

Mesures de teneurs en eau volumique et massique sur du sable

Cyrille FAUCHARD*
Vincent GUILBERT
Florence SAGNARD

Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement
Normandie-Centre

Michel FROUMENTIN

Centre d'expérimentation routière,
Le Grand-Quevilly, France

■ RÉSUMÉ

Usuellement, la mesure par séchage en étuve et la mesure de la masse volumique humide par méthode nucléaire permettent de relier la teneur en eau massique à la teneur en eau volumique.

La méthodologie étudiée ici propose d'associer à la mesure de la masse volumique humide une estimation de la teneur en eau volumique par des méthodes électromagnétiques via la mesure de la permittivité diélectrique apparente du sol.

Ce paramètre physique peut être relié à la teneur en eau volumique par une loi empirique ou par une loi de mélange, dans laquelle la permittivité et la concentration volumique de chaque constituant, notamment celle de l'eau, sont prises en compte. Deux méthodes électromagnétiques sont utilisées pour déterminer la permittivité apparente du sol : la première est basée sur la mesure des paramètres de réflexion d'un monopôle quart d'onde enfoncé dans le matériau étudié. La seconde est le radar impulsif, qui repose sur le principe de la propagation des ondes électromagnétiques à travers une épaisseur donnée de matériau. Ces méthodes permettent d'estimer directement et in situ la teneur en eau volumique.

Les résultats obtenus selon les deux méthodologies sont comparés et critiqués. Des améliorations notables sont préconisées pour de futures recherches.

Volumetric and mass water content measurements conducted on sand

■ ABSTRACT

Typically, the measurement conducted by oven drying and the wet mass density measurement using the nuclear method allow correlating mass water content with volumetric water content.

The methodology under study herein proposes associating the wet volumetric mass measurement with a volumetric water content estimation by means of electromagnetic methods, in measuring the apparent soil dielectric permittivity. This physical parameter may be correlated with the volumetric water content through either an empirical law or a mix law, according to which both the permittivity and volumetric concentration of each component, and particularly water, are taken into account. Two electromagnetic methods are used in order to determine apparent soil permittivity : the first is based on measuring the reflection parameters of a quarter-wave monopole sunk into the study material ; while the second, the pulse radar method, relies on the principle of electromagnetic wave propagation through a given material thickness. These methods serve to estimate both directly and in situ the volumetric water content.

The results obtained by applying the two methodologies will be compared and critically analyzed ; moreover, suggestions for major improvements will be forwarded for use in subsequent research.

* AUTEUR A CONTACTER

Cyrille FAUCHARD
cyrille.fauchard@developpement-
durable.gouv.fr

INTRODUCTION

■ Contexte et objectif

Ces mesures ont été réalisées sur des planches expérimentales sur du sable de classe B2 (NFP 98-300), au Centre d'Expérimentation Routière (CER) du Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement - Normandie Centre (CETE-NC). Elles s'inscrivent dans le cadre de l'opération de recherche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées « Terrassements et comportement des matériaux de remblais ».

La teneur en eau massique d'un matériau est une donnée de référence autour de laquelle se sont construites les pratiques dans le domaine des terrassements, et plus généralement en géotechnique. Associée à la mesure de la masse volumique humide, sa mesure mène à l'estimation de la masse volumique sèche, ce dernier paramètre permettant de vérifier que le taux de compactage du sol mis en œuvre répond aux spécifications requises en terme de densification.

La teneur en eau massique est déterminée en laboratoire par pesée et séchage en étuve, à 105 °C, pendant 24 heures (NF P94-050). Cette technique nécessite un prélèvement local et destructif. La masse volumique humide du sol en place, est déterminée par une méthode nucléaire reposant sur l'émission et la réception par transmission directe de rayonnement gamma. L'appareil utilisé est le gamma densimètre à profondeur variable (GPV 25/40, NF P94-062). C'est une méthode réalisée en forage, efficace et éprouvée mais dont l'utilisation en terme de sécurité et de maintenance impose de fortes contraintes.

Pour diminuer le temps de mesure, notamment celui concernant la teneur en eau massique, une méthode électromagnétique locale et non destructive, utilisant un monopôle quart d'onde est présentée. Les signaux obtenus sont traités dans le domaine fréquentiel. Elle est comparée à une méthode électromagnétique plus classique : le radar impulsif. Les signaux sont exploités dans le domaine temporel. Ces méthodes permettent d'estimer *in situ* la teneur en eau volumique du sol étudié. Associée à la mesure de la masse volumique humide, la teneur en eau massique peut être déduite.

Le paramètre physique mesuré en méthode électromagnétique est la permittivité complexe. Dans cette étude, seule la permittivité réelle est étudiée. Deux modèles de permittivité des sols sont utilisés : le premier est empirique [1] et le second repose sur une loi de mélange (*Complex Refractive Index Method* [2]). Seule l'utilisation de la formule de Topp donne directement la teneur en eau volumique du sol. L'utilisation de la formule de CRIM nécessite comme donnée la masse volumique humide, ce dernier paramètre étant de toutes façons nécessaire pour relier la teneur en eau volumique obtenue par l'une ou l'autre des formules, à la teneur en eau massique (figure 1).

DÉFINITION DES GRANDEURS MESURÉES

■ Teneurs en eau et masse volumique humide

Le séchage en étuve permet de mesurer la teneur en eau massique du matériau prélevé. Elle est obtenue, pour un volume donné, par la mesure de la masse d'un échantillon du sol humide (m_h [kg]) et la masse de cet échantillon après séchage (m_d [kg]). Le temps de séchage dépend de la quantité de matériau prélevé. Classiquement, le matériau est séché à 105 °C pendant 24 h heures.

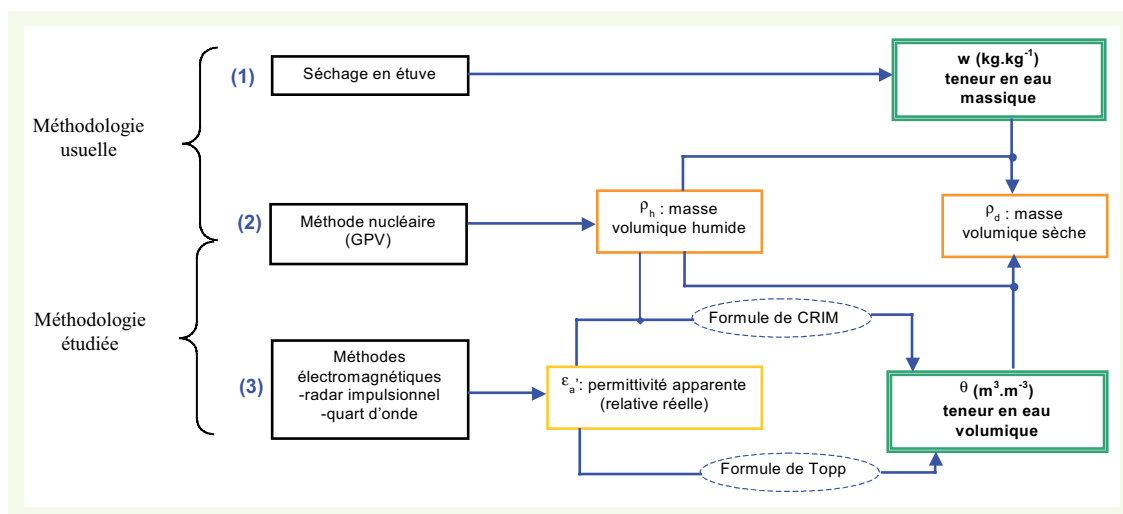
La teneur en eau massique w [3] est donnée par :

$$w = \frac{m_h - m_d}{m_d} \text{ [kg}\cdot\text{kg}^{-1}] \quad (1)$$

Où m_h et m_d sont les masses humide et sèche du matériau.

Dans le cadre de cette étude, en faisant l'hypothèse que chaque pesée est connue à ± 5 g et que l'ordre de grandeur de la masse de l'échantillon est de 3 000 g et celle de la tare de 1 000 g, l'erreur relative sur la mesure de la teneur en eau par séchage est estimée à 1 %.

figure 1
 Méthodologie usuelle et méthodologie étudiée pour la détermination des teneurs en eau massique et volumique.



La méthode de la mesure de la masse volumique humide n'est pas présentée ici. L'appareil utilisé est un gamma densimètre à profondeur variable (GPV). L'erreur relative sur la mesure de la masse volumique humide ρ_h avec les appareils à transmission est inférieure à 1 %.

La densité sèche γ_d (sans unité) d'un matériau est définie par le rapport de la masse volumique du matériau sec ρ_d [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] sur la masse volumique de l'eau ρ_w [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], avec $\rho_w \approx 1 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$:

$$\gamma_d = \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (2)$$

La teneur en eau volumique θ [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$] se déduit immédiatement des relations (1) et (2) :

$$\theta = w\gamma_d \quad (3)$$

La densité humide γ_h (sans unité) d'un matériau est définie par le rapport de la masse volumique du matériau humide ρ_h [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] sur la masse volumique de l'eau :

$$\gamma_h = \frac{\rho_h}{\rho_w} \quad (4)$$

La relation qui lie la densité sèche à la densité humide est donnée par :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w} \quad (5)$$

La teneur en eau volumique θ , la masse volumique humide ρ_h (obtenue par GPV) et la teneur en eau massique w sont liées par la relation :

$$\theta = \frac{\gamma_h}{(1 + w)} w = \frac{\rho_h}{\rho_w(1 + w)} w \quad [\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}] \quad (6)$$

■ La permittivité diélectrique des sols étudiés

La permittivité diélectrique effective d'un matériau, qui est celle que l'on mesure, est une grandeur complexe. Elle traduit la manière dont le matériau absorbe l'énergie¹ d'une onde électromagnétique qui le traverse. Cette énergie est stockée de façon capacitive par polarisation des charges liées (partie réelle) ou est dissipée dans le matériau par des phénomènes de relaxation de polarisation

¹ En génie civil et en géophysique, les propriétés magnétiques des matériaux sont celles du vides (exceptés pour la prospection minéralogique ou la recherche d'anomalies métalliques) : l'énergie absorbée ne dépend que de propriétés diélectriques complexes du matériau.

(partie imaginaire de la permittivité) et/ou de conduction. Pour les matériaux du génie civil, il est communément admis qu'elle peut être définie par :

$$\varepsilon_{\text{eff}}^* = \varepsilon_0(\varepsilon_{\text{eff}}' - j\varepsilon_{\text{eff}}'') = \left[\varepsilon_0 \left(\varepsilon_r' - j \left(\varepsilon_r'' + \frac{\sigma'}{2\pi f \varepsilon_0} \right) \right) \right] \quad (7)$$

où $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9} = 8,854 \times 10^{-12}$ [F/m], la permittivité du vide,

ε_r' , la permittivité relative réelle du matériau,

ε_r'' sa permittivité relative imaginaire,

σ' [S/m] sa conductivité réelle,

f [Hz] la fréquence de l'onde électromagnétique émise.

Pour un matériau hétérogène comme le sable humide, à des fréquences inférieures à 1 GHz [1], la permittivité dépend de celles du sable, de l'air, de l'eau et de leur proportion volumique. Leurs permittivités relatives réelles sont respectivement de 3,7, 81 et 1. La permittivité réelle de l'eau est très élevée par rapport à celle du sable, et de manière générale, à celles des matériaux du génie civil ; la teneur en eau, même faible joue un rôle important dans la mesure des permittivités.

Par ailleurs les pertes par relaxation de polarisation des molécules d'eau et par phénomène de

conduction restent relativement faibles ($\frac{\varepsilon_r'' + \frac{\sigma'}{2\pi f \varepsilon_0}}{\varepsilon_r'} \leq 1$, matériaux à faibles pertes) ; la permittivité

mesurée (ou apparente) est très proche de la permittivité relative réelle du matériau :

$$\varepsilon_{\text{eff},r}^* \approx \varepsilon_a = \varepsilon_r' \quad (8)$$

Expérimentalement, cette approximation est satisfaisante aux fréquences utilisées dans cette étude : Mironov [2] l'utilise pour du sable à des fréquences allant jusqu'à 1,43 GHz et pour des teneurs en eau volumiques inférieures à 25 %. Elle est aussi utilisée par Cariou [4] pour des teneurs en eau inférieures à 20 % et des fréquences inférieures à 2 GHz (mesures en cavité cylindrique sur des graves, graves calcaires, sables traités et sables de classe B2 identique à celui mesuré dans le cadre de cette étude).

■ Modèle de permittivité en fonction de la teneur en eau pour le sable

La formule de Topp [1] est une relation empirique basée sur un ensemble de mesures TDR (*Time Domain Reflectometry*) réalisées sur différents matériaux à différentes teneurs en eau. Elle est valable pour des fréquences de mesure allant de 1 MHz à 1 GHz.

Dans les conditions décrites précédemment, la teneur en eau volumique du sable étudié (θ^{Topp} [m³·m⁻³]) est donnée par :

$$\theta^{\text{Topp}} = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \varepsilon_a^1 - 5,5 \times 10^{-4} \varepsilon_a^2 + 4,3 \times 10^{-6} \varepsilon_a^3 \quad (9)$$

Cette relation n'est plus valable lorsque l'on atteint un seuil critique de saturation ($\theta \approx 0,4$). Par ailleurs, pour les matériaux contenant de l'argile, et pour des teneurs en eau inférieure à 10 %, d'autres relations prenant en compte la proportion d'eau liée et d'eau libre sont plus appropriées [2, 5].

On peut aussi calculer la permittivité d'un sol à l'aide de la formule de CRIM, basée sur un modèle volumétrique dans lequel le matériau est considéré comme un milieu essentiellement constitué d'un grain solide de nature unique, de vide et d'eau. Dans le domaine de fréquence étudié, elle s'applique

bien pour les sables [2, 6]. Elle est valable pour des milieux à faibles salinités (< 12 %) et à pertes faibles ($\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \leq 1$). Elle est donnée par :

$$\sqrt{\epsilon_a} = C_g \sqrt{\epsilon_g} + C_e \sqrt{\epsilon_e} + C_{air} \sqrt{\epsilon_{air}} \quad (10)$$

avec :

$$C_g = \frac{\rho_h}{\rho_s}, \text{ la concentration en granulat,}$$

$$C_e = \theta, \text{ la concentration en eau,}$$

$$C_{air} = 1 - \frac{\rho_h}{\rho_s} - \theta, \text{ la concentration en air,}$$

ρ_s [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], la masse volumique spécifique du grain de sable (silice),

ϵ_g , la permittivité relative réelle du grain,

$\epsilon_e = 81$, la permittivité relative réelle de l'eau,

$\epsilon_{air} = 1$, la permittivité relative réelle de l'air.

Dans ces conditions, la teneur en eau volumique est donnée par :

$$\theta = \frac{\sqrt{\epsilon_a} - \sqrt{\epsilon_{air}}}{\sqrt{\epsilon_e} - \sqrt{\epsilon_{air}}} - \frac{\rho_h}{\rho_s} \left(\frac{\sqrt{\epsilon_g} - \sqrt{\epsilon_{air}}}{\sqrt{\epsilon_e} - \sqrt{\epsilon_{air}}} \right) [\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}] \quad (11)$$

La permittivité du principal constituant est donnée par exemple par [7] :

$$\epsilon_g' = 3,7 \text{ et } \rho_s(\text{silice}) = 2,66 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}.$$

Par ailleurs, des mesures de constantes diélectriques [4] réalisées en cavité cylindrique, et de teneur en eau réalisées par séchage en étuve, ont permis de corriger, au sens des moindres carrés, et pour des masses volumiques humides données, les coefficients de la relation (8). En ne conservant comme seule inconnue que la masse volumique humide du matériau ρ_h , qui est déterminée par le GPV, on obtient la teneur en eau volumique (θ^{Labo} [$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$]) en fonction de la permittivité apparente mesurée :

$$\theta^{\text{Labo}} = 1,249 \times 10^{-1} * \sqrt{\epsilon_a} - 3,85 \times 10^{-2} * \rho_h - 1,279 \times 10^{-1} [\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}] \quad (12)$$

La formule de Topp (équation 9) et la formule de CRIM (équation 11 ou 12) associée à la mesure de la masse volumique humide (mesure GPV) permet d'obtenir directement la teneur en eau volumique du sol associée à la l'équation 6, la teneur en eau massique peut être déduite.

■ Le radar impulsif

L'objectif des mesures au radar impulsif, associées aux mesures de masse volumique humide est de déterminer la permittivité apparente des matériaux sur l'épaisseur mise en oeuvre. Les épaisseurs sont préalablement mesurées au théodolite. On obtient une estimation de la teneur en eau globale sur cette épaisseur.

Le principe du radar impulsif [8] repose sur l'émission d'ondes électromagnétiques (impulsion dans le domaine temporel), la propagation de ces ondes dans un milieu matériel, et la réception de la partie réfléchi sur les contrastes diélectriques rencontrés.

Les mesures représentent l'amplitude normalisée du champ électrique reçu, graduée en niveau de couleur en fonction du temps de propagation et de la position en surface. Le résultat obtenu est un radargramme ou coupe-temps.

Le radar impulsionnel utilisé est un radar GSSI SIR 10A+ relié à une antenne blindée GSSI de type dipôle bi-triangle (*bow-tie*), dont la fréquence centrale est de 400 MHz dans l'air. La bande passante est en général de l'ordre de $[fc / 4 ; 2fc]$.

La vitesse v [m/s] des ondes électromagnétiques dans les milieux matériels considérés ici, est donnée par :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Dans le cas monostatique (utilisation d'une seule antenne émettrice et réceptrice), la permittivité apparente peut être déduite du pointé des temps de trajet de l'impulsion, entre la surface et le contraste diélectrique qu'elle rencontre (interface de compactage, changement de matériau). Cette hypothèse est valable tant que les pertes et la dépendance fréquentielle des grandeurs diélectriques sont faibles, ce qui est le cas pour le sable, aux teneurs en eau étudiées. On a :

$$\epsilon_a = \left(\frac{ct}{2e} \right)^2 \quad (15)$$

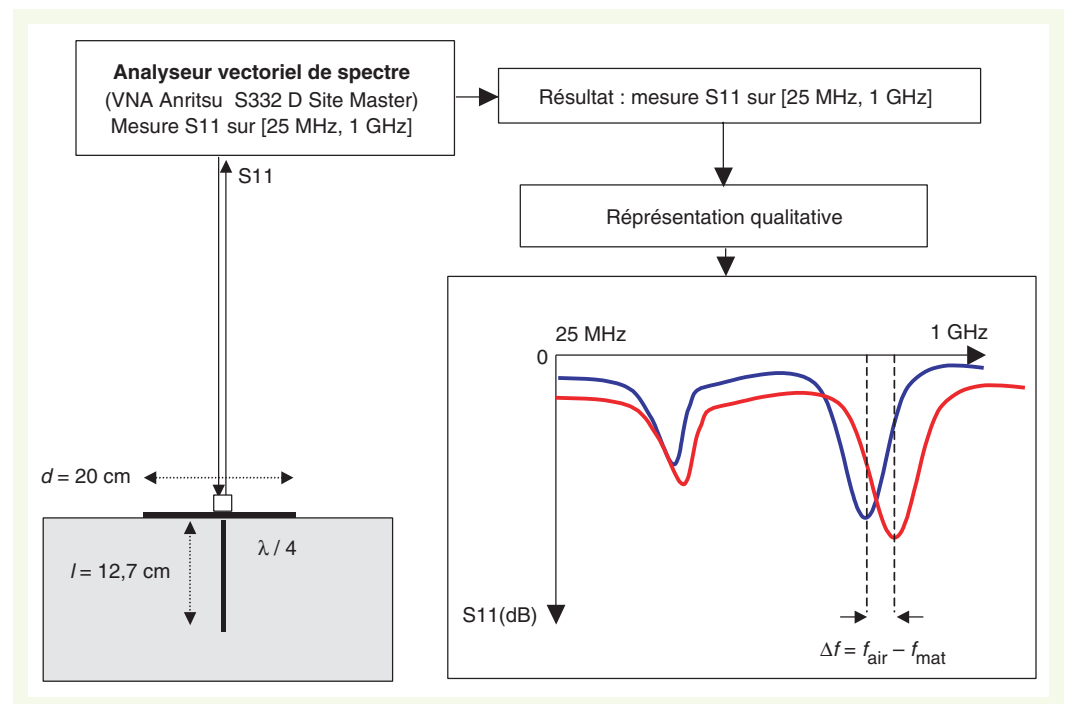
avec t [ns] le temps de propagation pointé sur les radargrammes bruts et e [m], l'épaisseur du matériau traversé. On suppose que les incertitudes absolues des épaisseurs et pointés des temps de trajet sont respectivement de 1 cm et 0,1 ns.

■ Méthode au monopôle quart d'onde

Associée à la mesure de la masse volumique humide par GPV, l'objectif des méthodes électromagnétiques est ici de remplacer le séchage en étuve (mesure de la teneur en eau massique) par une mesure de la teneur en eau volumique.

Le principe du monopôle quart d'onde repose sur la comparaison de ses fréquences de résonance dans le sable testé, f_{mat} , avec ses fréquences de résonance dans l'air, f_{air} . Ces fréquences sont générées par un analyseur vectoriel (Anritsu S332D) fonctionnant en réflexion, émettant un nombre défini d'ondes monochromatiques sur une bande de fréquence donnée, ici [25 MHz, 1 GHz].

figure 2
Principe de mesure de la méthode électromagnétique du quart d'onde.



Le résultat d'une mesure est la représentation du paramètre S11 (dB) de l'antenne quart d'onde dans l'air et dans le matériau, en fonction de la fréquence. Les pics de résonance correspondent aux fréquences pour lesquelles l'énergie électromagnétique émise par l'antenne dans l'air ou dans le sol est

maximale. Le dipôle quart d'onde est composé d'un fil métallique d'une longueur de $l = 12,7$ cm, et d'un plan de masse circulaire en cuivre de 20 cm de diamètre (figure 2).

Dans l'air, la première fréquence de résonance mesurée est proportionnelle au quart de la longueur d'onde dans l'air (figure 3) :

$$f_0^{\text{air}} = \frac{c}{4l} \text{ [Hz]} \quad (13)$$

Soit, sur la figure 3, $f_0^{\text{air}} = 587$ MHz, avec $c = 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹, la vitesse de la lumière dans le vide. Les autres fréquences sont respectivement $3 f_0^{\text{air}}$ et $5 f_0^{\text{air}}$. Afin de rester dans l'hypothèse d'un matériau diélectrique à faibles pertes, ces résonances ne sont pas exploitées.

Dans le matériau, le premier pic de résonance (en supposant le monopôle adapté) est donné par :

$$f_0^{\text{mat}} = \frac{c}{4l\sqrt{\epsilon_a}} \text{ [Hz]} \quad (14)$$

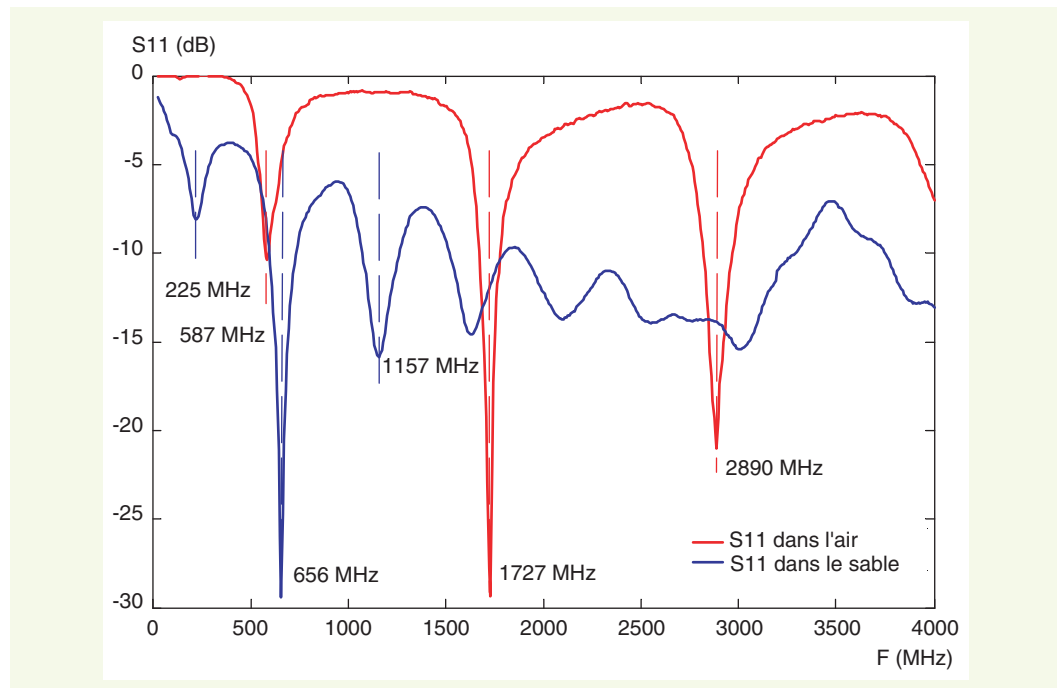
Soit, sur la figure 3, $f_0^{\text{mat}} = 225$ MHz. De (13) et (14), on a :

$$\epsilon_a = \left(\frac{f_0^{\text{air}}}{f_0^{\text{mat}}} \right)^2 \quad (15)$$

La profondeur d'investigation est difficile à estimer, puisque l'on ne connaît pas les caractéristiques diélectriques du sable que l'on cherche. En première approximation on peut considérer que le volume investigué par la méthode est proportionnel à la demi-longueur d'onde dans le matériau, soit dans l'exemple de la figure 3, à 225 Mz, une demi-sphère d'un diamètre de 60 à 70 cm. L'erreur sur les pointés des fréquences de résonance est estimée à 5 MHz.

figure 3

Exemple de mesures dans l'air et dans le sable du paramètre S11 (dB) du dipôle quart d'onde, sur la bande [25 MHz, 4000 MHz]. Seuls les premiers pics dans le sable et dans l'air sont traités (zone en pointillés).



RÉSULTATS DES MESURES

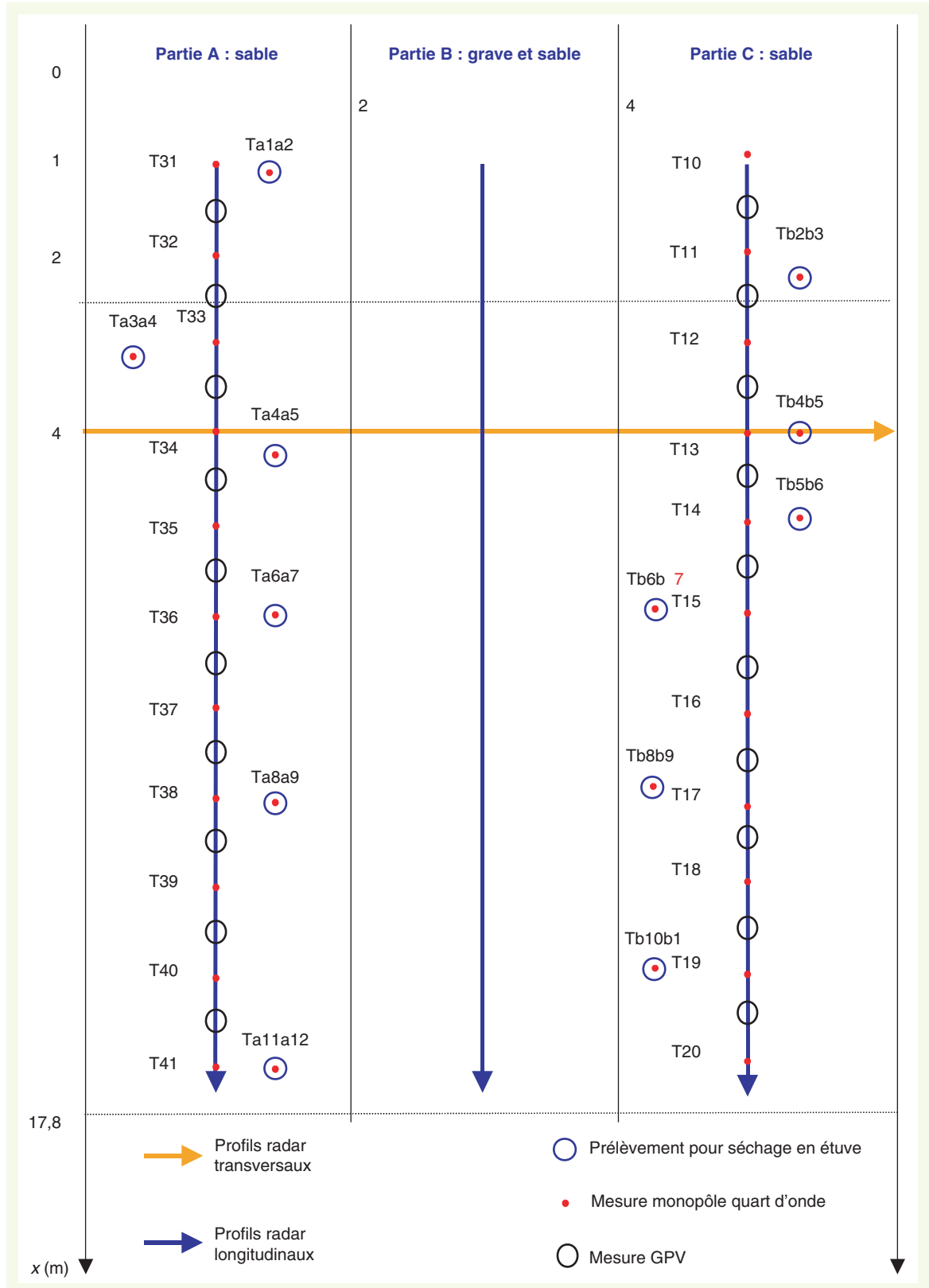
■ Site test et implantation des mesures

Le site test d'une largeur de 7,5 m environ, d'une longueur de 20 m, et d'une épaisseur d'environ 1 m, est composé de trois parties de terrain, notées A, B et C. Les parties A et C dont la teneur en eau

massique annoncée est respectivement de 9 % et 6 %, sont composées de sable de classe B2 mis en place en deux compactages : une couche de 70 cm et une de 30 cm. La partie B est composée d'une couche de 50 cm de grave (couche supérieure) puis de sable sur une épaisseur d'environ 50 cm. Elle n'a été testée qu'au radar, car il était impossible mécaniquement d'implanter le dipôle quart d'onde dans un sol graveleux. Les mesures de teneur en eau (figure 4) avec le monopôle quart d'onde sont représentées par des points rouges et sont notées :

– T31 à T41, entre les points GPV (cercles noirs) de la partie A (sable à plus forte teneur en eau) ;

figure 4
Schéma du site
de mesure –
vue de haut.



- $T_{a_{i+1}}$, sur l'emplacement des points de prélèvement d'échantillons pour la mesure de la teneur en eau par séchage (cercles bleus) de la partie A ;
- T10 à T20 sur l'emplacement des points GPV de la partie C (sable de faible forte teneur en eau) ;
- $T_{b_{i+1}}$, sur l'emplacement des points de prélèvement d'échantillons pour la mesure de la teneur en eau par séchage de la partie C ;

Le radar impulsif est déployé sur trois profils en long de 20 m, sur les parties A, B et C, et un profil en travers à 4 m. L'échantillonnage en espace est de un signal enregistré tous les 5 cm le long des profils. La mesure est déclenchée par une roue codeuse.

Le zéro temporel est fixé par convention au minimum du premier pic négatif de l'impulsion émise à la sortie de l'antenne, posée sur la surface du sol, traduisant le contraste d'impédance électromagnétique de sortie d'antenne/sol. Les épaisseurs relevées au théodolite lors de la mise en œuvre sont prises en compte :

PRÉSENTATION DES MESURES ET INTERPRÉTATION

■ Résultats des mesures brutes au radar impulsif

› Interface de compactage

Il s'agit de l'interface due à la mise en œuvre en deux couches de 70 et 30 cm. Pour la partie A, (coupe en travers de la **figure 5** et profil en long de la **figure 6**), dans le sable de plus forte teneur en eau massique (9 %), elle est peu marquée, probablement située entre 8 et 9 ns mais sa localisation reste incertaine.

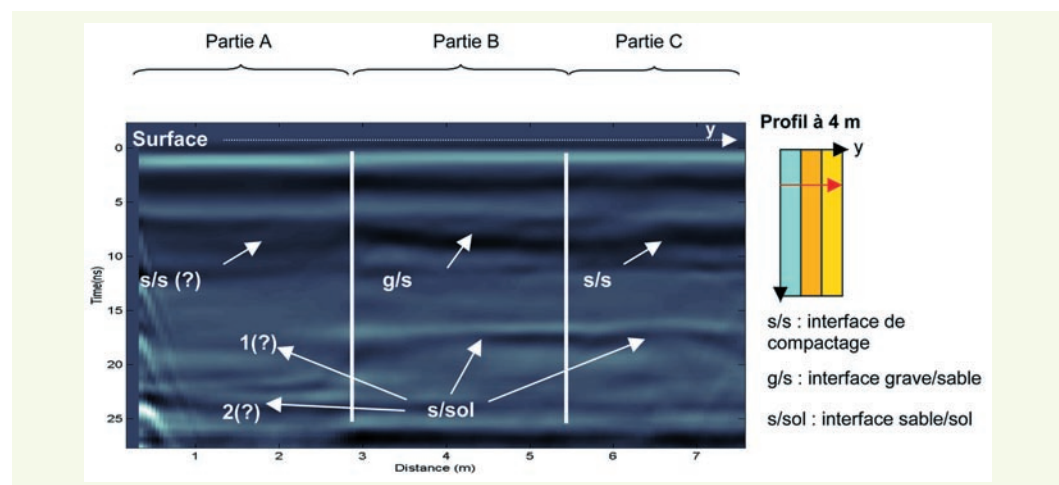
Elle est en revanche bien localisée (coupe en travers de la **figure 5** et profil en long de la **figure 7**) pour la partie B (grave/sable), vers 7,5 ns. Elle traduit d'une part le changement de nature des matériaux mis en œuvre (grave/sable) et d'autre part le gradient de densité (contraste électromagnétique) introduit par le compactage.

Pour la partie C (coupe en travers de la **figure 5** et profil en long de la **figure 8**), dans le sable de plus faible teneur en eau massique (6 %), l'interface visible située entre 8 et 10 ns ne s'explique que par le contraste électromagnétique dû au compactage (gradient de densité).

› Interface sable/terrain naturel

Pour la partie A (coupe en travers de la **figure 5** et profil en long de la **figure 6**), la localisation de l'interface sable/terrain naturel est délicate. Dans le cas de la **figure 5**, elle apparaît plus profonde (à 22,5 ns) que sur les parties B et C. La **figure 6** montre clairement qu'elle est bien située autour

figure 5
Mesures brutes au radar impulsif en travers du site, à 4 m.



de 22 ns, alors qu'elle est située autour de 17 ns pour les deux autres parties : le sable à 12 % de teneur en eau massique est plus absorbant, la permittivité γ est plus élevée et les vitesses des ondes électromagnétiques γ sont plus lentes.

› Conclusion sur les mesures radar brutes

Les mesures radar brutes permettent d'obtenir rapidement une image du sol étudié. Elles renseignent sur la localisation des interfaces entre couches de compactage et couches de matériaux différents, en fonction du temps de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu. L'analyse sommaire et comparative de ces radargrammes donne une idée de la teneur en eau potentielle des matériaux mis en œuvre.

figure 6
Mesures brutes au radar impulsionnel sur la partie A, sable de forte teneur en eau.

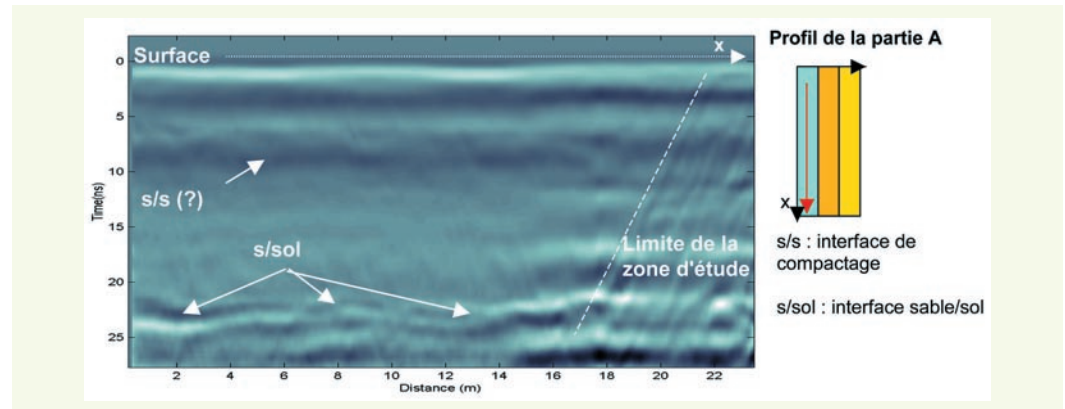


figure 7
Mesures brutes au radar impulsionnel sur la partie B, grave et sable de faible teneur en eau.

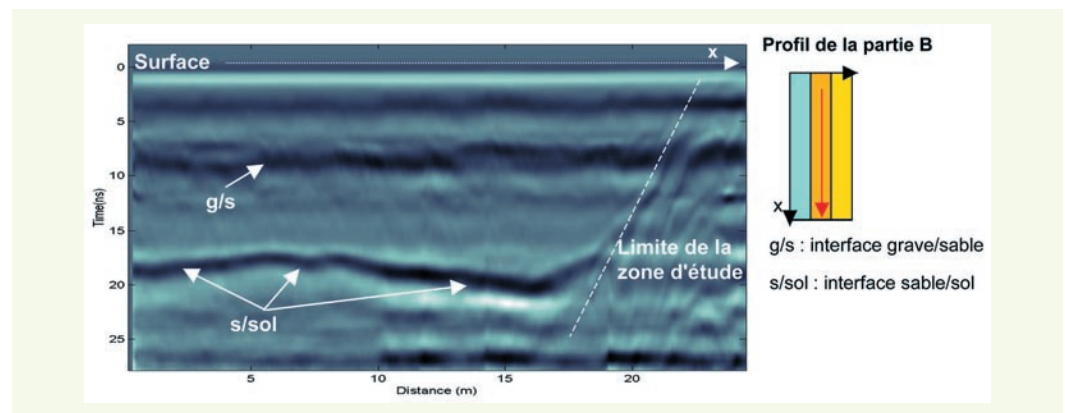
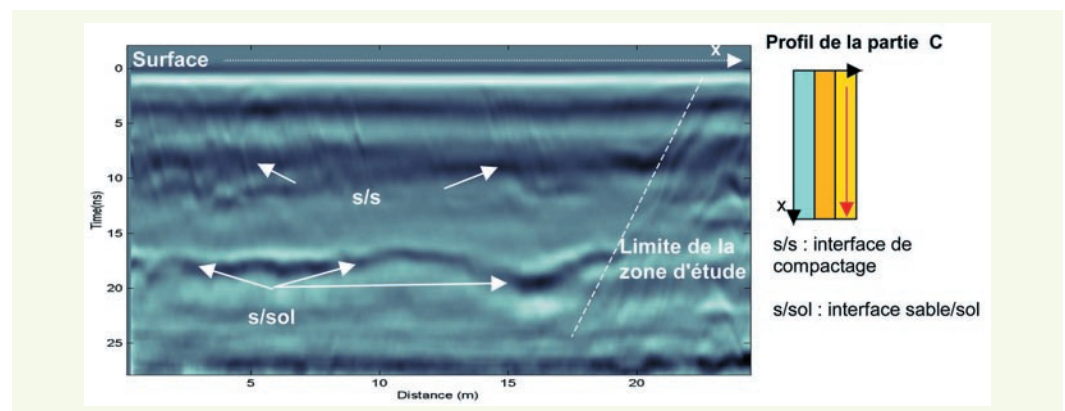


figure 8
Mesures brutes au radar impulsionnel sur la partie C, sable de faible teneur en eau.



■ Mesures de la teneur en eau volumique avec le radar impulsionnel

Les teneurs en eau volumique et massique sont estimées à partir de la permittivité apparente déduite des épaisseurs mesurées au théodolite et des temps de trajet pointés (équation 15) entre la surface et l'interface sable/sol sur les profils des parties A et C.

Ainsi, la **figure 9** présente les teneurs en eau volumique et massique sur ces profils. La formule de Topp (**équation 9**) donne directement la teneur en eau volumique. La formule de CRIM (**équation 11**) associée aux mesures de masse volumique humide, réalisées ponctuellement sur ces mêmes profils, donne la teneur en volumique. On obtient les teneurs en eau massiques en utilisant la formule 6. Le séchage en étuve donne directement la teneur en eau massique (mesures CER, courbes noires sur la **figure 9**). Les masses volumiques humides mène à l'estimation d'une teneur en volumique (mesures CER, courbes noires sur la **figure 9**).

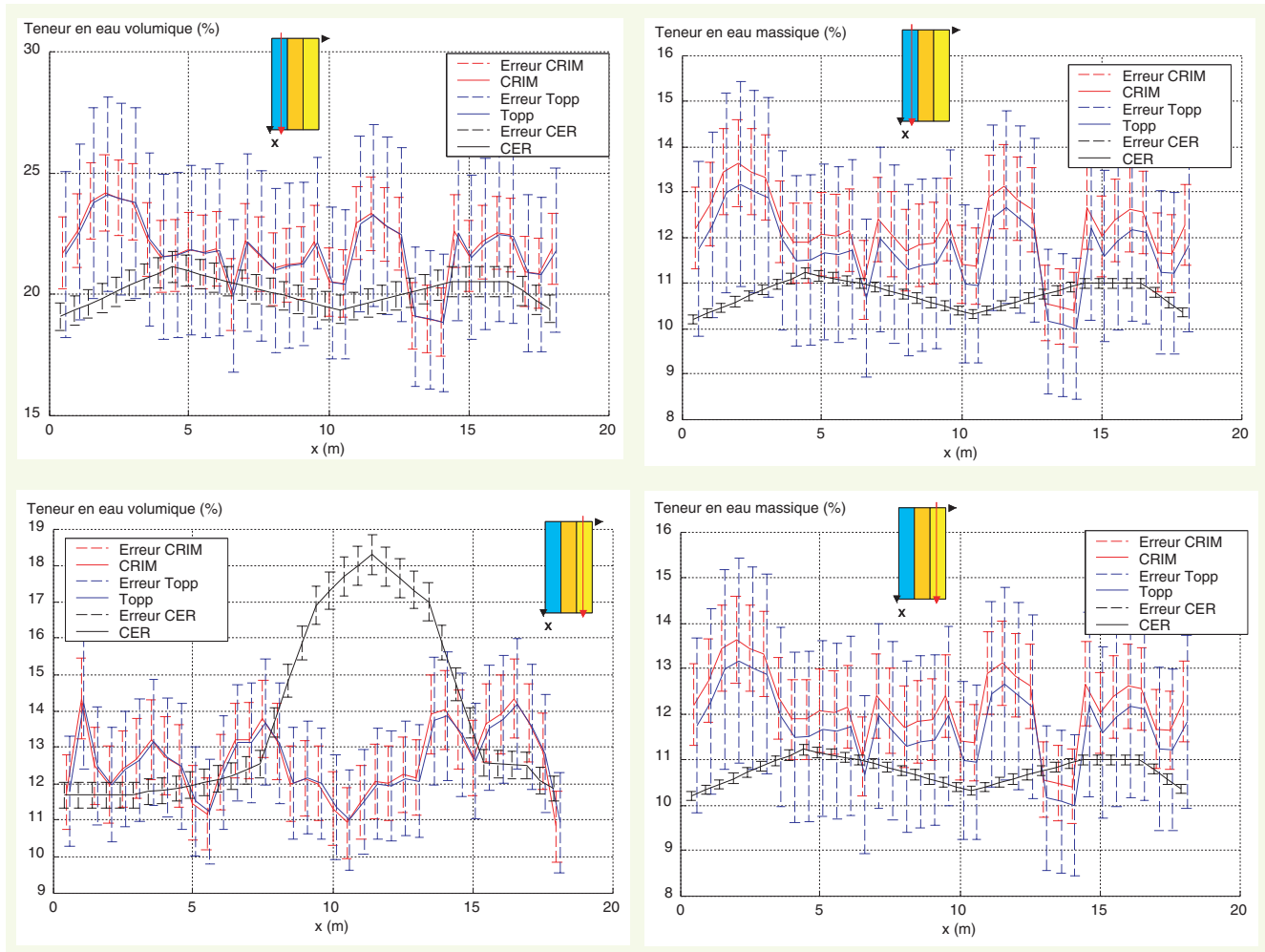
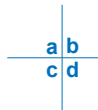


figure 9

Mesures des teneurs en eau volumique, a) et c), et massique, b) et d), estimées à partir des mesures de permittivité apparente du sol et de masses volumiques humides, par la formule de Topp (bleu), et de CRIM (rouge). Les figures a) et b) sont les mesures sur la partie A, les figures c) et d) celles sur la partie B. Les courbes noires représentent les teneurs en eau volumique et massique obtenues par mesures GPV sur les profils, et séchage en étuve au plus près des profils.



■ Résultats des mesures au monopôle quart d'onde

La **figure 10** présente respectivement les mesures aux points T_{a1a2} à T_{a11a12} de la partie A et les mesures aux points T_{b2b3} à T_{b10b11} de la partie C. Elle donne :

- ① les teneurs en eau volumique et massique calculées par la formule de Topp, à partir des mesures de permittivité apparente, déduite des pointés de la première fréquence de résonance dans l'air et dans le matériau par méthode quart d'onde, et des mesures de masses volumiques humides réalisées au GPV ;
- ② les teneurs en eau volumique et massique calculées par la formule de CRIM, à partir des mesures de permittivité apparente, déduite des pointés de la première fréquence de résonance dans l'air et dans le matériau par méthode quart d'onde, et des mesures de masses volumiques humides réalisées au GPV ;

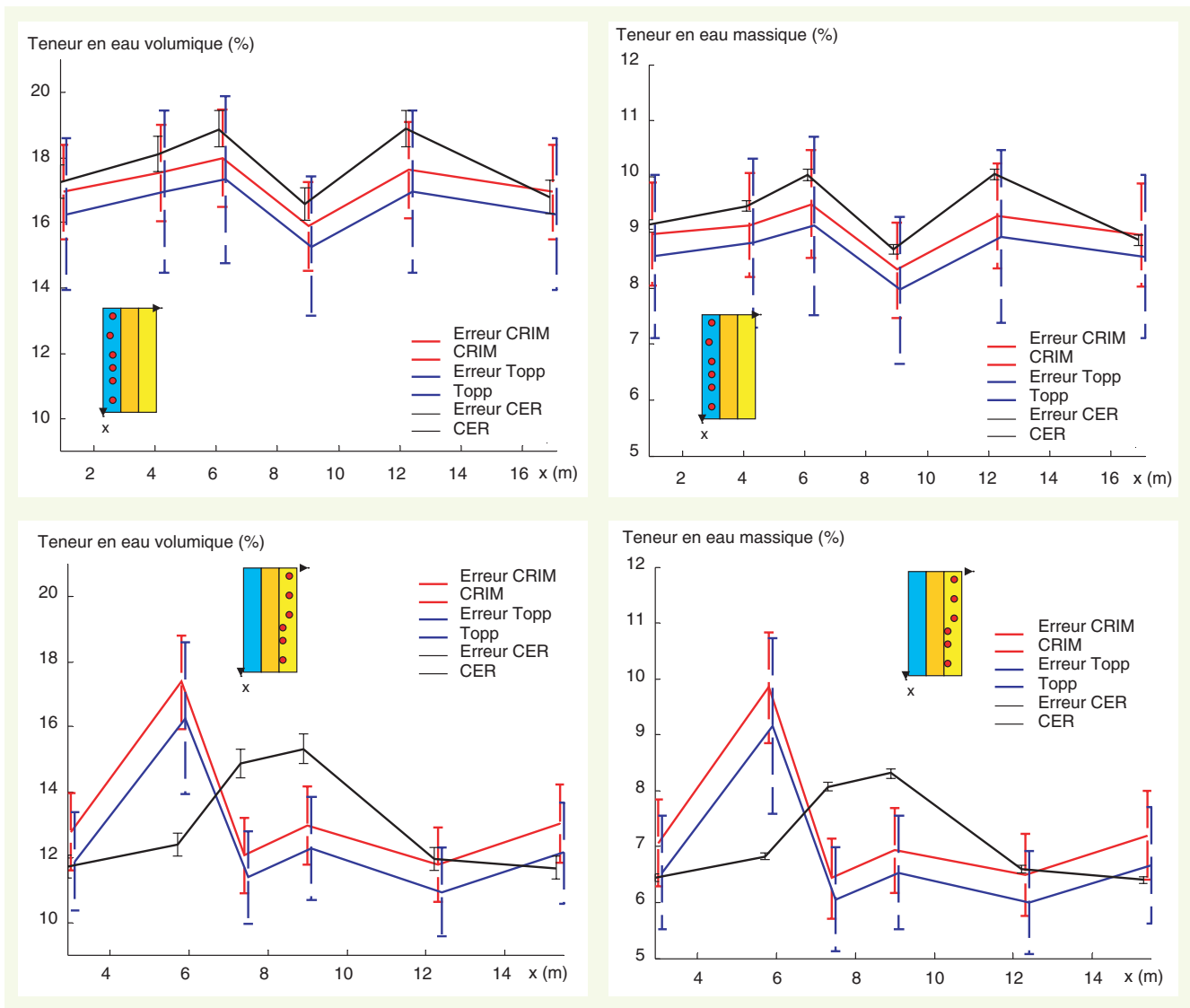


figure 10
 Représentation graphique des teneurs en eau volumique, a) et c), et massique, b) et d), calculées par les formules de Topp et de CRIM, comparées aux teneurs en eau volumique et massique obtenue par séchage en étuve et mesures GPV. a) et b) concernent la partie A, sur les 6 points T_{a1a2} à T_{a11a12} et b) et d) concernent la partie C, sur les 6 points T_{b1b2} à T_{b10b11} . Les mesures GPV considérées sont des mesures interpolées réalisées au plus près des points de mesures. En pointillé sont reportées les incertitudes relatives.

a b
 c d

Elles sont comparées aux mêmes points avec les mesures de la teneur en eau volumique réalisées par le CER, lesquelles sont obtenues après séchage en étuve des échantillons et par les mesures de masse volumique humide par GPV.

Les prélèvements d'échantillons pour le séchage ont été réalisés juste après la mesure au quart d'onde, strictement aux mêmes points de mesure. En revanche, une incertitude est introduite par l'approximation que l'on fait sur la masse volumique humide en ces points, qui est obtenue par interpolation des mesures GPV faites au plus près des mesures monopôle.

La figure 11 présente respectivement les mesures le long des profils A (points T31 à T41) et C (points T10 à T20). Elle donne de la même manière que la figure 10, les teneurs en eau volumique et massique obtenues par la formule de Topp et de CRIM. Elles sont comparées aux teneurs en eau volumique et massique obtenues par mesures GPV et séchage en étuve. Les mesures GPV sont réalisées le long des profils, mais décalées d'un pas de 1 m par rapport aux mesures monopôle. Par ailleurs, les prélèvements pour le séchage sont réalisés sur des points non situés sur les profils (voir figure 4). La teneur en eau massique considérée (en noir sur les courbes) est donc celle estimée au plus près des mesures (interpolation linéaire).

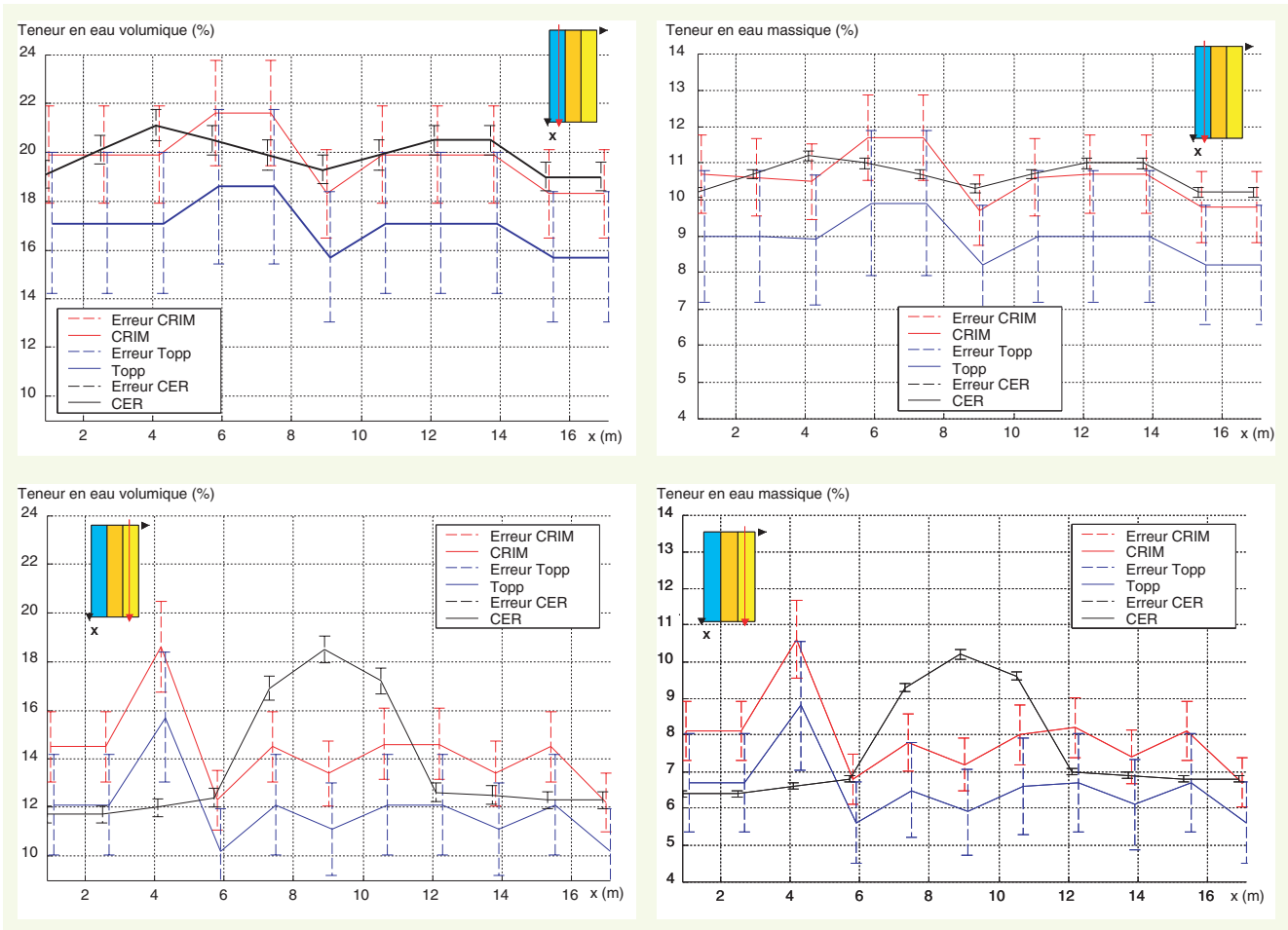
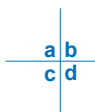


figure 11

Mesures des teneurs en eau volumique, a) et c), et massique, b) et d), estimées à partir des mesures de permittivité apparente du sol et de masses volumiques humides, par la formule de Topp (bleu), et de CRIM (rouge). Les figures a) et b) sont les mesures sur la partie A, les figures c) et d) celles sur la partie B. Les courbes noires représentent les teneurs en eau volumique et massique obtenues par mesures GPV sur les profils, et séchage en étuve au plus près des profils.



Synthèse des résultats et interprétation

Les **tableaux 1 et 2** présentent les moyennes des teneurs en eau estimées par les méthodes électromagnétiques et correspondent aux moyennes des courbes représentées sur les **figures 9, 10 et 11**. La teneur en eau massique visée pour la mise en œuvre de la partie A était de 9 %. Les prélèvements par séchage donnent une moyenne de 10 %. La teneur en eau volumique est de 18,8 %. Ces grandeurs pour la partie C sont respectivement de 6, 7,3 et 13,4 %. Les teneurs en eau CER prises en compte pour la comparaison avec les mesures radar sont légèrement plus élevées (effet de l'interpolation linéaire des points de mesure GPV et des points de prélèvement).

Interprétation des mesures

Les profils radar ont été réalisés une semaine avant les mesures de masses volumiques humides et les prélèvements pour le séchage en étuve. Les temps de trajet sont pointés tous les 50 cm. Le profil radar a été réalisé au-dessus de la ligne définie par les points de mesures de masse volumique humide. Elles ont été interpolées tous les 50 cm. Ces données mènent à l'estimation des teneurs en eau volumique et massique. Ces résultats sont comparés avec les teneurs en eau volumiques obtenues par séchage en étuve et les mesures GPV, sur six points seulement, au plus près des points de mesures radars, et avec les teneurs en eau massiques obtenues directement par séchage. L'interprétation est donc essentiellement qualitative, car on compare au final 40 points de mesures radar avec six points de mesures par prélèvement pour chaque profil.

La **figure 9** montre que la teneur en eau volumique de la partie A (partie de plus forte teneur en eau) a diminué de 2 points environ, entre les deux mesures réalisées au radar, puis les mesures réalisées

tableau 1
Moyennes des teneurs en eau volumique et massique sur la partie A (sable de plus forte teneur en eau).

Moyennes partie A		GPV				Teneur en eau volumique (%)					
		ρ_h	ρ_s	ϵ_r	$\Delta\epsilon$	θ_{Topp}	$\Delta\theta_{Topp}$	θ_{Labo}	$\Delta\theta_{Labo}$	Δ	$\Delta\theta_{CER}$
	Taiai + 1	2,07	1,89	8,8	0,6	16,5	2,4	17,1	1,3	17,8	0,5
	T30 à T40	2,07	1,87	9,1	0,3	17,0	1,2	17,6	0,7	19,9	0,6
Monopôle		2,07	1,88	9,0	0,4	16,7	1,8	17,4	1,0	18,8	0,6
Radar	Profil A	2,07	1,87	11,8	0,8	22,1	3,5	22,1	1,5	20,0	0,6

Moyennes partie A		GPV				Teneur en eau massique (kg/kg)					
		ρ_h	ρ_s	ϵ_r	$\Delta\epsilon$	W_{Topp}	ΔW_{Topp}	W_{Labo}	ΔW_{Labo}	W_{CER}	ΔW_{CER}
	Taiai + 1	2,07	1,89	8,8	0,6	8,7	1,5	9,0	0,9	9,4	0,1
	T30 à T40	2,07	1,87	9,1	0,6	8,9	1,4	9,3	0,7	10,6	0,1
Monopôle	Moy.	2,07	1,88	9,0	0,6	8,8	1,4	9,2	0,8	10,0	0,1
Radar	Profil A	2,07	1,87	11,8	0,8	11,9	2,0	12,4	0,9	10,7	0,1

tableau 2
Moyennes des teneurs en eau volumique et massique sur la partie C (sable de plus faible teneur en eau).

Moyennes partie C		GPV				Teneur en eau volumique (%)					
		ρ_h	ρ_s	ϵ_r	$\Delta\epsilon$	θ_{Topp}	$\Delta\theta_{Topp}$	θ_{Labo}	$\Delta\theta_{Labo}$	Δ	$\Delta\theta_{CER}$
	Tbibi + 1	1,96	1,83	7,0	0,4	12,5	1,6	13,4	1,1	13,2	0,4
	T10 à T20	1,95	1,81	6,7	0,2	11,9	0,8	12,8	0,6	13,6	0,4
Monopôle		1,95	1,82	6,8	0,3	12,2	1,2	13,1	0,8	13,4	0,4
Radar	Profil C	1,95	1,81	7,2	0,4	12,9	1,7	13,0	1,1	13,7	0,4

Moyennes partie C		GPV				Teneur en eau massique (kg/kg)					
		ρ_h	ρ_s	ϵ_r	$\Delta\epsilon$	W_{Topp}	ΔW_{Topp}	W_{Labo}	ΔW_{Labo}	W_{CER}	ΔW_{CER}
	Tbibi + 1	1,96	1,83	7,0	0,4	6,8	1,1	7,3	0,8	7,1	0,1
	T10 à T20	1,95	1,81	6,7	0,5	8,1	0,9	7,0	0,6	7,5	0,1
Monopôle		1,95	1,82	6,8	0,5	7,5	1,0	7,2	0,7	7,3	0,1
Radar	Profil C	1,95	1,81	7,2	0,4	6,9	1,0	7,4	0,7	7,6	0,1

au monopôle. Cet écart peut s'expliquer par une évaporation probablement plus forte en surface, qui introduit ainsi un gradient d'humidité dans le matériau et donc un gradient de vitesse (vitesse décroissante en fonction de la profondeur) : la permittivité radar est plus élevée que la permittivité monopôle. La formule de Topp (équations 9) montre que la teneur en eau volumique estimée est alors plus élevée. Les teneurs en eau estimée par la formule de CRIM (équation 11) au radar sont basées sur les mesures de masse volumique humide réalisées une semaine plus tard. Outre une permittivité plus élevée, la masse volumique humide considérée est plus faible, et donc les teneurs en eau estimées sont plus élevées. Pour les mêmes raisons, les teneurs en eau sur la partie C (partie de plus faible teneur en eau) sont légèrement plus élevées quand elles sont estimées par la méthode radar.

Le fort décalage entre 8 et 14 m pour les courbes CER (en noires sur la figure 9) est dû à une mesure locale, très probablement non représentative des prélèvements réalisés pour le séchage en étuve. Cette erreur se retrouve dans l'interpolation. Hormis cet écart, les mesures radar et les mesures par séchage montrent une forte corrélation : lorsque les épaisseurs sont connues, et lorsque les interfaces sont bien identifiées, le radar impulsif permet d'estimer des teneurs en eau volumique et massique pertinentes. On peut enfin conclure que la mesure radar, qui inclut l'épaisseur totale du matériau mis en place, et les prélèvements, qui sont réalisés juste en surface, montre une bonne

corrélation, ce qui traduit une mise en œuvre relativement homogène des matériaux sur toute leur épaisseur, malgré l'évaporation qui s'est produite entre les deux types mesures.

■ Interprétation des mesures quart d'onde

Les mesures de teneur en eau volumique obtenues par méthode quart d'onde sont proches des mesures de teneur en eau volumique obtenues par séchage en étuve et mesures GPV, notamment ceux issus de la formule de CRIM.

Les erreurs relatives sur le calcul de la teneur en eau volumique pour les trois méthodes (méthodes électromagnétiques avec la formule de Topp et la formule de CRIM, et séchage en étuve via les mesures GPV), sont respectivement de l'ordre de 15, 10 et 3 %. La formule de CRIM donne les moyennes les plus proches des teneurs en eau estimées par le séchage en étuve et les mesures GPV. La formule de Topp, si elle permet d'obtenir directement la teneur en eau volumique sans la donnée de la masse volumique humide, sous-estime de manière générale les teneurs en eau volumiques. L'incertitude absolue sur la grandeur estimée est par ailleurs plus importante (de l'ordre de 2 points contre 1/2 point).

Les mesures de teneur en eau massique obtenues par méthode quart d'onde et mesures GPV sont proches des mesures de teneur en eau massique obtenues par séchage en étuve. Cependant, l'incertitude absolue sur les résultats des formules de Topp et de CRIM est beaucoup plus importante que celle faite sur le calcul de la teneur en eau obtenue par séchage (± 1 %). Cette dernière méthode reste de loin la plus précise (méthode d'essai normalisé).

Les figures radar de la partie C montrent des variations fortes que seules des variations locales de teneur en eau peuvent expliquer. La teneur en eau massique (et donc volumique) mesurée par prélèvement à l'abscisse $x = 9$, à 1 m du profil C environ, sur les points T_{bjbj+1} , augmente fortement par rapport à sa valeur moyenne sur les six points mesurés. Cette variation n'existe pas sur les profils relevés au monopôle quart d'onde qui montrent en revanche une autre anomalie située plus amont, entre 4 et 6 m. Le nombre de point de mesure par prélèvement (6 points pour cette partie) est insuffisant pour une interprétation plus poussée. Cependant, en dehors de ces anomalies, les teneurs en eau entre les méthodes sont du même ordre de grandeur.

La méthode quart d'onde est une méthode non destructive, ponctuelle, qui peut se réaliser *in situ* à raison d'au moins une mesure tous les cinq minutes réalisée par un opérateur. La formule de Topp permet d'obtenir la teneur en eau volumique directement après la mesure quart d'onde.

La formule de CRIM nécessite la connaissance de certains paramètres (masse volumique et permittivité du grain) et la mesure de la masse volumique humide du matériau (GPV). Elle donne des résultats plus précis que la formule de Topp et mène à l'estimation conjointe des teneurs en eau massique et volumique.

La méthode par séchage en étuve est destructive, ponctuelle et se réalise en laboratoire à raison de dix mesures par jour. C'est la méthode de référence utilisée pour obtenir la teneur en eau massique. C'est aussi la plus longue. Associée aux mesures GPV, elle donne une meilleure estimation de la teneur en eau volumique en termes de valeur et d'incertitude que la méthode quart d'onde.

LIMITES DE L'ÉTUDE - PERSPECTIVES

Cette étude a permis de valider la mesure directe et non destructive de la teneur en eau volumique du sable par méthodes électromagnétiques. Cependant, les formules considérées ne tiennent pas compte de la partie complexe de la permittivité et limitent les interprétations physiques des résultats.

La détermination de la teneur en eau massique nécessite la connaissance de la masse volumique humide que l'on ne peut pas obtenir directement par ces méthodes : les mesures au GPV sont néces-

saires. L'utilisation d'une autre méthode géophysique comme le panneau électrique est envisagée et pourrait permettre de s'affranchir des techniques nucléaires pour cette application.

Par ailleurs, la détermination de la permittivité apparente du sol sur la seule première fréquence de résonance du quart d'onde reste une approche largement améliorable. Le potentiel de la technique au monopôle repose sur l'exploitation large bande du paramètre S11 complexe de ce type de d'antennes dans le sol. L'objectif est alors d'obtenir, *in situ*, la permittivité complexe du sol et son comportement fréquentiel. Cette étude est en cours [9] et se base sur l'utilisation d'un modèle analytique et de modélisations numériques, dont on cherche à faire varier les paramètres diélectriques pour que la réponse des modèles approche au mieux celle de la mesure.

Cette étude doit aussi se poursuivre sur d'autres matériaux (limon et argile en particulier), sur des gammes de teneur en eau plus complètes et corrélées avec des mesures précises de la permittivité complexe (mesures en cavité cylindrique). Ce travail est lui aussi en cours.

CONCLUSION

Ces mesures avaient pour objectif de tester différentes méthodes permettant de mesurer la teneur en eau (volumique et massique) des matériaux. Un site test situé au Centre d'expérimentation routière de Rouen a permis d'initier cette étude. Trois parties de terrain composées de sable et de grave ont été étudiées. Les mesures de teneur en eau portent uniquement sur les deux parties de sable, présentant des teneurs en eau massiques de 10 et 7,3 %.

Le radar impulsif, utilisé dans un premier temps pour une étude qualitative, permet d'enrichir l'interprétation des mesures ; et donne une première approche sur la répartition des matériaux et sur leur teneur en eau. Si les épaisseurs de mise en œuvre sont connues, l'estimation des teneurs en eau est possible et la pertinence des résultats est d'autant meilleure que la mise en œuvre des matériaux est homogène. L'utilisation de cette dernière méthode confirme la méthodologie générale de reconnaissance appliquée en génie civil et en géophysique et l'intérêt d'utiliser plusieurs techniques pour décrire au mieux les matériaux observés. Globalement, l'estimation des teneurs en eau par cette méthode est bonne, mais elle est difficile à systématiser pour cette application (nécessité de connaître précisément les épaisseurs) et dans la configuration utilisée (mode monostatique).

Cette étude montre que l'utilisation d'une méthode électromagnétique locale, le monopôle quart d'onde, permet de mesurer directement la **teneur en eau volumique** d'un sable, avec une précision cependant moins fiable (de 15 % pour la formule de Topp à 10 % pour le formule de CRIM) que celle obtenue par l'utilisation du séchage en étuve et du gamma densimètre à profondeur variable (de l'ordre de 3 %). Cette méthode électromagnétique utilise un analyseur vectoriel de réseau et un dipôle quart d'onde.

Lorsque la masse volumique humide est mesurée (mesures GPV), l'utilisation de la méthode quart d'onde avec la formule de Topp et la formule de CRIM mène à l'estimation de la **teneur en eau massique**. Les résultats des deux modèles sont comparés aux mesures obtenues par séchage en étuve. En moyenne, on obtient respectivement, en %, $8,8 \pm 1,4$, $9,2 \pm 0,8$ et $10 \pm 0,1$ pour la partie A, et $6,7 \pm 1$, $7,2 \pm 0,5$ et $7,3 \pm 0,1$ pour la partie C. D'un point de vue géotechnique, la précision de la méthode quart d'onde n'atteint pas encore celle qu'offre le séchage en étuve, qui reste la méthode directe, de loin la plus précise, mais aussi la plus longue.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P.**, Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines, *Water Resour. Res.* 16, 3, June 1980, 574-582
- 2 **MIRONOV V.L., DOBSON M.C., KAUPP V.H., KOMAROV S.A., KLESHCHENKO V.N.**, Generalized Refractive Mixing Dielectric Model for Moist Soils, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, 4, April 2004
- 3 **COSTET J., SANGLERAT G.**, *Cours pratique de mécanique des sols*, Dunod, 1969
- 4 **CARIOU J., FERRARI E., GENDRON A., GIRIN S.**, Applications des ondes électromagnétiques au contrôle de la teneur en eau, synthèse de juillet 2000, Rapport LRPC Rouen
- 5 **DOBSON M.C., ULABY F.T., HALLIKAINEN M.T., EL-RAYES M.A.**, Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil - Part II : Dielectric Mixing Models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, 1, January 1985
- 6 **BANO M., GIRARD J.F.**, Radar reflections and water content estimation of aeolian sand dune, *Geophysical Research Letters*, 28, 16, 3207-3210
- 7 **VON HIPPEL A.R.**, *Dielectric materials and applications*, The Technology Press of MIT and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1954, 438 pages
- 8 **DANIELS D.J., GUNTON D.J., SCOTT H.F.**, Introduction to subsurface radar, IEE Proceedings, 135, Pt. F, 4, August 1988
- 9 **SAGNARD F., GUILBERT V., FAUCHARD C.**, In-situ characterization of soil moisture content using a monopole probe, *Journal of Applied Geophysics*, juillet 2009, 182-193