

CARACTERISATION PAR APPROCHE GEOSTATISTIQUE DE LA VARIABILITE DES PROPRIETES DU SOL DE LA FERME AGROPASTORALE DE L'UNIVERSITE GASTON BERGER (UGB) DE SAINT-LOUIS, DANS LE BAS DELTA DU FLEUVE SENEGAL

1. Dr Mateugue **DIACK**, 2. Dr Macoumba **LOUM**, UFR de Sciences Agronomiques, d'Aquaculture et de Technologies Alimentaires. Université Gaston Berger de Saint-Louis, Sénégal, Email: mateugue.diack@ugb.edu.sn / macoumba.loum@yahoo.fr

Résumé

La nécessité d'exploiter les terres agricoles et les enjeux de durabilité qui y sont liés imposent une utilisation rationnelle des sols. La connaissance de la ressource pédologique devient de ce point de vue un impératif scientifique. L'objet de cette étude est de procéder à la caractérisation des sols à l'échelle du parcellaire par une approche géostatistique. Elle est appliquée à la ferme agricole de l'université Gaston Berger de Saint-Louis.

Le krigeage ordinaire est la méthode géostatistique mise en œuvre. Des analyses de laboratoire concernent les propriétés physique et chimique du sol. Les premiers résultats indiquent des niveaux assez satisfaisants de spatialisation du carbone organique et du pH aux horizons 0-10 cm et 10-20 cm. Les taux d'erreur moyens sont de l'ordre de 0,06 % et 0,5 % respectivement pour le carbone organique et le pH. La densité des points de prélèvement dans l'espace (une grille régulière de 30 m) a contribué à la bonne précision de la cartographie par krigeage des propriétés du sol.

Les résultats de l'étude montrent ainsi des sols généralement neutres avec des pH variant entre 6,7 et 7,7. Quelques parcelles abritant des sols basiques sont localisées dans la partie dépressionnaire de la zone d'étude. Les teneurs en carbone organique sont généralement faibles. Elles varient entre 0,17 et 0,40 % pour les horizons de surface et 0,12 et 0,27 % pour les horizons 10-20 cm. La conductivité électrique n'a pas été bien caractérisée par krigeage à cause d'une forte gamme de variabilité de la salinité dans les sols (0,09 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 4,91 mS/cm) et de l'absence d'une structure régulière dans l'espace. Ces résultats posent la nécessité de tester d'autres algorithmes statistiques pour une bonne caractérisation de la conductivité à l'échelle du parcellaire.

Mots clefs: caractérisation – géostatistique – krigeage - propriétés du sol

USING GEOSTATISTICAL APPROACH TO CHARACTERIZE VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES OF THE AGRICULTURAL FARM AT GASTON BERGER UNIVERSITY (GBU) IN THE LOWER DELTA OF THE SENEGAL RIVER

Abstract

With an increasing pressure on land tenure, there is a need for a better use of agricultural lands. This study relates a geostatistical approach to a characterization of soil physical and chemical properties at the plot scale, on the agricultural farm of Gaston Berger University, in Saint-Louis.

Ordinary Kriging method was used for soil sampling. Quantitative and qualitative methods were used for soil analyses. Results indicated that Soil Organic Carbon (SOC) as well as soil pH showed fairly good levels for their spatial distribution at 0-10 cm and 10-20 cm depths. The average error rates are approximately 0.5 % and 0.06 for the SOC and the soil pH respectively. Density of sampling points in the space (regular grid of 30 m) contributed to a high precision level of soil mapping by kriging.

The results of the study show neutral soils in general with pH ranging between 6.7 and 7.7. Some plots with basic soils are located in the lowland of the study area. SOC contents are generally low. Variations are between 0.17 and 0.40 % for the top soil horizon and 0.12 and 0.27 % for the 10-20 cm depth. The electrical conductivity (EC) has not been well characterized with the kriging method because not only of the high variability of salinity contents (0,09 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 4.91 mS/cm) but also the absence of a regular structure of the soil. Results underlined the need of using other statistical algorithms to test in the future for a better characterization of the EC at the plot scale.

Key words: characterization – geostatistics – kriging - soil properties

1. Introduction

Le sol est l'épiderme vivant et vital des continents de la terre, le support des activités humaines et le lieu de vie de nombreuses espèces végétale et animale (AFES, 2007). Il est certes renouvelable mais à des pas de temps très longs (échelle géologique). Il subit en plus des pressions et des dégradations (érosion, pollution, etc.). Au regard de ces fonctions et de ces enjeux, la gestion du sol devient nécessaire pour promouvoir des activités agricoles durables. La maîtrise des caractéristiques des sols est essentielle pour une orientation rationnelle de l'occupation et de l'utilisation des terres.

Face aux risques liés au changement climatique, il est urgent de renforcer les stratégies de gestion durable des sols surtout dans les agrosystèmes à écologie fragile. Sur le terrain, les propriétés du sol font souvent l'objet d'une caractérisation ponctuelle ou linéaire (sondages à la tarière ou description des profils pédologiques à partir des fosses). La caractérisation

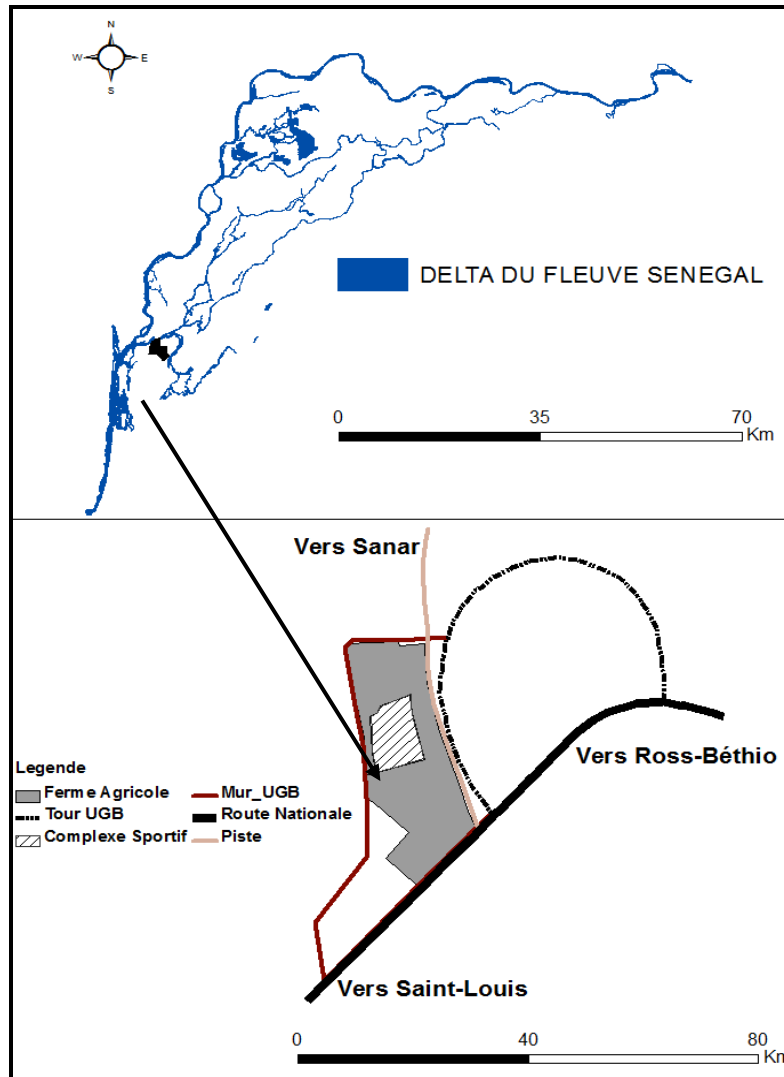
exhaustive qui peut être réalisée par des méthodes géostatistiques offre une vue synthétique de la variabilité des propriétés physicochimiques de la couverture pédologique. Elle peut ainsi orienter des choix judicieux d'aménagements et servir de référentiel pour élaborer des stratégies de gestion de la qualité des sols. La géostatistique, notamment le krigeage, est l'approche méthodologique mise en œuvre. Le carbone organique (Co), le potentiel hydrogène (pH) et la conductivité électrique (Ce) sont les propriétés ciblées.

Le carbone organique est un indicateur de fertilité reconnu des sols sahéliens (FELLER, 1995; DIACK, 1998; DIACK et al, 2000; NIANG, 2004; DIACK et al, 2010; LOUM 2014). Pour un climat donné (DABIN et MAIGNIEN, 1979), la richesse en carbone organique est souvent influencée par les autres facteurs intrinsèques du sol (texture, richesse en bases, structure). D'après les résultats des études agrotechniques conduites en milieu réel et des expérimentations réalisées en station, le carbone organique est apparu comme l'indicateur le plus sensible à l'évolution des sols de culture (PIERI, 1989). En outre, il est établi que le carbone organique issu des apports est essentiel pour le développement de la qualité du sol et les systèmes de production durable dans le Sahel (BATHIONO et al, 1993; SANCHEZ et al, 1997; BADIANE et al, 2000; AKINNIFISI et al, 2007; TITTONELL et al., 2008; DOSSA et al, 2012).

Le potentiel hydrogène (pH) renseigne sur le niveau d'acidité des sols. Le degré d'acidité ou de basicité du sol joue un rôle très important sur l'assimilabilité des éléments nutritifs de la plante. L'acidité des sols est influencée par un ensemble complexe de transformations chimiques, physiques et biologiques. L'acidification réduit considérablement la fertilité des sols, en affectant leur biologie, en décomposant les matières organiques et en provoquant la perte de substances nutritives (SENSI, 2002). De plus, l'acidification des sols est un facteur déterminant de la libération de cations tels que le fer, l'aluminium, le calcium, le magnésium ou les métaux lourds (qui sont présents dans le sol en quantités significatives, mais qui sont généralement très peu mobiles). Les effets secondaires sont la réduction du pouvoir tampon des sols (par la décomposition des minéraux argileux) et la modification de leur capacité à neutraliser l'acidité. Ce phénomène se produit notamment sur les sols dotés d'un faible pouvoir tampon qui peut aboutir à des états d'irréversibilité. Enfin, l'acidification des sols est étroitement liée à l'acidification de l'eau qui peut affecter la vie aquatique, les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau potable.

La conductivité électrique (CE) permet d'appréhender le processus de salinisation des terres (DIACK et al, 2014). Des études ont établi des relations entre la texture du sol et le niveau de salinité (BRESLER et al, 1982, FRIEDMAN, 2005). Des sols à texture fine abritent généralement des terres plus conductrices que celles contenant des fractions grossières. L'ion Sodium (Na^+) est le cation soluble prédominant dans beaucoup de sols arides et semi-arides (WANG et al, 2004). La spatialisation de ces propriétés par krigeage va ainsi contribuer à la mise en place d'outils d'aide à la décision pour une utilisation rationnelle de la couverture pédologique à des fins de développement et expérimentale de la ferme agropastorale de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis (figure 1).

Figure 1: Localisation de la zone d'étude



L'espace étudié est la ferme agricole de l'université Gaston Berger de Saint-Louis. L'université est implantée dans le village de Sanar situé dans la région de Saint-Louis. Elle se trouve à une dizaine de kilomètres de la ville Saint-Louis. La ferme agricole repose sur un périmètre de 33 ha. Le climat est de type sub-canarien à sahélien. La saison des pluies dure quatre mois (juillet-octobre). La saison sèche s'étale sur huit mois (novembre à juin). Les eaux de surface proviennent essentiellement du Djeuss (un affluent du fleuve Sénégal). Elles permettent l'irrigation des cultures maraichères, horticoles et des cultures sous pluies pratiquées sur le périmètre de la ferme. La végétation est caractérisée par une steppe arbustive typiquement sahélienne, composée des espèces *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Prosopis juliflora*, *Euphorbia balsamifera*, etc.

L'objectif de ce travail est de caractériser la variabilité des propriétés physico chimiques du sol à l'échelle du parcellaire pour mieux appréhender les perturbations et les transformations qui s'exercent sur les ressources pédologiques.

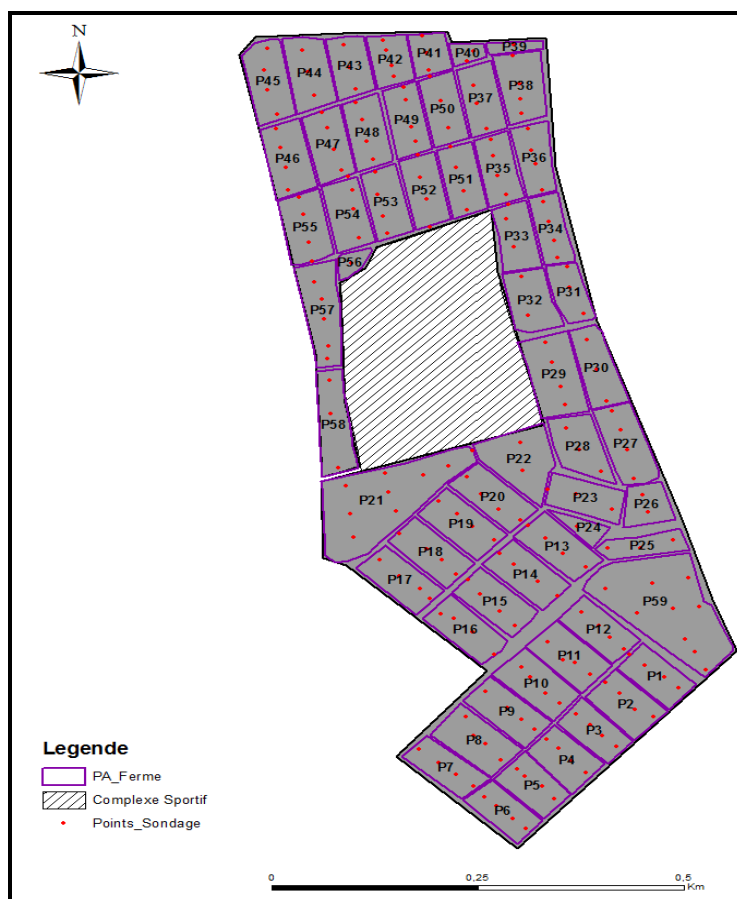
2. Méthodologie

Les échantillons de sol sont prélevés par des sondages à la tarière. La stratégie d'échantillonnage est élaborée à partir des travaux de pré-terrain. Les coordonnées géographiques de chaque point de sondage sont localisées par GPS. L'insertion des paramètres analytiques du sol (Co, pH et CE) dans un système d'informations géographiques et l'application du krigeage avec le logiciel Arc Gis 10 ont ainsi permis une caractérisation géostatistique de la variabilité des propriétés du sol d'une partie du Bas delta du Sénégal.

2.1. La stratégie d'échantillonnage

Des travaux de pré-terrain réalisés à partir des images Landsat, Google Earth et des relevés GPS, ont permis dans un premier temps de délimiter 59 parcelles qui composent la ferme agricole. Nous avons ensuite élaboré un plan de prélèvement des échantillons de sol suivant une grille régulière de 30 m. Ce plan nous a permis de prélever en moyenne 4 points de sondage dans chaque parcelle (figure 2). Dans chaque point de sondage, des échantillons de sol sont prélevés à la tarière aux horizons : 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm et 60-80 cm. Pour chaque horizon, un échantillon composite est constitué à partir d'un mélange de 3 prélèvements élémentaires. Tous les points de sondage sont localisés par GPS et projetés dans un système d'information géographique au moyen du logiciel Arc Gis 10.

Figure 2: Parcelles et plan de prélèvement des échantillons de sol de la ferme



2.2. Analyse des propriétés du sol

Les échantillons composites de sol issus des 3 prélèvements élémentaires de chaque point de sondage sont séchés à l'air libre et tamisés à une maille de 2 mm. Les analyses sont faites au laboratoire d'AfricaRice. Dans ce travail, le krigeage est appliqué sur les données analytiques des horizons 0-10 cm et 10-20 cm. Les horizons restants (20-40 m, 40-60 et 60-80 cm) feront l'objet d'un traitement par spectrométrie et de valorisation dans d'autres travaux scientifiques. Cette approche va nous permettre d'amoindrir le coût analytique des échantillons de sol et d'expérimenter d'autres types de modélisation des propriétés du sol.

2.3. La géostatistique

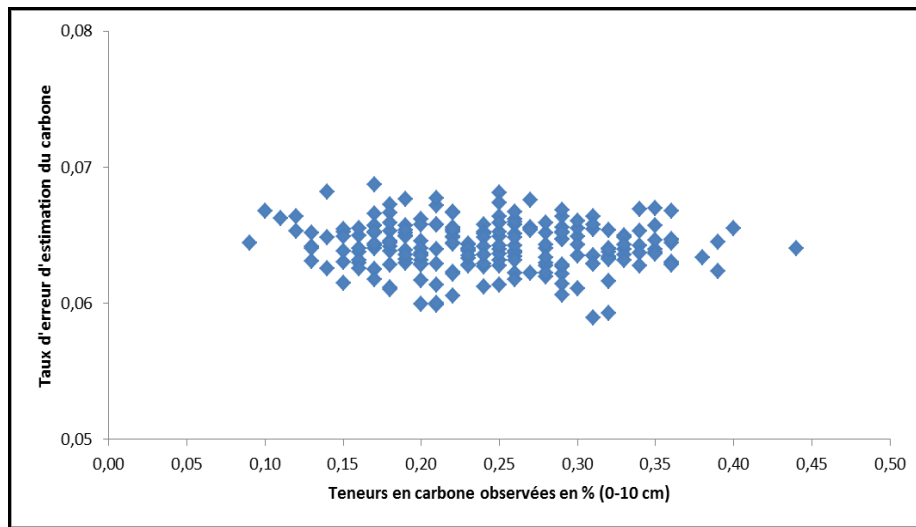
La variabilité des propriétés du sol est caractérisée à l'aide des méthodes de la géostatistique. La géostatistique est développée par l'ingénieur des mines KRIGE D. G. (1951) et formalisée par G. MATHERON (1965) sous la théorie dite des variables régionalisées. Elle désigne l'étude statistique des processus spatiaux appliqués aux phénomènes naturels (MATHERON, 1963). Le choix de la géostatistique se justifie par ses nombreuses applications dans le domaine de l'analyse spatiale des paramètres de la couverture pédologique. La variabilité du pH et du carbone organique sont des exemples de propriétés du sol appréhendées au moyen de la géostatistique dans le bassin arachidier du Sénégal (LOUM, M., 2012). Dans le Sud de l'Ille et Vilaine (France), la variabilité de l'hydromorphie et de la profondeur des sols est spatialisée avec les méthodes de la géostatistique (WALTER C., 1990).

Le krigeage est la méthode d'interpolation la plus connue de la géostatistique. Il repose sur le principe de proximité de la variable régionalisée (ARNAUD et EMERY, 2000). La valeur de la variable régionalisée, connue uniquement sur les sites échantillonnés de l'espace étudié, est interpolée par krigeage dans les sites dont on ne dispose pas des données d'observation. L'interpolation tient compte de la dépendance de la structure spatiale des observations analysée à l'aide d'un variogramme. Le krigeage ordinaire paramétré sous le logiciel Arc Gis est la méthode d'interpolation appliquée. L'hypothèse sous-jacente du krigeage considère une forte probabilité de ressemblance des variables régionalisées les plus proches jusqu'à une certaine distance au-delà de laquelle elles deviennent indépendantes les unes des autres (WALTER, 1990). Le krigeage fait partie des méthodes d'interpolation dites stochastiques. La minimisation de l'erreur quadratique moyenne est le critère de précision de l'estimation de la valeur de la variable régionalisée (ARNAUD M., EMERY X, 2000). Elles se distinguent des méthodes dites déterministes (inverse de la distance, polygone de THIESSEN, etc.) ou l'interpolation s'effectue sans une précision des occurrences d'incertitudes d'estimation. L'originalité de ce travail est relative à l'application des méthodes statistiques dans la caractérisation de la variabilité des propriétés du sol à l'échelle du parcellaire.

3. Présentation des résultats

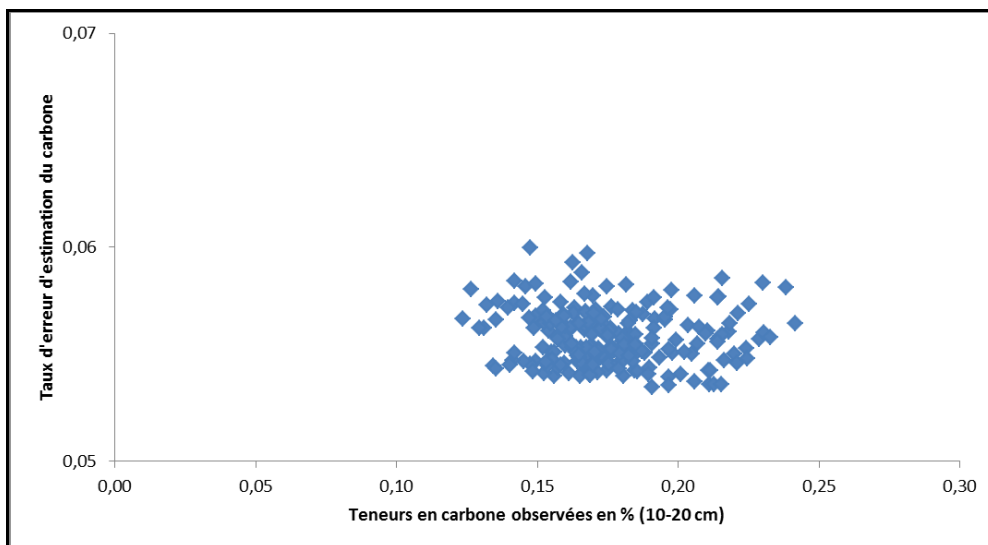
Le krigeage a donné des résultats satisfaisants pour la spatialisation du carbone organique. Les taux d'erreur moyens obtenus (figures 3 et 4) sont respectivement de 0,06 et 0,05 % des horizons de surface (0-10 cm) et des horizons profonds (10-20 cm). Pour l'ensemble des points d'apprentissage, le taux d'erreur d'interpolation par krigeage se stabilise entre 0,06 et 0,07 % aussi bien pour les horizons de surface que pour les horizons 10-20 cm.

Figure 3: Niveau de précision d'interpolation de la variabilité du Co (0-10 cm)



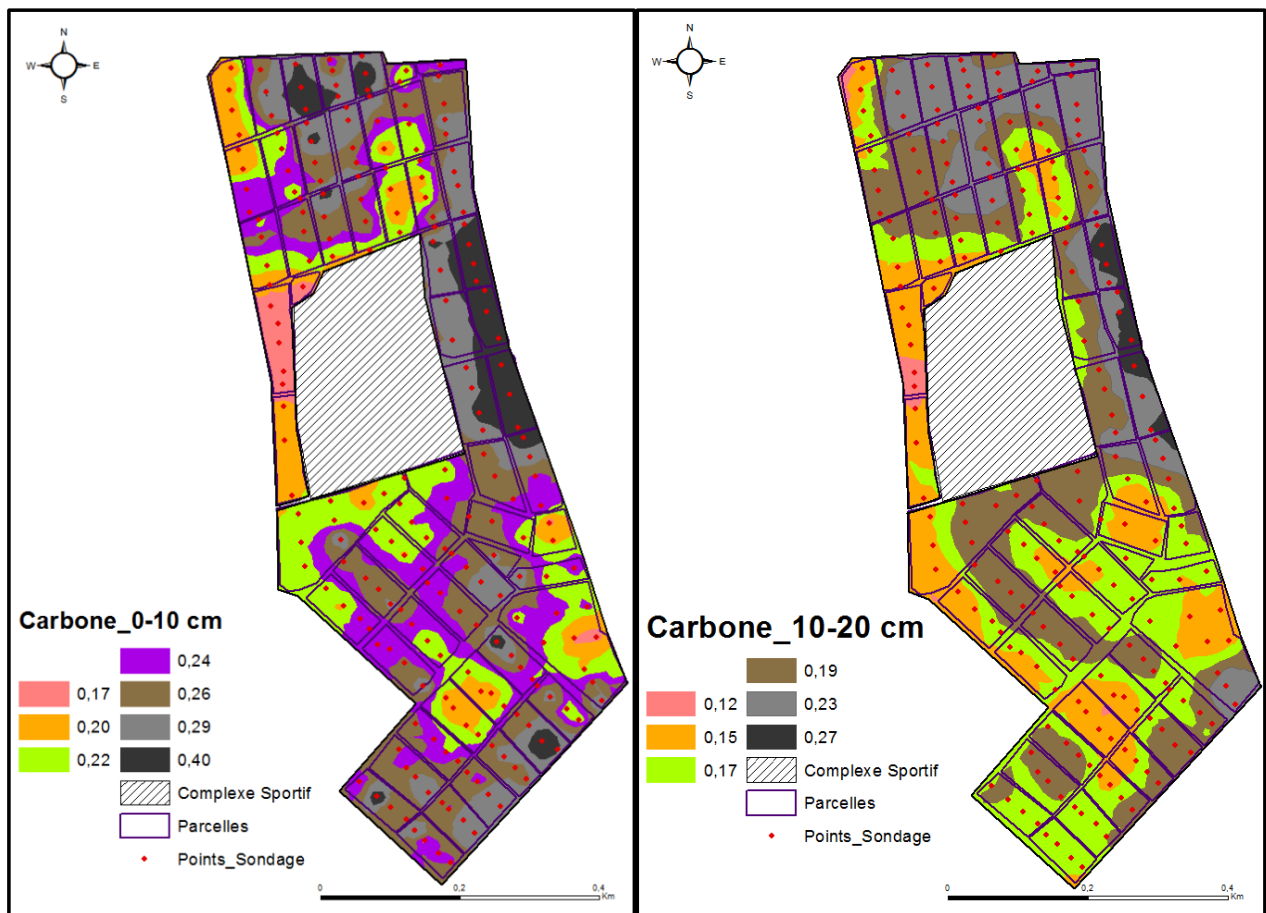
Les teneurs en carbone des horizons 10-20 cm sont interpolées avec beaucoup plus de précision. Le taux d'erreur ne dépasse pas 0,06 % (figure 4). Pour l'ensemble des deux horizons (0-10 cm et 10-20 cm), le krigeage ordinaire donne des résultats satisfaisants qui permettent une caractérisation exhaustive de la variabilité du carbone organique dans le sol.

Figure 4: Niveau de précision d'interpolation de la variabilité du Co (10-20 cm)



La variabilité du carbone caractérisée par krigeage met en évidence des sols pauvres en matière organique. La gamme de variabilité du carbone organique est comprise entre 0,17 et 0,40 % pour les horizons de surface. Elle est comprise entre 0,12 et 0,27 % pour les horizons 10-20 cm (figure 5). Une corrélation est notée entre les taux de matière organique élevés (0,40 %) et les sols à fort potentiel hydrogène localisés dans les parties Ouest de la ferme. Les parcelles situées dans la partie Nord du périmètre abritent aussi des sols avec des teneurs en carbone organique relativement élevées (figure 5).

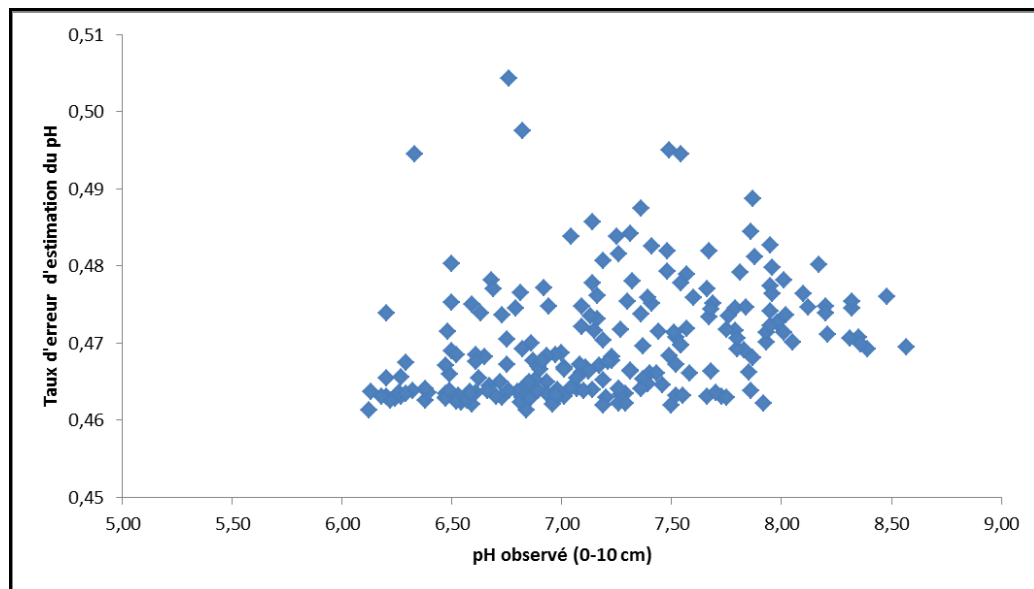
Figure 5: Variabilité des teneurs en Co des horizons 0-10 cm et 10-20 cm



La variabilité du pH est aussi bien caractérisée par krigeage avec des taux d'erreur de 0,47 et 0,46 % respectivement pour les horizons 0-10 cm et 10-20 cm (figures 6 et 7).

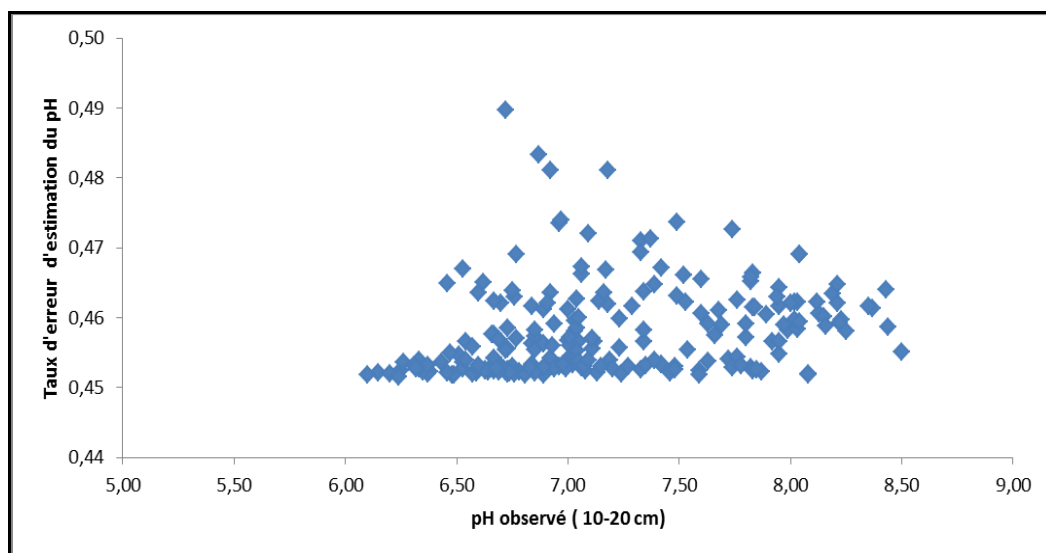
Les taux d'erreur les plus élevés concernent les données d'observation à pH compris entre 6,50 et 7,50. Ils sont de l'ordre de 0,50 % et concernent uniquement les horizons de surface. Cependant, elles sont peu représentatives par rapport à la taille totale des données d'observations.

Figure 6: Niveau de précision d'interpolation de la variabilité du pH (0-10 cm)



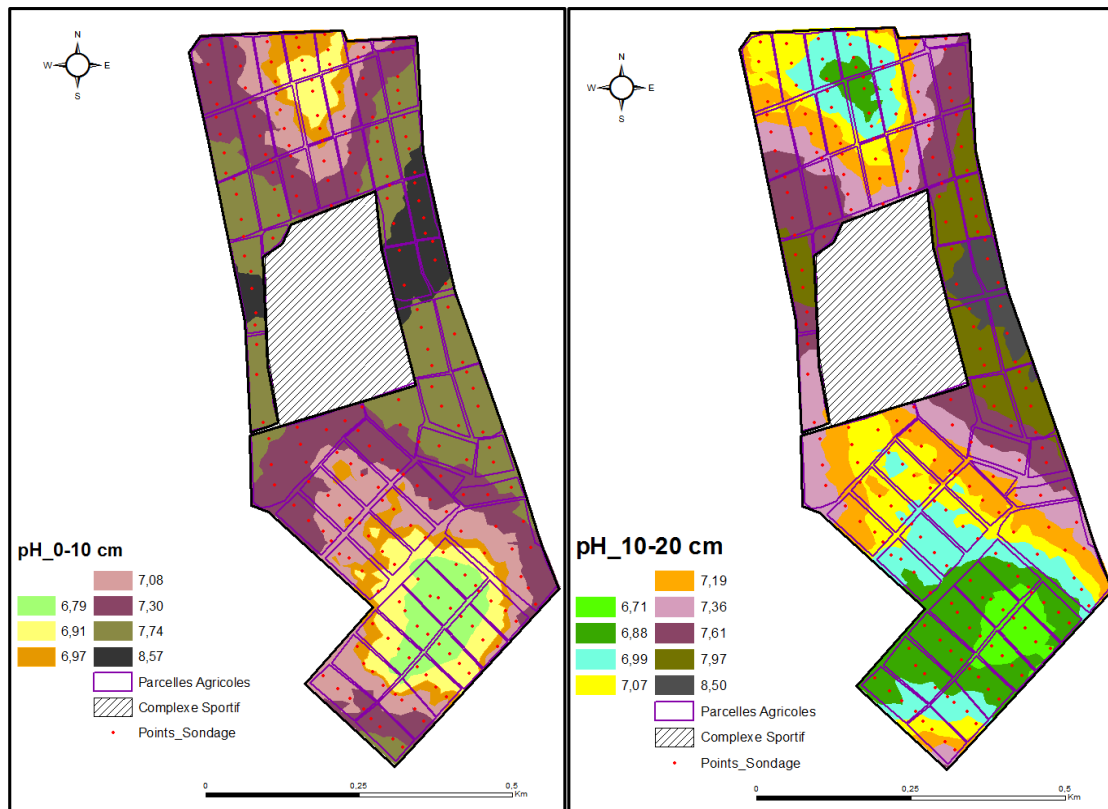
Les points d'observation à pH 6 et 8 permettent une bonne interpolation. Les taux d'erreur obtenus sont inférieurs à 0,5 % aussi bien pour les horizons de surface que les horizons 10-20 cm (figures 6 et 7). Ces résultats attestent la bonne caractérisation de la variabilité du pH par krigeage ordinaire.

Figure 7: Niveau de précision d'interpolation de la variabilité du pH (10-20 cm)



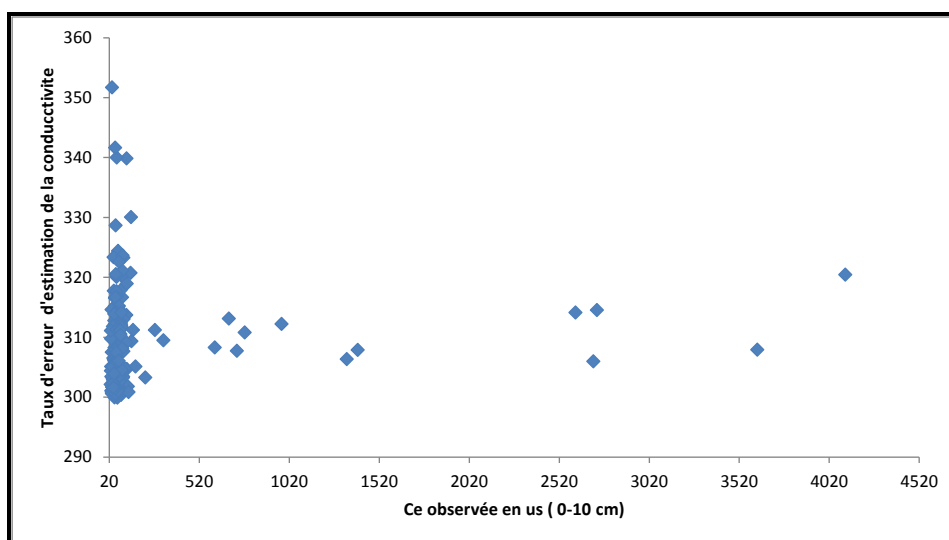
Les cartes de variabilité du pH issues du krigeage montrent des sols généralement neutres. Dans les horizons 0-10 cm, les pH varient entre 6,79 et 7,74 (figure 8). Les sols basiques à pH 8,57 sont faiblement représentés. Ils sont localisés dans les parties Ouest et Est de la ferme de part et d'autre du complexe sportif. Les mêmes tendances sont observées dans les horizons 10-20 cm avec une dominance des sols neutres sur la quasi-totalité du périmètre de la ferme.

Figure 8: Variabilité du pH des horizons 0-10 cm et 10-20 cm



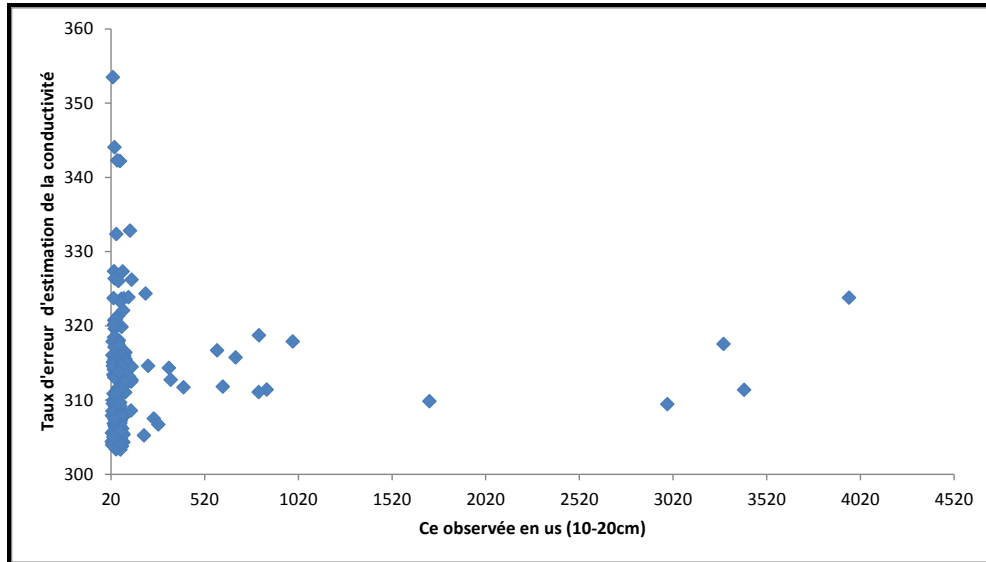
Le krigeage est par contre inadapté pour caractériser la variabilité de la conductivité. Les taux d'erreur d'interpolation sont supérieurs à 100 % aussi bien pour les horizons de surface que pour les horizons 10-20 cm (figures 9 et 10). Les sols à faible conductivité (entre 50 et 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) présentent des biais d'interpolation avec une forte variabilité (300 à 350 %).

Figure 9: Niveau de précision d'interpolation de la variabilité de la CE (0-10 cm)



Au-delà de 1,5 mS/cm, les taux d'erreurs d'interpolation à partir des données d'observations se stabilisent autour de 300 %. Toutefois, ces résultats ne permettent pas de caractériser la variabilité de la conductivité électrique dans l'espace à l'aide du krigeage ordinaire.

Figure 10: Niveau de précision d'interpolation de la variabilité de la CE (10-20 cm)



4. Discussion

A l'échelle du parcellaire, le krigeage a donné des résultats beaucoup plus précis pour la caractérisation de la variabilité du carbone organique et du pH comparés aux résultats obtenus à l'échelle de l'exploitation. Les travaux de LOUM (2012) et ceux de STOORGEL (2009) par exemple ont donné des taux d'erreur respectifs de 0,19 % et de 0,21 % pour la cartographie de la variabilité du carbone organique à l'échelle de l'exploitation. A l'échelle du parcellaire, le carbone organique est spatialisé avec un taux d'erreur de 0,06 %. Ces résultats attestent la sensibilité du krigeage par rapport à la densité des points de prélèvement des échantillons de sol. Une caractérisation fine de la variabilité des propriétés du sol par krigeage nécessite au préalable l'élaboration d'un plan d'échantillonnage dense ou stratifié dans l'espace. Notre stratégie d'échantillonnage suivant une grille régulière de 30 m nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour la spatialisation du carbone organique et du potentiel hydrogène.

L'inadéquation du krigeage à la caractérisation de la conductivité peut résulter de la forte gamme de variabilité des cristaux salins. La conductivité est comprise entre 0,09 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 4,91 mS/cm pour les horizons de surface. Les horizons 10-20 cm varient entre 0,07 μS à 3,96 mS/cm. L'absence de structure régulière du sel dans l'espace est aussi un élément d'explication. D'autres modèles statistiques (ceux relevant du data mining par exemple) ont donné des résultats satisfaisants dans la caractérisation de la variabilité spatiale des propriétés du sol (LEMERCIER et al, 2012). La combinaison du krigeage aux méthodes de classification de la télédétection est aussi une autre approche susceptible d'améliorer les résultats de la spatialisation des propriétés du sol (DOUAOUI et al, 2006). Ces différentes approches seront testées dans nos futurs travaux de caractérisation des paramètres physico-chimiques de la couverture pédologique.

Conclusion

La géostatistique a permis une caractérisation exhaustive de la variabilité du carbone organique et du pH du sol à l'échelle du parcellaire. Le couplage des sondages à la tarière et de leur insertion dans un système d'informations géographiques a permis de mettre en place une cartographie automatique à l'échelle du 1/5000. Cette méthodologie est reproductible grâce à l'application du krigeage.

Les variations locales intra-parcellaires des propriétés du sol mises en évidence par krigeage sont ainsi susceptibles d'orienter des pratiques vers une agriculture de précision. Les faibles teneurs en carbone organique des sols posent la nécessité d'appliquer d'autres rotations culturales permettant de restituer en quantité suffisante des résidus organiques au sol.

Les résultats de l'étude dégagent aussi des perspectives de recherche sur la nécessité d'explorer d'autres méthodes statistiques pouvant permettre une bonne caractérisation de la dynamique de la salinité dans le sol.

Références bibliographiques

- AKINNIFESI F. K., W. MAKUMBA, G. SILESHI, O. C. AJAYI, AND D. MWETA (2007). Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in southern Malawi. *Plant Soil* 294:203–217. doi:10.1007/s11104-007-9247-z.
- BADIANE, A.N., M. KHOUMA, and M. SENE (2000). Région de Diourbel: Gestion des sols. *Drylands Res. Work. Pap. 15*. Drylands Res., Somerset, UK.
- BATIONO, A., C.B. CHRISTIANSON, and M.C. KLAIJ (1993). The effect of crop residue and fertilizer on pearl millet yields in Niger. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*34:251–258.
- BRESLER, E., B. L. MCNEAL, and D. L. CARTER (1982). *Saline and Sodic Soils*. Springer-Verlag, New York.
- DABIN, B et R. MAIGNIEN (1979). Les principaux sols d'Afrique de l'Ouest et leurs potentialités agricoles, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XVII, no 4, 1979 : 235-257.

DIACK M. (1998). *Piliostigma reticulatum* dans un parc à *Cordyla pinnata*: effet sur la génération des sols dégradés au Sénégal. Mémoire de titularisation, ISRA, 46 pages.

DIACK, M., M. SENE, A.N. BADIANE, M. DIATTA and R.P. Dick (2000). Decomposition of a native shrub, *Piliostigma reticulatum*, litter in soils of semiarid Senegal. *J. of Arid Soil Research and Rehabilitation* 14 (3): 205-218.

DIACK, M., F. DIOM and K. SOW (2010). Managing soil fertility to sustain crop production in the watersheds in Senegal. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia.

DIACK, M., T. DIOP and R. NDIAYE (2014). Restoration of degraded lands affected by salinization process under climate change conditions: Impacts on food security in the Senegal River Valley, Springer (Eds).

DOSSA, E. L., I. DIEDHIOU, M. KHOUMA, M. SENE, A. LUFABA, F. KIZITO, et al., (2012). Crop productivity and nutrient dynamics in a shrub (*Guiera senegalensis*)-based farming system of the Sahel. *Agron. J.* 104:1255-1264. doi:10.2134/agronj2011.0399

DOUAOUI A. K., NICOLAS H., WALTER C. (2006). Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data, *Geoderma* 134, 217-230.

FRIEDMAN P.S. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46:45-70.7, Elsevier Science Publishers B.V.

FRIEDMAN J. H. (1999b). Stochastic gradient boosting. Technical report. Department of statistics, Stanford University, 10 p.

KRIGE DANIE G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa* 52 (6): 119-139

LAGACHERIE P. and McBRATNEY (2007). Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping pp 3-22. In *Digital Soil Mapping*, an introductory perspective E.B Lagacherie P., McBratney, Voltz M. 600 p.

- LAGACHERIE P. (1992). Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur pris comme référence. Mémoire de thèse, Université de Montpellier Agronomique, France, 175 p.
- LEMERCIER B., LACOSTE M., LOUM M., WALTER C. (2012). Extrapolation at regional scale of a local soil knowledge using boosted classification trees. A two-step approach. *Geoderma*, 171-172, 75-84.
- LOUM M. (2012). Contribution à l'étude de durabilité d'un système de production en milieu sahélien: cas de l'agrosystème de Khelcom dans le bassin arachidier du Sénégal (PhD thesis). Agrocampus-Ouest Rennes France and University Gaston Berger, Saint-Louis Senegal.
- LOUM, M., V. VIAUD, Y. FOUAD, H. NICOLAS, and C. WALTER (2014). Retrospective and prospective dynamics of soil carbon sequestration in Sahelian agrosystems in Senegal. *Journal of Arid Environments*, 100-101, 100-105.
- LEGROS J. P. (1996). Cartographie des sols: de l'analyse spatiale à la gestion des territoires, presses polytechniques et Universitaires Romandes, 321 p.
- MATHERON G. (1963). Principles of Geostatistics, *Economic Geology* 58, 1246-1266.
- MATHERON G. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation. Masson, Paris, 305 p.
- NIANG A. (2004). Organic matter stocks under different types of land use in the Peanut Basin of the Niore area in Senegal. Thesis report Soil Formation and Ecopedology. SFI-80826, Wageningen University, Wageningen.
- SANCHEZ, P.A., K.D. SHEPHERD, M.J. SOULE, F.M. Place, R.J. BURESH, A.M.N. Izac, et al. (1997). Soil fertility replenishment in Africa: An investment in natural resource capitol. In: R.J. Buresh et al., editors, Replenishing soil fertility in Africa. SSSA Spec. Publ. 51. SSSA and ASA, Madison, WI. p. 1-46.
- SENSI A. (2002). Agriculture et acidification, Eurostat (ed.).
- STOORVOGEL, J. J., KEMPEN B., HEUVELINK G.B.M., BRUIN de S. (2009). Implementation and evaluation of existing knowledge for digital soil mapping in Senegal. *Geoderma*, 149, 161-170.
- TITTONELL, P., M. CORBEELS, M.T. VAN WIJK, B. VANLAUWE, and K.E. GILLER. (2008). Combining organic and mineral fertilizers for integrated soil fertility management in smallholder farming systems of Kenya: Explorations using the crop-soil model FIELD. *Agron. J.* 100:1511–1526. doi:10.2134/agronj2007.0355.

WALTER C. (1990). Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle: Cartographie pédologique et géostatistique dans le Sud de l'Ille et Vilaine, Thèse de Doctorat, Université Paris, 172 p.

WALTER C., KING D., LAGACHARIE P., ROBBEZ MASSON J. M. (2011). L'analyse spatiale des sols: Description, modélisation et représentation de la variabilité spatiale des sols pp 427-452 in Sols et Environnement GIRAD J. C. et *al.* Dunod, 881 p.