

Spatialisation des stocks d'éléments dans les sols

Outils actuels et potentialités : cas du carbone organique

Dominique Arrouays, Martial Bernoux, Claudy Jolivet

En position d'interface dans l'environnement, les sols jouent un rôle de premier plan dans les grands cycles biogéochimiques. En stockant ou en libérant des éléments, ils influent sur la qualité de l'air (rôle des sols en tant que puits ou source de carbone atmosphérique, lieu de dénitrification, etc.) et des eaux (nitrates, phosphates, pesticides, etc.). Les stocks d'éléments présents dans les sols sont également une composante de leur fertilité ; l'évolution à moyen et long terme de ces stocks est un indicateur à prendre en compte dans le jugement de la durabilité des agro-écosystèmes.

Les stocks d'éléments dans les sols sont en constante évolution sous l'effet de facteurs naturels (climat, végétation, effets de l'altération, de la lixiviation, et plus généralement de l'ensemble des processus pédogénétiques) et anthropiques (impacts locaux des utilisations des sols, effets diffus d'apports atmosphériques). De cette combinaison de facteurs résulte une forte variabilité spatiale de ces

stocks, et toute tentative de bilan global (ou de suivi de leur évolution) doit nécessairement prendre cette dimension en compte.

La nécessité de développer des outils de spatialisation en science du sol est d'autant plus forte que la population de sols, au sens statistique, est très faiblement échantillonnée. À titre d'exemple, le Brésil, qui couvre plus de 8,5 millions de kilomètres carrés, dispose d'une base de données comprenant 15 000 profils de sol, soit un taux d'échantillonnage de l'ordre de 1 pour 500.

Les concepts et les outils utilisés pour la spatialisation des caractères des sols ont progressé rapidement ces dernières années, avec la généralisation de l'emploi des systèmes d'information géographique, le développement des outils géostatistiques et des moyens de mesure, et les progrès dans la compréhension et la modélisation des processus. À partir de l'exemple du carbone organique des sols, nous illustrons cette évolution et nous soulignons l'intérêt et les limites de différentes techniques de spatialisation des stocks d'éléments dans les sols. Le plan utilisé suit la logique du traitement de l'information : les mesures locales et leur signification sont traitées dans les deux premiers paragraphes, les techniques spatiales de généralisation et d'estimation sont abordées ensuite ; enfin les deux derniers paragraphes traitent de l'analyse et de la compréhension des phénomènes et des processus mis en jeu, ainsi que de leur modélisation.

De la concentration au stock : le cas de la densité apparente

Pour réaliser un bilan des éléments dans les sols, le calcul des stocks (par rapport à une profondeur, ou par rapport à une masse minérale donnée) est indispensable. Quelle que soit la méthode d'analyse, toutes les mesures d'éléments dans les sols sont exprimées en concentration par rapport à un poids de terre sèche, généralement tamisée à 2 millimètres. Le calcul des stocks pour un volume donné (ou une profondeur donnée) doit donc faire intervenir la concentration, le pourcentage d'éléments grossiers (> 2 mm) pour lequel on peut appliquer un facteur de correction, ainsi que la densité apparente, nécessaire pour rapporter un stock d'éléments à un volume donné. Réciproquement, pour un prélèvement effectué sur un volume donné, la densité apparente permet de calculer la masse minérale de sol concerné et donc de raisonner des comparaisons chronoséquentielles ou de diverses situations. Malheureusement, sa mesure est souvent longue et peu aisée et, de ce fait, elle est peu renseignée dans les bases de données. La plupart des estimations de densité apparente ont été fondées sur l'hypothèse de la pertinence d'un découpage cartographique ou topologique vis-à-vis de ce caractère [1-4]. Les auteurs calculent alors une densité moyenne ou médiane, par type de sol ou

D. Arrouays, C. Jolivet : INRA, Unité de science du sol, Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France, 45160 Ardon, France.

M. Bernoux : CENA-USP, Biogeoquímica do Solo, Caixa Postal 96, 13400-970 Piracicaba-SP, Brésil.

Tirés à part : D. Arrouays

par type d'horizon, qu'ils appliquent à l'ensemble des plages cartographiques concernées. Les effets de la prise en compte des seules moyennes ou médianes influencent peu l'estimation des stocks et l'analyse de leur variabilité spatiale, dans la mesure où la variation de ce critère est relativement faible (le plus souvent compris entre 1 et 1,8), en comparaison de celle des concentrations pondérales en carbone. Toutefois, pour certains horizons (en particulier les horizons de surface généralement les plus riches en matière organique, certains horizons très argileux, ou bien des horizons enrichis en fer), les valeurs de densité peuvent être très éloignées de la valeur moyenne, dont l'utilisation provoque alors un biais considérable. C'est pourquoi beaucoup de travaux ont été entrepris pour construire des outils de prédiction de ce caractère à partir de données physiques ou chimiques plus facilement disponibles dans les bases de données. Ces outils sont généralement des équations prédictives (régressions simples ou multiples) appliquées à des unités de sol [5, 6] ou à des écosystèmes spécifiques [7-9].

De nombreux travaux ont montré un effet prépondérant de la teneur en carbone des sols sur leur densité [6-10], laquelle est négativement corrélée à la teneur en carbone. L'utilisation d'une valeur moyenne de densité aurait pour résultat une très forte surestimation des stocks des horizons très organiques. En travaillant sur une gamme texturale très étendue, on a pu montrer également l'influence de la composition granulométrique des sols sur la densité apparente [11]. La limite de la plupart de ces travaux réside dans la spécificité du milieu auquel ils s'appliquent. Les fonctions analysées ne sont souvent utilisables que dans un contexte pédologique donné, ce qui en réduit la portée générale et les possibilités d'application sur de vastes espaces. Quelques tentatives d'établissement de telles relations sur de grands écosystèmes ont néanmoins été réalisées. Pour un ensemble de sols tropicaux, Kiehl met en évidence une relation entre le taux d'argile et la densité apparente [12]. Plus récemment, en utilisant une base de données sur l'Amazonie brésilienne, Bernoux *et al.* ont développé de telles relations prédictives pour plusieurs horizons et plusieurs types de sol [13]. En théorie, si l'on dispose de l'épaisseur de l'ensemble des horizons, de leur teneur pondérale en un élément, et

d'une mesure ou d'une estimation de la densité apparente, il est alors possible de calculer des stocks par horizon et de les sommer sur des profondeurs données correspondant aux limites d'horizons. Le problème est plus complexe si l'on désire obtenir une évaluation du stock sur une profondeur quelconque ou si certains horizons présentent des données manquantes.

De la sommation des stocks à leur calcul sur une profondeur variable : les modèles de distribution verticale

Le découpage en horizons d'un profil de sol est classiquement réalisé pour traduire le gradient vertical discontinu de certaines propriétés. Il n'est pas obligatoirement le plus pertinent pour traduire des variations continues des caractéristiques du sol. En effet, ce découpage est fondé sur des observations de terrain qui ne sont pas nécessairement corrélées avec les profils de stocks en certains éléments. C'est le cas du carbone organique qui n'est pas toujours estimable pour certains horizons, qu'il peut être utile d'interpoler.

Des modèles mécanistes de la répartition verticale de certains éléments ont été élaborés. Pour le carbone organique par exemple, Elzein et Balesdent proposent un modèle qui combine des effets de diffusion verticale et de minéralisation [15]. Toutefois, ces modèles mécanistes nécessitent généralement de nombreuses variables d'entrée qui ne sont pas dispo-

nibles dans les bases de données. Face à ce constat, un certain nombre de travaux ont visé à développer des modèles simplifiés de distribution verticale faisant intervenir un faible nombre de paramètres, et pouvant être ajustés aux données disponibles. Bennema [16] propose un modèle de décroissance en profondeur du carbone dans les sols tropicaux selon une équation de type puissance. Ce modèle s'ajuste correctement aux données mesurées, mais présente l'inconvénient majeur de tendre vers l'infini au voisinage de la surface des sols, ce qui provoque une surestimation systématique des stocks à faible profondeur.

Plus récemment, un modèle d'amortissement exponentiel applicable à des sols forestiers du piémont pyrénéen a été développé [6]. Ce modèle comporte trois paramètres : la teneur à la surface du sol (C1) (soit à l'interface litière-sol), la teneur (C2) à une profondeur constante (à 1 m dans ce cas) et la courbure du profil (b) (figure 1). Ces deux modèles ont été testés sur une base de données constituée de plusieurs centaines de profils de l'Amazonie brésilienne [17]. Il en résulte que le modèle d'amortissement

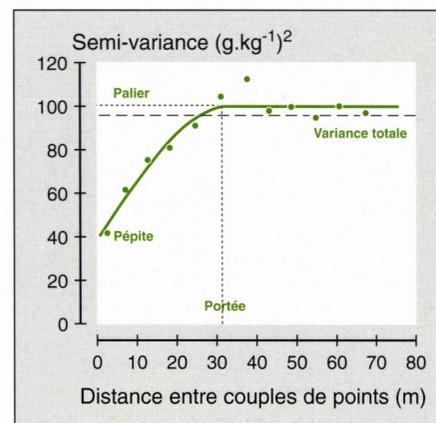


Figure 1. Exemple de semi-variogramme du carbone organique des sols (couche 0-30 cm) dans une parcelle forestière située sur des sols podzoliques des Landes de Gascogne (France). Les points figurent les valeurs expérimentales, le trait est le modèle sphérique ajusté. Les mesures deviennent spatialement indépendantes au-delà de 30 mètres de distance (portée). L'effet de pépite représente environ 40 % de la variance totale (C. Jolivet, travaux en cours).

Figure 1. Example of semi-variogram for organic carbon in the 0-30 cm layer of a forested plot on sandy spodosols of Gascony (France). Points are experimental values, line is the fitted spherical model. Measurements become spatially independent for distances between couple of points greater than 30 m (range). The nugget yields 40 % of the total variance.

Summary

Spatialisation of elements stored in soil Present tools and perspectives: the organic carbon case

D. Arrouays, M. Bernoux, C. Jolivet

Soils are of great importance for the global biogeochemical cycles because they can be sink or source of elements, and therefore change air, soil and water quality. Any tentative to access a global pool of one given element need to consider the spatial dimension. Moreover due to a generally small density of sampling, there is a need to develop new concepts and spatialisation tools. The carbon case is a perfect example to illustrate the pros and cons of the different procedures currently used in spatialisation. It is proposed to follow the steps (together with their associated problems and solutions), involved in the calculation of an estimate of organic carbon stored in soils. Two first sections deal with the available basic information, commonly selected observation points, and its signification. The third, fourth and fifth sections relate to spatial techniques of generalisation and estimation. At last, the two final sections present the analyse and the comprehension of the determinants implicated and their modeling.

At the profile plot level, carbon stocks calculation down to a fixed depth (traditionally one meter) need soil carbon content and soil bulk density for whole concerned horizons. However, soil bulk density data, and carbon content data for several horizons may be lacking, thus requiring to be estimated. Most authors estimate soil bulk density with multiple regression procedures using other available information. The problem of lacking soil carbon data could be resolved by modelling soil carbon distribution with depth, using simple equations based on few parameters which can in their turn be spatially studied. Mechanistic models could also be used, but they are data consuming for their calibration, and of limited use for large areas.

The map based methods (maps of soil or vegetation) are the simplest to be implemented, and gave the first estimates of regional and world carbon stocks. But, unfortunately, they do not take into account the spatial variability inside each taxonomic unit of the map. Recently, new spatial procedures of statistics, called geostatistics, were developed and adapted to soil properties. The geostatistical approach is based on a preliminary study of the spatial autocorrelation of measured values with their distance of separation. The semi-variogram (Figure 1) has three characteristics values (nugget effect, sill and range) which are used into the interpolation procedure (kriging). Geostatistical studies of soil organic carbon remain scarce and mainly at the field scale. For instance, a recent study in the French region of Gascony showed high variation in a one hectare plot (Figure 2). At regional scale in Brazilian Amazon, a classical geostatistical approach was combined with a simple exponential model of carbon vertical variation with depth, using three parameters. The semi-variogram analysis and the kriging interpolation were based on these parameters (Figure 3), and raised the problem of identifying the determinants of the carbon distribution.

Remote sensing techniques can also improve the estimation and the understanding of carbon in soils, at local or regional scale, furnishing a continuous information. Such information could be analysed having in mind the objective of identifying possible parameters of control, such those of the CLORPT (CLimate, Organisms, Relief, Parent material, Time) model or those deriving of digital model of elevation. This case is illustrated with an example of a geographical model of carbon stocks on ancient terraces of Pyrenean streams (Figure 4).

The prediction of evolution of the punctual carbon situation can be done using mechanistic models (e.g. Roth-C or Century). When combined with simple pedotransfer functions, these models represent the most promising approach to predict spatial evolution or to analyze the effect of the different control factors.

Finally it must be stressed that all scientific concepts and techniques used nowadays are in constant and rapid evolution. They may fill the need to have more precise and explainable estimates of carbon stocks, or of other elements, in soils.

Cahiers Agricultures 1998 ; 7 : 347-56.

exponentiel est applicable aux sols forestiers tropicaux, montrant ainsi une certaine généralité. Il convient toutefois de préciser que ce type de modèle ne peut en aucun cas s'appliquer à des sols présentant en profondeur des horizons d'accumulation de carbone (podzols par exemple). Les intérêts de ce modèle sont multiples : par intégration il devient possible de calculer un stock sur n'importe quelle profondeur ; par interpolation verticale on peut reconstituer des stocks en cas de données manquantes sur certains horizons intermédiaires ; enfin, les paramètres C1, C2 et b de ce modèle présentent tous une signification quant à la dynamique du carbone dans les sols et peuvent donner lieu à des études séparées, par exemple de type géostatistique. Lorsque le calcul ponctuel des stocks – associé ou non à une modélisation de leur distribution verticale – est réalisé, la phase suivante consiste en une spatialisation. Les premiers travaux en ce sens ont tout naturellement tenté de valoriser les connaissances pédologiques issues des programmes de cartographie des sols.

De la cartographie conventionnelle des sols aux bases de données

La carte est l'expression la plus courante pour rendre compte de la variabilité géographique des sols. Classiquement, celle-ci résulte d'un découpage en unités cartographiques jugées « homogènes » selon certains critères. La nature et la hiérarchie de ces critères varient considérablement d'une carte à l'autre en fonction de leur objectif, de leur échelle, du type de milieu étudié, voire de l'efficacité du cartographe. De plus, aux moyennes et petites échelles (c'est-à-dire sur de grandes superficies), la carte est un modèle explicatif global de l'organisation des sols dans le paysage. Elle n'est donc pas nécessairement pertinente vis-à-vis de la répartition ou des valeurs moyennes d'un élément particulier. Cette démarche fait toutefois instinctivement l'hypothèse que cette stratification du milieu en permet une bonne description spatiale, en définissant des zones dont la variabilité interne de l'ensemble des caractères est généralement plus réduite que sur

l'ensemble du territoire étudié. Au demeurant, le stockage des informations descriptives et analytiques ponctuelles au sein de bases de données facilite l'accès à une estimation quantitative de la variabilité des caractères des sols au sein des unités cartographiques. Partant de ce principe, de nombreux auteurs ont utilisé ces informations cartographiques et ces bases de données pour produire des estimations de stocks de carbone organique dans les sols [1-4]. La plupart de ces travaux utilisent des moyennes calculées par type de sol ou par plage cartographique pour estimer les stocks présents sur une profondeur de sol donnée (généralement le premier mètre). Ces stocks sont fournis avec une incertitude qui résulte de calculs statistiques simples. L'utilisation de la médiane au lieu de la moyenne offre l'avantage de limiter le poids des valeurs extrêmes dans le calcul. En général, elle réduit légèrement les estimations et leur intervalle de confiance [18, 19].

Le principal avantage de cette technique est la facilité et la rapidité de sa mise en œuvre ; elle a permis de réaliser les premières estimations des stocks mondiaux de carbone organique dans les sols, variant de moins de 1 400 Pg [1] à plus de 1 600 Pg [4, 18]. Cette procédure simple a fourni efficacement des premières références spatialisées dans de nombreuses régions du monde. La méthode présente néanmoins des inconvénients liés à l'hypothèse sous-jacente à cet exercice. En effet, on suppose – explicitement ou non – que le découpage cartographique, fondé ou non sur une taxonomie, est pertinent vis-à-vis de la variable d'intérêt, et l'on ne vérifie que très rarement cette hypothèse. Ainsi par exemple, le recours à un découpage taxonomique pour caractériser les stocks de carbone organique des sols semble pertinent pour certains types de sol où la dynamique des matières organiques est caractéristique (tourbes, podzols, chernozems, rankers, etc.), mais est relativement peu discriminant pour d'autres cas : existe-t-il un profil de carbone spécifique des sols lessivés ou des sols ferralitiques ?

En général, on ne possède pas l'information sur la distribution spatiale de la variable d'intérêt au sein même des unités cartographiques. En distinguant des plages cartographiques de même définition selon un gradient latitudinal, il a été montré que les latosols de l'Amazonie brésilienne ont, selon ce gradient, des

stocks de carbone sensiblement différents [19, 20]. Sur une unité de pédopaysage beaucoup plus réduite du piémont pyrénéen, des gradients allant du simple au quadruple en fonction du climat et de la texture des sols ont été mis en évidence [21].

L'enrichissement continu des bases de données laisse cependant espérer des améliorations constantes des estimations, une réduction des intervalles de confiance et des possibilités d'analyse de la variabilité intra-unité cartographique. Ceci suppose néanmoins que la mise à jour par de nouvelles données puisse être compatible avec les données antérieures car les changements de techniques d'analyse sont susceptibles d'introduire une dérive dans les résultats. Cette question rend indispensable la réalisation d'études méthodologiques permettant la comparaison de résultats obtenus par des techniques différentes. Ainsi, pour le carbone organique, de nombreux travaux ont été réalisés pour comparer différentes méthodes d'estimation [22-24]. Outre les connaissances chimiques et pédologiques apportées par ces travaux, la connaissance des facteurs de conversion entre les différentes méthodes permet l'harmonisation des résultats et leur exploitation au sein des banques de données. L'exploitation des données de base ponctuelles géoréférencées permet alors d'accéder de façon continue à la structure spatiale des caractères du sol, grâce à des techniques appropriées, parmi lesquelles les outils géostatistiques sont actuellement les plus utilisés.

Des données ponctuelles à l'interpolation : apports de la géostatistique

La géostatistique est fondée sur l'application de la théorie des variables régionalisées [25]. Elle fut à l'origine développée pour des applications minières, et part d'une constatation empirique banale : toute teneur en élément (et plus généralement, toute variable se déployant dans l'espace) présente un caractère à la fois chaotique (fluctuation à petite échelle) et structuré (zones plus riches que d'autres

par exemple). Ses applications en science du sol et en écologie se sont considérablement développées depuis les dernières décennies [26, 27]. La géostatistique fournit des outils statistiques pour décrire la structure spatiale d'une variable dans l'espace géographique. Le calcul des semi-variogrammes permet d'étudier la dépendance spatiale entre les différentes réalisations d'une variable spatialisée. Le semi-variogramme est une courbe qui décrit l'autocorrélation spatiale pour une variable aléatoire mesurée sur un jeu de points géoréférencés. Il s'agit d'un modèle statistique de dépendance spatiale [27] qui montre l'évolution de la semi-variance entre les points de mesure, lorsque la distance qui les sépare augmente.

Le semi-variogramme (*figure 1*) présente généralement trois caractéristiques : la pépité, la portée et le palier :

- la pépité, lorsqu'elle existe, est la valeur non nulle de semi-variance à l'origine. La valeur de semi-variance est en théorie nulle lorsque deux points sont confondus. Si la semi-variance tend vers une valeur non nulle lorsque la distance entre les couples de points tend vers zéro, cette valeur est appelée « effet de pépité » : elle est due soit à une variabilité opératoire, soit à une microvariabilité d'échelle inférieure au plus petit pas d'échantillonnage ;
- le palier, lorsqu'il existe, est la valeur de semi-variance au-delà de laquelle celle-ci tend vers une asymptote ;
- la distance à partir de laquelle le modèle atteint le palier est appelée la portée : elle représente la distance moyenne maximale en deçà de laquelle deux échantillons sont corrélés.

Après avoir modélisé le semi-variogramme, le modèle ajusté peut être utilisé dans une procédure de « krigeage » afin d'estimer des valeurs en des points ou sur des surfaces non mesurées. Sous le nom de « krigeage » sont regroupées différentes techniques d'estimation qui sont toutes des méthodes d'interpolation pour estimer des valeurs sur une grille régulière à partir de données ponctuelles espacées régulièrement ou non. Cette méthode n'est certainement pas la plus facile à mettre en œuvre et d'autres plus simples existent, comme par exemple la méthode de pondération par l'inverse de la distance : elle consiste en une pondération des valeurs voisines qui servent à l'estimation selon un poids qui varie inversement à une puissance de la distance d'éloignement (pondération en $1/d^n$), selon la formule :

$$\text{valeur estimée} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\text{voisin}_i}{(d_i)^a} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(d_i)^a} \right]}$$

où voisin_i est une valeur voisine séparée par la distance d_i de la valeur estimée, et n le nombre de voisins pris en compte. Cette méthode soulève le problème du choix du paramètre a , qui est purement empirique. L'approche géostatistique évite de tels problèmes, puisqu'elle débute par une analyse variographique des données ponctuelles qui permet de déterminer les paramètres à prendre en compte dans les algorithmes d'interpolation du « krigage ». Outre le fait que la variabilité propre aux données est intégrée à la procédure d'estimation, le « krigage » est une technique exacte au sens où, pour tout point échantillonné, la valeur estimée est exactement celle mesurée. De plus, fournissant une indication sur l'erreur associée à chaque valeur estimée, il permet d'établir, conjointement à la carte des valeurs, celle des erreurs d'estimation. Cette technique est fréquemment utilisée en science du sol pour pro-

duire des cartes de caractères ou de propriétés des sols (propriétés hydriques, teneurs en métaux, profondeur d'occurrence d'un horizon, etc.). Les exemples appliqués au carbone organique restent relativement rares et très fréquemment réservés à des études de la variabilité sur de très courtes distances.

Dans les Landes de Gascogne, des études en cours montrent des étendues de teneurs en carbone organique allant du simple au quintuple sur des parcelles de 1 hectare (figure 2). Les études sur de vastes espaces sont beaucoup plus rares. Très récemment, une analyse géostatistique des stocks de carbone organique des sols du Rondônia (334 000 km², Amazonie brésilienne) a été réalisée [20]. Ils montrent que les estimations globales des stocks par cette technique restent voisines de celles réalisées précédemment par le traitement classique de bases de données. Mais l'avantage des techniques géostatistiques est de réduire nettement la fourchette d'estimation de ces stocks, et d'associer à la carte de prédiction une carte des erreurs. L'analyse spatiale des paramètres du modèle exponentiel de répartition verticale décrit plus haut met en évidence des gradients insoupçonnés,

en particulier dans la structure du paramètre C1 qui traduit la teneur à l'interface litière-sol (cf. paragraphe De la sommation des stocks à leur calcul sur une profondeur variable). La mise en évidence de ces gradients pose la question de leurs déterminants et débouche ainsi sur de nouvelles recherches à propos des facteurs contrôlant la dynamique du carbone dans ces sols (figure 3).

Enfin, une autre possibilité est de combiner les approches géostatistiques en utilisant les relations entre la variable d'intérêt (carbone) et des paramètres disponibles en un plus grand nombre de points de l'espace (par exemple, des données sur le relief extraites d'un modèle numérique de terrain, des données sur la végétation ou sur la réponse spectrale des sols obtenues par télédétection). Le récent développement des capteurs satellitaires et des modèles numériques de terrain offre ainsi des jeux de données quasi continues qui, *via* des techniques appropriées (co-krigage, dérive externe, etc.), peuvent améliorer les résultats des interpolations géostatistiques.

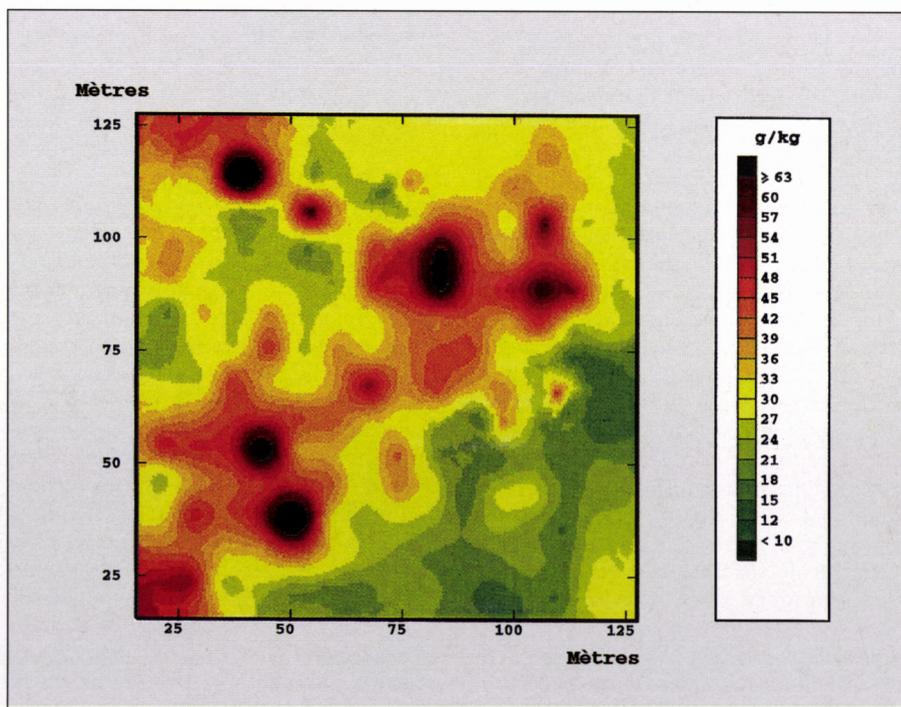


Figure 2. Exemple de carte des teneurs en carbone organique sur une parcelle d'un hectare dans les sols des Landes de Gascogne (France) (C. Jolivet, travaux en cours).

Figure 2. Example of an organic carbon concentration map on a one hectare plot in Gascony (France).

D'un comportement observable en continu aux stocks d'éléments : les capteurs

La plupart des capteurs opérationnels utilisent les propriétés des ondes électromagnétiques, émises, réfléchies ou diffusées par les surfaces observées. Certaines longueurs d'onde sont utilisées pour obtenir une mesure directe de caractères permanents ou conjoncturels du sol (carbone, humidité, teneur en calcaire, rugosité, etc.). D'autres longueurs d'onde, ou certains indices dérivés de la réponse des surfaces, permettent d'avoir accès à des informations sur la végétation (indice de végétation, évaluation de la biomasse végétale). Ces capteurs peuvent être utilisés à différentes échelles d'acquisition.

Les systèmes embarqués sur satellite permettent des mesures sur de vastes espaces, mais sont encore limités aux plans de leur résolution, soit spectrale, soit spatiale. Ils sont cependant utilisés pour obtenir soit des mesures directes des caractères des sols, soit des mesures

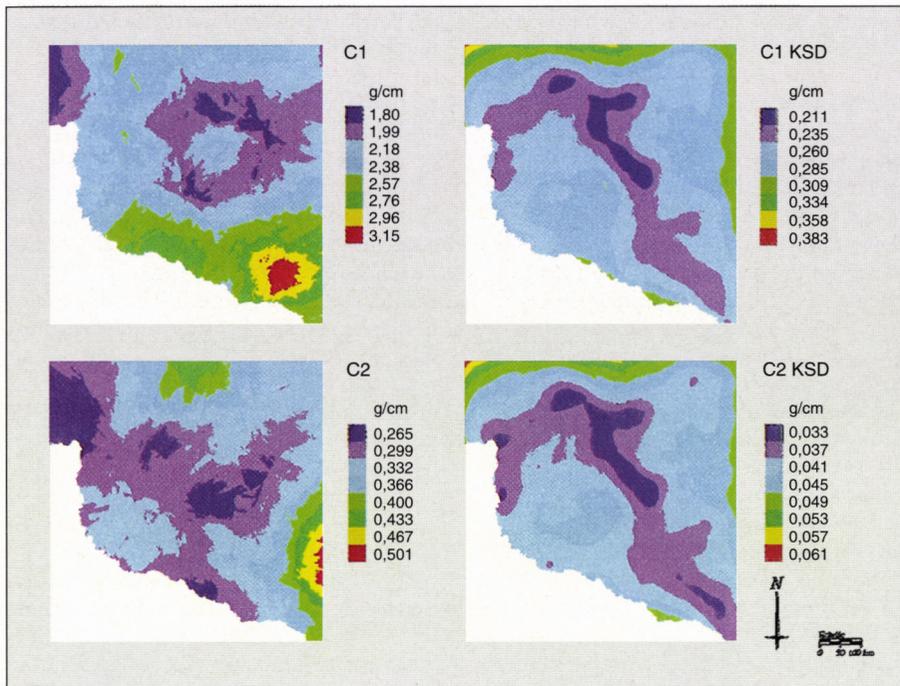


Figure 3. Structure spatiale des stocks de carbone organique des sols en Rondônia (d'après Bernoux *et al.* [20]). Les cartes obtenues par combinaison d'un modèle vertical de la distribution du carbone et des techniques de krigeage montrent la répartition géographique des stocks de C à la surface du sol (C1) et en profondeur (C2), ainsi que les erreurs respectives associées (C1 KSD et C2 KSD).

Figure 3. Spatial structure of C stocks in soils of Rondônia. Maps are derived from kriging the parameters of a model of the vertical distribution of carbon. They show the distribution of C stocks at the surface of soils (C1) and in deep horizons (C2) and associated errors (C1 KSD et C2 KSD).

de biomasse qui peuvent ensuite être utilisées dans des modèles. Ainsi, depuis le lancement du premier satellite d'observation de la terre Landsat, de nombreux efforts de recherche ont visé à mettre en relation la réponse spectrale des sols, principalement des sols nus, avec leurs caractéristiques physiques ou chimiques [28].

Le développement de capteurs portables, ou susceptibles d'être embarqués sur divers engins (avions, drones, ballons, tracteurs) s'est également accéléré, principalement aux États-Unis, en relation avec la problématique de l'agriculture de précision. L'objectif est d'obtenir des mesures directes des caractères du sol, *via* des capteurs proches de ce dernier, et permettre une cartographie détaillée grâce à la forte résolution spatiale. De nombreux travaux montrent les très fortes potentialités de ces capteurs (principalement ceux fonctionnant dans le spectre visible et infra-rouge) pour des cartographies très détaillées de certains paramètres du sol, dont la matière organique [29]. Ces applications nécessitent toutefois un calibrage analytique mini-

mal, qui est à reconduire lorsque l'on change de type de sol, voire lorsque les conditions de surface (humidité, rugosité) évoluent.

Sur de plus vastes espaces, les applications des données satellitaires concernant les stocks de carbone des sols sont plus rares. En France, la réponse spectrale dans les canaux du satellite Thematic Mapper a été utilisée pour discriminer des sols sur la base d'un seuil de teneur en carbone organique [30]. Cette application reste toutefois limitée à une unité de pédopaysage particulière et ne saurait être extrapolée à d'autres écosystèmes. L'avantage principal du recours à ces techniques est de disposer, pour un coût relativement faible, d'une information « continue » sur la surface du sol. Les inconvénients sont nombreux : les modèles développés restent souvent peu explicatifs et en tout état de cause peu reproductibles. La réponse spectrale des sols dépend de nombreux paramètres dont certains sont hautement conjoncturels (humidité, rugosité). Les règles que l'on peut établir sont fréquemment valables pour une acquisition donnée et

sont limitées à des unités de surface homogènes à certains points de vue et donc réduites en étendue.

L'intérêt de la cartographie et du suivi temporel de la végétation par ces techniques est également exploité. Certains auteurs utilisent directement des cartes de végétation tirées d'images satellitaires comme outils d'extrapolation des stocks de C dans la biomasse végétale, mais aussi dans les sols [31, 32]. Le suivi des changements d'occupation permet également d'évaluer ou de simuler des changements dans les stocks consécutifs aux usages. Un bilan complet des flux de carbone d'un secteur de l'Amazonie soumis au défrichement pour le pâturage bovin extensif a ainsi été réalisé [33].

La prédiction des stocks d'éléments : de la pédologie quantitative de Jenny au « Clorpt model » et au MNT

En 1941, Jenny [34] fonde sa démarche de pédologie quantitative sur le fait qu'un sol (X) (ou une propriété du sol) peut se définir comme : $X = f(CL, O, R, P, T)$, avec CL = *CLimate*, O = *Organisms*, R = *Relief*, P = *Parent material*, T = *Time*. Ceci est à l'origine du modèle « Clorpt » largement utilisé par la communauté scientifique, bien que l'on ne connaisse pas l'auteur de sa première utilisation (McBratney, communication personnelle). Son expression signifie que l'ensemble des caractères observables du sol dépend uniquement de l'action des cinq grands facteurs de la pédogenèse. Cette approche a connu un regain d'intérêt ces dernières décennies avec le développement des bases de données, des techniques d'interpolation climatiques et des modèles numériques de terrain, permettant l'obtention de données en tout point de l'espace. Partant de ce principe, bon nombre de travaux visent actuellement à développer des relations directes entre l'expression de certains de ces facteurs (cartes climatiques et modèles numériques de terrain par exemple) et les stocks de carbone observés dans les sols.

L'hypothèse sous-jacente à cette approche est que les stocks de carbone ne sont pas répartis aléatoirement, mais qu'ils dépendent d'un certain nombre de déterminants qui présentent des structures spatiales. Ainsi, une façon de réaliser une analyse spatiale de ces stocks est de quantifier l'effet de ces facteurs, puis de réaliser une analyse spatiale de ces déterminants. Cette approche suppose généralement la construction d'un échantillonnage raisonné, prenant en compte la diversité des situations et cherchant à séparer l'influence de divers gradients. La plupart des travaux se fondent sur des régressions ou des règles reliant les paramètres de contrôle aux stocks ou aux teneurs observées. Ces approches issues des conceptions de Jenny [34] permettent généralement une bonne appréhension du poids des différents facteurs de contrôle du stock de carbone des sols. Il s'agit en fait d'une approche pédogénétique très classique, mais « revisitée » au travers d'outils quantitatifs à des fins appliquées. Nous présentons, ci-après, des exemples concernant la quantification des effets du climat, puis du relief, sur les stocks de carbone.

En raisonnant l'échantillonnage selon de forts gradients climatiques, différents auteurs ont ainsi montré l'influence du climat sur le stockage en carbone dans les sols ainsi que sur l'importance des liaisons organo-minérales : par exemple, selon un gradient allant du Chaco à la Pampa argentine [35] ou en sélectionnant 21 sites de prairies selon un gradient de température et de précipitations allant du Canada au sud du Texas [36]. Ces deux travaux ont nécessité de prendre en compte à la fois les précipitations et les températures annuelles pour expliquer le stockage du carbone. Des travaux similaires ont été menés en Australie. Ces climato-séquences peuvent être aussi utilisées [35] pour prédire les effets de changements climatiques futurs. Le développement des applications des modèles numériques de terrain (MNT) en science du sol [37] a permis une approche quantitative des effets du relief sur la pédogenèse. En utilisant des caractères dérivés de ces modèles (pentes, concavités, exposition, etc.), des indices traduisant des fonctionnements hydriques (*wetness index*, indice de Kirkby), ou des classifications des positions topographiques, différents auteurs ont relié les paramètres du relief à la morphologie des sols ou à leurs stocks en certains éléments, en particulier le carbone [37-39], puis utilisé les MNT comme outil d'extrapolation ou d'interpolation spatiale.

Sur les terrasses anciennes des Gaves pyrénéens, on observe que, si à l'échelle régionale les stocks de carbone sont liés aux teneurs en argile et au climat [21], à une échelle plus locale, le principal déterminant sous végétation naturelle, est la pente [39] (figure 4). En revanche, lors de la mise en culture, c'est l'ancienneté de la monoculture de maïs qui détermine la cinétique d'évolution des stocks [40]. En classifiant des formes du relief, l'effet de ces dernières sur les stocks de carbone de certains sols du Canada a été mis en évidence [41]. Sur le Sumatra, Van Noordwijk *et al.* [42] établissent des régressions multiples entre le carbone organique des sols et certains de leurs caractères intrinsèques (pH et texture) et extrinsèques (altitude et pente).

La multiplication des sources de MNT (numérisation de cartes topographiques, *Global Positioning System*, Images satellitaires stéréoscopiques) et l'amélioration de leur précision laissent espérer un avenir prometteur pour ce type d'application. Bien que peu d'exemples existent à ce jour pour le carbone, on peut également envisager de coupler des informations issues de MNT avec d'autres informations spatiales (télédétection par exemple) ou

avec des techniques d'analyse et d'interpolation géostatistiques : Bourennane *et al.* [43] optimisent ainsi la prédiction spatiale de l'épaisseur du sol en Beauce.

Un avantage est que ces résultats peuvent être obtenus sur des jeux d'échantillons relativement réduits, à la condition de raisonner très rigoureusement leur disposition géographique. Dans une science où l'une des principales contraintes est la faiblesse de l'échantillonnage statistique par rapport à la population, ceci constitue un atout majeur. Ces méthodes ne sont toutefois pas mécanistes et les régressions établies restent parfois peu explicatives. Elles ne s'appliquent qu'aux situations étudiées dans le jeu initial de données : il est par exemple difficile de prévoir correctement les effets d'un changement d'occupation du sol ou d'un changement climatique à partir d'une telle technique. Un autre inconvénient est lié aux corrélations internes à l'objet sol : un gradient climatique est par exemple susceptible de générer, sur la durée de la pédogenèse, un autre gradient, teneur en argile par exemple [35]. Il devient alors difficile, lorsque l'on observe une éventuelle structure spatiale du carbone organique, de

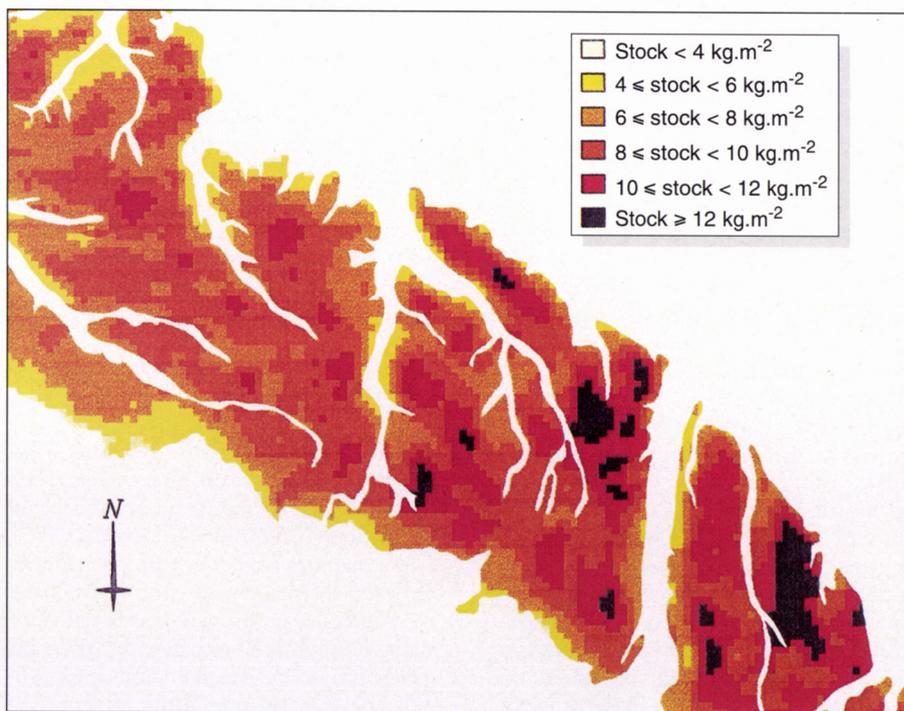


Figure 4. Exemple de modèle de répartition des stocks de carbone des sols développés sur les terrasses anciennes des Gaves pyrénéens (d'après Arrouays *et al.* [39]).

Figure 4. An example of a geographical model of carbon stocks on ancient terraces of Pyrenean streams.

démêler les effets du climat (sur la production primaire nette ou sur la minéralisation) de ceux de la fraction argile (sur la stabilisation). Une des voies possibles pour résoudre ce type de problème passe par la modélisation mécaniste.

De l'évaluation instantanée des stocks à la prédiction de leur évolution : les modèles mécanistes

La plupart des modèles mécanistes de la dynamique du carbone répartissent le carbone du sol en compartiments fonctionnels de durées de vie différentes. Le *Global Change and Terrestrial Ecosystems Soil Organic Matter Network* (GCTE-Somnet) recense 34 modèles. Les modèles les plus fréquemment utilisés sont ceux initialement conçus par Jenkinson et Rayner (RothC) et par Parton *et al.* (Century) [44, 45]. Ces modèles partent généralement de la production primaire nette, ou d'un intrant carboné « externe », qu'ils répartissent en différents compartiments selon sa nature. Ces compartiments sont affectés à la fois par une vitesse de minéralisation, et par des matrices de ré-allocation dans d'autres compartiments à chaque pas de temps. Les différents paramètres des modèles (vitesses de minéralisation, coefficients des matrices d'allocation) peuvent être modifiés par des lois d'action de facteurs externes ou internes au sol (par exemple, température, teneur en eau du sol, teneur en argile, nature des apports organiques, teneur en azote, intensité du travail du sol). Ils sont le plus souvent calibrés sur des sites ponctuels où toutes les données d'entrées sont disponibles. Cet ajustement fait souvent appel à des techniques relativement élaborées afin de quantifier les compartiments fonctionnels et leur durée de vie : fractionnements granulométriques [46], utilisation de l'isotope naturel ^{13}C du carbone [47-48], utilisation de marquages *in situ* (^{15}N , etc.), et/ou analyses de cinétiques à court terme en laboratoire. Du fait de la complexité de leurs données d'entrée, ces

modèles ont jusqu'à présent fait surtout l'objet de validations ponctuelles sur des sites de longue durée [49]. Peu d'évaluations sur des dynamiques à court terme existent, et très peu d'applications géographiques ont été réalisées (à l'exception notable de Parton *et al.* [45]). Les principales limites à leur utilisation spatiale sont la faible disponibilité spatiale des données d'entrée (valeurs initiales des compartiments, lois d'action des facteurs) qu'ils nécessitent et le faible nombre de sites susceptibles de permettre leur ajustement dans différentes situations.

Face à ce constat, plusieurs stratégies sont actuellement en cours de développement :

- développer des fonctions de pédotransfert et des outils d'interpolation permettant une estimation des données d'entrée (en d'autres termes on ne spatialise plus directement les stocks de carbone, mais on le fait au travers des entrées et les lois d'action des facteurs) ;

- développer des modèles simplifiés faisant appel à un nombre plus restreint de données d'entrée. Ce type de modèles simplifiés a été largement utilisé pour réaliser des bilans régionaux ou nationaux du potentiel de stockage en carbone dans les sols. Paustian *et al.* [32] ont récemment réalisé une revue de ce type de travaux menés à des échelles très globales.

Ces modèles semblent être actuellement la seule voie envisageable pour prédire spatialement des évolutions futures ou pour réaliser des analyses de sensibilité de l'effet de différents facteurs de contrôle. En ce sens, leur développement et leur ajustement sont des étapes cruciales pour évoluer vers une approche qui soit à la fois explicative et prédictive.

Conclusion

Les différentes techniques que nous avons passées en revue doivent être examinées dans un contexte technique et scientifique qui évolue rapidement.

Sur le plan des techniques, on peut supposer que l'enrichissement continu des bases de données se poursuivra dans les années à venir. De nombreuses bases sont en cours d'élaboration, ou d'exploitation opérationnelle (FAO, Europe, Inde, Brésil...) à diverses échelles. Les capteurs disponibles sont également de plus en plus précis tant sur le plan de la résolution spatiale (ex. : satellite Indien) que spectrale (AVHRR, spectroradiomètres de terrain). Le dévelop-

pement des modèles numériques de terrain et de leurs outils de traitement est actuellement en phase ascendante. Les outils géostatistiques sont de plus en plus perfectionnés et accessibles, les moyens de calculs sont de moins en moins limitants.

Sur le plan des connaissances scientifiques, la connaissance de la dynamique de l'élément « carbone », au travers de la mise en évidence de compartiments fonctionnels et de l'effet des facteurs externes ou internes sur leurs durées de vie, est en constante progression.

Si l'objectif immédiat est l'amélioration de la prédiction spatiale à un instant donné, présent ou passé, la combinaison de certaines de ces techniques devrait permettre des progrès sensibles : la combinaison des approches géostatistiques et des découpages cartographiques « conventionnels » a déjà montré des potentialités pour la prédiction de certains caractères du sol [50]. Le test sur les stocks de carbone reste à effectuer. La combinaison d'approches fondées, d'une part, sur des relations entre paramètres quantifiables du milieu et variables observées (Clorpt model) et, d'autre part, sur la géostatistique pourrait ouvrir des voies intéressantes (par exemple, utiliser la géostatistique pour interpoler les variables explicatives d'un « Clorpt model », ou appliquer un « Clorpt model » puis examiner la structure spatiale des résidus en utilisant la géostatistique). Les combinaisons des différentes sources d'information spatiale (télé-détection, MNT, données mesurées ponctuelles, autres supports cartographiques) et des techniques d'interpolation (régression, « krigage », « co-krigage », techniques dérivées de l'analyse d'image, moyennes pondérées par des distances) sont des voies prometteuses [43] qui restent en grande partie à explorer.

Si l'objectif est de prédire une évolution future, le recours à des modèles plus mécanistes s'impose. Dans certains cas particuliers, ceux-ci peuvent avoir une formulation très simple (par exemple, les modèles exponentiels dérivés de l'étude de l'effet de certains changements de végétation au travers de l'analyse de l'abondance en isotope ^{13}C du carbone [40, 48]). En revanche, l'utilisation de modèles applicables *a priori* en tout point de l'espace, pour toute végétation et tout climat, se heurte à la faible disponibilité des données nécessaires à l'ajustement et à l'application de ces modèles. C'est pourtant là l'une des voies les plus prometteuses sur le plan tant scientifique qu'appliqué. Grâce à la combinaison entre l'effort de stockage et d'harmonisation dans les bases de données, les progrès des techniques

d'interpolation faisant appel à des données externes, et la formalisation de la connaissance au travers de modèles mécanistes, les principales avancées vers une démarche réellement prédictive pourront probablement être réalisées. Ceci ouvrira la porte à des simulations spatiales prospectives selon différents scénarios ■

Remerciements

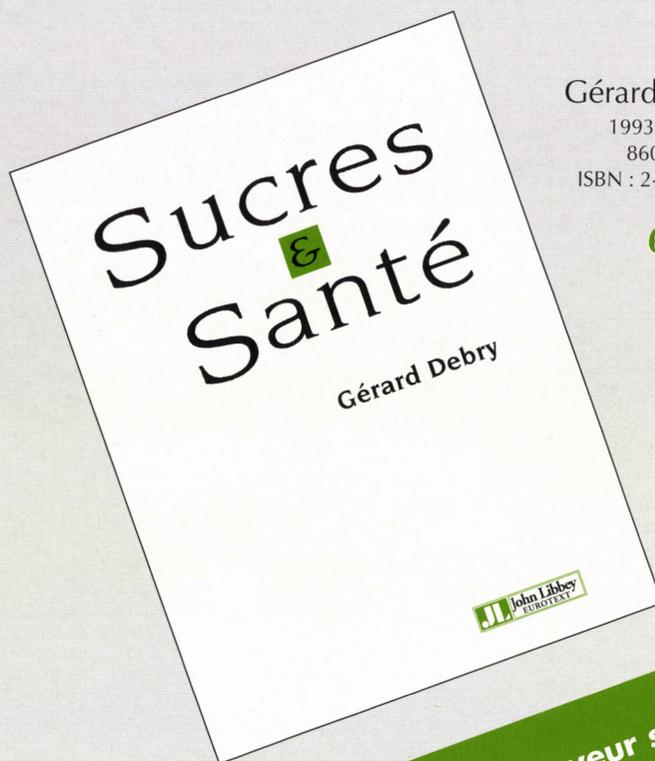
Les illustrations présentées dans cet article sont extraites de travaux qui ont été financés par la FAPESP et la CAPES (Brésil), Le ministère de l'Environnement (Programmes ECLAT et Agriges, France) et le GIP ECOFOR (Programme Landes II, France). Nous remercions vivement Christian Feller et Dominique King pour leur lecture critique très constructive d'une première version de cet article.

Références

1. Post WM, Emmanuel WR, Zinke PJ, Stangenberger AG. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 1982 ; 298 : 156-9.
2. Eswaran H, Van Den Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci Soc Am J* 1993 ; 57 : 192-4.
3. Moraes JL, Cerri CC, Melillo JM, et al. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. *Soil Sci Soc Am J* 1995 ; 59 : 244-7.
4. Batjes NH. Total carbon and nitrogen in soils of the world. *Eur J Soil Sci* 1996 ; 47 : 151-63.
5. Huntington TG, Ryan DF, Hamburg SP. Estimating soil nitrogen and carbon pools in a northern hardwood forest ecosystem. *Soil Sci Soc Am J* 1988 ; 52 : 1162-7.
6. Arrouays D, Pélissier P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest loamy soils of France. *Soil Sci* 1994 ; 157 : 185-92.
7. Grigal DF, Brovold DL, Nord WS, Ohmann LF. Bulk density of surface soils and peat in the north central United States. *Can J Soil Sci* 1989 ; 69 : 895-900.
8. Honeysett JL, Ratkowsky DA. The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. *J Soil Sci* 1989 ; 40 : 299-308.
9. Curtis RO, Post BW. Estimating bulk density from organic matter content in some Vermont forest soils. *Soil Sci Soc Am Proc* 1964 ; 28 : 285-6.
10. Federer CA. Nitrogen mineralization and nitrification : depth variation in four New England forest soils. *Soil Sci Soc Am J* 1983 ; 52 : 1162-7.
11. Rawls WJ. Estimating soil bulk density from particle-size analysis and organic matter content. *Soil Sci* 1983 ; 135 : 123-5.
12. Kiehl JE. *Manual de edafologia*. São Paulo, Brésil : Ceres Ltda, 1979 ; 234 p.
13. Bernoux M, Arrouays D, Cerri CC, Volkoff B, Jolivet C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Sci Soc Am J* 1998 ; 62 : 743-9.
14. Arrouays D, Pélissier P. Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant Soil* 1994 ; 160 : 215-23.
15. Elzein A, Balesdent J. A mechanistic simulation of the vertical distribution of carbon concentrations and residence time in soils. *Soil Sci Soc Am J* 1995 ; 59 : 1328-35.
16. Bennema J. Organic carbon profiles in oxisols. *Pédologie* 1974 ; 24 : 119-46.
17. Bernoux M, Arrouays D, Cerri CC, Bourennane H. Modelling vertical distribution of carbon in oxisols of the western Brazilian Amazon. *Soil Sci* 1998 (accepté pour publication).
18. Bouwman AF, Leemans R. The role of forest soils in the global carbon cycle. In : McFee WW, Kelly JM, eds. *Carbon forms and functions in forest soils*. Madison : SSSA Inc., 1995 : 503-26.
19. Bernoux M. *Stocks de carbone des sols de l'Amazonie occidentale et leur dynamique lors de la conversion de la forêt en pâturage*. Thèse co-tutelle Université d'Orléans, Université de São Paulo, 1998 ; 125 p.
20. Bernoux M, Arrouays D, Cerri CC, de Alencastro Graça PM, Volkoff B, Trichet J. Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie brésilienne). *Etude et Gestion des Sols* 1998 ; 5 : 31-42.
21. Arrouays D, Vion I, Kicin JL. Spatial analysis and modeling of topsoil carbon storage in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Sci* 1995 ; 159 : 191-8.
22. Ball DF. Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *J Soil Sci* 1964 ; 15 : 85-92.
23. Wang XJ, Smethurst PJ, Herbert AM. Relationships between three measures of organic matter or carbon in soils of eucalypt plantations in Tasmania. *Aust J Soil Res* 1996 ; 34 : 545-53.
24. Jolivet C, Arrouays D. Comparaison de quelques méthodes de caractérisation des teneurs en carbone et en matières organiques des sols sableux podzolisés. *C R Acad Sci Paris, Série III* 1997 ; 324 : 393-400.
25. Matheron G. Principles of geostatistics. *Econ Geol* 1963 ; 58 : 1246-66.
26. Trangmar BB, Yost RS, Uehara G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv Agron* 1985 ; 38 : 45-94.
27. Rossi RE, Mulla DJ, Journel AG, Franz EH. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecol Monogr* 1992 ; 62 : 277-314.
28. Baumgardner MF, Silva LF, Biehl LL, Stoner ER. Reflectance properties of soils. *Adv Agron* 1985 ; 38 : 1-44.
29. Sudduth KA, Hummel JW. Evaluation of reflectance methods for soil organic matter sensing. *Trans ASAE* 1991 ; 34 : 1900-9.
30. Arrouays D, King C, Vion I, Le Bissonnais Y. Detection of soil crusting risks related to low soil organic carbon contents by using discriminant analysis on thematic mapper data. *Geocart Internat* 1996 ; 11 : 1116.
31. Fearnside PM. Greenhouse gas emissions from deforestation in the Brazilian Amazon. In : Makundi W, Sathaye J, eds. *Carbon emissions and sequestration in forests : case studies from seven developing countries*. Washington D.C. : US Department of Energy, 1992 : 1-73.
32. Paustian K, Andren O, Janzen HH, et al. Agricultural soils as a sink to mitigate CO₂ emissions. *Soil Use Manage* 1997 ; 13 : 230-44.
33. Moraes JL, Seyler F, Cerri CC, Volkoff B. Land cover mapping and carbon pools estimates in Rondonia, Brazil. *Int J Remote Sensing* 1998 ; 19 : 921-34.
34. Jenny H. *Factors of soil formation*. New York : Mac Graw Hill, 1941 ; 281 p.
35. Alvarez R, Lavado RS. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 1998 ; 83 : 127-42.
36. Amelung W, Zech W, Zhang X, et al. Carbon, nitrogen and sulfur pools in particle-size fractions as influenced by climate. *Soil Sci Soc Am J* 1998 ; 62 : 172-81.
37. Bell JC, Thompson JA, Butler CA, McSweeney K. Modeling soil genesis from a landscape perspective. *15th International Congress of Soil Science, Acapulco 10-16/07/1994*. Volume 6a, 179-95.
38. Brubaker SC, Jones AJ, Lewis DT, Frank K. Soil properties associated with landscape position. *Soil Sci Soc Am J* 1993 ; 57 : 235-9.
39. Arrouays D, Kicin JL, Daroussin J, Hassika P. Improving topsoil carbon storage prediction by using a digital elevation model. *Soil Sci* 1998 ; 163 : 103-8.
40. Arrouays D, Balesdent J, Mariotti A, Girardin C. Modeling organic carbon turnover in temperate forest soils converted to corn cropping by using ¹³C natural abundance measurements. *Plant Soil* 1995 ; 173 : 191-6.
41. Pennock DJ, Van Kessel C. Effect of agriculture and of clear-cut forest harvest on landscape-scale soil organic carbon storage in Saskatchewan. *Can J Soil Sci* 1997 ; 77 : 211-8.
42. Van Noordwijk M, Cerri C, Woormer PL, Nugroho K, Bernoux M. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. *Geoderma* 1997 ; 79 : 187-225.
43. Bourennane H, King D, Chery P, Bruand A. Improving the kriging of a soil variable using slope gradient as external drift. *Eur J Soil Sci* 1996 ; 47 : 473-83.
44. Jenkinson DS, Rayner JH. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci* 1977 ; 123 : 298-305.
45. Parton WJ, Schimel DS, Cole CV, Ojima DS. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci Soc Am J* 1987 ; 51 : 1173-9.
46. Feller C. *La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1. Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique*. Coll. TDM, N° 144. Paris : ORSTOM, 1995 ; 393 p. + annexes.
47. Balesdent J, Mariotti A, Guillet B. Natural ¹³C abundance as a tracer for soil organic matter studies. *Soil Biol Biochem* 1987 ; 19 : 25-30.
48. Bernoux M, Cerri CC, Neill C, Moraes JFL. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma* 1998 ; 82 : 43-58.
49. Smith P, Smith JU, Powlson DS, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 1997 ; 81 : 153-225.
50. Gascuel-Oudou C, Walter C, Voltz M. Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour l'estimation spatiale. *Science du Sol* 1993 ; 31 : 193-213.

Résumé

L'estimation des stocks d'éléments, en particulier celui du carbone, dans les sols est d'une importance considérable, en raison de leur rôle potentiel sur la qualité et le futur de la pédosphère. Le bilan, régional ou global, doit nécessairement prendre en compte la dimension spatiale. Les concepts et les outils utilisés pour la spatialisation des caractères des sols ont évolué rapidement ces dernières années, avec la généralisation de l'emploi des systèmes d'information géographique, le développement des outils géostatistiques et des moyens de mesure, et les progrès dans la compréhension et la modélisation des processus. À partir de l'exemple du carbone organique des sols, nous illustrons cette évolution et nous soulignons l'intérêt et les limites de différentes techniques de spatialisation appliquées aux sols. Le plan que nous utilisons suit la logique du traitement de l'information. Sont successivement traitées les mesures locales et leur signification, les techniques spatiales de généralisation et d'estimation et enfin l'analyse et la compréhension des phénomènes et des processus mis en jeu, ainsi que de leur modélisation.



Gérard DEBRY

1993, broché

860 pages

ISBN : 2-7420-0070-4

690 F

La « somme » sur les glucides à saveur sucrée :
saccharose, glucose, fructose

- Beaucoup de fausses notions ont été diffusées à tort aux professions de santé et aux consommateurs.
- Il convenait donc de réaliser une étude critique des données scientifiques publiées afin de distinguer celles qui sont établies avec certitude de celles qui sont douteuses ou erronées.
- L'analyse de plus de 4 500 publications scientifiques présentées dans cet ouvrage devrait permettre aux différents publics de satisfaire leur plaisir sans mettre en danger leur santé.

Bon de commande

Éditions John Libbey Eurotext 127, avenue de la République
92120 Montrouge - FRANCE Tél : 33 (1) 46 73 06 60 Fax : 33 (1) 40 84 09 99



Je désire recevoir :

Sucres et Santé 550 FF
Frais de port forfaitaires 30 FF
Total : **580 FF**

NOM :

Prénom :

Adresse :

CP : Ville :

Pays :

Ci-joint mon règlement
d'un montant de :

FF

Par chèque, à l'ordre des Éditions John Libbey Eurotext

Par carte bancaire :

Visa Eurocard/Mastercard American Express

Carte N° : | | | | | | | | | | | | | | | |

Date d'expiration : | | | | | | | |

Signature :