

CARACTERISATION DES SOLS CONTAMINES AU DIESEL PAR REFLECTOMETRIE TEMPORELLE

Djaouida Chenaf, Royal Military College of Canada, Kingston, Canada

Nabil Amara, Royal Military College of Canada, Kingston, Canada

ABSTRACT

Hydrocarbon contamination of soils represents a serious geo-environmental problem. In order to achieve rehabilitation of these soils, a rigorous characterisation of the contaminated site is required. The Time Domain Reflectometry (TDR), a geophysical method, is a promising tool for soil characterisation because it is non-destructive, accurate, and simple to use. Moreover, it can be applied both at full (field) and at laboratory scales. The TDR method is based on the exploitation of the dielectric properties of the soil. The main objective of the present work is to develop an interpretation method based on changes of the reflected TDR signal shape caused by diesel presence and concentration in an unsaturated soil.

Both the temporal delay and the reflection coefficient have been found to increase when the diesel concentration increases. These findings are in disagreement with what has been found in previous studies when dealing with diesel contaminated soils that are liquid (water and diesel) saturated.

RESUME

La contamination des sols par des hydrocarbures constitue un problème géo-environnemental sérieux. La réhabilitation de ces sols passe par une caractérisation rigoureuse du site contaminé. La réflectométrie temporelle (TDR), une méthode géophysique, est un outil prometteur pour la caractérisation des sols du fait qu'elle offre l'avantage d'être non destructive, précise, et simple à la mise en œuvre. De plus, elle peut être appliquée à la fois sur site et à l'échelle du laboratoire. La méthode TDR est basée sur l'exploitation des propriétés diélectriques du sol. L'objectif principal du présent travail est de développer une méthode d'interprétation basée sur l'influence de la présence de diesel et de sa concentration, dans un sol non saturé, sur l'allure du signal TDR réfléchi par celui-ci.

Il a été remarqué que le retard temporel et le coefficient de réflexion augmentaient avec la concentration en diesel. Ces résultats sont incompatibles avec les conclusions avancées par les études traitant des sols contaminés au diesel et saturés en liquide (eau et diesel).

1. INTRODUCTION

La contamination des sols par des hydrocarbures constitue un problème géo-environnemental prenant de plus en plus d'ampleur. Au regard du niveau élevé de toxicité et de mobilité de ces composés organiques, il est impératif de prendre ce problème très au sérieux. Les effets néfastes ne se limitent pas uniquement à la détérioration des propriétés chimiques, physiques et mécaniques des sols contaminés, ceux-ci constituent également un risque réel pour la santé de l'être humain et des autres espèces vivantes. La réhabilitation de ces sols exige préalablement une identification et une caractérisation rigoureuses du site contaminé. Dans ce sens, plusieurs méthodes géophysiques ont été développées. Le principe de celles-ci est basé sur l'exploitation du contraste, causé par le contaminant, sur les propriétés physiques du sol, à l'exemple des propriétés magnétiques, électriques ou élastiques. Olhoeft (1986) et Pitchford et al. (1989) donnent un aperçu sur certaines de ces méthodes et leurs applications.

La technique TDR (Time Domain Reflectometry) est une méthode géophysique basée sur l'exploitation des modifications des propriétés diélectriques des sols en présence des contaminants. Elle se distingue des autres techniques par sa précision, son caractère non destructif et la simplicité de sa mise en œuvre (DeRyck et al.,

1993). Depuis ses premières applications en sciences du sol (Davis, 1975 ; Davis and Chudobiak, 1975), la technique TDR a connu plusieurs développements. Une synthèse de ces derniers est fournie par Topp et al. (1994), et dans l'ouvrage de référence de O'Connor et Dowding (1999). Les développements en question consistent principalement en l'amélioration de l'électronique d'excitation et le développement de nouveaux designs de sondes TDR afin d'en améliorer la sensibilité (Feng et al., 1999 ; Ferré et al., 2000). La microstructure du sol, les interactions de ses composants (grains solides, eau, et air) l'un avec l'autre (Tabbagh et al., 2000), l'anisotropie du sol et les variations de la géométrie des grains solides (Jones et Friedman, 2000 ; Robinson et Friedman, 2001) ont été prises en compte. Des développements sont poursuivis dans le sens d'une meilleure exploitation des signaux afin d'en extraire l'information utile et en déduire certaines caractéristiques des sols contaminés (Weerts et al., 2001).

La TDR est une méthode puissante pour la détermination de la teneur en eau des sols propres saturés et non saturés (Topp et al., 1980). Elle tend à devenir une technique de mesure standard de teneur en eau des sols. En reconnaissance à ses grandes retombées, et vingt ans après ses premières applications, la TDR a été couronnée

au cours de l'année 2000 par le prix d'innovation des PFTT (Partenaires Fédéraux en Transfert de Technologie) décerné au Dr. Topp.

Cette méthode a également montré une bonne efficacité dans la détermination des chemins de migration de contaminants DNAPL et de LNAPL dans des essais contrôlés en laboratoire et d'injection in situ de LNAPL et de DNAPL (Redman et DeRyck, 1994) utilisant une sonde TDR multi-niveaux laquelle mesure la permittivité diélectrique à intervalles de profondeur réguliers. Pour les investigations sur site, la sonde multi-niveaux est combinée avec d'autres méthodes géophysiques, généralement au GPR (Ground Penetrating Radar), pour une caractérisation plus complète (Redman, 1992 ; Kueper et al., 1993 ; Brewster et al., 1995). Cependant, l'application de la méthode TDR aux sols contaminés par des hydrocarbures s'est souvent limitée aux sols saturés (Benson et Bosscher, 1999). Le problème des sols contaminés par des NAPLs et non saturés commence à être approché, et cela en essayant d'exploiter à la fois la permittivité diélectrique et la conductivité électrique du sol contaminé, grandeurs que peut fournir le signal TDR (Dalton et al., 1984 ; Persson et Berndtsson, 2002).

Cet article présente les résultats préliminaires d'une étude en cours. L'objectif de celle-ci est la mise en évidence de la présence de diesel dans un sol non saturé, et l'identification de l'effet de sa concentration sur le signal TDR réfléchi. C'est une approche directe du problème de détection de présence de contaminant, et d'évaluation de sa concentration dans un sol non saturé, basée sur le traitement numérique des signaux TDR.

Quatre séries d'échantillons ont été préparées à une teneur en eau constante de 15 %. Une des séries est maintenue propre tandis que les trois autres ont été contaminées au diesel à une concentration dans le liquide total (eau + diesel) de 11.25 %, 22.30 % et 32.76 % correspondant à une concentration en diesel dans le sol respectivement de 18 076 ppm, 41 414 ppm et 70 256 ppm. Une comparaison des signaux TDR collectés à partir des sols propres, considérés comme signaux de référence, avec ceux recueillis à partir des sols contaminés a permis la mise en évidence de l'effet du diesel sur le signal TDR.

2. TECHNIQUE TDR ET MODELE DU MELANGE

La vitesse de propagation v du signal TDR est reliée à la permittivité diélectrique relative ϵ du sol supposé sans pertes, par l'équation suivante (Topp et al., 1980)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad [1]$$

où c désigne la célérité de la lumière dans le vide, $c = 3 \times 10^8$ m/s.

Le temps de transit Δt , représentant le temps nécessaire au signal TDR pour effectuer un aller-retour dans un guide d'ondes de longueur L s'écrit :

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \sqrt{\epsilon} \quad [2]$$

L'équation précédente montre la dépendance directe entre le temps de transit du signal TDR et les propriétés diélectriques du sol traduites par la permittivité diélectrique ϵ .

Un sol propre est constitué de grains solides, d'eau et d'air, dont les permittivités diélectriques relatives sont $\epsilon_s = 4$, $\epsilon_w = 80$, $\epsilon_{air} = 1$. L'écart important existant entre la permittivité diélectrique de l'eau et celles des autres constituants du sol est remarquable. Il en résulte une forte influence de la teneur en eau sur la permittivité diélectrique du sol.

Les approches les plus importantes liant la teneur en eau à la permittivité diélectrique sont :

- l'approche empirique se basant sur des résultats expérimentaux recueillis pour plusieurs sols, ayant abouti à une loi de comportement reliant la teneur en eau et la permittivité diélectrique du sol (Topp et al., 1980).
- l'approche analytique, basée sur des considérations physiques et géométriques, a donné lieu au modèle du mélange (Roth et al., 1990).

Cette dernière approche tient compte de la contribution, à la permittivité diélectrique globale du sol, de chaque constituant par l'importance de sa présence et de sa permittivité. Dans le cas d'un sol propre non saturé, c'est à dire constitué de trois phases (grains solides, eau et air), la permittivité diélectrique relative est donnée par la loi du mélange :

$$\epsilon = \left[\theta \epsilon_w^\beta + (1 - \theta) \epsilon_s^\beta + (\phi - \theta) \epsilon_{air}^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad [3]$$

avec θ et ϕ désignant respectivement, la teneur volumique en eau et la porosité du sol. β est un facteur lié à la géométrie des grains et à leur distribution spatiale. Pour un sol supposé homogène et isotrope (Alharthi and Lange, 1987): $\beta \approx 0.5$.

Dans le cas où le sol étudié est contaminé, particulièrement par un liquide non miscible à l'exemple du diesel, une quatrième phase s'ajoute dans la composition du sol. L'expression précédente de la permittivité diélectrique se voit ainsi reformulée afin de tenir compte de la présence du contaminant. En notant par ψ , la concentration volumique pour le diesel et par ϵ_d sa permittivité diélectrique relative ($\epsilon_d = 2.88$), la permittivité diélectrique ϵ du sol est donnée par la loi du mélange modifiée (Chenaf, 2000) :

$$\epsilon = \left[\theta \epsilon_w^\beta + \psi \epsilon_d^\beta + (1 - \phi) \epsilon_s^\beta + (\phi - \theta - \psi) \epsilon_{air}^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad [4]$$

3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental utilisé est le protocole classique mis en œuvre pour une mesure TDR. Il est constitué d'un

bloc d'excitation et d'un bloc d'acquisition et de traitement. Le schéma synoptique du dispositif est représenté sur la Figure 1.

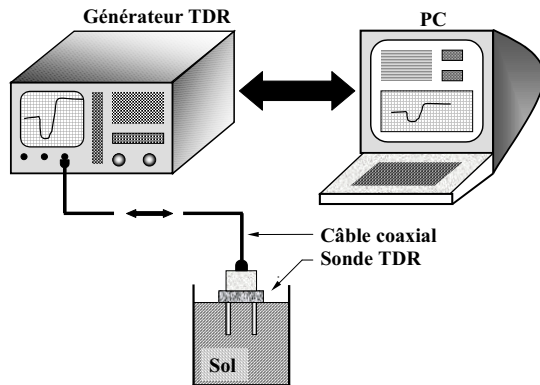


Figure 1. Dispositif expérimental

Le bloc d'excitation est essentiellement constitué d'un générateur de signaux TDR Tektronix 1502C; une sonde TDR à deux guides d'ondes cylindriques aux extrémités planes, dont les caractéristiques géométriques sont données sur la Figure 2; et un câble coaxial de longueur 1m reliant la sonde au générateur.

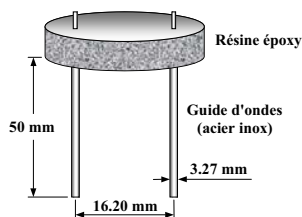


Figure 2. Caractéristiques géométriques de la sonde TDR

Les signaux TDR réfléchis sont recueillis par un PC qui constitue le système d'acquisition et de traitement. Celui-ci pilote également le bloc d'excitation par l'intermédiaire d'une interface de commande. La conception du dispositif expérimental offre l'avantage d'être entièrement automatisé et évite ainsi toute intervention du manipulateur.

Le signal TDR d'excitation est une impulsion électromagnétique échelon de quelques dixièmes de Volts, caractérisé par un temps de montée très court, inférieur à 150 ps (Tektronix, 1993). Le signal est émis par l'intermédiaire du câble coaxial vers la sonde TDR dont les tiges sont insérées dans l'échantillon de sol à tester. Au niveau des extrémités des tiges, le signal subit une réflexion provoquée par la rupture d'impédance que celui-ci y rencontre lors de sa propagation le long des guides d'ondes. Le signal réfléchi recueilli porte la signature de l'échantillon étudié. L'exploitation et le traitement de cette dernière permet la caractérisation de certaines propriétés physiques du milieu dans lequel était insérée la sonde, telles que la permittivité diélectrique et la conductivité électrique.

4. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Dans le souci de parer à toute erreur ou inhomogénéité qui surviendrait lors de la préparation des sols et afin d'assurer une répétitivité des résultats, 10 échantillons de sol de 400g chacun ont été préparés à teneur en eau constante et à trois concentrations en diesel différentes : 4 propres et 6 contaminés au diesel. Ainsi, quatre ensembles d'échantillons de sol ont été obtenus et identifiés par leurs taux de contamination au diesel. A chaque échantillon de sol a été ajouté 60g d'eau afin d'obtenir une teneur en eau gravimétrique constante de 15 %. de petites quantités de sol sont pris de chaque échantillon pour déterminer, par gravimétrie, la teneur en eau ω_1 à la préparation. La teneur en eau ω_1 se situe entre 14.69% et 14.92%, représentant une perte de 0.31% à 0.08 % relativement à la teneur en eau prévue qui est de 15 %.

Les échantillons de sol sont conservés pendant vingt-quatre heures dans des sacs en plastique scellés afin d'éviter toute évaporation. Cette opération a pour but d'assurer une humidité uniforme et une bonne adsorption de l'eau par les grains de sol.

Vingt-quatre heures après, un nouveau contrôle de la teneur en eau ω_2 présente dans les sols, est effectué par gravimétrie. Les valeurs de la teneur en eau ω_2 après 24 heures se situent entre 14.26 et 14.43% représentant une perte de 0.74 à 0.57% par rapport à la valeur de 15% représentant la teneur en eau prévue. Ces valeurs sont considérées comme étant les valeurs réelles de la teneur en eau. Ce sont ces valeurs qui ont été utilisées dans les calculs de FC, teneur en liquide (eau + diesel).

Un des quatre échantillons de sol humide a été maintenu propre tandis que les trois autres étaient mélangés à 6.67g, 15g et 25.71g de diesel afin d'atteindre les concentrations en diesel de 18 076 ppm 41 414 ppm et 70 256 ppm, respectivement. Ces quantités sont calculées en utilisant la masse réelle de l'échantillon de sol i.e. 400g desquels a été ôtée la masse de sol utilisé pour les mesures gravimétriques des teneurs en eau ω_1 représentant environ 26.7g, de 38g et de 34g pour les échantillons 2, 3 et 4 respectivement.

Ainsi, connaissant les valeurs de ω_2 , les valeurs prévues des teneurs en liquide (eau + diesel) FC_1 sont calculées et comparées aux teneurs en liquide FC_2 , déterminées par gravimétrie à la fin de l'étape du mélange du diesel avec le sol humide. La diminution de la teneur en liquide ($FC_1 - FC_2$) augmente avec l'augmentation de la concentration en diesel, atteignant approximativement 1% pour les échantillons 3 et 4. Cet écart raisonnable prouve que la préparation des échantillons a été menée avec soin. Le Tableau 1 donne un récapitulatif des teneurs en eau et des teneurs en liquide correspondant aux différentes étapes de préparation de chaque échantillon de sol, moyennées sur les différents échantillons préparés à la même concentration en diesel.

Le sol est ensuite placé dans un porte-échantillon. Celui-ci est de géométrie cylindrique et présente des dimensions suffisamment grandes pour éviter d'éventuels effets de bords. Pour tous les tests, le sol est placé en trois couches et légèrement compacté avec un pilon. A chacune des étapes, la surface tassée a été grattée afin d'éviter que des frontières planes et franches ne se

constituent, et donneraient par conséquent à l'échantillon un aspect stratifié susceptible de générer des réflexions

parasites sur le signal TDR.

Tableau 1. Description des teneurs en eau et en liquide dans les échantillons de sol.

ECHANTILLON DE SOL #	1	2	3	4
Teneur en eau prévue (%)	15	15	15	15
Concentration en diesel dans le sol (ppm)	0	18 076	41 414	70 256
A LA PREPARATION				
Teneur gravimétrique en eau, ω_1 (%)	14.72	14.92	14.69	14.71
APRES 24 HEURES				
Teneur gravimétrique en eau, ω_2 (%)	14.27	14.26	14.43	14.42
Concentration diesel dans le liquide (%)	0	11.25	22.30	32.76
Teneur en liquide, FC_1 (%)	14.27	16.11	18.56	21.44
Teneur en liquide, FC_2 (%)	14.27	15.65	17.63	20.38
Différence ($FC_1 - FC_2$) (%)	0	0.46	0.93	1.06
Degré de saturation (%), (porosité = 0.4)	60.75	69.43	80.29	94.24

5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les mesures TDR présentent une relative simplicité d'exécution, néanmoins la précision de celles-ci dépend naturellement de la fiabilité du dispositif expérimental et de la technique de mesure adoptée. Ces deux facteurs ne sont pas les seuls à être déterminants. En effet, les conditions de préparation des échantillons et la rigueur qui y a été observée influent fortement sur la validité des résultats. Toute inhomogénéité ou anisotropie qui se manifeste dans les sols est souvent à l'origine d'artefacts. Pour contourner cette difficulté, en plus d'avoir préparé plusieurs échantillons pour chaque taux de contamination, deux tests sont effectués pour chacun des échantillons. Ces deux tests consistent en l'acquisition des signaux TDR réfléchis correspondant à deux positions perpendiculaires d'insertion des guides d'ondes dans l'échantillon.

Pour tous les signaux qui suivront, il sera entendu par signal, l'évolution du coefficient de réflexion en fonction du temps. Celui-ci est défini par l'expression suivante (Cole, 1977):

$$R = \frac{u(t) - u_0}{u_0} \quad [5]$$

avec,

$u(t)$: Tension relevée à l'instant t .

u_0 : Tension d'excitation.

Les premiers signaux recueillis (Figure 3) sont ceux réfléchis par les échantillons propres (non contaminés).

Les signaux TDR collectés font apparaître majoritairement une tendance dans le comportement. Un signal qui ne suit pas la tendance dégagée n'est pas retenu. Il est très probable que celui-ci soit entaché d'erreurs.

Les signaux TDR réfléchis par les échantillons contaminés ont également subi le même traitement. Les Figures 4, 5 et 6 montrent les signaux TDR correspondant aux sols contaminés au diesel respectivement aux concentrations 18 076 ppm, 41 414 ppm et 70 256 ppm.

Il est à relever que l'échantillon propre (Figure 3) fait apparaître une certaine disparité dans les signaux par rapport aux échantillons contaminés. Cette disparité serait due au volume assez important d'air en présence. Ce volume ne serait pas réparti de façon identique d'un échantillon propre à un autre. Aussi, lors de l'insertion des tiges de la sonde TDR dans l'échantillon de sol, celles-ci compactent et perturbent l'état du sol qui est autour. De plus, souvent des poches d'air sont piégées entre les tiges et le sol. Cette influence de la présence des poches d'air sur la précision des mesures TDR a été soulevée par Annan (1977). Il les confirma en tant que sérieuse source d'erreurs dans l'estimation de la permittivité diélectrique.

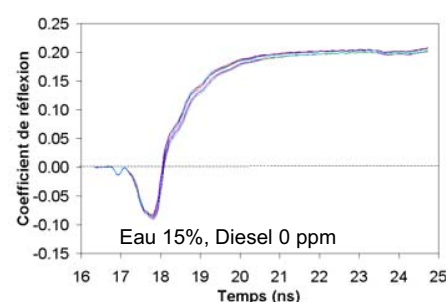


Figure 3. Signaux TDR réfléchis par l'échantillon propre

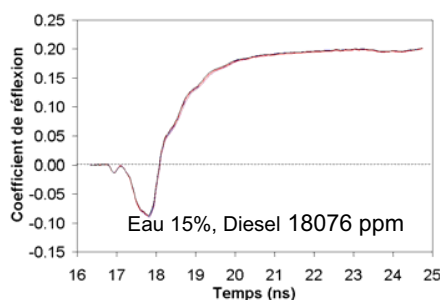


Figure 4. Signaux TDR réfléchis par l'échantillon contaminé

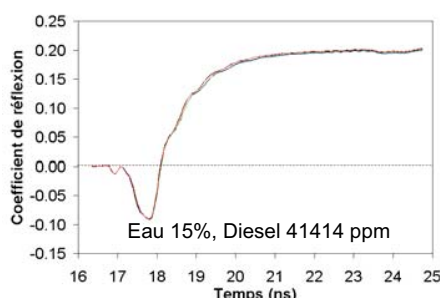


Figure 5. Signaux TDR réfléchis par l'échantillon contaminé

La disparité mentionnée pour les signaux recueillis à partir de l'échantillon propre est moins perceptible pour les signaux relatifs aux sols contaminés (Figures 4 à 6). Ceci

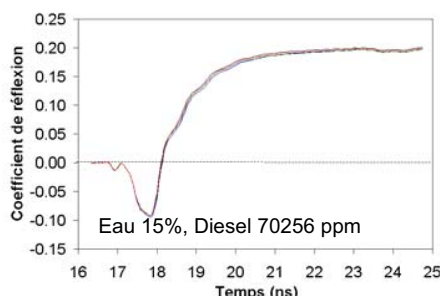


Figure 6. Signaux TDR réfléchis par l'échantillon contaminé

est probablement dû au volume d'air en présence qui est plus faible d'une part, et probablement à un effet de lubrification du diesel sur les guides d'ondes, favorisant ainsi une insertion de ces derniers sans grande perturbation du sol en contact, d'autre part.

Un tracé de la moyenne arithmétique, à chaque instant, du coefficient de réflexion relatif à chacun des sols est représenté sur la Figure 7.

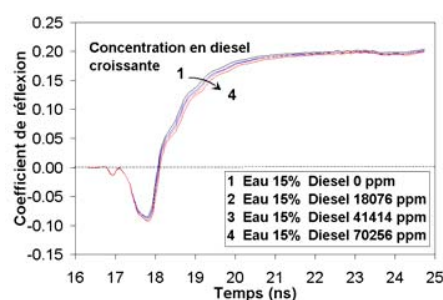


Figure 7. Signaux TDR réfléchis, sols propres et contaminés

Ce tracé global met en évidence les effets de la contamination au diesel sur les signaux TDR réfléchis. En première remarque, il est à noter que ceux-là se manifestent par une séparation des signaux les uns par rapport aux autres, particulièrement sur leurs fronts ascendants. Par la suite, les signaux réfléchis par les échantillons propre et contaminés se resserrent en tendant asymptotiquement vers un palier horizontal. Cette queue du signal TDR caractérise la conductivité électrique du milieu entourant les tiges de la sonde (Dalton et al., 1984). Les variations de cette grandeur se manifestent par une excursion dans le sens vertical de la partie plane du signal. L'exploitation de cet effet permet la détermination de la conductivité électrique du sol (Topp et al., 1988).

Pour le problème étudié, la présence de diesel n'a eu aucun effet sur cette partie caractéristique du signal. Il est possible de conclure donc que le diesel n'est d'aucune contribution à la conductivité électrique du sol. Cela confirme le caractère non conducteur du diesel.

La Figure 8 présente la première partie des signaux recueillis (Figure 7) se situant entre les instants $t = 16.3$ ns et $t = 19.7$ ns. Il est possible d'observer, la portion du signal TDR, jusqu'à l'instant $t = 16.8$ ns, correspondant à la propagation dans le câble coaxial. Puis dans la couche de résine, constituant le socle de la sonde TDR, entre $t = 16.8$ ns et $t = 17.1$ ns. Au delà de cet instant, la propagation a lieu dans les guides d'ondes insérés dans le sol. Les signaux relatifs aux différents échantillons se détachent alors nettement les uns des autres pour évoluer de façon similaire sans jamais se couper cependant. La vitesse de propagation n'étant pas la même selon le sol dans lequel est insérée la sonde, un retard se manifeste dans les temps de transit observés d'un échantillon à un autre, provoquant ainsi le décalage relevé entre les signaux TDR. Il faut remarquer que ces derniers se manifestent par concentration croissante en diesel. Le retard enregistré par rapport à l'échantillon propre est d'autant plus important que le taux de contamination du sol augmente.

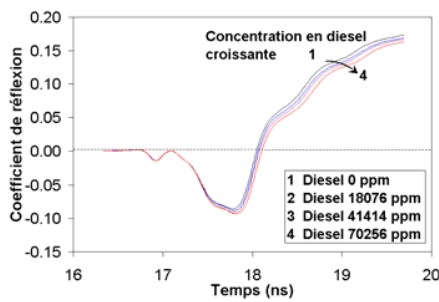


Figure 8. Portion initiale des signaux TDR réfléchis, sols propres et contaminés

Par ailleurs, il est aussi possible de remarquer que le module du coefficient de réflexion, au niveau des extrémités des guides d'ondes, augmente avec la concentration en diesel existante dans le sol.

Les comportements relevés sont la conséquence directe de l'influence de la concentration en diesel sur la constante diélectrique apparente du composite constitué par les grains solides de sol, l'eau, le diesel et l'air.

En prenant en considération le fait que la permittivité du diesel est plus importante que celle de l'air, il est aisé de voir en comparant les équations [3] et [4] que la présence de diesel dans un sol non saturé a pour effet d'augmenter la permittivité diélectrique du composite.

Afin de mieux traduire les réalités expérimentales, la loi du mélange (équation [4]) a été réécrite en fonction de la teneur massique en eau θ_m et de la concentration massique en diesel ψ_m . Celle-ci devient,

$$\varepsilon = \left[\frac{\rho_s}{\rho_\omega} \theta_m \varepsilon_\omega^\beta + \frac{\rho_s}{\rho_d} \frac{\theta_m \psi_m}{1 - \psi_m} \varepsilon_d^\beta + (1 - \varphi) \varepsilon_s^\beta + \left(\varphi - \frac{\rho_s}{\rho_\omega} \theta_m - \frac{\rho_s}{\rho_d} \frac{\theta_m \psi_m}{1 - \psi_m} \right) \varepsilon_{\text{air}}^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad [6]$$

ρ_ω , ρ_s et ρ_d désignent les masses volumiques respectives de l'eau, des grains solides du sol et du diesel.

Une représentation graphique de l'évolution de la permittivité diélectrique relative du sol en fonction de la teneur en eau telle que la prévoit l'équation précédente, jusqu'à la saturation de l'échantillon, est présentée sur la Figure 9, pour les différentes concentrations en diesel considérées soit 0 ppm, 18 076 ppm, 41 414 ppm et 70 256 ppm. Pour cela, les valeurs numériques considérées, pour les masses volumiques, sont les suivantes: $\rho_\omega = 10^3 \text{ Kg.m}^{-3}$, $\rho_s = 2.7 \cdot 10^3 \text{ Kg.m}^{-3}$ et $\rho_d = 0.77 \cdot 10^3 \text{ Kg.m}^{-3}$.

Il ressort du tracé suivant que la permittivité diélectrique du sol ne subit pas une forte croissance au fur et à mesure que la concentration en diesel évolue. Ce comportement s'explique par le fait que la permittivité du diesel soit relativement faible devant celle de l'eau et

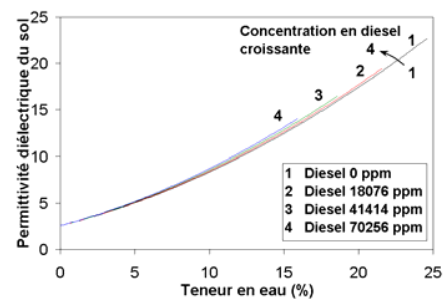


Figure 9. Permittivité diélectrique relative du sol, prévue par le modèle du mélange, en fonction de la teneur en eau pour différentes concentrations en diesel

proche des permittivités de l'air et des grains solides du sol.

Sur la Figure 10 a été représentée l'évolution théorique du temps de transit en fonction de la teneur en eau, à concentration en diesel constante, obtenue par la combinaison des équations [2] et [6]. Il ressort de ce tracé que le temps de transit suit une évolution linéaire croissante. Le retard induit par la contamination du sol augmente avec la concentration du diesel en présence. Cette propriété explique l'apparition par concentration en diesel croissante des signaux obtenus expérimentalement. Ce comportement n'est observable que pour les sols non saturés.

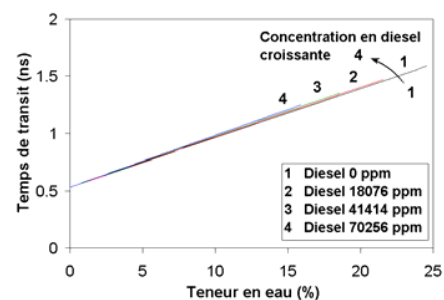


Figure 10- Evolution du temps de transit du signal TDR en fonction de la teneur en eau du sol pour différentes concentrations en diesel

Dans le cas de sols saturés (en eau), la présence de contaminant de type hydrocarbure provoque une diminution de la constante diélectrique, et par conséquent du temps de transit dans les guides d'ondes. Les signaux TDR correspondant aux sols contaminés se manifesteront alors à gauche du "signal propre", c'est à dire plus tôt sur l'échelle des temps. Ce comportement de la permittivité diélectrique et du temps de transit pour des sols saturés a été observé par Redman et al. (1991) et Redman and Annan (1992). Du fait de l'écart important existant entre les permittivités du contaminant et de l'eau, l'effet de la présence de celui-ci sur la permittivité apparente du sol et sur le temps de transit est appréciable, dans le cas de sols saturés. Cette constatation est moins vraie pour les sols non saturés, autant du point de vue de la constante diélectrique et du temps de transit que de l'amplitude du signal électromagnétique réfléchi.

Selon le taux de contamination, les signaux recueillis pour les échantillons contaminés se distinguent entre eux et par rapport au signal relatif au sol propre. Néanmoins, l'écart qui existe entre eux n'est pas très important. Dans le but d'une meilleure mise en évidence de ces écarts selon la concentration en diesel et afin de disperser les tracés entre eux, des courbes donnant la différence, à chaque instant t , entre les signaux relatifs aux sols contaminés et le signal correspondant au sol propre, pris comme référence, ont été représentées sur la Figure 11.

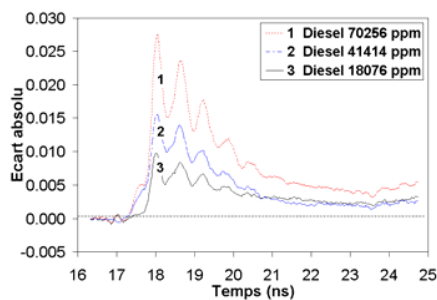


Figure 11- Ecarts des signaux TDR par rapport au signal du sol propre pris comme référence en fonction du temps

Le tracé est ainsi exécuté respectivement pour chacun des taux de contamination. Les courbes obtenues présentent des allures similaires. Elles se manifestent par une succession de pics, d'amplitudes décroissantes, régulièrement espacés. Ces courbes sont détachées les unes par rapport aux autres selon la concentration en diesel. La comparaison des tracés obtenus laisse remarquer que la dynamique des pics est proportionnelle à la concentration de diesel en présence dans le sol. Aussi, il peut être relevé que ces courbes sont étagées par concentration en diesel croissante.

Si les amplitudes des pics diffèrent selon l'échantillon c'est à dire par rapport à la concentration en diesel présente, ceci par contre n'est pas valable pour les instants auxquels ils se manifestent. En effet, les pics apparaissent aux mêmes instants pour les trois échantillons contaminés. La concentration en diesel n'influe donc pas sur les positions des pics. Celles-ci sembleraient être plutôt imposées par les dimensions des tiges de la sonde TDR.

Donc suite à toutes ces constatations, il est possible d'avancer que ce sont particulièrement les amplitudes des pics, apparaissant sur les courbes d'écart des signaux TDR, qui sont corrélées par la concentration en diesel.

6. CONCLUSION

Dans l'étude qui a été menée, il a été tenté de faire ressortir les effets que provoque la présence du diesel dans un sol non saturé sur le comportement du signal TDR réfléchi.

Il a été montré, d'un point de vue expérimental, que la présence du diesel dans un sol non saturé se manifestait par un retard du signal TDR et un coefficient de réflexion qui augmentent avec la concentration de celui-ci. Une comparaison avec les résultats existant dans la littérature pour des sols saturés, a révélé un effet inverse du diesel

sur le signal TDR renvoyé. L'importance de l'influence que provoque le diesel sur le signal TDR réfléchi par un sol non saturé a été relevée et comparée au cas d'un sol saturé. En s'appuyant sur le modèle du mélange, il a été apporté une justification à ces deux comportements opposés et à leur importance relative dans l'un et l'autre des deux cas.

En outre, afin de mettre en exergue l'effet de la présence du diesel, les courbes donnant la différence entre le signal référence constitué par le "signal propre" et les "signaux contaminés" ont été représentées. Ces dernières ont laissé remarquer, pour toutes les concentrations, une série régulière de sommets dont la dynamique est d'autant plus importante que la concentration en diesel augmente.

Bien que l'influence du diesel sur le signal TDR réfléchi par un sol non saturé soit faible, l'étude menée a permis néanmoins de dégager un comportement de ce signal par rapport au diesel et à sa concentration. Il serait utile d'approfondir l'exploitation du signal TDR, afin de contourner cette faiblesse de sensibilité et pouvoir quantifier la concentration de diesel en présence. Dans ce sens, le caractère non conducteur du diesel peut être exploité. La non contribution du diesel à la conductivité électrique du sol, alliée à l'estimation de la permittivité diélectrique de ce dernier, pourrait être une issue prometteuse pour ce problème.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par le directeur général de l'environnement (DGE), Ministère de la Défense Nationale du Canada (MDN). Ce support financier est apprécié avec beaucoup de gratitude. Les auteurs remercient également M. Joe DiPietrantonio, technicien au département de génie civil, Collège Militaire Royal du Canada, pour son assistance technique au laboratoire.

REFERENCES

- Alharthi, A., and Lange, J., 1987, Soil water saturation: Dielectric determination, *Water Resour. Res.*, 23(4), 591-595.
- Annan, A. P., 1977, Time-domain reflectometry -- air-gap problem for parallel wire transmission lines, in *Report of Activities, Part B, Rep. 77-1B*, pp. 59-62, Geol. Surv. Of Canada, Ottawa, 1977.
- Benson, C. H., and Bosscher, P. J., 1999, Time-domain reflectometry (TDR) in geotechnics: a review, *Nondestructive and Automated Testing for Soil and Rock Properties*, ASTM STP 1350, Marr, W. A., and Fairhurst, C. E., Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 113-136.
- Brewster, M. L., Annan, A. P., Greenhouse, J. P., Kueper, B. H., Olhoeft, G. R., Redman, J. D., and Sander, K. A., 1995, Observed migration of a controlled DNAPL release by geophysical methods, *Ground Water*, 33(6), 977-987.
- Chenaf, D., 2000, Petroleum oil lubricant mobility in permafrost, *Internal Technical Report for DGE*, 100p.
- Cole, R.H., 1977, Time domain reflectometry, *Ann. Rev. Phys. Chem.*, 28, 283-300.

- Dalton, F. N., Herkelrath, W. N., Rawlins, D. S., and Rhoades, J. D., 1984, Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe, *Science*, 224, 989-990.
- Davis, J. L., 1975, Relative permittivity measurement of a sand and clay in situ, *Geol. Surv. Can. Pap.*, Vol. 75-1C, 361-365.
- Davis, J. L., and Chudobiak, W. J., 1975, In situ meter for measuring relative permittivity of soils, *Geol. Surv. Can. Pap.*, Vol. 75-1A, 75-79.
- DeRyck, S. M., Redman, J. D., and Annan, A. P., 1993, Geophysical monitoring of a controlled kerosene spill, *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, San Diego, California, April 18-22, 5-20.
- Feng, W., Lin, P., Deschamps, R., J., and Drnevich, V.P., 1999, Theoretical model of a multisection time domain reflectometry measurement system, *Water Resour. Res.*, 35(8), 2321-2331.
- Ferré, P. A., Knight, J. H., Rudolph, D. L., and Kachanoski, R. G., 2000, A numerically based analysis of the sensitivity of conventional and alternative time domain reflectometry probes, *Water Resour. Res.*, 36(9), 2461-2468.
- Jones, S. B., and Friedman, S. P., 2000, Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles, *Water Resour. Res.*, 36(10), 2821-2833.
- Kueper, B. H., Redman, D., Starr, R. C., Reitsma, S., and Mah, M., 1993, A field experiment to study the behavior of tetrachloroethylene below the water table: Spatial distribution of residual and pooled DNAPL, *Ground Water*, 31(5), 756-766.
- O'Connor, K. M., Dowding, C. H., 1999, *GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes*, CRC Press, New York.
- Olhoeft, G. R., 1986, Direct detection of hydrocarbon and organic chemicals with ground penetrating radar and complex resistivity, *Proceedings of the NWWA/API Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water - Prevention, Detection, and Restoration -*, Houston, November 12-14, 284-305.
- Persson, M., and Berndtsson, R., 2002, Measuring nonaqueous phase liquid saturation in soil using time domain reflectometry, *Water Resour. Res.*, Vol. 38(5), 22-1 – 22-8.
- Pitchford, A. M., Mazzella, A. T., and Scarbrough, K. R., 1989, Soil-gas and geophysical techniques for detection of subsurface organic contamination, *Final Report*, January 1989, Air Force Engineering & Services Center, Florida.
- Redman, J. D., Kueper, B. H., and Annan, A. P., 1991, Dielectric stratigraphy of a DNAPL spill and implications for detection with ground penetrating radar, *Fifth National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, Ground Water Monitoring, and Geophysical Methods*, Las Vegas, Nevada, May 13-16, 1017-1030.
- Redman, J. D., 1992, Geophysics and the solvents-in-groundwater program, *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Oakbrook, Illinois, April 26-29, 375-382.
- Redman, J. D., and Annan, A. P., 1992, Dielectric permittivity monitoring in a sandy aquifer following the controlled release of a DNAPL, *Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar*, Rovaniemi, Finland, June 8-13, 191-195.
- Redman, J. D., and DeRyck, S. M., 1994, Monitoring non-aqueous phase liquids in the subsurface with multilevel time domain reflectometry probes, *Symposium and Workshop on the Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, Evanston, Illinois, September 7-9, 207-215.
- Robinson, D. A., and Friedman, S. P., 2001, Effect of particle size distribution on the effective dielectric permittivity of saturated granular media, *Water Resour. Res.*, 37(1), 33-40.
- Roth, K., Schulin, R., Flühler, H., and Attinger, W., 1990, Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach, *Water Resour. Res.*, 26(10), 2267-2273.
- Tabbagh, A., Camerlynk, C., and Cosenza, P., 2000, Numerical modeling for investigating the physical meaning of the relationship between relative dielectric permittivity and water content of soils, *Water Resour. Res.*, 36(9), 2771-2776.
- Tektronix, 1993, 1502C Metallic Time Domain Reflectometer, *Operator Manual*, 070-7169-00, Tektronix Inc., USA.
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.*, 16(3), 574-582.
- Topp, G. C., Yanuka, M., Zebchuk, W. D., and Zegelin, S., 1988, Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines, *Water Resour. Res.*, 24(7), 945-952.
- Topp, G.C., Zegelin, S.J., and White, I., 1994, Monitoring soil water content using TDR: An overview of progress, *Symposium and Workshop on the Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications*, Evanston, Illinois, September 7-9, 67-80.
- Weerts, A. H., Huisman, J. A., and Bouten, W., 2001, Information content of time domain reflectometry waveforms, *Water Resour. Res.*, 37(5), 1291-1299.