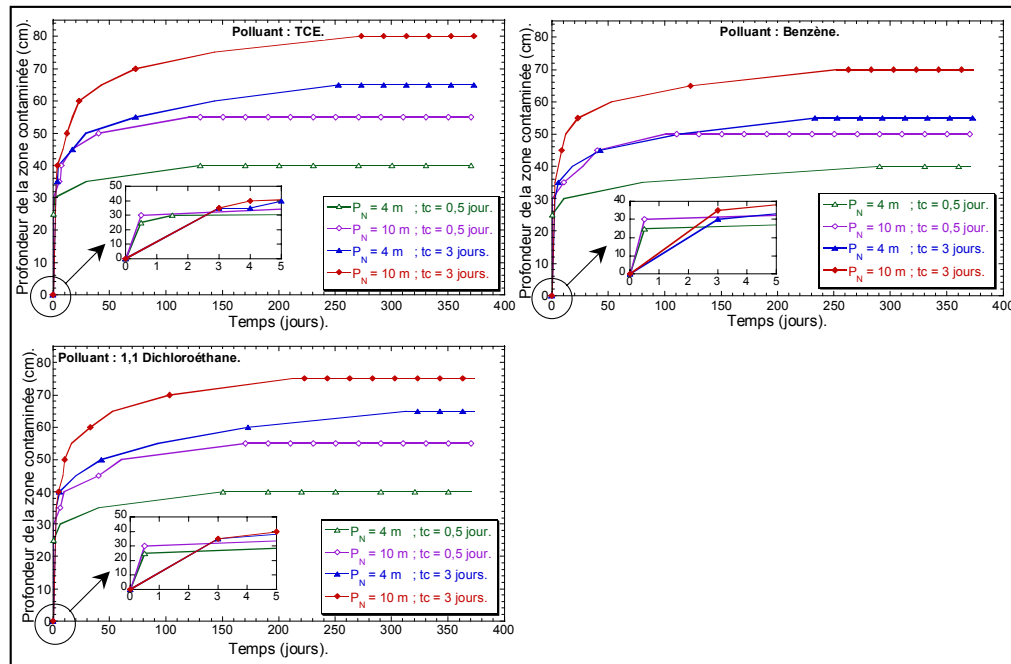


Fig. 7. Front de pénétration des 3 polluants en fonction du temps pour  $t_c = 0,5$  jour et  $t_c = 3$  jours, pour deux profondeurs de la nappe  $P_N$

En comparant les résultats des 3 polluants, on constate que le benzène migre moins profondément que le TCE et le 1,1-dichloroéthane, et que le front de contamination se stabilise un peu plus vite. On peut attribuer cette différence de comportement au fait que le benzène est moins dense et donc moins entraîné par les forces de pesanteur.

### 3.2. INFLUENCE DU LESSIVAGE PAR TEMPS DE PLUIE

On considère une période de pluie après la phase de mise en contact avec le sol, c'est à dire dans l'hypothèse où, ayant retiré la nappe de polluant en surface après un temps de contact  $t_c$ , un épisode pluvieux de durée  $t_p$  survient avant ou pendant qu'on décape le sol contaminé.

Les résultats obtenus pour un temps de contact  $t_c = 3$  jours et  $P_N = 10$ m pour les 3 polluants montrent que le front d'infiltration des polluants migre un peu plus

profondément, et que cette profondeur est atteinte plus rapidement, si la pluie tombe plus longtemps (voir figure 8). L'incidence d'une période de pluie après le déversement est toutefois peu sensible au cours des premiers jours d'infiltration. Dans la mesure où la totalité de l'épaisseur contaminée est retirée dans les premiers jours, l'influence de la pluie postérieurement au déversement est négligeable. Il en va autrement si tout ou partie du sol contaminé reste en place, puisque dans ce cas la pluie facilite la migration.

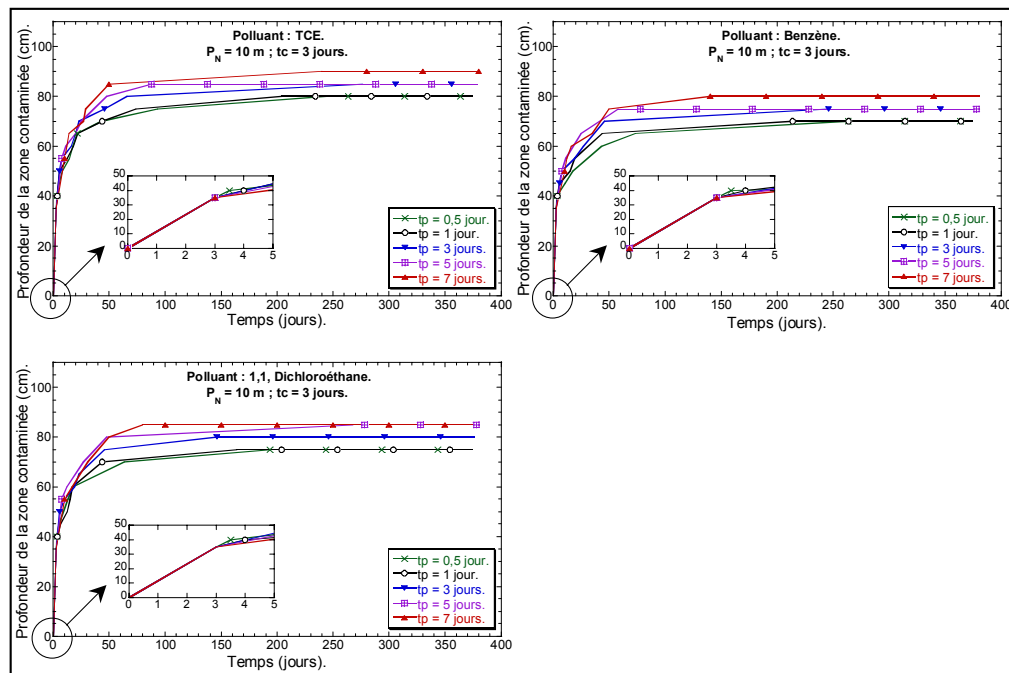


Fig. 8. Front de pénétration des 3 polluants pour  $t_c = 3$  jours, une nappe à 10 m et différentes durées  $t_p$  de lessivage par temps de pluie

#### 4. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'étude d'impact de la construction d'une route dans une zone traversant des champs captants d'eau potable nécessite une analyse de la migration d'un polluant de type hydrocarbure (DNAPL) vers la nappe d'eau, qui peut être occasionnée par le déversement d'un véhicule de transport de matières dangereuses. Ce phénomène est complexe parce qu'il fait intervenir de nombreux paramètres sur lesquels existent généralement de fortes incertitudes. L'analyse des résultats obtenus au cours d'une étude paramétrique a prouvé que la perméabilité et l'épaisseur de la couche de couverture limoneuse, la profondeur de la nappe et le temps de contact sol-polluant

ont un rôle prépondérant dans les mécanismes de contamination des ressources d'eaux souterraines. Un modèle de généralisation de la prévision de la profondeur de contamination, utilisant les réseaux de neurones artificiels, a été établi, sur la base des 4 paramètres d'entrée mentionnés précédemment. Les réseaux de neurones artificiels constituent une approche intéressante, car elle permet d'établir rapidement pour un projet de route une cartographie du risque de pollution pour divers scénarios d'accidents.

A titre d'exemple, on a présenté dans cet article une étude de différents scénarios de pollution lors du déversement accidentel de 3 polluants: trichloréthylène, benzène et 1,1-dichloroéthane. Les paramètres liés aux opérations d'intervention, à savoir la durée pendant laquelle le polluant va rester au contact du sol, et le temps nécessaire pour décapier l'épaisseur de sol contaminé, ainsi que l'effet de l'occurrence d'un événement pluvieux après le déversement, ont été pris en compte pour la simulation de l'évolution de la migration de polluant dans le temps. Les simulations indiquent que la profondeur contaminée augmente régulièrement avec le temps de contact sol-polluant. Si le sol n'est pas ou mal décapé après nettoyage en surface, la migration peut se poursuivre sur plusieurs mois avant que le front d'infiltration ne se stabilise. On a montré qu'une pollution résiduelle peut migrer plus loin et plus lentement si la nappe est plus basse. L'incidence d'une période de pluie après le déversement (*lessivage* de la pollution) est peu sensible au cours des premiers jours d'infiltration. La profondeur atteinte à stabilisation du front de pollution augmente légèrement avec la durée de la pluie. Si la totalité de l'épaisseur contaminée est retirée dans les premiers jours, l'influence de la pluie postérieurement au déversement est négligeable. Si tout ou partie du sol contaminé reste en place, la pluie facilite la migration. L'étude de ces différents scénarios peut contribuer à la mise en œuvre d'un plan d'intervention en cas de pollution accidentelle lors de l'exploitation de la route.

#### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ABRIOLA L.M., PINDER G.F., *A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds – 1°) Equation development*, Water Resources Research, 1985, 21, 19–26.
- [2] EL TABACH E., LANCELOT L., SHAHROUR I., *Etude d'impact d'une pollution accidentelle sur un projet routier*, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie JNGG 2004, Lille, 2004, 28–30.
- [3] EL TABACH E., LANCELOT L., SHAHROUR I., NAJJAR Y., *Estimation de la migration d'une pollution accidentelle: comparaison des approches réseaux de neurones artificiels et régression multilinéaire*, Colloque International de Géotechnique Beyrouth 2004, Beyrouth, 2004, 19–22.
- [4] GUARNACCIA J., PINDER G., FISHMAN M., *NAPL-simulator documentation*, EPA/600/R-97/102, Environmental Protection Agency, United States of America, 1997.
- [5] MUALEM Y., *A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*, Water Resour. Res., 1976, 12, 513–522.
- [6] NAJJAR Y., *Quick Manual for the Use of ANN program TR-SEQ1*, Department of Civil Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA, 1999.
- [7] NAJJAR Y.M., BASHEER I.A., HAJMEER M.N., *Computational neural networks for predictive microbiology. I. Methodology*, International Journal of Food Microbiology, 1997, 34, 27–49.

- [8] NAJJAR Y., ZHANG X., *Characterizing the 3D Stress–Strain Behavior of Sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach*, [in:] *Numerical Methods in Geotechnical Engineering, ASCE Geotechnical Special Publication n°96*, G. Filz and D. Griffiths (eds.), 2000, 43–57.
- [9] OPPELT E.T., *Pump-and-treat ground water remediation – a guide for decision makers and practitioners*, Office of Research and Development, Environmental Protection Agency, Washington; EPA/625/R-95/005, 1996.
- [10] PANKOW J.F., STAN F., CHERRY J.A., RYAN M.C., *Dense Chlorinated Solvents in Groundwater: Background and History of the Problem, Dense Chlorinated Solvents and other DNAPLs in Groundwater*, J.F. Pankow and J.A. Cherry (eds.), Waterloo Press, Ontario, 1996.
- [11] PARKER J.C., LENHARD R.J., KUPPUSAMY T., *A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media*, *Water Resources Research*, 1987, 23(4), 618–624.
- [12] PENNEL K.D., POPE G.A., ABRIOLA L.M., *Influence of viscous and buoyancy forces on the mobilization of residual tetrachloroethylene during surfactant flushing*, *Environ. Sci. Technol.*, 1996, 30, 1328–1335.
- [13] VAN GENUCHTEN M.Th., *A closed-form equation for the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44, 892–898.