

## VARIABILITE SPATIALE DE LA TENEUR EN EAU DE SURFACE DES SOLS NUS PAR MESURES IN SITU ET IMAGERIE RADAR

BRAUD Isabelle <sup>(1)</sup>, GONZALEZ-SOSA Enrique <sup>(1,2)</sup>,  
MASTACHI-LOZA Carlos <sup>(1,2)</sup>, AUBERT Maëlle <sup>(3)</sup>, LEBLOIS Etienne <sup>(1)</sup>,  
JANKOWSKY Sonja <sup>(1)</sup>, BAGHDADI Nicolas <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Cemagref, UR HHLY, CP 220, 69336 Lyon Cédex 9, France,  
[isabelle.braud@cemagref.fr](mailto:isabelle.braud@cemagref.fr)

<sup>(2)</sup> DEFI-CIAQ, Université de Querétaro, CU Cerro de las Campanas. S/N.  
Centro. 6900 Queretaro, Qro., Mexique

<sup>(3)</sup> Cemagref, UMR TETIS, Maison de la Télédétection, 500 Rue Jean-François  
Breton, 34093 Montpellier, Cédex 5, France

### RÉSUMÉ

*On présente l'analyse géostatistique de la teneur en eau de surface (0-6 cm de profondeur) collectée les 12 et 13 Mars 2009, sur une quinzaine de parcelles de sol nu d'un petit bassin péri-urbain proche de Lyon. Les mesures in situ, ont été collectées à deux échelles : une échelle locale sur des croix de longueur 20m et un pas d'espace de 1m et une échelle parcellaire sur 3 transects avec un pas de 20m environ. Les résultats montrent une corrélation de quelques m à échelle fine et de 20 à 50m à l'échelle de la parcelle. Après correction du bruit, calibration radiométrique et correction des effets géométriques et de pente, la comparaison des moyennes par parcelles issues de l'image radar TerraSAR-X et des mesures in situ est satisfaisante ( $R^2=0.43$ ) mais l'analyse intra-parcellaire reste à affiner.*

**Mots clés :** Radar, TerraSAR-X, Humidité, Variabilité spatiale, Géostatistique.

### ABSTRACT

#### **SPATIAL VARIABILITY OF SURFACE SOIL WATER CONTENT OF BARE SOIL FIELDS USING IN SITU DATA AND RADAR IMAGES**

*This paper presents the geostatistical analysis of surface soil water content (0-6 cm depth), collected on March 12-13 2009, in about 15 bare soil fields located in a small suburban catchment close to Lyon. In situ data were sampled at two scales : a local scale on 20m-long crosses with a space step of about 1m; a field scale, with 3 transects and a space scale of about 20m. The results show a correlation of a few meters at the local scale and of about 20-50m at the field scale. After correction of the noise, radiometric calibration, geometric and slope effect correction, the comparison of the field averages derived from the TerraSAR-X image and of in situ data is satisfactory ( $R^2=0.43$ ), but the intra-field variability should be studied in more details.*

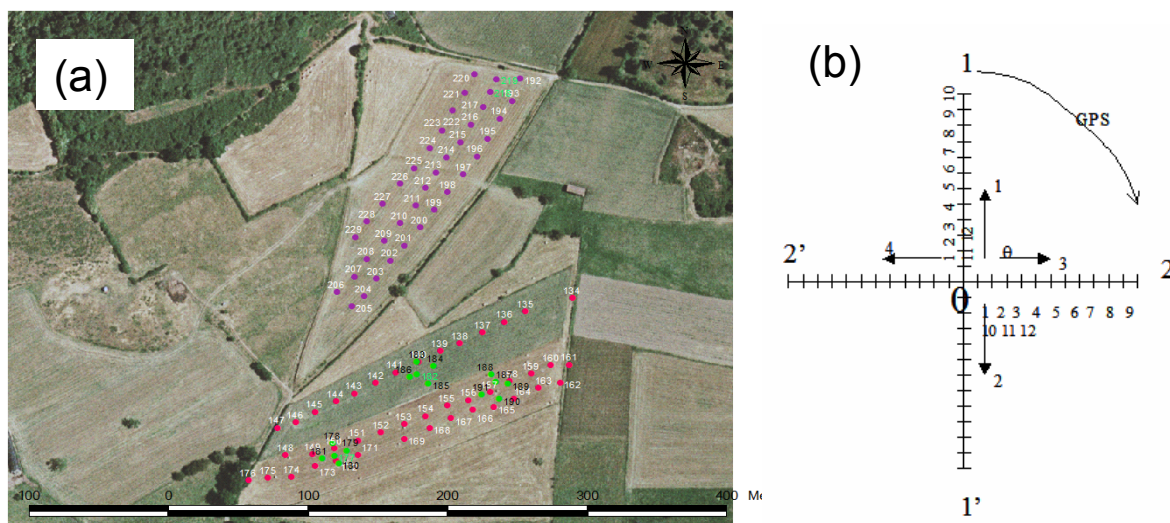
**Keywords:** Radar, TerraSAR-X, Soil water content, Spatial variability, Geostatistics.

## 1. INTRODUCTION

La teneur en eau superficielle des sols contrôle en partie l'infiltration dans les sols et est simulée par de nombreux modèles hydrologiques. La très haute résolution des nouveaux capteurs radar SAR (Synthetic Aperture Radar) permet d'accéder à différents paramètres physiques des sols (humidité et rugosité), utiles pour les modèles hydrologiques spatialisés. La haute périodicité de ces nouveaux satellites permet d'acquérir de nombreuses données spatialisées. L'exploitation de ces images radar est encore délicate sur des zones à relief marqué. L'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel de l'imagerie radar TerraSAR-X (longueur d'onde  $\sim 3$  cm) d'une résolution de 1m (HH,  $23^\circ$ ) sur ce type de terrain. L'image analysée a été acquise le 12 Mars 2009 sur le bassin versant de l'Yzeron ( $150 \text{ km}^2$ ), dans les Monts du Lyonnais où la partie amont présente de fortes pentes. Pour l'évaluation des données issues du radar, des mesures de teneur en eau superficielle d'une quinzaine de parcelles de sol nu ont été acquises en parallèle. La géostatistique a permis de documenter les échelles caractéristiques de la teneur en eau de surface du sol *in situ*. On présente ces résultats et la comparaison entre données *in situ* et données radar.

## 2. MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Protocole d'échantillonnage pour les mesures au sol



**Fig. 1** – (a) Illustration de l'échantillonnage sur les parcelles (transects) et (b) des croix. – (a) Illustration of the field sampling (transects) and (b) of the crosses.

La campagne de mesure *in situ* a eu lieu les 12 et 13 Mars 2009 sur les sous-bassins du Mercier et du Ratier. Une quinzaine de parcelles de sol nu ont été sélectionnées pour comparaison aux données radar, ce dernier ne fournissant une information exploitable que pour du sol nu. Les mesures ont été réalisées à l'aide de sondes capacitatives (ThetaProbe – DeltaT Device) mesurant la teneur en eau volumique superficielle sur une profondeur 0-6cm. Un étalonnage a été réalisé par prélèvement d'échantillons selon la méthode recommandée par le constructeur. La courbe d'étalonnage obtenue

est proche de la courbe constructeur pour les sols minéraux (différence 5%). Pour documenter la variabilité spatiale, on a utilisé, deux protocoles de mesures. Le premier couvre l'ensemble des parcelles avec 3 transects échantillonnés à pas de 20m. Le second, effectué sur quatre parcelles, utilise un échantillonnage plus fin en trois zones de la parcelle. Les mesures sont effectuées, avec un pas d'un mètre, suivant une croix dont chaque branche couvre une longueur de 20m (**figure 1**). Une comparaison spatialisée entre données radar et mesures *in situ* d'humidité est possible grâce à la géo-localisation des mesures *in situ* par GPS (précision de 1 m selon l'horizontale).

## 2.2 Analyse géostatistique des données au sol

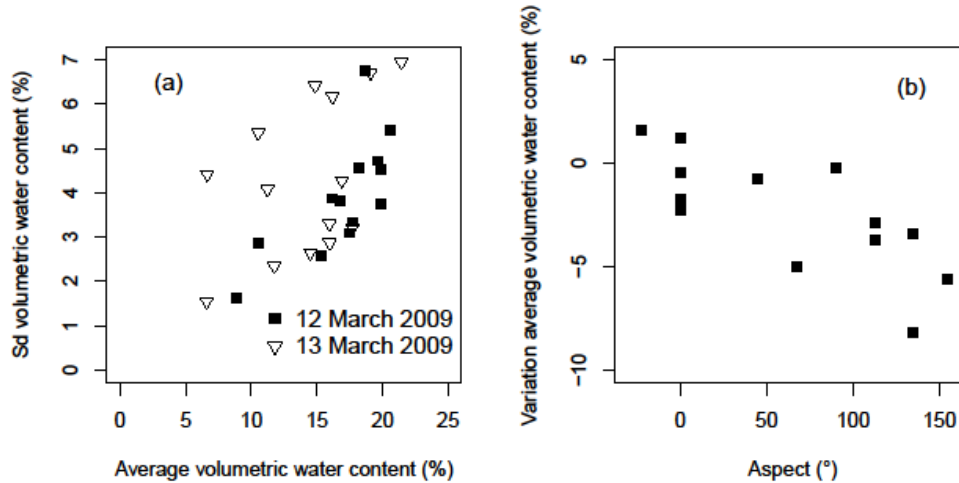
Les données ont été analysées en s'appuyant sur le package *stats* du logiciel R pour les statistiques classiques et le package *gstat* (PEBESMA, WESSELING, 1998) pour les analyses géostatistiques : calcul du variogramme expérimental, ajustement d'un modèle de variogramme, production d'une carte d'humidité des sols par krigeage. Certains choix automatiques sur ces calculs ont été adaptés à nos besoins (BRAUD, 2009). Les calculs de variogrammes ont été réalisés pour chaque date en s'appuyant sur i) les données acquises sur les croix pour chaque parcelle en distinguant éventuellement les deux directions de la croix ; ii) les données acquises pour chaque parcelle selon les transects avec une analyse parcelle par parcelle et éventuellement une analyse variographique directionnelle (parallèle et perpendiculaire à la direction principale des lignes ; iii) l'ensemble des données acquises sur une même parcelle (en mélangeant données des transects et des croix). Nous avons ensuite réalisé un krigeage ordinaire des différentes parcelles pour les deux dates par krigeage de bloc sur une grille régulière de 5 m de côté. Ceci permet de comparer avec des valeurs satellitales obtenues sur des pixels. Le krigeage de bloc fournit, pour chaque parcelle, une carte de la teneur en eau de surface et une carte de l'écart type d'estimation.

## 2.3 Traitements réalisés sur l'image radar

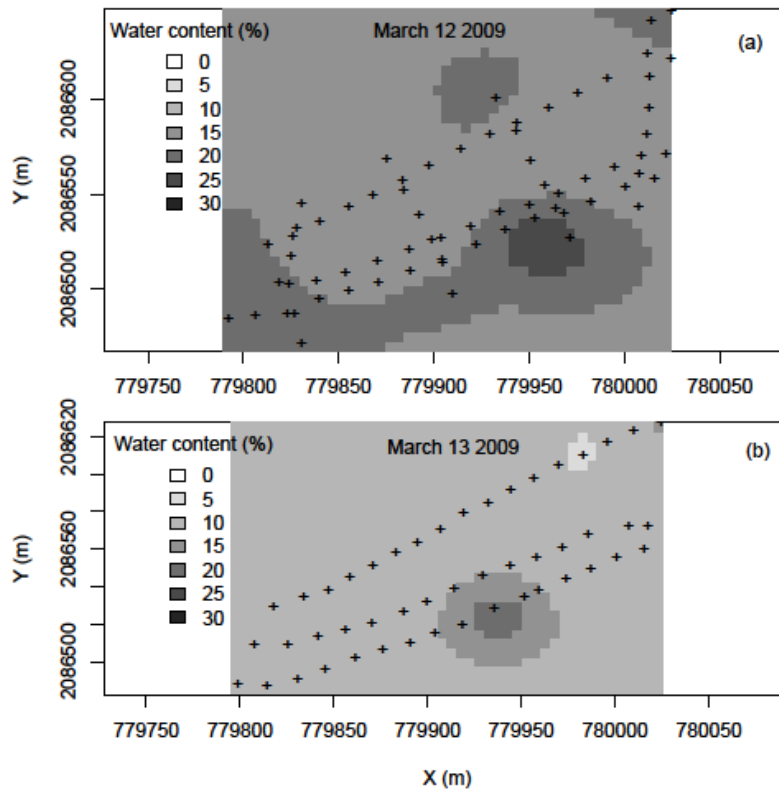
Le taux d'humidité induit des changements des propriétés électriques du sol. La réflexion sur la cible des hyperfréquences émises par le radar est alors modifiée. En général, le signal augmente avec le taux d'humidité, et à partir d'un certain seuil, correspondant à la saturation en eau du sol, le signal stagne avant de commencer à décroître. Une relation entre le signal radar et la teneur en eau volumique du sol peut donc être établie. Une image TerraSAR-X (longueur d'onde ~ 3 cm) d'une résolution de 1m (HH, 23°) a été acquise le 12 Mars 2009 sur le bassin versant de l'Yzeron. Les traitements suivants ont été réalisés: correction du bruit du capteur, calibration radiométrique et correction des effets géométriques et de pente à l'aide d'un MNT lidar à 2m. A partir de cette image radar calibrée, une relation linéaire établie à partir de données acquises entre 2008 et 2009 sur 5 bassins versants (répartis dans toute la France) a permis d'effectuer des estimations de teneur en eau. Cette relation est :  $\sigma^{\circ} = 0.43 mv - 16.12$  (avec :  $\sigma^{\circ}$  : signal radar (dB) ;  $mv$  l'humidité volumique (%)). Grâce à cette relation, il suffit ensuite de calculer le signal radar moyen sur une parcelle ou une sous parcelle donnée pour obtenir une estimation de la valeur moyenne de la teneur en eau volumique.

### 3. RESULTATS

#### 3.1 Résultats de l'analyse statistique et géostatistique



**Fig. 2** – (a) Ecart-type par parcelle en fonction de la moyenne pour les deux dates (b) Variation de teneur en eau entre les deux dates en fonction de l'aspect.  $0^\circ$  correspond au Nord et  $180^\circ$  au Sud. – (a) *Field standard deviation as function of field average for the two dates* (b) *Variation of average water content between the two days and aspect.  $0^\circ$  is the North and  $180^\circ$  is the South.*

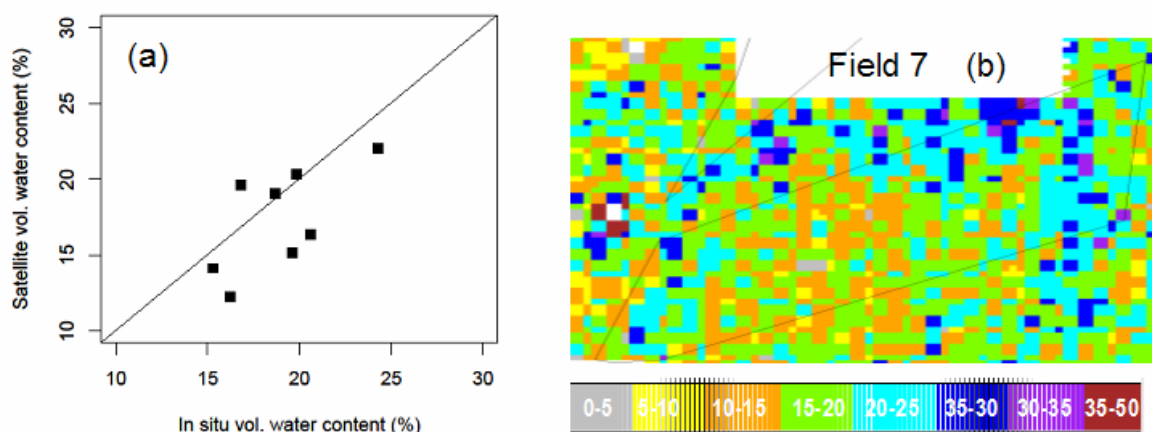


**Fig. 3** – Carte krigée de teneur en eau de la parcelle 7 (a) le 12 Mars, (b) le 13 Mars. – *Kriged map of soil water content for field 7 on (a) March 12 (b) March 13.*

La teneur en eau moyenne le 12 Mars est de  $18 \pm 5.7\%$  et de  $14.4 \pm 6.1\%$  le 13 Mars. On note une relation linéaire entre moyenne et écart-type par parcelle, avec deux groupes de points qui se dégagent le deuxième jour (**figure 2a**). On ne note pas de relation entre l'humidité moyenne et la pente, l'aspect ou l'altitude. En revanche, les variations de teneur en eau entre les deux dates sont bien corrélées avec l'aspect (**figure 2b**), ce qui traduit que les parcelles les plus au sud s'assèchent plus rapidement, comme on pouvait s'y attendre.

Les variogrammes sur les croix montrent une corrélation spatiale de 1 à 2.5 m, ce qui est très faible. A l'échelle des parcelles, la longueur de corrélation varie de 15 à 50 m, avec une valeur moyenne de  $35 \pm 15$  m le 12 Mars, et  $23 \pm 10$  m le 13 Mars. On note des différences selon les directions (parallèle ou perpendiculaire aux transects), qu'on peut relier à l'effet du labour. En général, la portée diminue le deuxième jour. Si on mélange les deux échelles d'échantillonnage (parcelles + croix), on note un effet de pépite de 10 à 30% de la valeur du pallier et une corrélation plus grande que pour l'analyse des parcelles seules. La (**figure 3**) illustre la cartographie de la teneur en eau pour la parcelle 7 pour les deux dates. On note l'assèchement marqué de cette parcelle orientée S-SE.

### 3.2 Comparaison image radar / données in situ



**Fig. 4** – (a) Teneur en eau moyenne issue du radar en fonction de la valeur moyenne tirée des données in situ. (b) Carte radar de la teneur en eau de la parcelle 7 calculée sur une grille  $5 \times 5 \text{ m}^2$ . – (a) Radar averaged field soil water content as a function of in situ average (b) Map of radar soil water content for Field 7 calculated on a  $5 \times 5 \text{ m}^2$  grid.

La comparaison des moyennes par parcelle obtenues par mesures *in situ* et radar apparaît (**figure 4a**). A l'échelle parcellaire, l'erreur moyenne est de 1.6 % de teneur en eau et la corrélation de  $R^2=0.43$ , ce qui est acceptable et tout à fait encourageant. Des estimations de teneur en eau intraparcellaire sur des mailles de  $5 \times 5 \text{ m}^2$  ont aussi été effectuées. La (**figure 4b**) présente la cartographie issue de l'image radar pour la parcelle 7 présentée (**figure 3a**). On note l'effet « poivre et sel » de la cartographie ainsi obtenue. Cet effet, est sans doute lié à la fine taille du maillage. En effet, à cette échelle l'effet de chatoiement est important. Un lissage de cette carte, ou des

estimations sur un maillage plus grand, pourraient permettre de distinguer des variations intraparcellaires et se rapprocher des cartes krigées des données *in situ*.

#### 4. CONCLUSIONS

L'étude géostatistique de la teneur en eau volumique superficielle présentée suggère l'existence de plusieurs échelles caractéristiques emboîtées. Une première échelle rend compte d'une corrélation spatiale à très courte distance (quelques m). La seconde montre l'existence d'une certaine organisation à l'échelle de toute la parcelle dont la longueur de corrélation caractéristique est de l'ordre de 20 à 40 m. Un échantillonnage plus fin à l'échelle des parcelles (de l'ordre de 5 à 10 m) aurait permis une meilleure continuité entre les deux échelles étudiées (échelle locale et échelle de la parcelle). Lorsqu'on examine l'ensemble des parcelles échantillonnées sur le bassin versant, on voit apparaître une troisième échelle de variabilité plutôt reliée à l'exposition qui agit surtout sur la vitesse d'assèchement.

Ces résultats mériteraient d'être affinés avec l'étude d'autres journées et étendues à des parcelles cultivées ou en prairie. Les résultats sont intéressants pour l'hydrologue car ils permettent d'obtenir des résultats sur la répartition spatiale et la dynamique de l'assèchement des sols. Les résultats sont aussi intéressants pour le télédéacteur car la connaissance des longueurs de corrélation peut permettre d'affiner les méthodes d'échantillonnage pour la calibration/validation des algorithmes d'estimation de la teneur en eau des sols à partir d'images de télédétection. La comparaison des résultats obtenus à partir de l'image TerraSAR-X sont très encourageants avec une corrélation acceptable entre mesures *in situ* et image satellite à l'échelle de la parcelle, compte tenu des pentes importantes. Des contrastes de teneur en eau à l'échelle intra-parcellaire de l'ordre de 5% de teneur en eau, correspondent à des différences sur le signal radar de 2.2 dB, ce qui est dans les limites de précision du capteur. Il faudrait proposer une cartographie par zones plus grandes ou sur des mailles supérieures à 5m pour mieux valoriser et identifier le signal radar intra-parcellaire.

---

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**BRAUD I., 2009** – Analyse géostatistique des mesures de la teneur en eau collectées sur le sous-bassin du Mercier (bassin versant de l'Yzeron) lors de la campagne des 12-13 Mars 2009. *Rapport du projet ANR AVuPUR*, Cemagref, UR HHLV, Novembre 2009, 70 p.

**PEBESMA E.J., WESSELING C.G., 1998** – Gstat, a program for geostatistical modelling, prediction and simulation, *Computers and Geosciences*, 24(1), 17-31. see <http://www.gstat.org/index.html>

---

#### REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés pour partie par le projet AVuPUR soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via le contrat n° ANR-07-VULN-01.