

VALIDATION D'UN SYSTÈME DE CLASSIFICATION THERMIQUE DES SOLS

VALIDATION OF A THERMAL SOILS CLASSIFICATION SYSTEM

Philippe REIFFSTECK¹, Madeleine COUAILLIER², Gilles GRANDJEAN³

1 Terrasol, p.reiffsteck@terrasol.com

2 RTE, madeleine.couaillier@rte-france.com

3 BRGM, g.grandjean@brgm.fr

RÉSUMÉ — La détermination des caractéristiques thermiques des sols lors des phases amont de projets d'enfouissement de câbles électriques ou d'échangeurs géothermiques représente un enjeu important. Cette communication présente une méthodologie pratique de détermination basée sur la classification des terrassements routiers dite GTR (NF P11-300) prenant en compte l'état de saturation du massif. Les prédictions obtenues avec différentes méthodes de détermination de la conductivité thermique sont ensuite comparées à plusieurs jeux de données couvrant l'ensemble des classes de sol.

ABSTRACT — Determination of the thermal characteristics of soils in the early phases of projects of buried power cables or geothermal heat exchangers is an important issue. This paper presents a practical methodology of determination based on the French soils classification for earthworks called GTR (NF P11-300) taking into account the saturation of the ground mass. The predictions obtained with different methods for determining the thermal conductivity are then compared with several data sets covering all classes of soil.

1. Méthodologie

Nous proposons de déterminer les caractéristiques thermiques en utilisant une loi empirique définissant la conductivité en fonction de l'état de densité et de la teneur en eau. Ces caractéristiques d'état peuvent être obtenues à partir du modèle proposé dans l'article de Skaggs et al. 2001 pour la détermination des courbes synthétiques des différentes classes de sol à partir des points singuliers définis dans la GTR (AFNOR, 1992). La démarche proposée consiste donc à utiliser les relations humidité-conductivité thermique calées sur une base de données pour estimer la conductivité thermique, en fonction de l'humidité du sol. Celle-ci sera estimée grâce aux cycles saisonniers et aux informations texturales du sol obtenues à partir d'un prélèvement de classe C (AFNOR, 2007).

2. Proposition de modélisation

L'estimation de la conductivité thermique passe par les méthodes proposées par Skaggs et al. 2001 pour (i) la détermination des courbes synthétiques des différentes

classes à partir des points singuliers définis dans la GTR puis par (ii) la détermination de la relation de la distribution granulométrique avec la teneur en eau caractéristique pour les sols par le modèle empirique simple développé par Arya et Paris (1981).

Connaissant trois proportions ($1 > P(r_2) > P(r_1) > P(r_0) > 0$) correspondant à trois dimensions de particules (rayons $r_2 > r_1 > r_0 > 0$) on peut définir une courbe granulométrique synthétique.

$$P(r) = \frac{1}{1 + (1/P(r_0) - 1) \cdot e^{-u \cdot R^c}} \quad (1)$$

Avec

$$R = \frac{r-r_0}{r_0}; \quad a = \frac{1}{\ln \frac{r_1-r_0}{r_2-r_0}}; \quad b = a \cdot \ln \frac{r_1-r_0}{r_0}; \quad x = \ln \frac{1/P(r_1)^{-1}}{1/P(r_0)^{-1}}; \quad y = \ln \frac{1/P(r_2)^{-1}}{1/P(r_0)^{-1}}; \quad c = a \cdot \ln \frac{x}{y};$$

$$u = |x|^{1-b} \cdot |y|^b$$

Pour la fraction grossière (soit X% de $r > 25\text{mm}$) une approximation par une courbe de Fuller a été utilisée.

$$P(r > 25\text{mm}) = X\% \cdot \sqrt{\frac{r}{r_3}} \quad (2)$$

Cette méthode aboutit à la proposition de courbes synthétiques données sur la Figure 1a, connaissant les passants à 2 mm, 80 et 2 μm .

La détermination de la relation distribution granulométrique avec la teneur en eau caractéristique pour les sols est réalisée par le modèle empirique simple développé par Arya et Paris (1981). La Figure 1b donne les courbes de succion des textures recrées précédemment. La succion est déduite des forces capillaires régnant dans la structure granulaire.

$$\psi_i = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{\rho_w \cdot g \cdot r_{pi}} \quad (3)$$

Avec

γ : la tension de surface de l'eau ;

θ : l'angle de contact ;

ρ_w : la densité de l'eau ;

g : l'accélération de la pesanteur

et le rayon des pores obtenu par :

$$r_{pi} = R_i \cdot \left(\frac{4 \cdot e \cdot n_i^{1-\alpha}}{6} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Où e est l'indice des vides, R_i le rayon moyen des particules dans la $i^{\text{ème}}$ classe granulométrique comportant n_i particules et α un paramètre calé par Arya et Paris (1981) à 0,38.

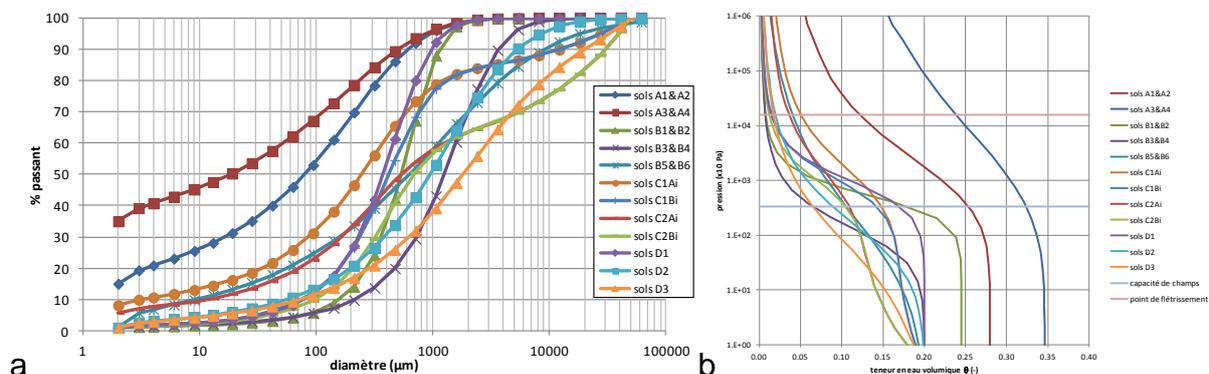


Figure 1 Courbes granulométriques et courbes de succion des classes GTR

Il devient ainsi possible connaissant la classification GTR d'un matériau d'estimer les plages de teneurs en eau correspondant aux états sec, humide ou saturé.

2.1. États limites de l'humidité du sol

La revue de la littérature agronomique révèle que deux valeurs seuils importantes de l'humidité du sol sont utilisées par les pédologues. Ces valeurs peuvent être utilisées comme des indicateurs approximatifs des limites de la plage de non saturation des sols. L'état humide est estimé en utilisant la capacité au champ, alors que l'état sec est estimé en utilisant le point de flétrissement.

On peut s'interroger sur l'opportunité de préférer la limite de retrait qui semble plus facile à mesurer (dans le cadre d'un marché de construction). Toutefois, cette limite de retrait pourrait être assimilée à un « état limite de rupture » et le point de flétrissement à un « état limite de service ». En effet, à la limite de rupture, le sol a fissuré et s'est séparé du câble ou de la fondation de manière partiellement irréversible. Ces états sont figurés sur la Figure 1b.

3. Estimations de la conductivité ou résistivité thermiques par corrélation

Nous avons regroupé dans ce paragraphe les modèles les plus simples et les plus utilisés dans la pratique pour l'estimation des propriétés thermiques. Il s'agit des méthodes analytiques de Kersten, de Vries et Johansen.

3.1. Modèle de Kersten

La conductivité thermique des sols a été testée de façon systématique par Kersten (1949), qui a fourni des formules empiriques pour deux sols types (cas non gelé) : argile et limon (5) et sable (6) en fonction de la teneur en eau w et de la densité sèche ρ_d .

$$k_{tu} = 0,1442 \cdot (0,9 \cdot \log w - 0,2) \cdot 10^{0,6243 \cdot \rho_d} \quad (5)$$

$$k_{tu} = 0,1442 \cdot (0,7 \cdot \log w + 0,4) \cdot 10^{0,6243 \cdot \rho_d} \quad (6)$$

Les résultats de Kersten servent encore de base aux applications de la thermique aux sols dans la plupart des pays. Ils sont représentés graphiquement sur la Figure 2.

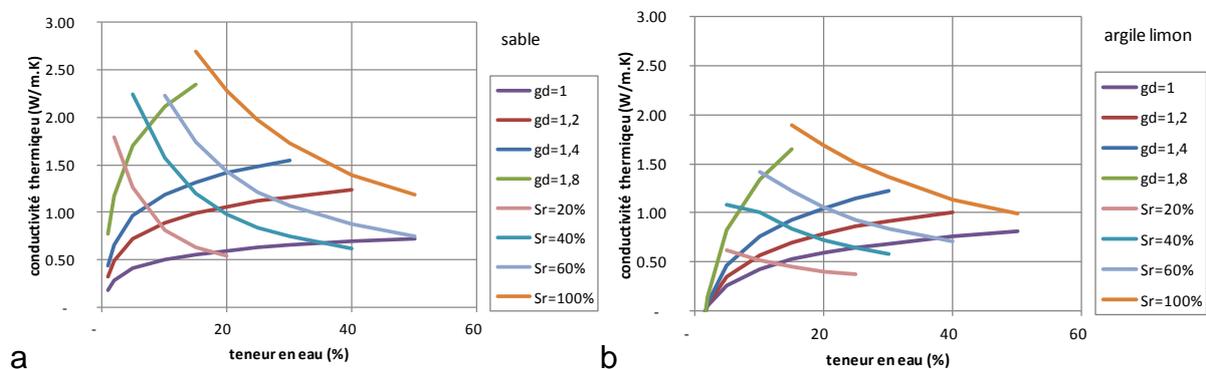


Figure 2 Conductivité thermique de sols : (a) sable, (b) argiles et limons

3.2. Modèle de de Vries

Le modèle de de Vries (1961) est basé sur une application de la théorie des potentiels. Il considère que le sol est un milieu continu d'eau (pour les sols saturés) ou d'air (pour les sols secs) dans lequel des particules de sol sont dispersées. La conductivité thermique est une moyenne pondérée de la conductivité des différents composants (7).

$$k_t = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot F_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (7)$$

avec

$$F_i = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n \left[1 + \left(\frac{k_i}{k_0} - 1 \right) \cdot g_i \right]^{-1} \quad (8)$$

où :

- g_i représente à l'origine un facteur de forme pour les composantes considérés comme des ellipsoïdes, mais il est en fait un paramètre de calage empirique ($\sum_{i=1}^n g_i = 1$) ;
- x_i est la fraction volumique de chaque composante ;
- k_i est la conductivité thermique de chaque composante (Tableau 1).

Tableau 1 — Valeur et expression des paramètres de la méthode de Vries

paramètre	matériau	unité	Expression/valeur
k_q	Quartz	W/m.K	9,103-0,028.T soit 7,7 à 20°C
k_m	Autres minéraux		2,93
k_o	Matière organique		0,251
k_w	Eau		$0,552+2,34 \cdot 10^{-3} \cdot T^{-1} - 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
k_a	Air		0,0237+0,000064.T
k_{app}	Air humide		$k_{app} = k_a + h \cdot k_v$ *

* k_v conductivité thermique de la vapeur d'eau.

Cette méthode donne des valeurs minorées pour les sols secs et celles-ci doivent selon l'auteur être augmentées de 25%.

3.3. Modèle de Johansen

Le modèle proposé par Johansen (1975) met en relation deux variables K_s et S_r . K_s est une conductivité thermique normalisée s'exprimant en fonction des conductivités thermiques à l'état sec k_{dry} , humide k_{sat} et à un degré de saturation S_r donné, k.

$$K_s = \frac{k - k_{dry}}{k_{sat} - k_{dry}} \quad (9)$$

La relation proposée avec S_r est la suivante

$$K_s = 1 + a \cdot \log S_r \quad (10)$$

Avec $a=0,7$ et 1 pour les sols grossiers et fins respectivement.

On rappelle que S_r s'exprime en fonction de la teneur en eau massique w par (11).

$$S_r = \frac{\rho_d \cdot w}{\rho_w \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right)} \quad (11)$$

Les conductivités thermiques à l'état sec ou saturé sont déterminées par les relations (12) et (14).

$$k_{dry} = k_a \cdot \frac{\rho_s + \rho_d \cdot [\lambda_s \cdot (k_s/k_a) - 1]}{\rho_s + \rho_d \cdot (\lambda_s - 1)} \quad (12)$$

Soit avec $k_s=3$ et $k_a = 0,024$ W/m.K et $\rho_s = 2700$ kg/m³ et $\lambda_s=0,053$ (paramètre de forme) :

$$k_{dry} = \frac{0,135 \cdot \rho_d + 64,8}{2700 - 0,947 \cdot \rho_d} \quad (13)$$

et

$$k_{sat} = k_w^n \cdot k_s^{1-n} \quad (14)$$

3.4. Modèle de Johansen modifié par Tarnawsky

Le modèle de Johansen possède deux défauts selon Tarnawsky et al. (2000 ; 2009). Le premier est l'absence de prise en compte du pourcentage de quartz dans le sol qui est identifié à la masse de sable. Le second est que K_s prend des valeurs négatives. La conductivité thermique du squelette du sol peut être considérée en fonction de la quantité de quartz dans celui-ci (15).

$$k_s = k_q^{\%q} \cdot k_m^{1-\%q} \quad (15)$$

En prenant les valeurs données dans le Tableau 1.

$$k_s = 7,7^{\%q} \cdot 2,93^{1-\%q} \quad (16)$$

K_s devenant négatif pour les faibles teneurs en eau (sols grossiers : $S_r=0,038$; sols fins $S_r=0,1$ pour les valeurs de a données précédemment), Tarnawsky et al. (2000) ont étudié trois adaptations :

- Interpoler linéairement entre la valeur de conductivité à l'état sec et la teneur en eau critique,
- Garder une valeur constante de la conductivité entre l'état sec et la teneur en eau critique puis une variation linéaire jusqu'au point de flétrissement,
- Prendre la valeur de l'état sec.

En 2009, Tarnawski et al. proposent de prendre K_s nul pour résoudre cette difficulté. Cote et Konrad (2005) ont proposé une expression alternative (17).

$$K_s = \frac{\kappa \cdot S_r}{1 + (\kappa - 1) \cdot S_r} \quad (17)$$

Avec $\kappa = 4,60$ pour les sables grossiers avec gravier et $\kappa = 3,55$ pour les sables grossier et $\kappa = 1,90$ pour les sols fins.

3.5. Synthèse

Pour utiliser ces méthodes et classer les sols (NF P94-011 et NF P11-300), il est nécessaire de connaître :

- les pourcentages des matériaux constitutifs : sable, limon et argile des matériaux (NF P94-040, 41, 56 et 57),
- le poids volumique des grains et humide (NF P94-053 et 54),
- la teneur en eau et les limites d'Atterberg (NF P94-050, 51, 52),
- la teneur en silice en matière organique et carbonate (NF P94-48, 55 et essais DRX).

4. Validation de la méthode

Afin de valider la méthodologie que nous proposons, nous allons comparer les estimations de courbes de rétention et de conductivité thermique en fonction de la teneur en eau volumique déduite des classes et de l'état de densité des sols.

Nous avons choisi comme exemples le calcaire concassé utilisé par Abdel-Hadi et Mitchell (1981) et les sols testés par MacInnes (1981). Nous disposons pour ces cas de référence des répartitions entre classes de sol, des courbes de rétention ainsi que des caractéristiques thermiques.

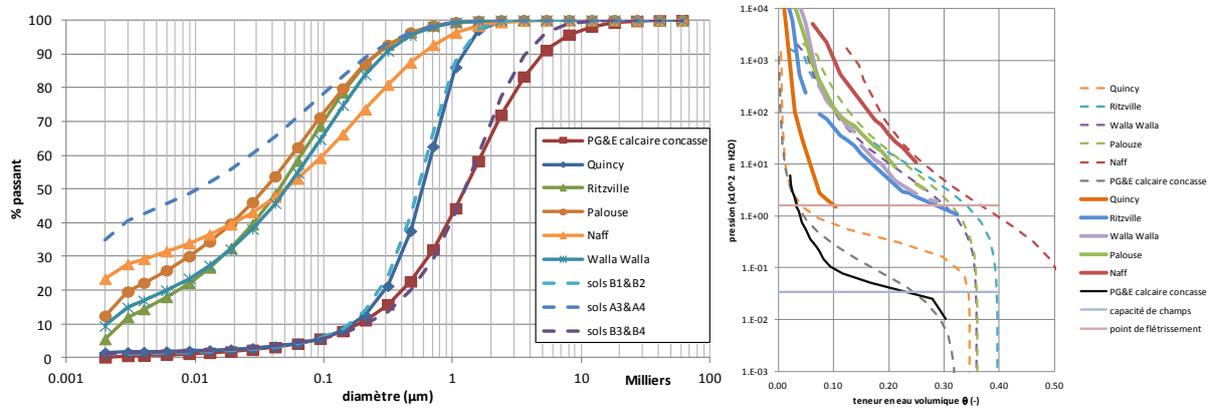


Figure 3 Courbe granulométrique reconstituée par classe GTR et comparaison entre courbe de rétention recréée et courbes mesurées

Ces sols sont assez proches de certaines classes de la GTR (AFNOR, 1992). Les sols Quincy, Ritzville, Palouse et Naff sont des sols de classe A3&A4 alors que le sol Walla Walla est un B1 ou B2 et le calcaire concassé PG&E est un B3&B4 (Figure 3). Cette comparaison met en évidence la bonne capacité de prédiction de la courbe de rétention d'eau avec un nombre très restreint d'information (Figure 3). La prédiction de ces courbes est sensible au rapport entre le passant à 80 et 2µm analogue au

coefficient d'uniformité. Si ce rapport est trop faible la courbure obtenue peut influencer sur la prédiction de la courbe de rétention dans la zone des fortes succions.

Toutefois, la possibilité d'utiliser des limites d'humidité de laboratoire standards (teneur en eau à -0,1 ; -0,3 et -15 bar) pour approcher les limites de la teneur en eau ambiante du sol n'est pas complètement validée (cf. §2.1).

Nous avons ensuite fait une estimation de la conductivité thermique en fonction de la classe et de la teneur en eau à l'aide des trois modèles simples décrits au paragraphe 3 (Figure 4). La teneur en silice a été prise en compte pour déterminer la conductivité de la fraction solide. Quand elle n'était pas disponible, elle a été évaluée empiriquement.

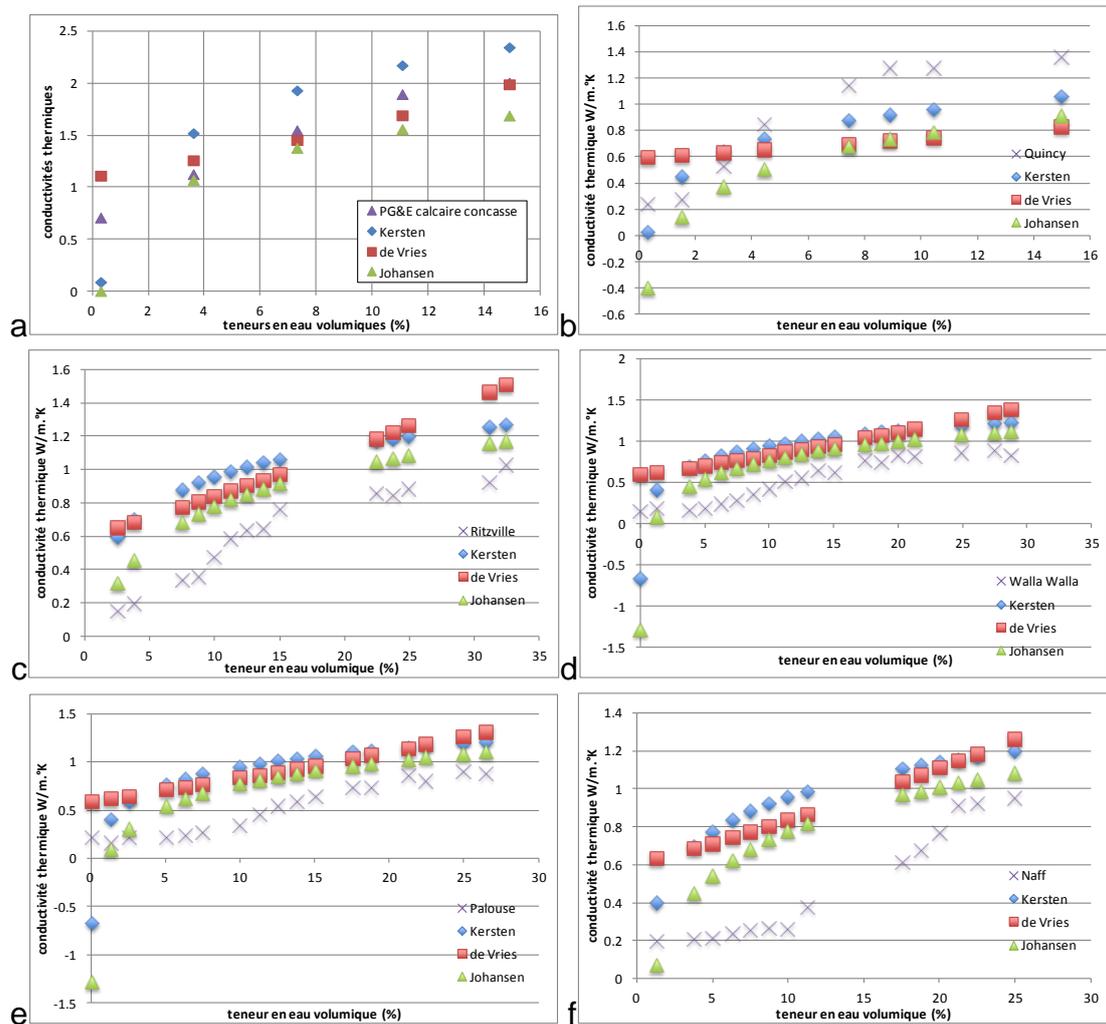


Figure 4 Comparaison entre conductivités thermiques mesurées et estimées par les modèles sur quelques exemples

En première approche le modèle de de Vries semble être plus fidèle que ceux de Johansen et Kersten (Figure 4). La difficulté pour ces modèles est la prédiction de la conductivité pour les teneurs en eau les plus faibles.

La comparaison dans un plan conductivité thermique mesurée et calculée permet de voir l'écart entre la prédiction et la valeur mesurée. Cette comparaison a été faite de manière systématique pour les 500 données expérimentales collectées (Figure 5).

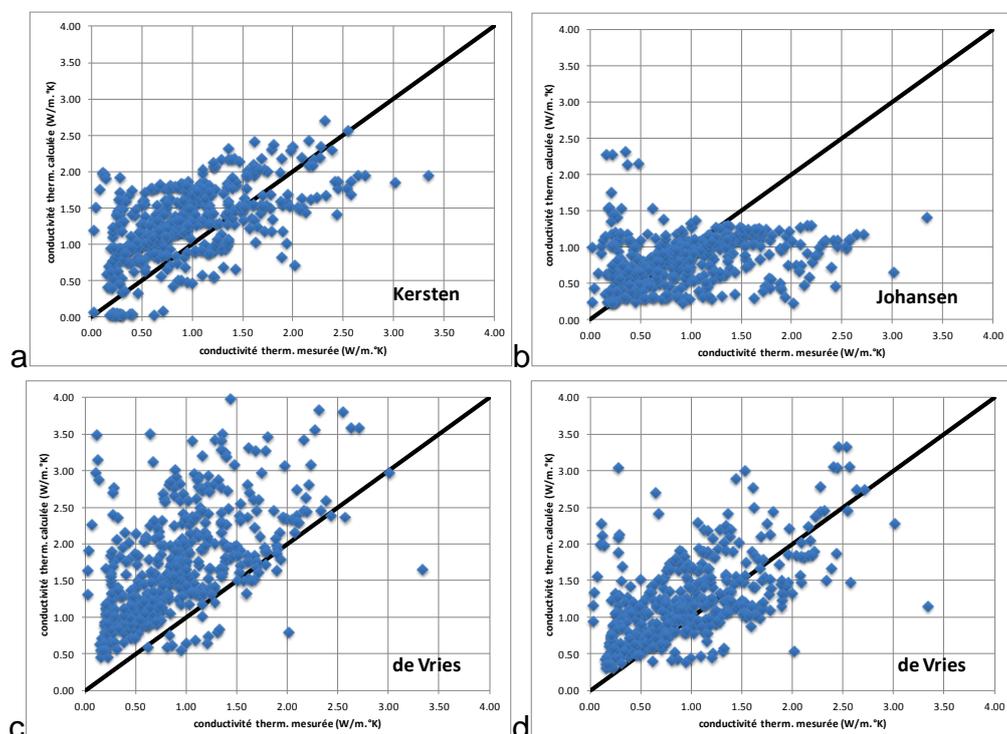


Figure 5 Précision des estimations des conductivités thermiques sur le panel complet

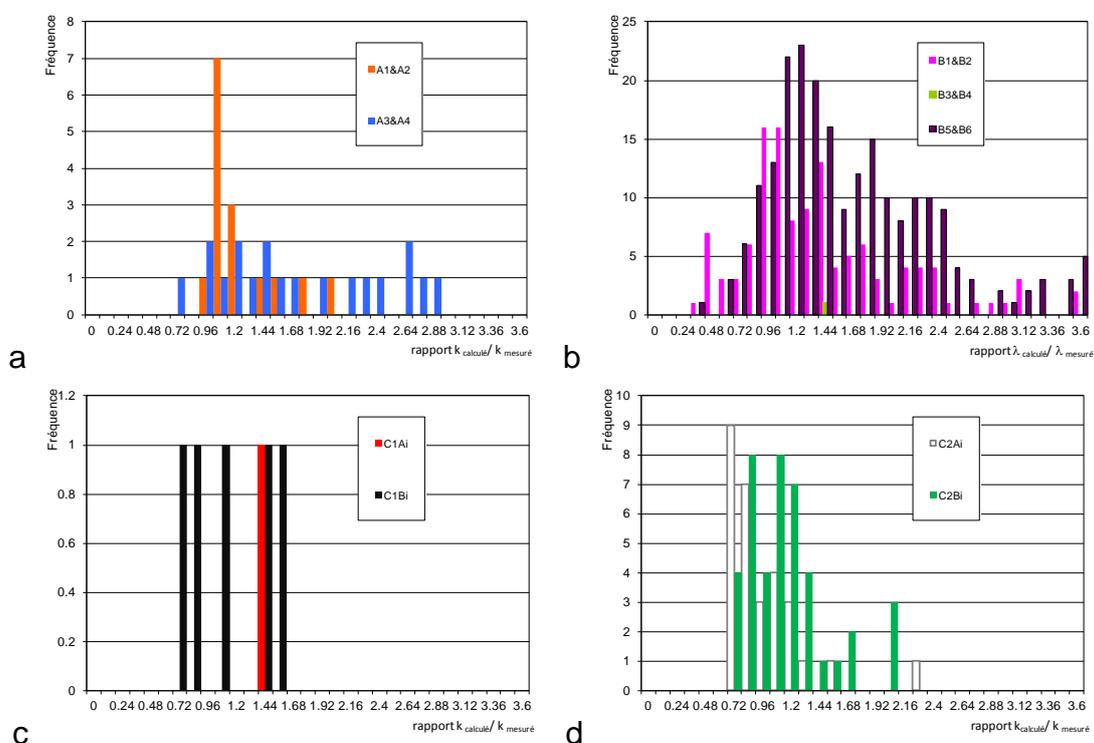


Figure 6 Histogrammes des rapports de conductivité calculée sur mesurée par classe

Les nuages se positionnent au-dessus de celle-ci, signe d'une surévaluation. On observe que le modèle de de Vries (Figure 5c et d) est influencé par la valeur de la conductivité thermique de la composante sol. Pour la Figure 5c nous avons utilisé les valeurs du Tableau 1 et, sur la Figure 5d, ces valeurs adaptées aux sols de laboratoire ont été diminuées à $k_a=5$ et $k_m=1,85$; le calcaire ayant une conductivité plus proche de 1 que de 2,93 W/m.°K et la kaolinite aux environs de 0,34. Le nuage de points s'aligne mieux sur la relation identité pour les méthodes de de Vries et de Johansen.

En première approche, nous choisissons de conserver le modèle de de Vries pour la suite de cette étude. Une analyse plus fine par classe montre que le rapport est surévalué par la méthode de de Vries (Figure 6) et ce quelle que soit la classe. Les histogrammes présentent un seul pic généralement positionné sur une valeur supérieure à l'unité.

La Figure 7 rassemble les courbes de répartition de ces jeux de données. On peut légitimement attribuer une répartition gaussienne aux différentes courbes.

La corrélation est bonne pour les classes A1&A2, C1Bi et C2Bi ; toutefois une surévaluation systématique de 20 à 50 % est observée pour les classes B1&B2, C2Ai, B5&B6 et A3&A4.

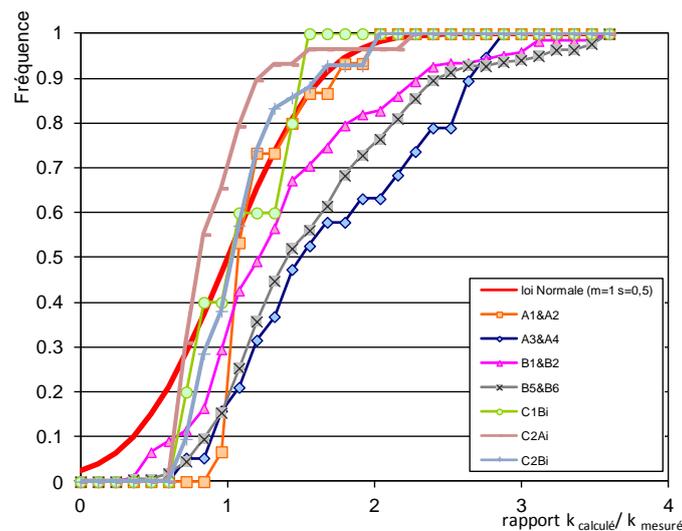


Figure 7 Courbes de répartition des rapports de conductivité calculée sur mesurée

5. Synthèse

Une compilation des données de résistivité thermique du sol a été faite et les tendances générales données. Des modèles relativement simples sont disponibles, calés par leurs auteurs sur des sols modèles. Une méthode simple de prédiction de la conductivité thermique a été proposée et validée sur quelques cas. La validation de cette méthode sur une base de données de 500 valeurs a permis d'évaluer la sensibilité d'une telle méthode. Le niveau de précision est suffisant dans un premier

temps pour informer ceux qui participent à la pose de câbles souterrains sur le comportement thermique des matériaux géologiques.

L'application de cette méthode à des sols intermédiaires dans le cadre de projets réels nécessitera une validation sur des jeux de données complémentaires aptes à représenter ces classes et un nouveau calage.

Remerciements

Les auteurs remercient RTE pour le financement de cette étude.

Références bibliographiques

- Abdel-Hadi, O. N., Mitchell, J. K., (1981). Coupled Heat and Water Flows Around Buried Cables, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, No. 11, pp. 1461-1487.
- AFNOR (1992). NF P 11-300, Exécution des terrassements — Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, 25 pages.
- AFNOR (2007). NF P 94-150-1, Reconnaissance et essais géotechniques — Méthodes de prélèvement par forage ou excavation et mesurages piézométriques, Partie 1 : Principes techniques des travaux, 132 pages.
- Arya, LM, Paris, JF (1981). A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data. *Soil Sci Soc Am J.* 45: 1023-1030.
- Cote, J. & Konrad, J. M. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Can. Geotech. J.* 42, No. 2, 443–458.
- De Vries, D. A. (1961). Thermal Properties of Soils. In *Physics of Plant Environment*. W.R. Van Wijt. ed. Amsterdam: North-Holland Publishing Co.
- Johansen, O. (1975). Thermal conductivity of soils. PhD thesis. University of Trondheim, Norway (CRREL Draft Translation 637, July 1977, ADA 044002).
- Kersten. M. S. (1949). Thermal Properties of Soils." Bulletin #28. St. Paul: University of Minnesota Engineering Experiment Station.
- McInnes, K. (1981). Thermal conductivities of soils from dry land wheat regions in Easter Washington. MSc thesis. Washington State University. USA.
- Skaggs, T. H., Arya, L. M., Shouse, P. J., and Mohanty, B. P. (2001). Estimating Particle-Size Distribution from Limited Soil Texture Data. *Soil Sci Soc Am J.* 65:1038–1044.
- Tarnawski, V. R., Leong, W. H. (2000). Thermal Conductivity of Soils at Very Low Moisture Content and Moderate Temperatures. *Transport in Porous Media*. Kluwer Academic Publishers. 41: 137–147.
- Tarnawski, V. R., Momose, T. & Leong, W. H. (2009). Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil thermal Conductivity *Géotechnique* 59, No. 4, 331–338.