

GÉRARD BOURGEON
CIRAD-Amis

SÉBASTIEN SALVADOR BLANES
INRA-SESCPF

FRANÇOIS HOULLIER
CIRAD-Amis

C. S. HARINDRANATH
C. R. SHIVAPRASAD
NBSS & LUP

CARTOGRAPHIE DU CARBONE ORGANIQUE DES SOLS EN INDE DU SUD

Exemple du district de Shimoga au Karnataka

Une méthode originale de cartographie du carbone organique des sols, mise au point et testée en Inde du Sud, permet de répondre partiellement à la demande des modèles globaux concernant les émissions de gaz à effet de serre.

Une réflexion sur les améliorations à apporter à la méthode, pour satisfaire aux procédures d'inventaire du GIEC, vient compléter cette présentation.



L'escarpement des Ghâts occidentaux
couvert par la forêt sempervirente.
*The escarpment of the Western Ghats,
covered by evergreen forests.*

Les sols constituent, après les roches carbonatées, le plus gros réservoir terrestre de carbone, environ 1 500 milliards de tonnes (ou 1 500 Pg ; ESWARAN *et al.*, 1993 ; BATJES, 1996) ce qui équivaut à presque trois fois la quantité stockée dans la biomasse. Les préoccupations concernant l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre de l'atmosphère conduisent donc naturellement à s'interroger sur le rôle du sol en terme de source ou de puits de carbone et nombre d'articles et d'ouvrages ont été publiés récemment à ce sujet. Face à un tel regain d'intérêt, de nombreuses institutions se préoccupent de valoriser les données existantes – i.e. taux de carbone organique du sol (COS) mesurés à diverses occasions : prospections pédologiques, études écologiques, suivis d'essais... L'exercice n'est pas toujours possible, nous l'avons réalisé en Inde du Sud où un certain nombre de conditions favorables étaient réunies ; c'est ce travail qui est présenté ici.

MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE

Notre objectif initial visait avant tout à répondre à une question précise posée à l'I.F.P.* par l'administration de l'État du Karnataka** : lui fournir une carte du carbone des sols pour aider à la gestion de l'environnement. C'est par une étroite collaboration

entre l'I.F.P. et le NBSS & LUP*** (service indien de la carte pédologique) que nous avons pu mettre au point et tester une méthode cartographique originale pour répondre à cette question. Nous présenterons donc tout d'abord la méthode et les résultats préliminaires obtenus, en insistant sur les caractéristiques des données et de la méthode qui permettent d'arriver à la cartographie escomptée. Les résultats obtenus, pour incomplets et imparfaits qu'ils soient, permettent de répondre partiellement à la demande des modèles globaux concernant les émissions de gaz à effet de serre. Nous réfléchirons donc, dans une troisième partie, aux modifications à apporter à notre méthode pour mieux répondre à cette demande, en nous basant pour cela sur les procédures du GIEC****.

La méthode de spatialisation des teneurs de carbone à l'échelle régionale a été développée pour s'adapter à la situation indienne : vaste territoire fortement diversifié et relativement bien mis en valeur depuis très longtemps, souvent plus d'un millénaire. Elle diffère donc logiquement d'autres méthodes développées dans d'autres contextes pour répondre à la même question (ARROUAYS *et al.*, 1994 ; BERNOUX *et al.*, 1998).

DIVERSITÉ DU MILIEU INDIEN

L'un des avantages de travailler en Inde du Sud tient au fait que, même en étudiant un territoire limité, on couvre facilement une gamme très étendue de situations (nous avons d'ailleurs légèrement élargi notre zone d'étude en y incluant l'État de Goa, mitoyen de celui du Karnataka, pour couvrir un maximum de situations). Dans notre exemple, l'altitude varie de 0 à plus de 2 000 m et la pluviosité de 600 à 7 000 mm, avec toutes les conséquences que l'on peut imaginer sur les types forestiers et les modes d'occupation du sol (cf. encadré).

PRINCIPES DE LA MÉTHODE UTILISÉE

Les recherches conduites depuis de nombreuses années en science des sols ont bien mis en évidence que la quantité de carbone organique d'un sol (COS) était contrôlée par un certain nombre de facteurs – ou déterminants –, tant internes (caractéristiques du sol autres que le COS, par exemple texture) qu'externes (facteurs climatiques, occupation du sol).

Dès 1960 en Inde, JENNY et RAYCHAUDHURI ont réalisé un travail pionnier remarquable en étudiant l'importance de différents facteurs (pluviosité, température, texture, occupation du sol) sur les taux de carbone et d'azote de l'horizon superficiel (0-20 cm) ; leurs résultats nous serviront de référence.

Dans leur étude, JENNY et RAYCHAUDHURI ont généralement considéré les différents facteurs indépendamment les uns des autres, plus rarement deux à deux. Il nous a semblé qu'il s'agissait d'une limite méthodologique importante, imposée par les possibilités de calcul de l'époque, et nous avons recherché un modèle plus global, du type :

$$C = f(\text{sol, climat, topo, etc.})$$

Dans l'écriture symbolique de cette équation, C représente indifféremment un taux de COS pour un horizon donné ou un stock calculé pour une certaine épaisseur.

Concrètement, notre méthode a d'abord consisté à établir un modèle de régression multiple expliquant le taux de COS à partir de données ponctuelles concernant des profils pédologiques. Le modèle a ensuite été couplé à un SIG pour spatialiser le taux de carbone dans l'horizon de surface, à partir des cartes des facteurs retenus dans la région considérée (figure 2). Les trois grandes étapes suivantes ont donc été nécessaires pour arriver à la première carte de COS :

- L'établissement du modèle statistique qui repose sur la recherche de ré-

* Institut français de Pondichéry.

** Le Karnataka est un État du sud de l'Inde possédant une couverture forestière diversifiée ; la carte du carbone des sols a été demandée aux chercheurs en écologie de l'I.F.P. par le Secrétariat spécial à l'environnement et aux forêts du gouvernement de cet État.

*** National Bureau of Soil Survey and Land Use Planning, bureau dépendant de l'ICAR, Indian Council of Agricultural Research.

**** GIEC, Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (en anglais : I.P.C.C., Intergovernmental Panel on Climate Change).

BRÈVE DESCRIPTION DU MILIEU

La région étudiée s'étend à l'ouest de la péninsule indienne entre 11 et 18° de latitude nord et correspond aux Etats du Karnataka et de Goa (figure 1). Elle couvre 195 000 km² et recensait environ 46 000 000 habitants en 1991. Elle comporte de fait trois grandes zones géographiques orientées nord-sud : (i) une bande côtière étroite, (ii) l'escarpement des Ghâts occidentaux, et (iii) une partie du Plateau du Deccan méridional.

La côte occidentale indienne correspond à ce que l'on appelle, en tectonique des plaques, une marge passive, et l'escarpement des Ghâts occidentaux (« grand escarpement » homologue de l'escarpement malgache) résulte de la dissection pous-

sée du flanc ouest d'une flexure à large rayon de courbure produite par la dynamique de cette marge passive. De ce fait, la péninsule indienne présente une dissymétrie ouest-est marquée ; la ligne de partage des eaux entre la Mer d'Arabie et la Baie du Bengale coïncide, à quelques exceptions près, avec le sommet de l'escarpement. L'escarpement joue de plus le rôle de barrière climatique et concentre l'essentiel des pluies de mousson. La morphologie générale influe ainsi largement sur la distribution des climats, des sols, de la végétation spontanée et des systèmes de cultures. La résultante globale est une mosaïque de facettes paysagères particulièrement riche.

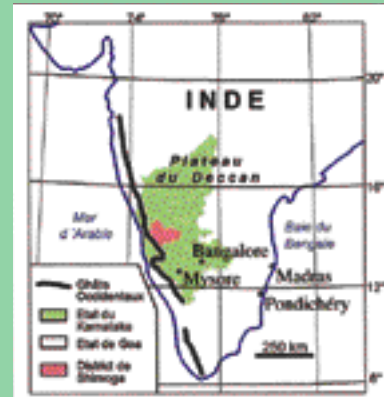


Figure 1. Localisation de l'étude.
Location of the study.

gressions entre le taux de COS et les différents facteurs potentiellement explicatifs (d'après l'analyse de la bibliographie), permet de sélectionner les facteurs qui sont réellement explicatifs pour la zone considérée et d'évaluer leur contribution. Le modèle est un modèle additif sans interaction, calculé à partir de variables qualitatives, car les facteurs intervenant dans la partie droite de l'équation sont codés pour chaque profil. Ce codage, réalisé en utilisant les classes figurant sur les cartes des facteurs environnementaux (tableau I), est indispensable pour pouvoir utiliser ultérieurement ces cartes pour dresser celle du carbone.

Dans la région étudiée, nous avons considéré indépendamment les sols des milieux anthropisés, ayant un taux de carbone de l'ordre de 1 %, et les sols des milieux peu anthropisés, présentant un taux de carbone de l'ordre de 3 à 15 %. Nous justifions ce traitement séparé par le fait qu'une régression globale aurait été peu discriminante au sein de chaque groupe. A partir des valeurs mesurées en forêt (FERRY, 1992) une relation globale entre les taux de carbone et les fac-

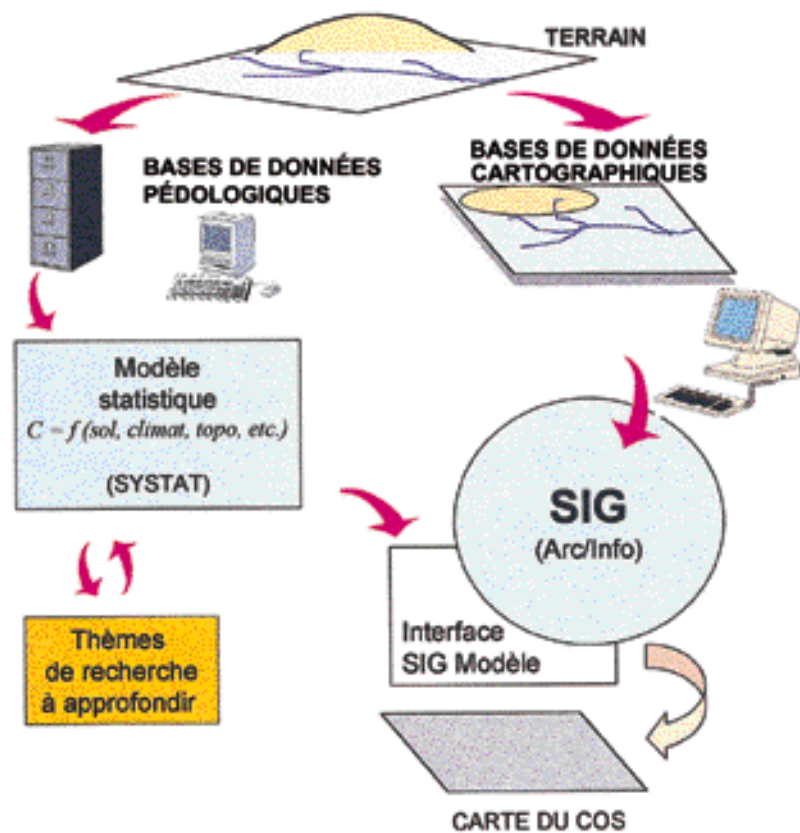


Figure 2. Etablissement d'une carte du carbone des sols à partir de données pédologiques et des cartes des facteurs environnementaux.
Preparation of a soil carbon map from a soil database and environmental factors maps.

teurs du milieu (type forestier, facteurs pédologiques, climat) a donc été établie pour le domaine forestier peu, ou pas, perturbé (qui représente par exemple 28,6 % de la superficie totale pour le district de Shimoga). Le même exercice a été conduit pour le reste du territoire du Karnataka à l'aide des données recueillies en zone anthropisée par le NBSS & LUP (SEHGAL *et al.*, 1996), le type forestier étant

alors remplacé par le type d'utilisation du sol (tableau I).

Il faut bien retenir que, par cette méthode de calcul, le modèle obtenu dépend de la zone d'où proviennent les données (*data-driven regression*).

- La numérisation des cartes des facteurs explicatifs retenus par le modèle et la combinaison (*overlay*) générale de ces cartes. Ici se sont posés des pro-

blèmes de compatibilité entre les différents types de SIG utilisés par les partenaires ainsi que des problèmes de projection.

- Le développement de l'interface SIG/modèle pour calculer les taux de COS et éditer la carte du carbone recherchée, après simplification et regroupement des polygones selon un certain nombre de classes de COS.

TABLEAU I
DÉFINITION DES CLASSES POUR LES DIFFÉRENTS FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX
(D'APRÈS LES CARTES EXISTANTES)

Climat (carte des bioclimats ; PASCAL, 1982a)						
Durée de la saison sèche						
Classe (mois)	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6
	< 3	3 à 4	4 à 5	5 à 6	6 à 7	> 7
Pluviosité						
Classe (mm)	P1	P2	P3	P4	P5	
	< 1 000	1 000 à 1 500	1 500 à 2 000	2 000 à 5 000	> 5 000	
Altitude						
Classe d'altitude (m)	ALT1	ALT2	ALT3	ALT4	ALT5	
	0 à 5	5 à 500	500 à 900	900 à 1 500	> 1 500	
Utilisation des terres						
Zones anthropisées (document NBSS & LUP non publié)						
Classe	LU1	LU2	LU3	LU4		
Type	cultivé non irrigué	cultivé irrigué	plantations	forêts dégradées – pâturages – friches		
Forêts, zones peu perturbées (carte des forêts ; PASCAL, 1982b)						
Classe	FO1	FO2	FO3	FO4	FO5	
Type	sempervirent de basse altitude	sempervirent de moyenne altitude	sempervirent de haute altitude	décidu humide	décidu sec	
Sols (carte pédologique ; SEHGAL <i>et al.</i> , 1996)						
Texture en surface						
Classe	TS1	TS2				
Argile (%)	< 35	35				
Texture de l'horizon B entre 50 et 100 cm						
Classe	TD1	TD2				
Argile (%)	< 35	35				
Teneur en graviers entre 50 et 100 cm						
Classe	GD1	GD2				
Graviers (%)	< 15	15				

ASPECTS PRATIQUES

Deux bases de données ont dû être créées ou développées pour accomplir ces tâches :

- Une base de données pédologiques où sont rassemblés des profils caractéristiques des types de sols rencontrés dans la zone d'étude. Chaque profil y est géoréférencé (numéro de référence, latitude, longitude, altitude, occupation du sol, descripteurs de l'environnement) ; pour chaque horizon, sont notés des caractères de description (texture, structure, épaisseur) et des paramètres analytiques (densité, éléments grossiers, classes texturales, pH, carbone, azote...). La source principale de ces données était constituée par les archives du NBSS & LUP (131 profils sur les 153 utilisés pour l'étude). La définition des catégories pour les différents facteurs est donnée dans le tableau I car l'analyse est faite après codage.

Il est important que les descripteurs de l'environnement, notamment ceux susceptibles de varier rapidement comme l'occupation du sol, aient été notés lors de la description du profil et de son échantillonnage. Des données pédologiques pour lesquelles cette information manque ne permettront jamais d'évaluer l'impact des différents modes d'occupation du sol sur le COS. De plus, les modes d'occupation du sol doivent être suffisamment nombreux, les stades de dégradation du couvert forestier suffisamment bien décrits, pour que le modèle soit riche d'enseignements. Il y a finalement un compromis à trouver entre les données disponibles et le nombre de classes que l'on peut introduire au niveau des facteurs, ou des déterminants, du COS.

- Une base de données géographiques digitalisées qui regroupe les cartes de la végétation, des sols, des paramètres climatiques, etc.

Tout ce travail peut être réalisé de façon itérative – *i.e.* par approximations successives (figure 3) –, et la méthode qui a été testée sur un district pour produire la carte du carbone de l'horizon de surface permettra aussi :

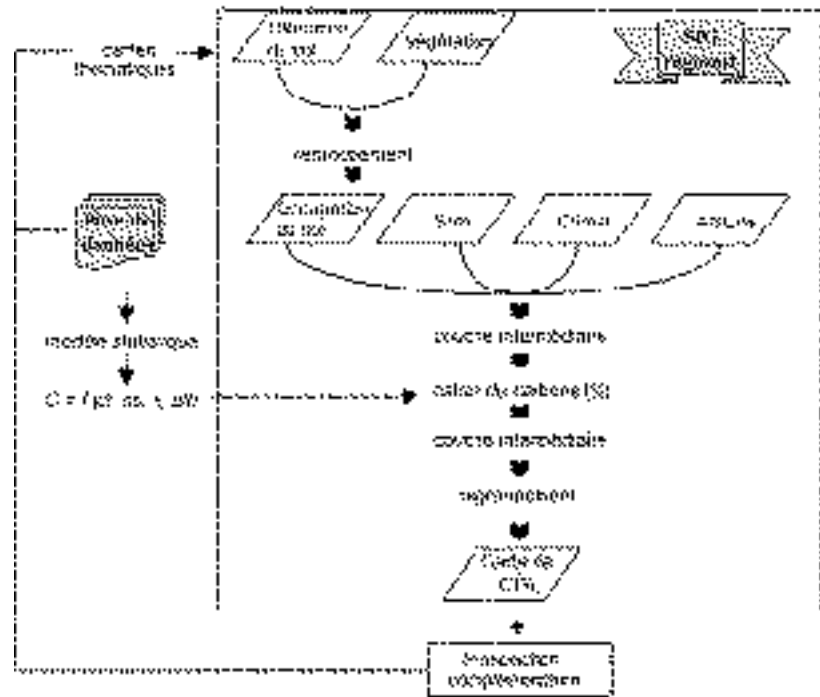


Figure 3. Opérations réalisées au niveau de l'interface modèle statistique / SIG pour établir la carte du carbone.

Carbon map preparation process with the statistical model/GIS interface.

- de donner rapidement des réponses quantifiées (stock de carbone d'un district ou d'un Etat, variations en fonction de l'occupation du sol...)
- d'améliorer progressivement la précision de ces réponses en effectuant les investigations nécessaires correspondantes et en complétant les bases de données.

RÉSULTATS

Le modèle statistique de la teneur en COS de l'horizon de surface des sols a été établi pour l'ensemble de la zone étudiée (195 000 km²), mais la carte du COS n'a été pour l'instant réalisée que pour un seul district (Shimoga, 10 000 km²). Les résultats prennent donc diverses formes : le modèle lui-même, les valeurs de COS calculées à l'aide du modèle pour certaines situations, et la carte.

LE MODÈLE

Dans le cas traité, le modèle – qui, rappelons-le, n'a de valeur que pour la zone où il a été établi – est composé d'un système de deux équations, puisque les profils sous forêt peu perturbée ont été traités indépendamment des autres.

Nous justifions ce traitement séparé par le fait que les taux de carbone étaient très différents dans les deux groupes. La régression globale sur l'ensemble des profils sous forêt s'est révélée très significative, mais peu discriminante, car les profils prélevés en altitude, vers 1 800 m, présentaient un taux de carbone de l'ordre de 15 % en surface alors que tous les autres profils présentaient des taux de l'ordre de 3 à 8 %. Il a donc fallu éliminer les profils sous forêt d'altitude (FO4) pour avoir une analyse pertinente des différences constatées au sein des profils sous les autres types de forêt.

□ Sols sous forêt

Dans cette équation, fort peu de facteurs interviennent puisque, après l'élimination de ceux qui se sont révélés peu pertinents (élimination réalisée en se servant des valeurs des probabilités et du test F calculées à chaque pas de la régression), ne restent que le type forestier et la texture de l'horizon B du sol (très exactement, il s'agit de la texture de la section de contrôle*). L'équation se présente donc sous la forme générale :

$$COS = Cte + \text{Effet du type forestier} + \text{Effet de la texture en B}$$

Les valeurs (effets sur le taux de carbone) non nulles que prennent ses différents termes sont présentées dans le tableau II. Par construction du modèle de régression, les effets sur C correspondant aux dernières modalités des déterminants potentiels du COS (ici FO5 et TD2) sont prises égales à zéro, ceci n'ayant, bien entendu, aucune signification écologique.

L'écriture symbolique FO(1 & 4) signifie que les forêts sempervirentes de basse altitude (FO1) ont été regroupées avec les forêts semi-décidues (FO4) au cours du calcul. Toutes les variables climatiques ont été éliminées au cours du calcul, mais elles se retrouvent plus ou moins implicitement dans la définition des types forestiers (sempervirent, décidu humide, décidu sec).

Sur le plan écologique, cette équation ne nous apprend rien de très original :

- Les forêts sempervirentes présentent des taux de COS dans l'horizon de surface toujours supérieurs à celui d'une forêt décidue sèche et, parmi les différentes forêts sempervirentes, l'effet positif de l'altitude – en l'occurrence de la diminution de la température – sur

* D'une façon générale, il s'agit de la tranche de sol située entre 25cm, ou entre le sommet de l'horizon B d'accumulation argileuse, et 100cm de profondeur. Pour une définition précise, nous renvoyons à la dernière édition des Keys to Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, USDA).

TABLEAU II

VALEURS NON NULLES PRISES PAR LES TERMES DE L'ÉQUATION RELIANT LE TAUX DE CARBONE DE L'HORIZON DE SURFACE ET SES DÉTERMINANTS SOUS FORÊTS PEU PERTURBÉES (SAUF FORMATIONS D'ALTITUDE)

Termes non nuls	Effet C %	Probabilité (test F)
Constante	3,68	
FO(1&4) ⁽¹⁾	2,42	0,00574
FO2	3,56	0,00113
TD1	-2,89	0,00013

(1) Cf. Définition des classes tableau I.

le stockage du carbone est vérifié puisqu'elles se classent de la façon suivante par rapport au taux de COS :

$$FO3 \text{ (éliminées du calcul pour les forts taux de COS)} \gg FO2 > FO1.$$

- Une texture argileuse en B favorise le stockage du carbone sous forêt.



Forêt sempervirente de basse altitude. Low elevation evergreen forests.

Le modèle fournit néanmoins une quantification des différents effets, quantification qui permettra ultérieurement de calculer le COS dans l'horizon de surface pour différentes situations réelles rencontrées dans la région étudiée.

□ Milieux anthropisés

L'équation obtenue pour les sols des milieux anthropisés est très différente de la précédente, elle se présente sous la forme générale :

$$COS = Cte + \text{Effet de la texture de surface} + \text{Effet de l'altitude} + \text{Effet de l'utilisation du sol} + \text{Effet de la durée de la saison sèche}$$

Les valeurs (effets sur le taux de carbone) non nulles que prennent ses différents termes sont présentées dans le tableau III.

Cette équation fait donc intervenir de nombreux facteurs et illustre, mieux que la précédente, l'intérêt de la méthode utilisée par rapport à des régressions simples.

TABLEAU III

VALEURS NON NULLES PRISES PAR LES TERMES DE L'ÉQUATION RELIANT LE TAUX DE CARBONE DE L'HORIZON DE SURFACE ET SES DÉTERMINANTS EN MILIEU ANTHROPISE

Termes non nuls	Effet C %	Probabilité (test F)
Constante	2,26	
ALT2 ⁽¹⁾	0,64	0,00120
TS1	-0,95	0,00000
LU1	-1,33	0,00000
LU2	-0,93	0,00020
SS1	1,25	0,00077
SS(2 & 3)	0,60	0,00353

(1) Cf. définition des classes tableau I.

L'effet de l'altitude est inattendu ; cinq classes d'altitude avaient été prises en compte au départ entre 0 et 2 000 m et seule la seconde (en réalité la seconde opposée aux quatre autres) est retenue dans l'équation. Cette classe correspond à une bande de terrain se situant géographiquement à la base de l'escarpement des Ghâts et qui a été atteinte assez récemment par les défrichements. C'est peut être en raison du caractère récent de la plupart des défrichements que cette zone correspondrait à des sols anthropisés globalement plus riches en COS que ceux situés sur le plateau du Deccan, pour lesquels les défrichements sont souvent plus anciens.

Les effets des autres facteurs sont moins surprenants.

- Une texture argileuse, cette fois-ci de l'horizon de surface, favorise le stockage du carbone.
- Les systèmes d'utilisation du sol se classent de la façon suivante par rapport au stockage du carbone :

*Culture pluviale < Culture irriguée
< Autres systèmes*

(les autres systèmes correspondent aux plantations, aux friches et aux forêts perturbées non différenciés par l'analyse statistique).

- Le raccourcissement de la saison sèche favorise le stockage du carbone.

Deux remarques au sujet de ces résultats.

Alors que c'est la texture de l'horizon B qui explique le mieux la teneur en COS des sols sous les forêts – ce qui rappelle la relation obtenue par BEN-NEMA (1974) reliant le taux de carbone au pourcentage moyen d'argile dans le sol –, c'est la texture de l'horizon de surface qui joue ce rôle en milieu anthropisé. Nous pouvons expliquer cette différence par le fait que la continuité du profil est rompue par l'anthropisation (travail du sol, ralentissement de l'activité biologique...).

JENNY et RAYCHAUDHURI (1960) avaient déjà observé que les sols irri-



Forêt décidue en saison humide dans la zone semi-aride du plateau du Deccan.
Deciduous forests during the rainy season in the semi-arid zone of the Deccan Plateau.

gués (*paddy soils*) stockaient généralement plus de carbone que les sols cultivés « en pluvial ». Ils invoquaient, pour interpréter cela, la texture généralement plus fine des sols irrigués. Nos classes texturales étant en nombre réduit et pas forcément adaptées à la mise en évidence d'un tel effet, nous ne pouvons totalement exclure une explication de ce type. Il est aussi possible de penser à un effet direct de l'irrigation (création de conditions réductrices favorables au stockage) et à un effet indirect lié au plus grand soin (meilleure fumure) apporté aux cultures irriguées.

ESTIMATIONS À L'AIDE DU MODÈLE

Pour estimer la valeur du COS de l'horizon de surface dans une situation particulière, par exemple un sol argileux sous une forêt semi-décidue, on ajoute à la constante (3,68) la valeur C correspondant à FO4 (2,42) et la valeur de C correspondant à TD2 (0,00), ce qui donne 6,10 % de carbone. La seconde équation permet de calculer ce que devient le taux de carbone suite à diverses utilisations du

sol, par exemple une plantation de cocotiers en zone côtière sur les basses collines à sol argileux avec une durée de saison sèche comprise entre 4 et 5 mois ; on ajoute alors à la constante (2,26) les valeurs C correspondant à ALT2 (0,64), à TS2 (0,00), à LU3 (0,00) et finalement à SS(2 & 3) (0,60) ce qui donne 3,50 % de carbone. C'est ainsi qu'ont été obtenues les données du tableau IV (remarquons, qu'avec cette équation, il est impossible de différencier les diverses plantations – i.e. café, hévéa, cocotier... – puisque toutes ont été regroupées en une seule classe).

Dans le tableau IV, nous employons le vocabulaire de la *Soil taxonomy* en usage en Inde : les Ultisols et Alfisols des zones très arrosées de la région des Ghâts correspondent à des sols ferrallitiques dans la classification française, les Alfisols de la zone semi-aride indienne sont généralement des sols fersiallitiques.

Nous avons aussi introduit dans la dernière colonne du tableau un coefficient C_x (*cultivation index*) dont la définition a été proposée par JENNY et RAYCHAUDHURI (1960) pour caractériser la perte en carbone due au passa-



Mosaïque de systèmes agroforestiers sur des collines et dans des bas-fonds aménagés en rizières dans la zone humide du plateau du Deccan.
Patchwork of agro-forestry systems on hills and of paddy fields in lowlands in the humid zone of the Deccan Plateau.

ge à la culture. Si C_v désigne le taux de COS sous une végétation naturelle et C_c ce même taux après la mise en culture, le coefficient C_x est défini comme étant égal à 100 fois le rapport C_c/C_v . Les valeurs de C_x figurant dans le tableau ont été calculées à partir des estimations de C_v et de C_c figurant dans la colonne précédente.

LA CARTE

La carte ne sera pas présentée ici (un extrait figure dans les actes du 16^e congrès mondial de science du sol ; VELAYUTHAM *et al.*, 1998) ; elle reproduit assez fidèlement la complexité de la carte d'occupation du sol et ne reflète que fort mal la carte pédologique. En 1960, JENNY et RAYCHAUDHURI notaient déjà qu'ils n'observaient pas de différences marquées dans les taux de carbone pouvant s'expliquer par des différences de type de sol (sols rouges versus sols noirs) pour le sud du plateau du Deccan.

La carte obtenue via le SIG présente un atout incomparable ; grâce à un accès immédiat aux surfaces, elle permet de calculer des stocks de COS (calculs pour le moment limités au seul horizon de surface, à condition de faire une hypothèse sur la valeur de sa densité apparente).

TABLEAU IV	
VALEURS ESTIMÉES DU TAUX DE COS POUR CERTAINES SITUATIONS FRÉQUENTES ET VALEURS CORRESPONDANTES DE C_x (CULTIVATION INDEX)	
Situation	COS % C_x
Zone géographique, longueur de la saison sèche, type de sol	
Végétation naturelle	C_v
Type d'utilisation du sol	C_c
Zone côtière, 4 à 5 mois de saison sèche, Ultisol argileux	
Forêt sempervirente de basse altitude	6,10
Plantation de cocotiers	3,50 57
Escarpement des Ghâts, 3 à 4 mois de saison sèche, Alfisol argileux	
Forêt sempervirente de basse altitude	6,10
Plantation d'hévéas	3,50 57
Bordure occidentale du plateau, 4 à 5 mois de saison sèche, Alfisol argileux	
Forêt sempervirente de moyenne altitude	7,24
Plantation de caféiers	2,86 39
Intérieur du plateau, 6 à 7 mois de saison sèche, Vertisol argileux	
Forêt décidue sèche	3,68
Culture pluviale de cotonniers	0,93 25

COMPARAISON AVEC LES APPROCHES GLOBALES

L'étude réalisée n'a été conduite à son terme, la cartographie, que sur un seul district (Shimoga, 10 000 km²) et limitée à un seul horizon. Beaucoup de travail reste à accomplir pour : (1) étendre le modèle à l'ensemble de la zone étudiée (195 000 km²) et (2) compléter les bases de données de façon à envisager la spatialisation des stocks de carbone pour des profils entiers.

Cette approche du COS, les pages qui précèdent le montrent amplement, est essentiellement ascendante : nous sommes partis de données ponctuelles pour arriver à un modèle spatial et à une carte. Les modèles globaux s'intéressant à l'effet de serre abordent le problème selon une approche descendante et au moyen d'inventaires généraux destinés à recenser toutes les émissions. Pour cela, l'émission globale est décomposée en « agrégats » provenant de différentes sources émettrices pré-identifiées.

Avant de poursuivre le travail entrepris en Inde, il nous paraît aujourd'hui nécessaire de voir où les deux démarches peuvent se rejoindre (et s'enrichir mutuellement), puis d'envisager comment améliorer notre méthode d'estimation de la contribution du compartiment organique des sols aux émissions de CO₂ pour répondre à la demande des modèles globaux.

L'APPROCHE GLOBALE DU GIEC

Dans l'arborescence des différentes contributions envisagées par le GIEC*, celle du COS figure comme l'une des quatre composantes de l'agrégat « forêsterie et changements d'utilisation du sol »**. La procédure standard préconisée par le GIEC pour l'estimation de cette contribution croise six catégories de sols (sols tourbeux et cinq catégories de sols minéraux) avec huit types de climats. Elle fournit pour chacune des combinaisons concernant les sols minéraux une valeur moyenne du stock de carbone sur 30 cm de profondeur et sous végétation naturelle. Des modes d'utilisation et d'occupation du sol (liste non exhaustive) sont ensuite recensés pour chacun des types de climats et des coefficients proposés pour passer du stock de carbone sous végétation naturelle à celui du sol d'une parcelle anthropisée. De l'avis même des rédacteurs des *guidelines* du GIEC, il ne s'agit que d'une première approximation pour pallier l'absence de données régionales, surtout en milieu tropical. L'effet de l'an-

thropisation est alors décomposé en trois facteurs : F_b, un facteur dit de base, lié au passage du sol sous végétation naturelle au sol cultivé ; F_t, un facteur correctif lié au travail du sol ; et F_r, un facteur correctif lié aux intrants en carbone (gestion des résidus, fumure...).

Un tableau, très incomplet pour la zone tropicale, fournit des valeurs pour ces différents facteurs.

CONVERGENCES ET DIVERGENCES

Notre approche et celle du GIEC convergent sur deux points essentiels :

- Le COS est comptabilisé indépendamment du carbone de la biomasse.
- Dans les documents du GIEC, il est indiqué que la seule méthode envisageable aujourd'hui pour estimer globalement les émissions de CO₂ à partir du sol est celle d'un bilan effectué sur une période donnée (20 ans). Ce bilan nécessite de connaître, pour chaque grand type d'utilisation du sol, le stock par hectare et la surface occupée au début et à la fin de la période considérée. C'est bien à ce type de bilan que doit nous conduire le développement de notre méthode.

Les divergences, parfois simples différences, sont abordées en reprenant, point par point, la procédure du GIEC.

□ Informations pédologiques

Pour le GIEC, le type de sol constitue l'une des bases du compartimentage de la contribution du COS à l'émission de CO₂. Il s'agit en fait d'un type de sol très simplifié par rapport aux grands systèmes taxonomiques : les andosols et les sols tourbeux sont tout d'abord considérés à part ; pour les autres sols, ne sont pris en considération que la texture – sol sableux ou argileux –, puis l'activité*** des argiles pour les sols argileux, soit 3 catégories.

Il est tout à fait possible d'adopter le même compartimentage, et un codage adapté à ce compartimentage, en

reprenant les données disponibles tant à l'I.F.P. qu'au NBSS & LUP. Ce nouveau compartimentage conduira à un nouveau modèle.

Pour le GIEC, il n'est pas *a priori* demandé de s'intéresser aux textures de différents horizons du sol. Notre étude en a cependant démontré l'intérêt, notamment pour les sols anthropisés et nous voyons là une possibilité de préciser les normes des modèles globaux dans les étapes ultérieures de leur développement.

□ Informations climatiques

Les subdivisions des climats tropicaux proposées par le GIEC (sec, humide à longue saison sèche, humide à courte saison sèche et très humide****) correspondent parfaitement au découpage adopté en Inde et sont donc applicables sans modification.

□ Végétation naturelle

Sous végétation naturelle, nos estimations sont en désaccord très net avec les chiffres – normes – proposés par le GIEC.

En zone humide à longue saison sèche, dans les sols à argile de faible activité et sous végétation naturelle, les tableaux du GIEC indiquent 50 t/ha de C pour la couche 0-30 cm ; notre modèle estime à

* *Guidelines for national greenhouse gas inventories : reference manual* (I.P.C.C., 1996).

** Le GIEC envisage six agrégats principaux : "Energy", "Industrial processes", "Solvent and product use", "Agriculture", "Land use changes and forestry" et "Waste" et il propose pour chacun des procédures d'estimation de la contribution pour l'émission/la séquestration des gaz à effet de serre.

*** L'activité des argiles s'estime en rapportant la capacité d'échange cationique (CEC) du sol à 100 g d'argile. Le sol est dit *low activity clay soil* si ce rapport est inférieur à 24 cmol⁺/100g, *high activity clay soil* dans le cas contraire.

**** Traductions respectives de *tropical dry* ; *tropical moist (long dry season)* ; *tropical moist (short dry season)* ; et de *wet*.



Cultures pluviales et cultures irriguées dans la zone semi-aride du plateau du Deccan.
Rainfed crops and irrigated crops in the semi-arid zone of the Deccan Plateau.

85 t/ha le stock de C pour la seule couche 0-10 cm (en admettant une densité apparente de 1,4).

En zone sèche, dans les sols à argile de forte activité sous végétation naturelle, le GIEC donne 60 t/ha de C pour la couche 0-30 cm, notre modèle estime à 51 t/ha le stock de C pour la seule couche 0-10 cm (toujours pour une densité apparente de 1,4).

Le désaccord porte donc autant sur les taux de COS eux mêmes (sous estimés par le GIEC par rapport aux cas réels de l'Inde du Sud) que sur le classement des écosystèmes par rapport à leur richesse en COS (cf., ci-dessus, le classement établi à partir de la première équation du modèle). De notre point de vue, le deuxième type de désaccord est plus fondamental, donc plus grave que le premier.

□ Anthropisation

Ici encore nous notons une divergence assez grande sur la façon d'aborder le problème bien qu'en théorie le produit des coefficients proposés par le GIEC corresponde au facteur C_x introduit par JENNY et RAYCHAUDHURI (1960) et utilisé dans notre tableau IV.

$$F_b \times F_t \times F_i = C_x$$

Nous avons abordé les milieux anthropisés par des mesures directes effectuées sur ces milieux et une modélisation spécifique, le calcul de C_x n'intervenant qu'en dernière phase. Le GIEC considère, semble-t-il faute d'avoir des données plus précises, les milieux anthropisés comme des « altérations » de milieux naturels (i.e. sous végétation naturelle). Dans un tel cadre, à forte connotation écologiste, les estimations en milieu anthropisé ne valent que ce que valent les estimations en milieu naturel (cf., ci-dessus, nos critiques à ce sujet). De plus, nous voyons bien là, grâce à nos estimations, moyen de compléter les données manquantes du GIEC.

D'une façon plus théorique, la richesse du modèle GIEC, qui fait intervenir pas moins de trois coefficients pour passer de la teneur en COS du milieu naturel à celle du milieu anthropisé, nous paraît excessive par rapport à la qualité générale des autres données de ce modèle global.

CONCLUSIONS

Cet article a montré les limites de l'exercice qui consiste à utiliser des données pédologiques et environnementales existantes pour estimer les quantités de carbone organique présentes dans le sol à l'échelle régionale : l'exercice n'est possible que si les données sont suffisamment complètes ; il manque souvent une description correcte de l'utilisation du sol correspondant à la valeur mesurée du carbone ; la plupart du temps aussi, les densités apparentes n'ont pas été mesurées. S'il est possible de faire des



hypothèses, ou des estimations réalistes, pour remplacer les valeurs manquantes de densité apparente, il est impossible de renseigner correctement *a posteriori* la banque de données en ce qui concerne l'utilisation du sol.

Dans le cas étudié, les données ont permis d'établir une carte de la teneur en COS pour les sols d'un district de 10 000 km². Étendre cette cartographie à un territoire plus vaste, la reprendre pour un autre état de l'occupation du sol, et finalement estimer une émission de CO₂ entre deux états successifs, n'est ensuite qu'une question de moyens matériels à mettre en œuvre.

Avant de le faire, il convient de s'interroger sur les modifications à apporter à nos calculs (au sens large, c'est-à-dire en incluant la phase de codage des données préalable aux calculs proprement dits) pour répondre à la demande exprimée au travers du mo-

dèle global proposé par le GIEC. Nous nous sommes rendus compte que des normes proposées par les auteurs du modèle global du GIEC ne correspondaient pas à la réalité des écosystèmes et des agrosystèmes de l'Inde du Sud.

La convergence entre les deux approches ne pourra donc se réaliser qu'au prix d'un effort réciproque :

- Effort de notre part pour coder nos informations selon le compartimentage du modèle global ; effort également pour intégrer nos données sur la profondeur standard (30 cm pour le GIEC) du modèle global.

- Effort de la part des auteurs du modèle global pour tenir compte d'une réalité des situations se traduisant certainement par un plus grand nombre de catégories pré-établies.

Nous ne pouvons donc que constater qu'il reste en fait un important fossé à combler pour faciliter l'insertion des

résultats obtenus par les spatialisations régionales dans les modèles globaux.

▶ Gérard BOURGEON
CIRAD-Amis
Domaine de Lavalette
BP 5035, 34032 MONTPELLIER CEDEX 1
France

▶ Sébastien SALVADOR BLANES
INRA-SESCPF
avenue de la Pomme de Pin
BP 20619, Ardon
45160 OLIVET CEDEX
France

▶ François HOULLIER
CIRAD-Amis
Campus international de Baillarguet
BP 5035, 34032 MONTPELLIER CEDEX 1
France

▶ C. S. HARINDRANATH
C. R. SHIVAPRASAD
Regional Centre NBSS & IUP
Hebbal, BANGALORE 560024
Inde

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARROUAYS D., KICIN J. L., PÉLISSIER Ph., VION I., 1994.

Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation : analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique. *Etude et Gestion des Sols* 1 (2) : 29-38.

BATJES N. H., 1996.

Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47 : 151-163.

BENNEMA J., 1974.

Organic carbon in oxisols. *Pédologie* 24 : 119-146.

BERNOUX M., ARROUAYS D., CERRI C. C., ALENCASTRO GRAÇA P., VOLKOFF B., TRICHET J., 1998.

Estimation des stocks de carbone des sols du Rondônia (Amazonie brésilienne). *Etude et Gestion des Sols* 5 : 31-42.

ESWARAN H., VAN DEN BERG E., REICH P., 1993.

Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal* 57 : 192-194.

FERRY B., 1992.

Les humus forestiers des Ghâts occidentaux en Inde du Sud. Facteurs climatiques, édaphiques et biologiques intervenant dans le stockage de la matière organique du sol. Thèse, Université Nancy-I, France, 260 p.

JENNY H., RAYCHAUDHURI S. P., 1960.

Effect of climate and cultivation on nitrogen and organic matter reserves in Indian soils. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi, Inde, 126 p.

PASCAL J.-P., 1982a.

Carte des bioclimats des Ghâts occidentaux (1 500 000). Institut français de Pondichéry, travaux de la section scientifique et technique, hors série 17, Pondicherry, Inde.

PASCAL J.-P., SHYAM SUNDER S., MEHER HOMJI V. M., 1982b.

Forest Map of South India, sheet Shimoga (1 250 000). Institut français de Pondichéry, travaux de la section scientifique et technique, Hors série 18b, Pondicherry, Inde.

SEHGAL J., SHIVAPRASAD C. R., REDDY P. S. A., SARMA V. A. K., PURANIK MATH K. V., NARASIMHA MURTHY H., 1996.

Karnataka soils (4 feuilles au 1 500 000). National Bureau of Soil Survey & Land Use Planning in co-operation with Department of Agriculture of Karnataka, Bangalore Inde.

VELAYUTHAM M., RAGHU MOHAN N. G., BOURGEON G., HARINDRANATH C. S., SHIVAPRASAD C. R., SALVADOR S., 1998.

Detailed estimations and mapping of soil organic carbon at district level in South India. In : Actes (Cédérom) du 16^e Congrès Mondial de Science du Sol, 20-26 août 1998, Montpellier, France.

R É S U M É

CARTOGRAPHIE DU CARBONE ORGANIQUE DES SOLS EN INDE DU SUD Exemple du district de Shimoga au Kamataka

Les sols constituent l'un des principaux réservoirs terrestres de carbone organique ; il est donc important d'estimer le carbone perdu par ce réservoir quand interviennent des changements d'utilisation des terres. Ces pertes peuvent s'estimer à partir de deux états du stock et le but de l'étude présentée était de mettre au point une méthode d'estimation et de cartographie du carbone des sols à l'échelle régionale, c'est-à-dire pour plusieurs dizaines de milliers de km².

Cette méthode a été mise au point en Inde du Sud et les résultats sont, pour l'instant, limités à l'étude du taux de carbone de la couche superficielle du sol. Un modèle statistique décrit le carbone en fonction de paramètres pédologiques et environnementaux. Il permet d'estimer le carbone pour différents types d'utilisation des terres et d'en dresser la carte pour un état connu de l'utilisation des terres. Des exemples illustrent les variations du taux de carbone liées à la transformation d'écosystèmes en divers types d'agrosystèmes.

Les améliorations de la méthode pour satisfaire aux requêtes des modèles globaux de changement climatique sont ensuite abordées en prenant comme référence les directives du GIEC.

Mots-clés : effet de serre, carbone organique, sols, cartographie, Inde.

A B S T R A C T

MAPPING ORGANIC CARBON IN SOILS IN SOUTHERN INDIA The example of the Shimoga district in Kamataka

Soils are one of the main terrestrial reservoirs of organic carbon. So it is important to estimate the amount of carbon lost by this reservoir when changes in land use occur. These losses can be assessed on the basis of two states of the stock, and the goal of this study was to develop a method for estimation and mapping of soil organic carbon on a regional scale, in other words for several thousand square miles.

This method has been developed in South India and, for the time being, the results are limited to a study of carbon content in the soil surface layer. A statistical model describes the carbon content on the basis of pedological and environmental parameters. It helps to estimate the carbon content for different types of land use and to draw up the map for a known state of land use. Examples are given to illustrate the variations in carbon content associated with the transformation of ecosystems in different sorts of agro-systems.

Improvements of the method to meet the requirements of global climate change models are then tackled, taking IPCC guidelines as a reference.

Key words : greenhouse effect, organic carbon, soils, mapping, India.

R E S U M E N

CARTOGRAFÍA DEL CARBONO ORGÁNICO DE LOS SUELOS DEL SUR DE LA INDIA Ejemplo del distrito de Shimoga, en Kamataka

Los suelos constituyen una de las principales reservas terrestres de carbono orgánico y, por consiguiente, es de suma importancia evaluar el carbono perdido por estas reservas cuando se modifican las condiciones de utilización de las tierras. Estas pérdidas se pueden evaluar a partir de dos estados de las existencias y el objeto del presente estudio ha consistido en desarrollar un método de evaluación y de cartografía del carbono de los suelos a escala regional, para varias decenas de miles de kilómetros cuadrados.

Este método se ha desarrollado en el sur de la India y, por el momento, los resultados se limitan al estudio de la concentración de carbono de la capa superficial del suelo. Un modelo estadístico presenta la concentración de carbono acorde a parámetros pedológicos o medioambientales. El método permite, pues, evaluar la concentración para diversos tipos de utilización de las tierras y elaborar un mapa para un estado conocido de utilización de las tierras. Varios ejemplos ilustran las variaciones de la concentración de carbono, vinculadas con la transformación de ecosistemas en diversos tipos de agrosistemas.

Las mejoras del método para satisfacer los requerimientos de los modelos globales de cambios climáticos se examinan a continuación tomando como referencia las directivas del I.P.C.C..

Palabras clave : efecto invernadero, carbono orgánico, suelos, cartografía, India.

SYNOPSIS

MAPPING SOIL ORGANIC CARBON IN SOUTH INDIA

The example of the Shimoga district in Karnataka

G. BOURGEON, S. SALVADOR BLANES, F. HOULLIER, C. S. HARINDRANATH, C. R. SHIVAPRASAD

Soils store about three times more organic carbon than the vegetation biomass, so concerns about "greenhouse effect" lead quite naturally to questions about the role of soils in terms of carbon source or sink. The initial aim of this study was to prepare a map of soil organic carbon [SOC map] to help with environmental management at the regional scale. This map now seems to be an incomparable tool to estimate the soil carbon stock (at a given moment and for a given state of land cover). In this paper, we discuss our map and mapping method can be adapted to meet the requirements of global change models.

METHOD

In South India (figure 1), where the work was done, it is easy to cover a wide range of land cover types by studying a small area. In our example, over 200 000 km², the altitude varies from 0 to more than 2 000 m, and rainfall from 600 to 7 000 mm with major consequences on natural and anthropogenised ecosystems.

We have considered the SOC content at a given point (e.g. a soil profile) as a function of soil characteristics, climate, altitude... and we have looked for a multiple regression model :

$$C = f(\text{soil, climate, altitude, etc}).$$

In this equation, C represents either the carbon content for a given horizon, or the carbon stock calculated to a certain depth. The model is an additive model with no interaction, calculated thanks to the soil profile data coded according to the classes used in the factor maps (table I). It is worth bearing in mind that, with this calculation method, the model obtained depends on the zone from which the data originate ("data-driven regression").

The model was then hooked up with a GIS to prepare the carbon map (carbon content of the surface horizon) from the general overlay of the factor maps (figures 2 and 3).

RESULTS

We separately considered soils in environments slightly affected by man (forest areas showing little or no disturbance), with a carbon content ranging from 3-15 %, and soils in environments markedly affected by man (i.e. cultivated areas) showing a carbon content of around 1 %. Thus, two equations constitute the statistical model.

The first equation, obtained for soils under forest (table II) retains only two factors: the forest type and the texture of the B-horizon. This equation confirms the role of vegetation and texture, and it does permit a quantification of their effect.

In the second equation, obtained for soils in environments markedly affected by man (table III) numerous factors are involved and this equation illustrates, better than the first one, the advantage of the multiple regression method.

Table IV shows how the previous results can be used to estimate the SOC content of the surface horizon for specific situations ; the last column of this table (cultivation index Cx) helps to describe the loss of carbon due to the shift from a natural forest ecosystem to a cropping system.

OUR METHOD COMPARED TO GLOBAL MODELS

Global models dealing with the greenhouse effect use a downward approach and the global emission is broken down into "aggregates" corresponding to different pre-identified sources. In the IPCC guidelines, the SOC contribution features as one of the four components of the Land-Use Change and Forestry "aggregate". It seems to be easy to modify the coding of our data before calculation of the model so that our findings satisfy the pigeonholing of the IPCC.

Our approach and that of IPCC overlap on two essential points : (i) the SOC is separated from the carbon of the vegetation biomass; and (ii) the flux of CO₂ to or from atmosphere is assumed to be equal to the change in soil carbon stock over a given period (20 years is recommended by IPCC).

We have noticed considerable differences between the SOC values estimated in India and the standard values provided for broad types of native vegetation by the IPCC guidelines ; these differences raise more significant issues. According to its "default calculation procedures", the IPCC usually (generally in tropical zones) considers anthropogenised environments as "transformations" of natural environments (i.e., under native vegetation) and applies corrective factors to standard values to calculate carbon stocks. We have dealt with anthropogenised environments using direct measurements and a specific modeling. From our viewpoint, the use of standard values should be considered as a very initial approximation (a stopgap) which should be replaced by country level data as soon as they are available.

SUMMARY AND PERSPECTIVES

The need to estimate the SOC at a regional scale has often been emphasized. The research described here, carried out in a tropical area, represents a typical response to this expectation. The article also shows the limitations of the exercise which consists in reusing existing data to estimate the greenhouse gas emissions linked with land-use changes. The exercise is only possible if the database is sufficiently complete: bulk density values and a precise description of the land-use when the soil profiles were described and sampled are often missing. In conclusion, we may notice that there is still a major gap to be filled in to facilitate the inclusion of the findings obtained by regional estimates in global models.