

Une analyse des facteurs de contrôle de la distribution des teneurs en carbone des horizons superficiels des sols de Corse

Y. Grosset⁽¹⁾, A.C. Richer de Forges^(1*), J. Demartini⁽²⁾, N.P.A. Saby⁽¹⁾, M. P. Martin⁽¹⁾, J. Meersmans⁽¹⁾ et D. Arrouays⁽¹⁾

1) INRA, US 1106, Infosol, F-45075 Orléans, France

2) Office du Développement Agricole et Rural de Corse (ODARC), BP 618, 20601 Bastia, France

* : auteur correspondant : anne.richer-de-forges@orleans.inra.fr

RÉSUMÉ

La Corse, grâce à sa localisation et sa topographie, constitue une zone d'étude intéressante pour l'analyse des différents facteurs influençant les teneurs en carbone organique des sols. A partir des profils issus du programme régional d'inventaire cartographique (constitution du Référentiel Régional Pédologique (RRP) Corse dans le cadre du programme IGCS), nous avons pu établir un modèle de prédiction de la teneur en carbone des sols sur 0-30 cm. Lors de la réalisation de ce modèle, nous avons étudié différents facteurs influençant la teneur en carbone des sols, et particulièrement les facteurs climatiques (précipitation, température), topographique (altitude) et environnementaux (type de sol et occupation du sol). Ceci nous a permis d'établir une carte des teneurs en carbone en surface des sols de la Corse qui semble robuste et cohérente avec d'autres estimations.

Mots clés

Carbone, Corse, modélisation, arbre de régression multiple, cartographie.

SUMMARY

ASSESSING CONTROLLING FACTORS OF TOPSOIL CARBON CONTENT IN CORSICA (FRANCE)

The location and the topography of Corsica island make it an interesting test area to study the various controlling factors on soil organic carbon (SOC) content. We use data from the national and regional soil mapping programme to build a model that predicts SOC content in the 0 to 30 cm layer. When building this model we used and studied several controlling factors such as rainfall, temperature, elevation, soil type and land cover. We then mapped SOC content over Corsica and compared the results with those previously obtained at the European scale, and with point data taken from the French national soil monitoring networks. Results appeared to be rather robust and consistent.

Key-words

Soil organic carbon, Corsica, modeling, Multiple additive regression Boosted Regression Tree (BRT), mapping.

RESUMEN**UN ANÁLISIS DE LOS FACTORES DE CONTROL DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTENIDOS EN CARBONO DE LOS HORIZONTES SUPERFICIALES DE LOS SUELOS DE CÓRCEGA**

Córcega, gracias a su localización y a su topografía, constituye una zona de estudio interesante para el análisis de los diferentes factores que influyen los contenidos en carbono orgánico de los suelos. A partir de los perfiles del programa regional de inventario cartográfico (constitución del Referencial regional Pedológico (RRP) Corso en el cuadro del programa IGCS), pudimos establecer un modelo de predicción del contenido en carbono de los suelos sobre 0–30 cm. Durante la realización de este modelo, estudiamos diferentes factores que influyen el contenido en carbono de los suelos, y particularmente los factores climáticos (precipitación, temperatura), topográfico (altitud) y ambientales (tipo de suelos y uso del suelo). Esto nos permitió establecer un mapa de los contenidos en carbono en superficie de los suelos de Córcega que parece robusto y coherente con otras estimaciones.

Palabras clave

Carbono, Córcega, modelización, árbol de regresión múltiple, cartografía.

INTRODUCTION

Dans le contexte d'atténuation du changement climatique, notamment dans la lutte contre l'augmentation des gaz à effets de serre dans l'atmosphère, un accroissement du stockage de carbone dans les sols pourrait jouer un rôle important (Arrouays *et al.*, 2002; IPCC, 2000; Chiti *et al.*, 2010). La quantité de carbone organique contenue dans les sols du monde est évaluée à environ 1 500 milliards de tonnes, soit environ deux fois plus que dans l'atmosphère, et trois fois plus que dans la végétation terrestre (Eswaran *et al.*, 1993; Post *et al.*, 1982; Schlesinger, 1984; Batjes, 1996). Ce carbone se minéralise et retourne à l'atmosphère avec des durées de vie (ou de stockage) très variables, qui dépendent de nombreux facteurs. Parmi ces facteurs, l'un d'entre eux nous intéresse particulièrement car nous pouvons agir dessus. Il s'agit de l'occupation du sol.

Pour agir sur ce facteur, il nous faut connaître son potentiel en termes de stockage de carbone. Aussi de nombreux travaux (Eswaran *et al.*, 1993; Post *et al.*, 1982; Schlesinger, 1984, 1991; Batjes, 1996; Paustian *et al.*, 1997; Smith *et al.*, 1998; Cerri *et al.*, 2000; Arrouays *et al.*, 2001, 2003a; Jones *et al.*, 2005; Bellamy *et al.*, 2005; Saby *et al.*, 2008; Grinand *et al.*, 2009; Meersmans *et al.*, 2009; Martin *et al.*, 2011) ont concerné la quantification des stocks de carbone des sols et ceci à des échelles très diverses (du suivi de placettes à la Terre entière).

Il a été démontré au cours de ces travaux que les pratiques agricoles permettant un stockage de carbone dans les sols s'accompagnent souvent d'autres effets positifs sur l'environnement. Il s'agit, par exemple, d'amélioration de la stabilité structurale et de la résistance à l'érosion, de moindre sensibilité au tassement des sols, d'économies d'énergie fossile, d'augmentation de la réserve en eau disponible et de la biodiversité.

Ceci prend toute son importance en milieu méditerranéen car celui-ci est particulièrement sensible à l'érosion (Kirkby *et al.*, 2004; Cerdan *et al.*, 2010). Sous climat méditerranéen, les teneurs en carbone des sols constituent un paramètre essentiel de leur stabilité structurale et de leur résistance à l'érosion (Antoni *et al.*, 2006; Plaza-Bonilla *et al.*, 2010) et à la désertification qui s'en suit parfois. C'est pourquoi l'étude des teneurs en carbone des sols sous climat méditerranéen présente un intérêt environnemental certain.

Souhaitant étudier l'influence de différents facteurs sur la teneur en carbone de l'horizon de surface (0-30 cm) en milieu méditerranéen, nous avons choisi la Corse comme zone d'étude. En effet, cette île d'environ 8 700 km² présente des particularités intéressantes vis-à-vis de notre problématique. Son relief montagneux en fait sa caractéristique principale avec une zone montagneuse orientée NW-SE. Cette topographie contrastée influence le climat méditerranéen de l'île. Les températures peuvent descendre fortement en zone montagneuse en période hivernale avec des précipitations importantes. Au contraire, dans

les zones de plus faible altitude, les précipitations peuvent être de très faible intensité et le déficit hydrique peut y être important en été. Cette très forte variabilité climatique et topographique sur un territoire plutôt restreint fait de la Corse un milieu d'étude intéressant, en quelque sorte un « modèle réduit naturel », pour la compréhension des facteurs liés à la distribution des teneurs de carbone des sols. Les situations insulaires montagneuses sont en effet des lieux privilégiés pour étudier de forts gradients de carbone dans les sols (Grimm *et al.*, 2008).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données utilisées

Pour cette étude, trois ensembles de données utilisées peuvent être distingués. Les données ponctuelles sur les teneurs en carbone, les variables externes potentiellement facteurs de la distribution du carbone pour la modélisation et les données de validation (ponctuelles et surfaciques).

Pour les données sur les teneurs en carbone qui ont servi à la construction du modèle, nous avons sélectionné les données ponctuelles issues du programme IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols). Il s'agit de la description de 479 profils de sols obtenus de 1976 à 2009 et numérisés en format DoneSol. De ces profils ont été extraites les teneurs en carbone des sols sur 0-30 cm.

Les covariables potentielles retenues pour la modélisation sont:

- Un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) afin d'avoir une donnée d'altitude. Le MNE utilisé est issu du MNE produit en 2009 par les Etats-Unis et le Japon à partir du satellite ASTER (<https://lpdaac.usgs.gov/>). Ce MNE présente une résolution de 30 m.
- Les données d'occupation du sol utilisées issues de la base CORINE Land Cover nationale datée de 2006 et mises à disposition par le SOeS (Service de l'Observation et des Statistiques du Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement).
- Les données climatiques utilisées issues de Météo-France (Aurhély). Ce sont des moyennes mensuelles de précipitations et de températures sur 30 ans (1970-2000). Ces données sont fournies par centroïde d'une grille régulière de 1 000 m de résolution.
- Les UCS (Unités Cartographiques de Sols) de la BDGSF (Base de Données Géographique des Sols de France) au 1/1 000 000.

Enfin, deux jeux de données nous ont permis de valider notre modèle:

- Les teneurs en carbone des sols sur 0-30 cm du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS) sur la France entière (Jolivet *et al.*, 2006; Arrouays *et al.*, 2003b). Ces données, d'une part, nous permettent de comparer la variabilité des teneurs en carbone sur la Corse et sur la France entière et d'autre part ont été

utilisées comme données de validation du modèle.

- Les données de la base de données « Topsoil Organic Carbon Content » des sols d'Europe du JRC afin de pouvoir comparer nos résultats avec des résultats existants.

Nous avons ainsi rapatrié à l'aide de jointures spatiales toutes les variables prédictives sur les profils IGCS et les sites RMQS

Modélisation de la teneur en C organique

Pour la modélisation, nous avons utilisé un arbre de régression multiple boosté « *boosting regression tree* » (Martin *et al.*, 2011) implémenté dans le package *gbm* sous R (2.12.1). Cette méthode consiste à améliorer les techniques d'arbre de régression ou de classification (Breiman *et al.*, 1984) grâce à un algorithme très performant d'apprentissage appelé « *boosting* » (Freund et Schapire, 1996). Le « *boosting* » consiste à multiplier et combiner de façon itérative un grand nombre d'arbres simples construits sur des sous-ensembles de données d'apprentissage.

Notre modèle nommé ici « BRT » se présente de la façon suivante :

$$C = f(\text{clc}; z; P; T_{\text{moy}}; \text{ucs}) \quad (1)$$

où C est la teneur en carbone sur 0-30 cm à prédire en g.kg⁻¹, clc est le code correspondant à la nomenclature du niveau 2 de CORINE Land Cover issu de la description des profils (champ CULTURE de la table PROFIL de DoneSol contenant la description de l'occupation du sol).

z est l'altitude en m.

P est la précipitation moyenne annuelle en mm.

T_{moy} est la température moyenne annuelle en °C

ucs est le numéro de l'unité cartographique de sol issu de la BDGSF.

Validation au niveau des points

La validation a été effectuée au niveau ponctuel par validation interne et externe. La validation interne consiste à estimer la qualité de l'ajustement du modèle sur les données d'apprentissage. Pour la validation externe, les données issues du programme RMQS ont été utilisées comme jeu de validation externe du modèle (Jolivet *et al.*, 2006). Les valeurs de précipitation, de température moyenne, d'altitude et d'UCS de la BDGSF ont été calculées pour chaque situation ponctuelle du RMQS. Le modèle a ensuite été appliqué à ces données de façon à obtenir une estimation de la teneur en carbone. La valeur prédite obtenue a ensuite été comparée à la valeur mesurée avec des indicateurs statistiques. En plus du coefficient de détermination (r²), nous avons estimé le biais qui correspond à la moyenne de la différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites. Le REQM, qui correspond à la racine de l'erreur quadratique moyenne, est utilisé pour mesurer la différence entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs observées. Il est calculé ainsi :

$$\widehat{Biais}(C) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\widehat{C}_i - C_i)^2 \quad (2)$$

$$\widehat{REQM}(C) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\widehat{C}_i - C_i)^2} \quad (3)$$

Où C_i est la teneur en carbone mesurée et \widehat{C}_i la teneur en carbone prédite, au site i.

La déviation standard (DS) permet d'évaluer la dispersion des mesures autour de la valeur moyenne. Cette DS est calculée sur les valeurs observées.

Pour quantifier la capacité de prédiction du modèle, nous avons calculé le RPD (*ratio of performance to deviation*) qui correspond à la déviation standard divisée par le REQM. La valeur de RPD exprime la qualité de prédiction du modèle en comparaison avec le calcul d'une teneur en carbone moyenne. Les valeurs de RPD de 2, 3 et 4 correspondent respectivement à 50 %, 66,67 % et 75 % d'explication de la variation totale des données par le modèle (Meersmans *et al.*, 2011).

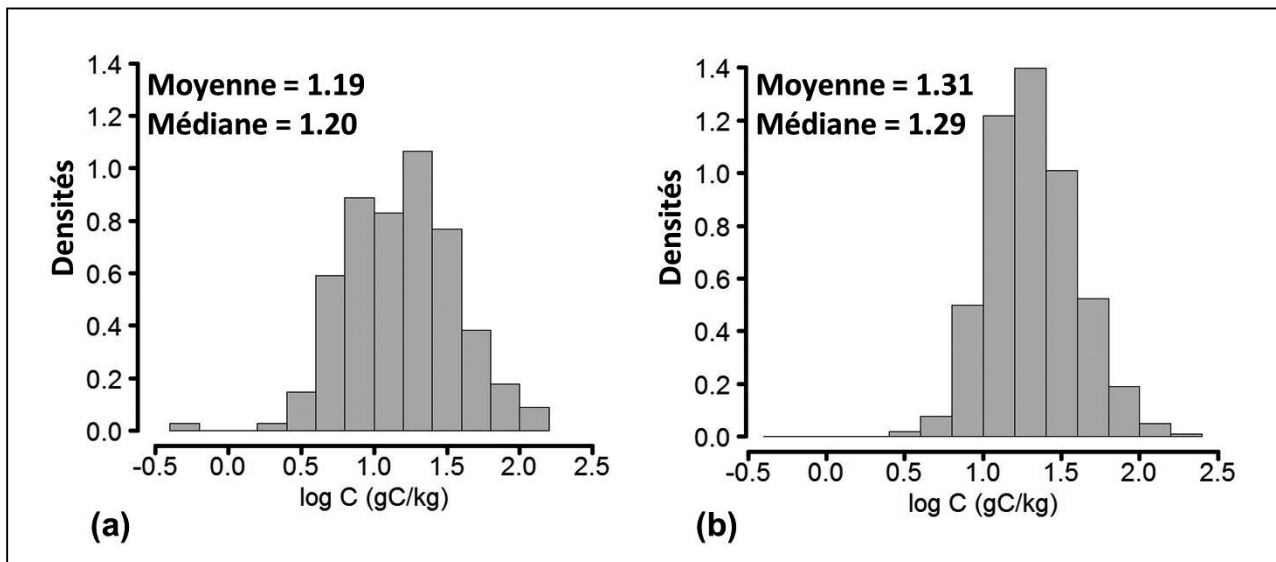
Analyse de l'influence des variables

L'influence des différents facteurs (altitude, occupation du sol, type de sol, température, précipitations) a été étudiée d'abord à travers l'analyse statistique des relations entre les teneurs en C et ces facteurs. Elle a été complétée par le calcul d'un indice issu du modèle BRT comptabilisant le nombre de fois qu'une variable a été sélectionnée par l'étape de « *boosting* » pour améliorer le modèle.

Cartographie sur l'ensemble du territoire corse et comparaison avec des estimations européennes

Nous avons ensuite appliqué ce modèle à l'ensemble des données surfaciques de la Corse afin de produire une prédiction de la teneur en carbone (0-30 cm) sur l'ensemble de l'île.

La carte de teneur en carbone obtenue a été comparée aux résultats du JRC (Jones *et al.*, 2005). Pour cela, nous avons utilisé une couche graphique issue de l'intersection entre les UCS de la BDGSF et les polygones de CORINE Land Cover. Nous avons transformé cette couche graphique en raster de même maille que le raster du JRC. En soustrayant ces deux rasters, nous avons obtenu un raster des différences.

Figure 1 - Répartitions du carbone dans les sols de Corse (a) et de France (b) sur 0-30 cm.**Figure 1** - Organic carbon contents distribution of soil in Corsica (a) and in France (b) on 0-30 cm.

RÉSULTATS

Distribution statistique des teneurs en carbone

La distribution statistique des teneurs en carbone de l'horizon de surface du sol a été dans un premier temps comparée à celle des données RMQS sur la France entière. Les histogrammes de la *figure 1* montrent la répartition des teneurs en carbone (exprimées en log) sur 0-30 cm en Corse et sur la France entière.

L'allure générale de ces deux histogrammes est assez similaire. Toutefois, le test de Kolmogorov-Smirnov nous indique que ces deux jeux de données ne suivent pas une même loi de distribution ($p \ll 0$). Les moyennes du carbone dans les sols de la Corse et celle pour la France entière sont d'ailleurs statistiquement différentes (d'après le test de Student ($p \ll 0$)).

Les gammes faibles de valeurs observées pour la Corse sont proportionnellement inférieures à celles de la France entière.

Estimation de la teneur en carbone

L'estimation des teneurs en carbone par le modèle BRT sur des données ponctuelles issues du RMQS indépendantes des données utilisées pour le calibrer permet de juger de la qualité prédictive de notre modèle.

La *figure 2* montre les valeurs prédites en fonction des valeurs mesurées pour la teneur en carbone des sols de Corse,

Figure 2 - Teneurs en carbone prédites par le modèle BRT en fonction des teneurs en carbone mesurées. Les points noirs correspondent aux données d'entrées du modèle et les triangles gris aux données de validation (issus du programme RMQS-Corse).

Figure 2 - Carbon contents estimated by the BRT model vs measured ones. Black dots are the data used for model calibration, grey dots are external validation data.

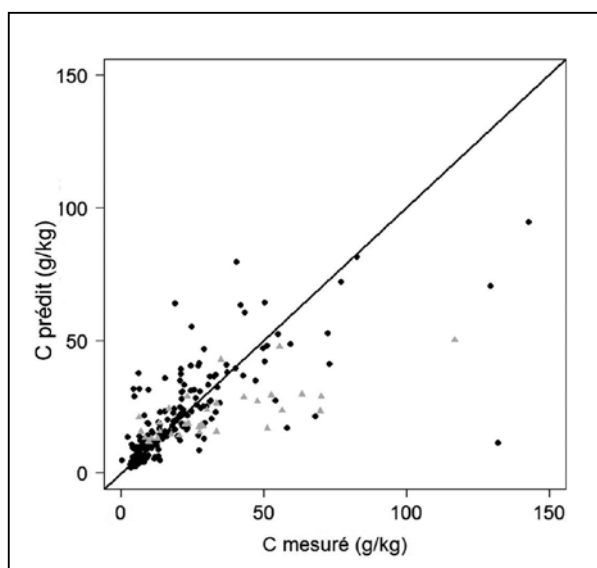
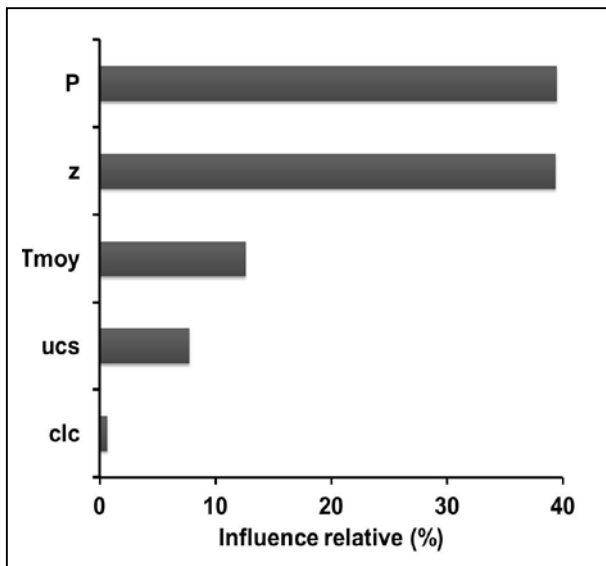


Tableau 1 - Résultats statistiques.**Table 2** - Statistical results.

	r ²	REQM (g C.kg ⁻¹)	Biais	DS	RPD
Données d'entrée du modèle (IGCS)	0,49	15,72	0,23	22,06	1,403
Données de validation du modèle (RMQS)	0,53	20,71	-10,62	23,77	1,148
Données (IGCS) d'entrée du modèle sans teneurs > 100 g.kg ⁻¹	0,61	10,08	0,41	16,09	1,596
Données de validation (RMQS) du modèle sans teneurs > 100 g.kg ⁻¹	0,47	22,45	-11,67	23,77	1,059

Figure 3 - Poids relatif de chaque variable explicative dans le modèle réalisé.**Figure 3** - Relative weight of the explaining variables in the BRT model.

pour les données de calibration, et pour les données indépendantes de validation.

Le modèle BRT semble prédire relativement bien les teneurs en carbone. Le RPD obtenu avec les données servant à la calibration du modèle (1,403) est du même ordre de grandeur que ceux obtenus en Belgique par Meersmans *et al.* (2011). En revanche le RPD de validation externe (1,15) est plus faible. Les teneurs en carbone élevées (> à 100 g.kg⁻¹) apparaissent moins bien prédites que les teneurs faibles. Cette sous-estimation des valeurs fortes semble être un cas relativement général dans ce type de prédiction (i.e., Martin *et al.*, 2011). Si on supprime les valeurs fortes (> 100 g.kg⁻¹) du jeu de données, les performances

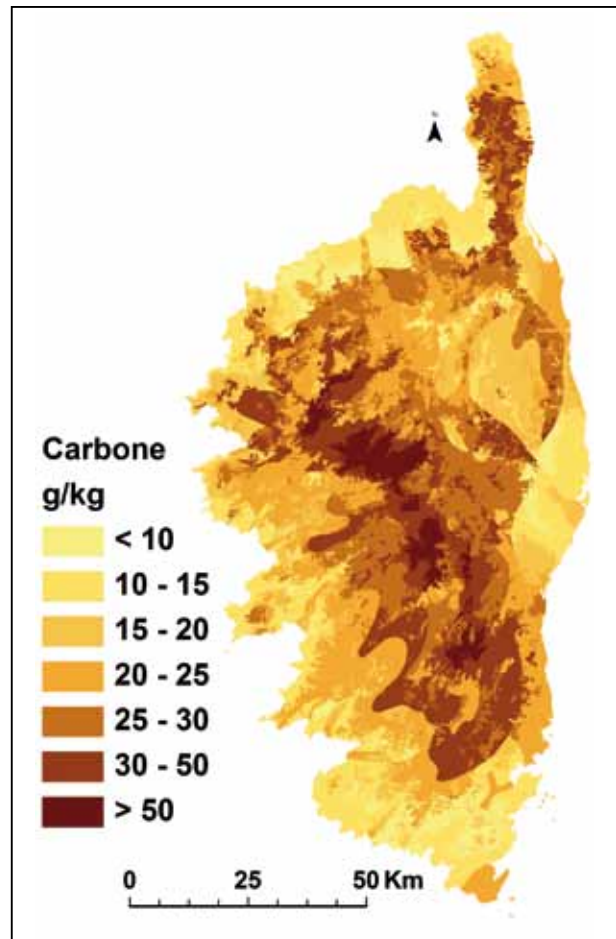
Figure 4 - Carte des teneurs de carbone prédites.**Figure 4** - Map of predicted organic carbon contents.

Figure 5 - Distribution de la teneur en carbone sur 0-30 cm selon le type d'occupation du sol.

Figure 5 - Distribution of soil organic carbon content on 0-30 cm according to the different land cover.

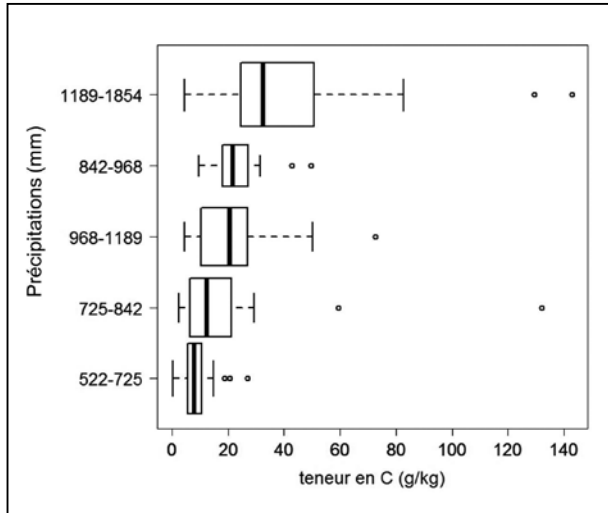


Figure 6 - Distribution des teneurs en carbone sur 0-30 cm en altitude dans les différentes occupations du sol.

Figure 6 - Soil organic carbon content (0-30 cm) vs the elevation and various land cover types.

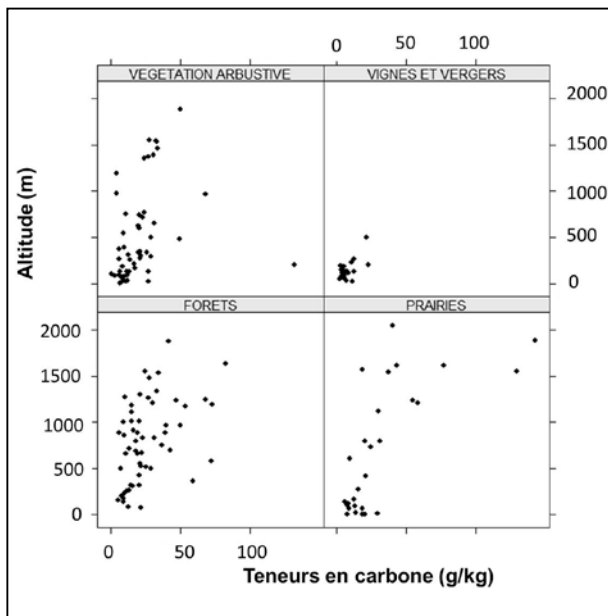


Figure 7 - Répartition de la teneur en argile (A) et de la teneur en carbone (C) en fonction des différentes occupations du sol.

Figure 7 - Distribution of clay (A) and of the organic carbon content (C) (0-30 cm) according to the various land cover types.

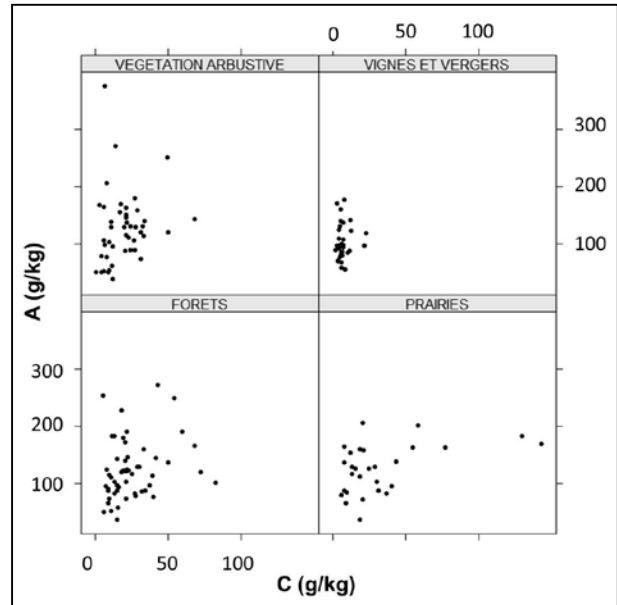
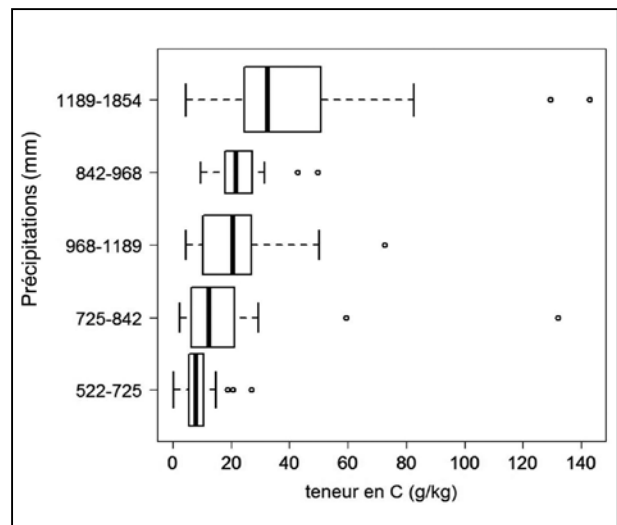


Figure 9 - Distribution des teneurs en carbone des sols sur 0-30 cm selon le total annuel des précipitations.

Figure 9 - Soil organic carbon contents (0-30 cm) according to the annual sum of rainfall.



du modèle obtenu à partir de ce nouveau jeu de données sont bien meilleures. La présence des valeurs fortes dans le jeu de données entraîne une baisse de performance importante du modèle car celles-ci sont mal prédites. Ceci dit, la validation externe de ce nouveau modèle sans teneurs > 100 g.kg⁻¹ avec les données RMQS de la Corse est moins performante.

Les différentes variables d'entrées utilisées n'ont pas le même poids dans le modèle d'estimation de la teneur en carbone. La *figure 3* montre que l'altitude et la pluviométrie expliquent à elles seules plus de 66 % de la variabilité de la teneur en carbone.

Le premier facteur explicatif de la variabilité de la teneur en carbone correspond à la variable des précipitations. L'altitude est également un facteur important de notre modèle (expliquant 39,4 %). La température moyenne n'intervient que pour 12,6 % dans la construction du modèle. L'appartenance à une UCS explique 7,7 % de la teneur en carbone et l'occupation du sol n'intervient que dans moins de 1 % des cas.

Ce modèle permet de prédire les teneurs en carbone sur 0-30 cm sur l'ensemble de la Corse (*figure 4*).

La carte obtenue traduit bien l'influence prépondérante du relief et de la pluviométrie. Les valeurs les plus fortes de carbone se situent en altitude.

L'effet de l'occupation du sol

La *figure 5* présente la répartition de la teneur en carbone sur 0-30 cm en fonction de l'occupation du sol.

Figure 8 - Répartition de la teneur en carbone sur 0-30 cm dans les différents types de sol de Corse.

Figure 8 - Soil organic carbon content (0-30 cm) according to the different soil types of Corsica.

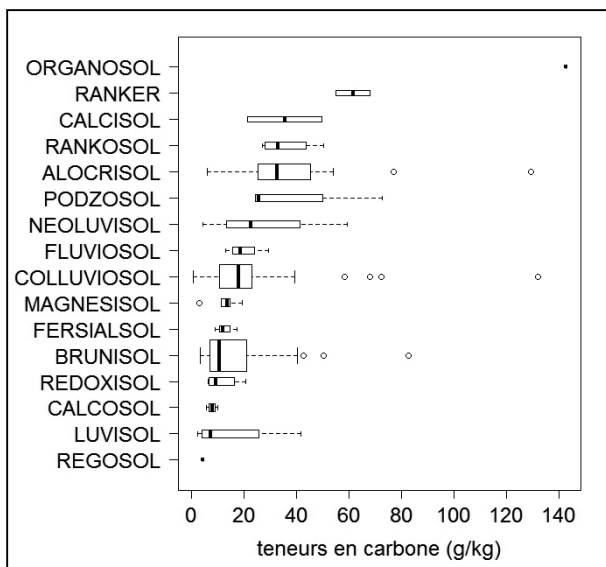
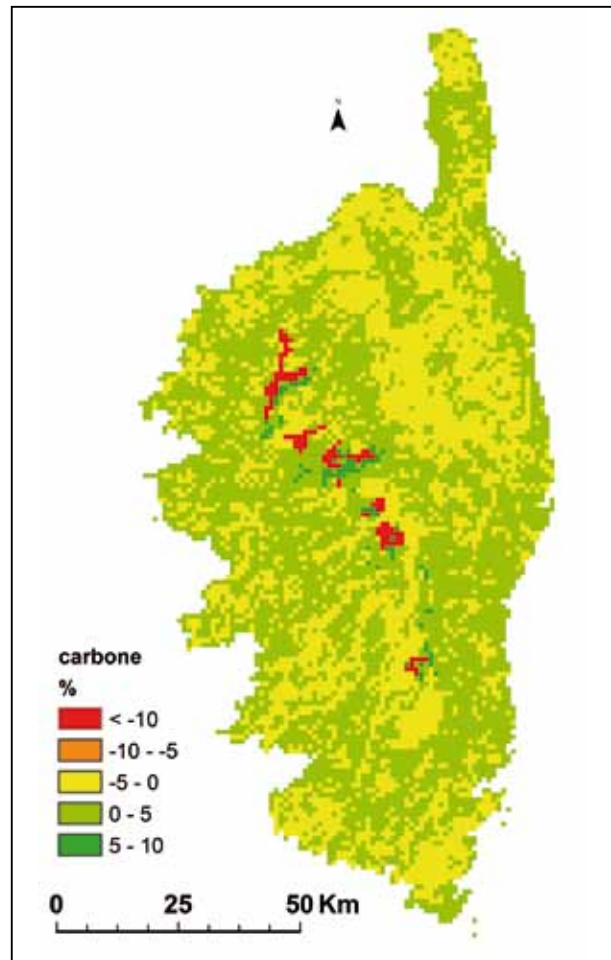


Figure 10 - Carte de la différence entre les valeurs de notre modèle (CBRT) et les valeurs de Jones et al. (2005) CJones. La valeur cartographiée correspond à CBRT - CJones.

Figure 10 - Map of the differences between the carbon content predicted by the BRT model (CBRT) the Jones et al. (2005) model CJones. The value corresponds to CBRT - CJones.



Les sols forestiers ou de prairie présentent les teneurs en carbone sur 0-30 cm les plus élevées (avec une médiane située aux alentours de 22 g.kg⁻¹). Les sols de vignes et vergers possèdent les teneurs les plus faibles (médiane de 6 g.kg⁻¹). Un test de Mann-Whitney révèle une différence significative entre les 2 groupes ($p < 0$).

Les relations entre l'altitude, l'occupation du sol et les teneurs en carbone

La *figure 6* présente le lien existant entre l'altitude, l'occupation du sol et les teneurs en carbone. Plus les sols se situent

à une altitude élevée et plus ils présentent de fortes teneurs en carbone. La plupart des sols ayant de faibles teneurs en carbone sont situés à des altitudes inférieures à 500 m.

Les sols présentant les plus faibles teneurs en carbone sur 0-30 cm et situés à moins de 500 m d'altitude se retrouvent dans tous les types d'occupation du sol et constituent l'essentiel des cultures permanentes. Inversement, les fortes teneurs en carbone sur 0-30 cm se trouvent sous forêt ou prairie et à haute altitude.

L'effet du type de sol

La *figure 7* montre les relations entre la teneur en argile, la teneur en carbone et les occupations du sol rencontrées en Corse. Dans les sols sous cultures permanentes le taux de carbone reste plus ou moins constant pour des teneurs en argile qui augmentent. Sous forêt et sous prairie, les teneurs en carbone augmentent avec la richesse en argile.

La répartition de la teneur en carbone est représentée ici par type de sol.

La distribution des teneurs en C organique en fonction des types de sol apparaît relativement cohérente. Ce résultat est conforté par Batjes (1996) qui montre globalement la même distribution en fonction des types de sols des teneurs en C organique sur 0-30 cm.

L'effet du climat

Les teneurs en carbone des sols de Corse sur 0-30 cm diminuent avec l'augmentation des températures. On constate sur la *figure 9* une augmentation des teneurs en carbone avec l'augmentation de la pluviométrie.

La comparaison avec les estimations réalisées à l'échelle européenne (Jones *et al.*, 2005) permet de visualiser les écarts entre les deux modèles (*figure 10*). On constate globalement un assez bon accord entre les deux cartes avec des écarts ne dépassant pas en moyenne -0,10 (avec un écart type de 2,87). Les écarts les plus importants se situent en altitude où le modèle BRT prédit des valeurs moins fortes que le modèle de Jones *et al.* (2005). Ceci peut s'expliquer par le fait que le modèle BRT sous-estime les valeurs supérieures à 100 g.kg⁻¹.

DISCUSSION

La répartition des teneurs en carbone sur 0-30 cm en Corse présente une allure similaire à celle observée sur la France entière. Toutefois, les teneurs en carbone apparaissent légèrement plus élevée en Corse (10 à 30 g.kg⁻¹) que sur la France entière. Ceci s'explique par la localisation des profils de Corse qui sur-représente les situations d'altitudes élevées (et non cultivées). A l'inverse, les gammes faibles de valeurs observées pour la Corse sont proportionnellement inférieures à celles observées sur la

France, ce qui s'explique probablement à la fois par des effets climatiques et par les occupations du sol les plus fréquentes à ces altitudes.

Le climat est un facteur important de la variabilité de la teneur en carbone (Martin *et al.*, 2011; Heimann et Reichstein, 2008; Sacks *et al.*, 2007). Dans notre modèle de prédiction, les précipitations représentent d'ailleurs le facteur le plus important. Elles sont de toute évidence liées à l'altitude et l'apparition de ce dernier facteur de contrôle en deuxième position peut paraître surprenante. Il est probable que ceci est à relier à la résolution différente de nos données d'entrée. L'interpolation des données de précipitation lisse inévitablement des effets altitudinaux, qui restent par contre évidemment présents sur un modèle numérique d'altitude.

L'occupation du sol n'intervient que très peu dans notre modèle d'estimation ce qui est également étonnant. Cependant, nous avons vu que l'occupation du sol influence grandement les teneurs en carbone. L'effet de l'occupation du sol se retrouve peut-être indirectement dans le facteur altitude. Le carbone présent dans les sols forestiers ou de prairie est caractérisé par un temps de résidence plus long que dans un sol de cultures (INRA, 2002). De plus, dans notre cas, les concentrations en carbone plus élevées sous forêt ou végétation sclérophylle témoignent probablement aussi de l'efficacité de la couverture végétale dans la prévention de l'érosion par le vent ou l'eau (FAO, 2002). Certaines teneurs élevées sous prairies sont également justifiées par la présence de prairies humides (pozzines), l'anoxie tendant à diminuer la minéralisation du carbone par un ralentissement de l'activité des micro-organismes responsables de l'oxydation des matières organiques (Vian *et al.*, 2009). Si dans notre modèle d'estimation, l'occupation du sol n'apparaît pas comme un facteur primordial, c'est très probablement qu'elle est très liée aux autres facteurs et par conséquent déjà prise en compte dans les autres variables. En effet, un lien entre l'occupation du sol et l'altitude est facilement mis en évidence. Les profils présentant les plus faibles teneurs en carbone sont situés à moins de 500 m d'altitude et se retrouvent sous tous types d'occupations mais avec l'essentiel des cultures permanentes. A l'inverse, la plupart des teneurs importantes en carbone sont situées en altitude sous forêts et prairies. Ces types d'occupations du sol (incluant les maquis et les garrigues) occupent le territoire de façon plus uniforme que les vignes et les vergers que l'on ne retrouve qu'à faible altitude.

Le climat et l'occupation du sol ne sont pas stables dans le temps. Or, les échantillons de sols ont été récoltés sur une période de temps assez longue (plus de 30 ans). Par conséquent, plusieurs sources d'erreurs peuvent avoir affecté la qualité de prédiction de notre modèle cartographique : les occupations ont pu changer au cours du temps, la teneur en carbone organique également.

Sous forêt et prairie, la granulométrie du sol influence la teneur en carbone alors qu'elle ne semble pas présenter

d'effet sous vignes et vergers. Il est connu que la stabilisation et le temps de résidence du carbone varient en fonction des teneurs en argile des sols (Arrouays *et al.*, 2002; 2006). Un sol argileux contient donc en général plus de carbone, à condition que les flux de carbone entrants et le climat le permettent. Sous vignes et vergers, il est possible que l'influence de la teneur en argile ne se manifeste pas en raison des faibles restitutions en carbone de cette culture ainsi que du climat plus chaud. A l'inverse, les forêts et les prairies, qui sont caractérisées par des flux de carbone entrants plus importants et par une gamme climatique plus large, montrent une influence des fractions fines du sol sur le potentiel de stabilisation du carbone. La répartition du carbone est d'ailleurs différente selon le type de sol. Cela confirme en partie le lien existant entre la teneur en argile et la teneur en carbone des sols. Certains sols à faibles teneurs en argile (LUVISOL par exemple) se caractérisent également par de faibles teneurs en carbone. D'autres facteurs semblent également contrôler la teneur en carbone : l'altitude pour les RANKOSOLS, probablement l'acidité pour les ALOCRISOLS et les PODZOSOLS, le régime hydrique pour les ORGANOSOLS...

La comparaison avec les estimations faites par Jones *et al.* (2005) semble donner des résultats cohérents, bien que les données et les modèles utilisés soient totalement différents. La légère surestimation relative de Jones *et al.* (2005) en altitude provient probablement du fait que l'effet de l'altitude a été calibré dans un cas sur l'Europe entière, alors qu'il l'a été localement pour notre estimation. Cette bonne cohérence est en contradiction apparente avec des comparaisons récentes réalisées à l'échelle nationale (Martin *et al.*, 2011) qui montrent que le modèle de Jones *et al.* (2005) surestime largement les stocks de carbone dans les sols de France. Il est probable que cette contradiction provient également de différences entre les jeux de données de calibration. Le modèle de Jones *et al.* (2005) est calibré sur l'ensemble de l'Europe, il a été construit pour refléter les très forts gradients et les contrastes importants qui existent entre des situations aussi différentes que les tourbes du nord de l'Europe et les sols de climat méditerranéen. En conséquence, il optimise la prédiction dans ces situations extrêmes (dont la Corse) mais il est inévitablement beaucoup plus bruité dans les situations intermédiaires où des effets de gestion des sols prennent le pas sur les effets climatiques.

CONCLUSION

La Corse présente un milieu modèle pour étudier la variabilité spatiale de la teneur en carbone et en déterminer le rôle des facteurs environnementaux dans un contexte méditerranéen et montagnard. Le climat apparaît ici comme le facteur le plus important car il contrôle à la fois la production primaire, les entrées de carbone associées et la vitesse de minéralisation des ma-

tières organiques. A l'inverse d'autres situations géographiques, le gradient climatique affecte ces deux processus dans le même sens vis-à-vis du stockage de carbone. Ces facteurs naturels ne peuvent pas être modifiés volontairement pour influencer le stockage du carbone. Il semble donc que le potentiel d'action dans ce milieu reste relativement limité à des actions très locales sur les occupations ou les usages des sols, ou sur les phénomènes d'érosion.

Le modèle d'estimation de la teneur en carbone réalisé a permis d'obtenir une carte de cette variable qui semble robuste et cohérente avec d'autres estimations. Ceci a été rendu possible grâce à l'existence de données de qualité en quantité suffisante issues du programme IGCS (Inventaire Gestion et Conservation des Sols). L'enrichissement de la base de données DoneSol, via les différents programmes de cartographie, permettra à terme d'étudier *a posteriori* une évolution temporelle de cette variable.

BIBLIOGRAPHIE

- Antoni V., Le Bissonnais Y., Thorette J., Zaidi N., Laroche B., Barthès S., Daroussin J., Arrouays D., 2006 - Modélisation de l'aléa érosif des sols en contexte méditerranéen à l'aide d'un Référentiel Régional Pédologique au 1/250 000 et confrontation aux enjeux locaux. *Etude et Gestion des Sols*.13, 3, pp. 201-222.
- Arrouays D., Deslais W., Badeau V., 2001 - The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. *Soil use and Management* 17, pp. 7 - 11.
- Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P., 2002 - Stocker du carbone dans les sols agricoles de France? - Expertise scientifique collective, INRA, 334 p.
- Arrouays D., Feller C., Jolivet C., Saby N., Andreux F., Bernoux M. et Cerri C., 2003a - Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps, *Etude et Gestion des Sols*, Volume 10, 4, pp 347-355.
- Arrouays D., Jolivet C., Boulonne L., Bodineau G., Saby N. et Grolleau E., 2003b - Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) de France. *Etude et Gestion des Sols*. 10, 4, pp. 241-250.
- Arrouays D., Saby N., Walter C., Lemerrier B., Schwartz C., 2006 - Relationships between particle-size distribution and organic carbon in French arable topsoils. *Soil Use and Management*. 22, 1, pp. 48-51.
- Batjes N.H., 1996 - Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47, pp. 151-163.
- Bellamy P.H., Loveland P.J., Bradley R.J., Lark R.M. et Kirk G.J.D., 2005. - Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* 437, pp. 245-248.
- Breiman L., Friedman H., Stone C.J. et Olshen R.A., 1984 - Classification and Regression Trees. Chapman & Hall. 358 p.
- Cerdan O., Mouchel J.-M., Desprats J.-F., Fouché J., Le Bissonnais Y., Cheviron B., Simonneaux V., Raclot D., Mouillot F., 2010 - Soil erosion modelling of the Mediterranean basin in the context of land use and climate changes. 8679-1 Geophysical Research Abstracts
- Cerri CC, Bernoux M, Arrouays D, Feigl B.J., Piccolo M.C., 2000 - Carbon stocks in soils of the Brazilian Amazon. Conference Information: Workshop on Carbon Pools and Dynamics in Tropical Ecosystems, dec 01-05, 1997 Belem, Brazil. In *Global Climate Change and Tropi-*

- cal Ecosystems. Book Series: Advances in Soil Science-boca Raton. pp. 33-50.
- Chiti T., Papale D., Smith P., Dalmonech D., Matteucci G., Yeluripati J., Rodeghiero M. et Valentini R., 2010 - Predicting changes in soil organic carbon in mediterranean and alpine forests during the Kyoto Protocol commitment periods using the CENTURY model. *Soil Use and Management*, 26, pp. 475-484.
- Eswaran H., Van Den Berg E., Reich P., 1993 - Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci Soc Am J* 57, pp. 192-194.
- FAO, 2002 - La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres, rapport sur les ressources en sols du monde, 59 p.
- Freund Y. et Schapire R.E., 1996 - Experiments with a New Boosting Algorithm. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Machine Learning*, pp. 148-156. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann.
- Grimm R., Behrens T., Marker M., et Elsenbeer H., 2008 - Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island - Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146, pp. 102-113.
- Grinand C., Rajaonarivo R., Bernoux M., Pajot V., Brossard M., Razafimbelo T., Albrecht A., 2009 - Estimation des stocks de carbone dans les sols de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, 16, pp. 23-33.
- Heimann M. et Reichstein M., 2008 - Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 451, pp. 289-292.
- IPCC, 2000 - Land use, land-use change, and forestry special report. Cambridge University Press 377 p.
- Jolivet C., Arrouays D., Boulonne L., Ratié C. et Saby N., 2006 - Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols de France (RMQS). Etat d'avancement et premiers résultats. *Etude et Gestion des Sols*, Vol. 13, 3, pp. 149-164.
- Jones R. J. A., Hiederer R., Rusco E., et Montanarella L., 2005 - Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. *European J. Soil Sci.*, 56, pp. 655-671.
- Kirkby M.J., Jones R.J.A., Irvine B., et al., 2004 - Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, Version 1 October 2003. Explanation of Special Publication Ispra, 2004 - No.73 (S.P.I.04.73). European Soil Bureau Research Report No.16. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Martin M. P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Boulonne L. et Arrouays D., 2011 - Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences*, 8, pp. 1053-1065.
- Meersmans J., van Wesemael B., De Ridder F., Van Molle M., 2009 - Modelling the three-dimensional spatial distribution of soil organic carbon (SOC) at the regional scale (Flanders, Belgium). *Geoderma (IF 2.5)*, 152, pp. 43-52.
- Meersmans J., Van Wesemael B., Goidts E., Van Molle M., De Baets S., et De Ridder F., 2011 - Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands, 1960 - 2006. *Global Change Biology*, 17, pp. 466-479.
- Paustian K., Levine E., Post W.M., Ryzhova I.M., 1997 - The use of models to integrate information and understanding of soil C at the regional scale. *Geoderma* 79, pp. 227-260.
- Plaza-Bonilla D., Cantero-Martínez C. et Álvaro-Fuentes J., 2010 - Tillage effects on soil aggregation and soil organic carbon profile distribution under Mediterranean semi-arid conditions. *Soil Use and Management*, 26, pp. 465-474.
- Post W.M., Emmanuel W.R., Zinke P.J., Stangenberger A.F., 1982 - Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 258, pp. 165-159.
- Saby N., Arrouays D., Antoni V., Lemerrier B., Follain S., Walter C. et Schvartz C., 2008 - Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990 - 2004. *Soil Use and Management*. 24, 3, pp. 254-262.
- Sacks W. J., Schimel D. S. et Monson R. K., 2007 - Coupling between carbon cycling and climate in a high elevation, subalpine forest: a model-data fusion analysis. *Oecologia* 151, no. 1, pp. 54-68.
- Schlesinger W.H., 1984 - Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In: *The changing carbon cycle, a global analysis*. Springer Verlag. New York, pp. 194-220.
- Smith P., Powlson D S., Glendenning A J. et Smith J U., 1998 - Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till farming. *Global Change Biology* 4, pp. 679-685.
- Vian J.F., Peigne J., Chaussod R. et Roger-Estrade J., 2009 - Effets du mode de travail du sol sur les microorganismes à l'échelle du profil cultural. *Etude et Gestion des Sols*, 16, 3/4, pp. 359-368.

