

Évolution des stocks de carbone des sols après déforestation :

Analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique

D. Arrouays (1), J.L. Kicin (2), Ph. Pélissier (3), Isabelle Vion (4)

1. INRA, Science du Sol, Service d'Étude des Sols et de la Carte Pédologique de France, Bordeaux, 33140, Pont de la Maye, France

2. INRA, Station de Bioclimatologie, 33140, Pont de la Maye, France

3. ENITA de Bordeaux, 1 cours du Général de Gaulle, 33175, Gradignan, France

4. Université de Dijon, Sciences de la Terre, 6 Bd Gabriel, 21000, Dijon, France

RÉSUMÉ

On présente succinctement un ensemble de recherches, de résultats et de perspectives concernant la mise au point de modèles d'intégration spatiale de l'évolution des stocks de carbone (C) organique des sols à l'échelle d'une petite région naturelle. La région choisie est caractérisée par des stocks initiaux importants sous forêt, et par une conversion de la quasi totalité des forêts en monoculture de maïs grain, conversion qui a débuté au début des années 60. On construit successivement un modèle de la distribution verticale des stocks de C sous forêt, un modèle bi-exponentiel de décroissance de ces stocks sous monoculture de maïs, et un modèle de progression spatio-temporelle des défrichements. L'approche retenue permet de produire une estimation des pertes en C des sols sur 4 000 hectares de 1948 à nos jours. Différentes techniques d'analyse et de modélisation spatiales sont en cours d'utilisation afin de réaliser un transfert d'échelle permettant cette évaluation et la cartographie des stocks de C à l'échelle de l'ensemble des paysages concernés (75 000 hectares).

Mots clés : Sols, carbone organique, déforestation, monoculture de maïs grain, CO₂.

SUMMARY

EVOLUTION OF CARBON STORAGE IN SOILS AFTER FOREST CLEARING : SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS AT THE SOIL-SCAPE LEVEL

This study aims to analyse the evolution of carbon storage in soils after forest clearing and continuous corn cropping. The studied area is a small natural area (Fig. 1) characterized by large initial amounts of C stored in soils under forest vegetation and by a change in land use, from forest to intensive continuous corn cropping. A model of the vertical distribution of C amounts in forest soils is built (Fig. 2). Then, a chronosequence study enables to propose a bi-compartmental model of C decrease under corn cropping (Fig. 3), assuming that the initial C pool can be divided into two pools whose rates of decline are different (Fig. 4). An analysis of the forest clearing progression is then realized, and geographical estimates of clearing dates are produced (Fig. 5). The temporal progression of clearing is studied (Fig. 6). Combining informations about initial C pools, rates of decrease, and date of clearing, leads to an estimation of the present C amounts in soils. Results are validated by comparing predicted pools to the values observed on a systematical network of sampling (Fig. 7). An estimate of the global carbon release at the small natural area level is then produced (Fig. 8). Different spatial modelling techniques are now tested to enable the change of scale necessary for extrapolating these results to the whole concerned region.

Key words : Soils, organic carbone, forest cleaning, continuous corn cropping, CO₂.

OBJECTIFS

Les teneurs en carbone organique (C) des sols et leur évolution à long terme sont des caractéristiques essentielles influant sur leurs fonctionnements et leurs comportements. Celles-ci sont aussi une des données d'entrée nécessaires à l'établissement de modèles prédictifs du fonctionnement des sols en terme de source ou de puits de CO₂ pour l'atmosphère (Post *et al.*, 1982 ; Schlesinger, 1984, 1986, 1991 ; Eswaran *et al.*, 1993).

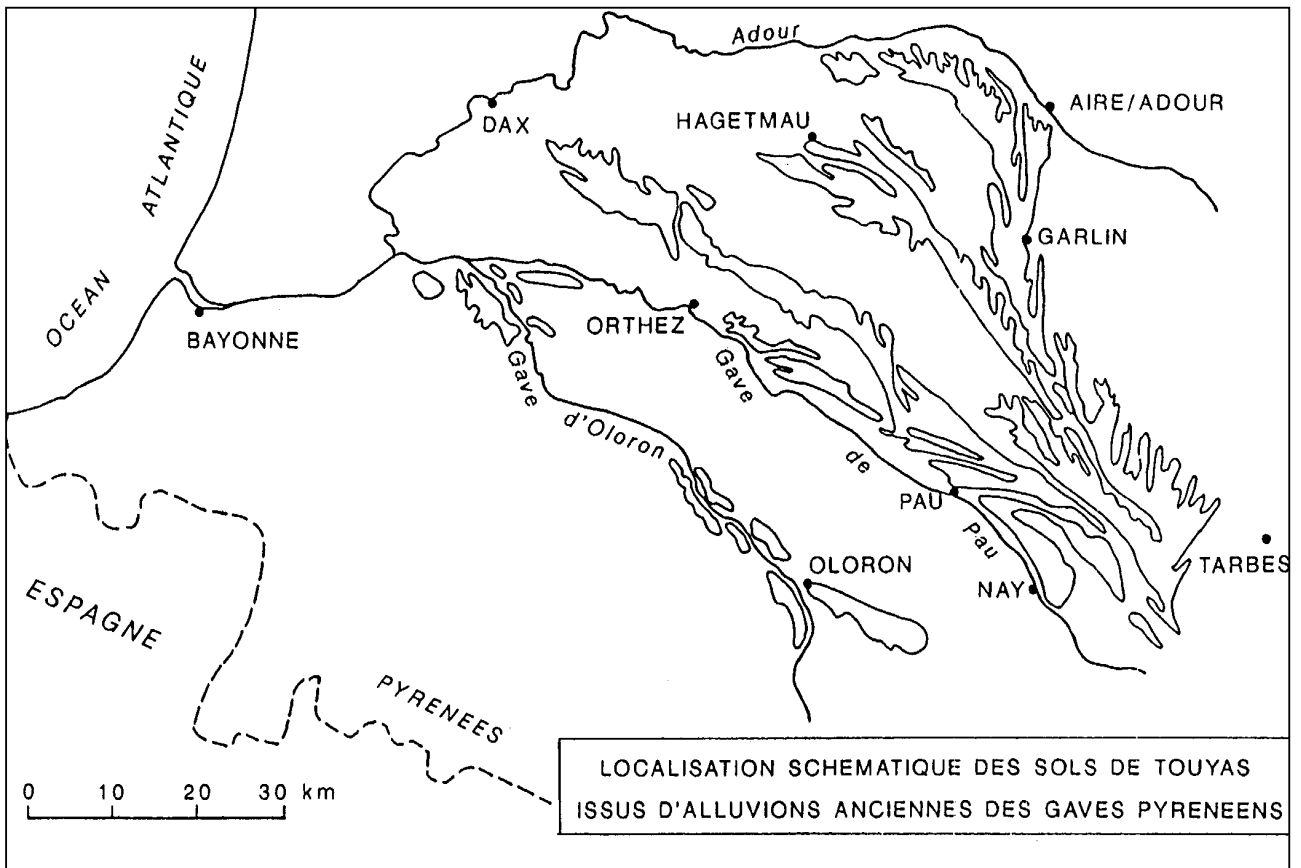
De nombreuses études chronoséquentielles détaillées (par exemple : Cerri *et al.*, 1985 ; Mariotti et Balesdent, 1990 ; Balesdent *et al.*, 1990 ; Martin *et al.*, 1990) ont permis d'améliorer nos connaissances sur la dynamique du carbone des sols sous l'effet de changements d'utilisation. Cependant, le passage à une approche cartographique sur de grands espaces n'a été que rarement effectué (citons cependant pour mémoire

Huntington *et al.*, 1988 ; Grigal et Ohmann, 1992 ; Stone *et al.*, 1993). Dans leurs revues de synthèse, Schlesinger (1991) et Eswaran *et al.*, (1993) soulignent à ce propos le manque de données disponibles et la difficulté de formuler des hypothèses plausibles sur la distribution et l'évolution probable de ces stocks. Ainsi, à l'échelle d'une petite région naturelle, cette analyse est difficile en raison des nombreux facteurs qui régissent l'évolution de cette caractéristique (climat, régime hydrique, occupation du sol et histoire des parcelles, gestion organique...).

Dans le sud-ouest de la France, les sols de touyas, initialement très riches en C (Arrouays *et al.*, 1992 ; Arrouays et Pélissier 1994a) ont été défrichés intensivement depuis 35 ans pour la monoculture de maïs grain. Sur ce milieu particulier, on se propose de mettre au point des outils d'intégration dans l'espace de l'évolution des stocks de C à l'échelle de la petite région naturelle.

Figure 1 - Localisation de l'étude

Figure 1 - Study location



MATÉRIEL ET MÉTHODES

Localisation et sols

L'étude est localisée sur les terrasses anciennes des gaves pyrénéens comprises entre l'Adour et le Gave de Pau ; elle est plus particulièrement focalisée sur une portion de la terrasse la plus ancienne, localisée sur la feuille IGN au 1/25 000 d'Aire sur Adour (Fig. 1).

Les sols sont des sols limoneux humifères profonds connus sous le nom vernaculaire de "touyas" (Arrouays *et al.*, 1992) et intégrés dans le Référentiel Pédologique sous la référence des Veracrisols (Arrouays, 1992a). Dans la soil taxonomy, ils peuvent être classés comme des Vermic Haplumbrepts.

Initialement sous végétation forestière à sous-bois de landes, ils sont caractérisés par un pH acide (compris entre 4 et 4,9), des teneurs importantes en aluminium échangeable

(Callot et Juste, 1971 ; Arrouays *et al.*, 1992), et une incorporation profonde de la matière organique sous l'effet d'un brassage biologique intense. Leur épisolum humifère est épais, acide, et néanmoins caractérisé par une incorporation rapide de la litière. Il constitue un eumull désaturé (Arrouays *et al.*, 1992). Dans l'échantillonnage retenu pour l'étude chronoséquentielle (Tableau 1), les taux d'argile varient de 15 à 28 % tandis que les limons totaux représentent une gamme allant de 60 à 74 %.

Ces sols ont été défrichés intensivement pour la monoculture de maïs grain depuis le début des années soixante.

Étude de la distribution verticale du C sous forêt

Sept profils sous forêt ont été prélevés systématiquement par incréments de 10 cm de profondeur afin de caractériser le gradient vertical de concentration de C au sein des sols étudiés. Les déterminations ont concerné la granulométrie

Tableau 1 - Caractéristiques analytiques des échantillons utilisés dans la chronoséquence.

Table 1 - Analytical characteristics of samples used for the chronosequence study

Site	Durée de culture ans	carbone g/kg	dapp g/cm ³	C léger g/kg	argile %	Lf %	Lg %	Sf %	Sg%	pH eau
Zone L										
LF	0	55		19,28	27,5	33,9	26,5	9,2	2,9	4
LC1	17	26,1	1,27	1,29	21,9	37,9	29,5	7,9	2,8	6,4
LC2	19	17,8	1,49	1,42	22,4	34,7	29,7	9,6	3,6	6,1
LC3	30	18,1	1,44	2,11	24,1	35,1	30,5	7,7	2,6	6,3
LC4	17	27,8	1,24	1,65	24,9	38,2	28	6,7	2,2	6,2
LC5	8	28,5	1,41	1,96	21,8	40,6	28,2	7	2,4	5,6
LC6	5	31,9	1,47	1,78	21,6	42,3	27,6	6,6	1,9	5,1
Zone M										
MF	0	46,9		14,54	19,1	42,3	29	7,3	2,3	3,9
MC1	24	24,5	1,28	1,58	19	42,3	29,7	6,8	2,2	6
MC2	27	26,6	1,24	1,3	20,3	42,7	28,4	8,1	0,5	6
MC3	3	36,9	1,35	2,33	23,5	37,2	29,8	7	2,5	5,3
Zone H										
HF	0	49,8		19,87	18,6	36,7	33,3	8,7	2,7	4,2
HC2	22	23,3	1,21	1,39	21,2	33,2	33,4	9,7	2,5	5,5
HC3	32	15,7	1,32	1,04	15,6	37,2	33,8	10,2	3,2	6,2
HC4	19	21,9	1,28	1,17	20,1	35	26,2	11,6	7,1	5,6
HC5	31	19,9	1,52	1,86	15,4	38,5	34,7	8,6	2,8	6
HC6	12	23,4	1,31	1,7	16,5	34,8	31,7	12,3	4,7	5,5

(Robinson), le taux de C (Anne), Le taux de C des fractions légères [fractionnement densimétrique par centrifugation dans un mélange bromoforme/éthanol de densité 2 (Monnier *et al.*, 1962)], et la densité apparente (cylindres).

Construction d'un modèle temporel

On réalise une étude chronoséquentielle en comparant les stocks de C sous forêt et sous des parcelles adjacentes de dates de défrichement différentes. Les sites forestiers sont des parcelles de Pin Maritime (*Pinus pinaster* Ait). Le sous-bois est principalement constitué de *Ulex nanus*, *Molinia coerulea*, *Pteris aquilina* et *Ulex europaeus*. Tous les sites agricoles ont été défrichés pour la monoculture intensive de maïs grain non irriguée, et sans autre restitution organique que les résidus de culture.

Trois secteurs ont été retenus, (L = 43°32'N 0°40'W, H = 43°39'N 0°41'W, M = 43°34'N 0°18'W) comprenant un site forestier chacun et des sites agricoles adjacents de dates de mise en monoculture différentes. Les secteurs reçoivent de 1000 à 1150 mm de précipitations par an, et la température moyenne annuelle est de l'ordre de 13°C. Les altitudes varient de 105 à 200 m, et les pentes sont toujours inférieures à 2%.

L'horizon cultivé (labour) et la couche sous-jacente de la profondeur du labour à 50 cm ont été prélevés sur huit profils pour chaque parcelle agricole. Les sites forestiers ont été prélevés par incrément de 10 cm de profondeur (huit échantillons par couche). Les huit échantillons de chaque tranche prélevée ont été mélangés sur place et aliquotés pour obtenir un seul échantillon pour les mêmes déterminations qu'au que pour les sols forestiers

Étude géographique de la progression des défrichements

Cette étude est réalisée par interprétation de séries de photographies aériennes panchromatiques au 1/25 000 (IGN, 1948, 1957, 1969, 1974, 1979, 1984). Elle per-

met de produire une cartographie informatisée de l'histoire des parcelles au sein d'une portion du paysage étudié (8 000 hectares).

Combinaison spatiale et temporelle des informations et validation

Les informations concernant la progression spatiale des défrichements et le rythme de disparition du C organique sont combinées au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour produire des cartes de stocks de C de 1948 à nos jours. Un réseau systématique de prélèvements (1 km x 1 km) est utilisé pour la validation des résultats.

RÉSULTATS

Distribution verticale des stocks de C sous forêt

La distribution verticale des stocks de C sous forêt peut être modélisée selon une équation d'amortissement exponentiel (Fig. 2, d'après Arrouays et Pelissier, 1994a). Cette équation s'écrit :

$$(1) \quad (C_x - C_2)/(C_1 - C_2) = (e^{-bx} - e^{-bx_2}) / (e^{-bx_1} - e^{-bx_2})$$

x et C_x étant la profondeur médiane et le taux de C d'un échantillon donné, x_1 et C_1 la profondeur médiane et le taux de C de la couche de surface (0-10 cm), x_2 et C_2 la profondeur médiane et le taux de C de la couche la plus profonde (90-100 cm). b

Figure 2 - Modélisation des profils de concentrations volumiques de carbone organique des sols sous forêt.

Figure 2 - Modelling C storage profiles in forest soils.

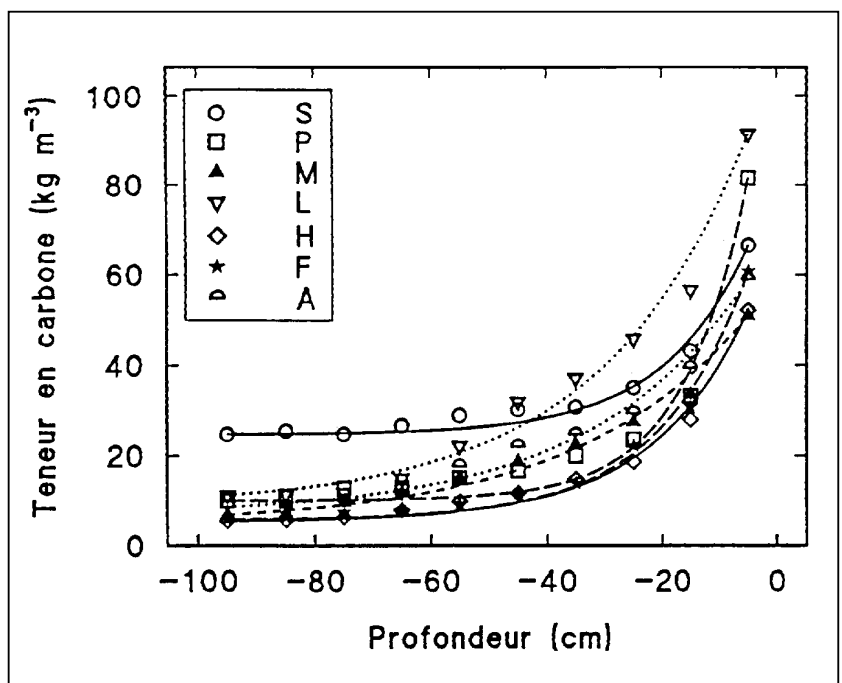


Figure 3 - Décroissance des stocks de carbone organique des horizons labourés et modèle bi-exponentiel. Les points d'abscisse 0 sont situés sous forêt (stock dans la couche de même masse que la moyenne des horizons labourés correspondants).

Figure 3 - Bi-exponential decrease of C amounts vs time of cultivation. Zero ages values are forest soils.

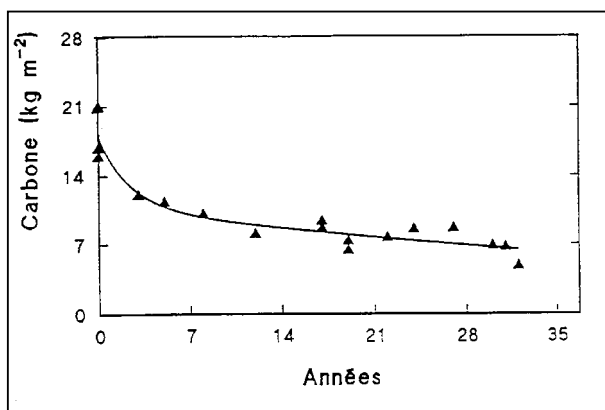
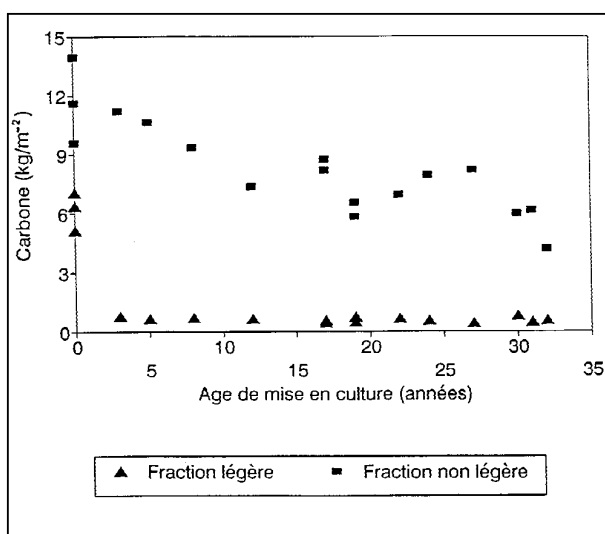


Figure 4 - Décroissance des stocks de carbone organique des fractions légères et denses des horizons labourés.

Figure 4 - Light and heavier fraction C decrease in tilled layers.



représentant la courbure de la courbe, et pouvant être estimé par une analyse de la tranche 20-30 cm.

Ces résultats, et l'établissement d'une relation entre taux de C et densité apparente de ces sols (Arrouays et Pelissier, 1994a) permettent d'envisager une procédure de prélèvement simplifiée pour l'évaluation des stocks de C présents sous forêt.

Décroissance des stocks de C sous monoculture de maïs grain

L'étude chronoséquentielle montre une décroissance rapide du stock organique durant les premières années de cultures (Fig. 3, d'après Arrouays et Pélissier, 1994b). Cette décroissance concerne tout particulièrement le stock de C organique des fractions légères du sol (Fig. 4, d'après Arrouays, 1994).

Ainsi la décroissance des stocks de C peut être modélisée selon une équation bi-exponentielle supposant que le stock organique de départ peut être décomposé en au moins deux fractions, une fraction très labile détruite durant la première phase de décroissance rapide, une fraction plus résistante, disparaissant à un rythme beaucoup plus faible. Pour l'horizon travaillé, ce modèle bi-exponentiel s'écrit (Arrouays et Pélissier, 1994b) :

$$(2) \quad C = 0,605 C_0 e^{-0,016 t} + 0,395 C_0 e^{-0,423 t}$$

Progression spatio-temporelle des défrichements

L'étude géographique permet de cartographier la progression spatio-temporelle des défrichements. Cette progression s'est effectuée des bords vers le centre des terrasses, colonisant ainsi des terres de plus en plus éloignées des lieux d'habitation. Les cartes (Fig. 5) suggèrent que le défrichement le plus intensif s'est effectué entre 1957 et 1974 ; ceci peut être vérifié en cumulant les surfaces défrichées en fonction du temps, pour obtenir une courbe de la progression temporelle des défrichements (Fig. 6) qui présente une allure de sigmoïde logarithmique déjà signalée par ailleurs (Arrouays, 1992b).

Cartographie et validation

Les informations sont combinées dans un SIG afin de produire des cartes de classes de stocks de C de 1948 à 1992. Les résultats sont validés par confrontation avec les valeurs observées sur la grille de prélèvements (Arrouays *et al.*, 1994a). La figure 7 montre les valeurs observées et leur dispersion par rapport au modèle prédictif obtenu en appliquant l'équation 2 avec un taux initial de C correspondant au taux moyen observé sous forêt et une date de défrichement correspondant à la médiane de la classe de date de défrichement obtenue par interprétation photographique. Bien que la dispersion des résultats apparaisse élevée, cette confrontation valide *a posteriori* nos estimations géographiques. Une régression a

Figure 5 - Progression spatio-temporelle des défrichements, terrasse d'Aire sur Adour.

Figure 5 - Spatio-temporal dynamic of forest clearing.

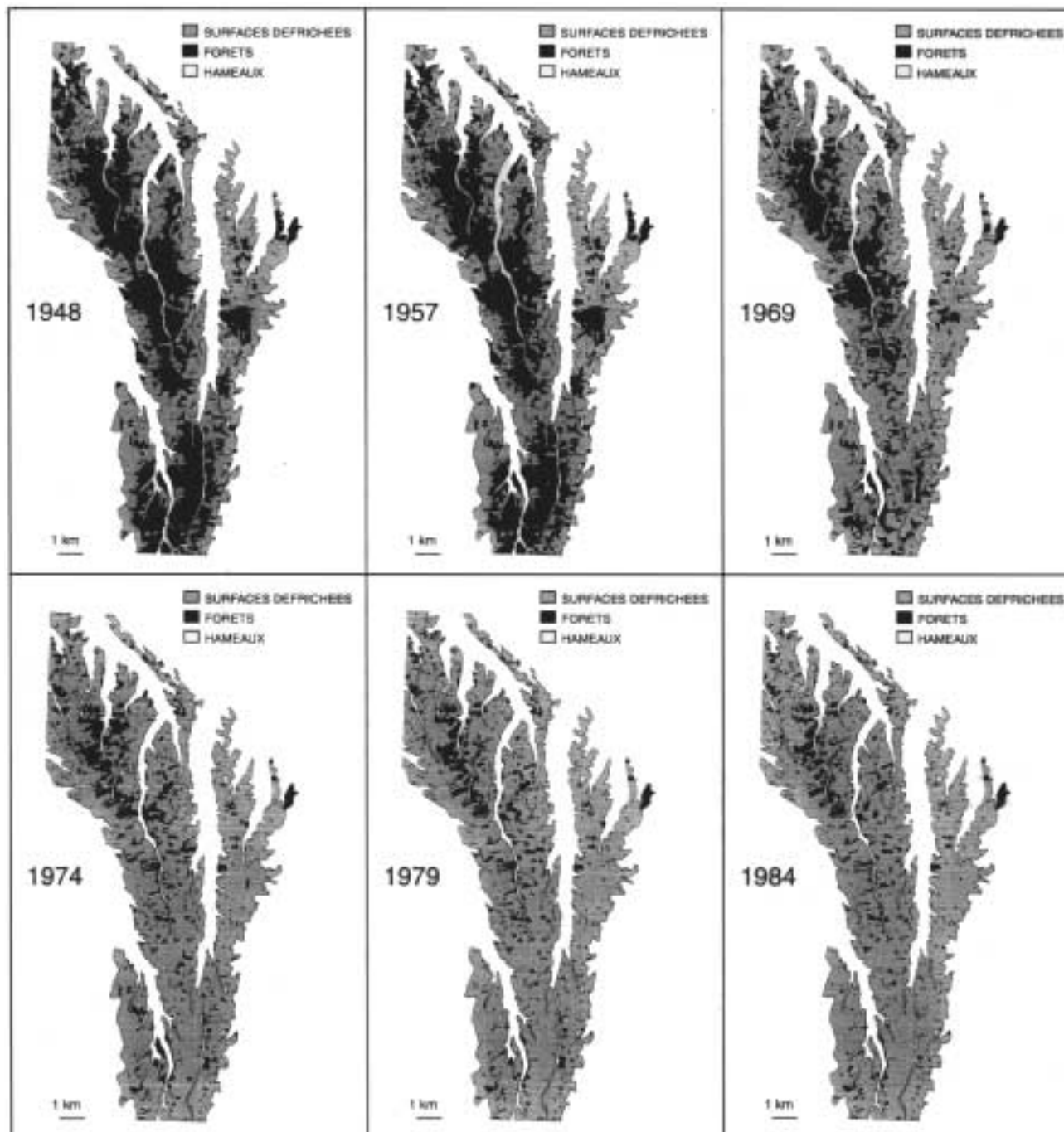


Figure 6 - Courbe cumulative des surfaces défrichées en fonction du temps, terrasse d'Aire sur Adour.

Figure 6 - Cumulative curve of cleared areas.

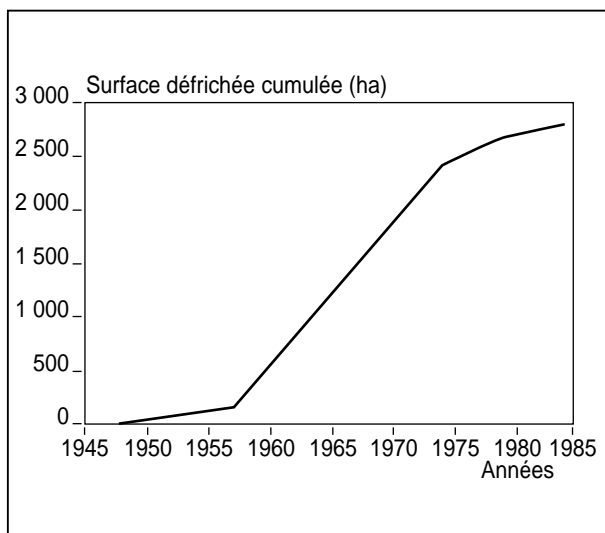
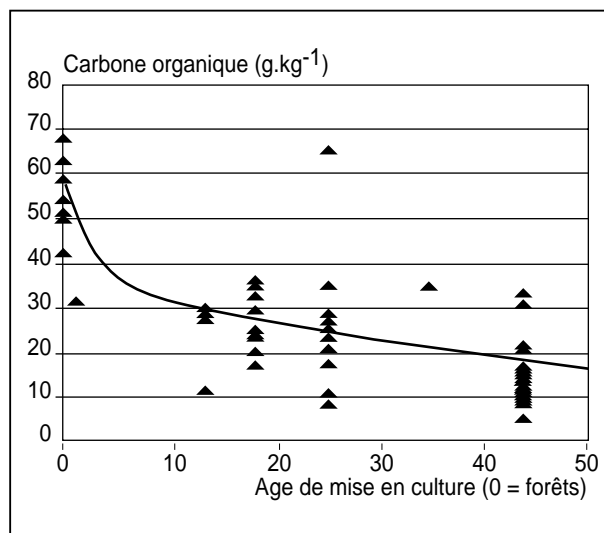


Figure 7 - Modèle prédictif des teneurs en C organique et valeurs observées sur la grille de validation, terrasse d'Aire sur Adour.

Figure 7 - Predicted and observed values of organic C content.



été calculée afin de comparer les prédictions du modèle aux valeurs observées (Arrouays *et al.*, 1994a). Elle s'écrit :

$$(3) \quad C_{\text{obs}} = 0,982 C_{\text{pred}} \quad \text{avec } r^2 = 0,69$$

Application à l'estimation des flux de C de 1948 à 2000

La modélisation globale des pertes en C des sols (Arrouays *et al.*, 1994a) conduit à la courbe sigmoïde donnée par la figure 8. De 1948 à 1984 les pertes en C sur 4 000 hectares peuvent être estimées à environ 270 000 tonnes. Ce qui représente $6,75 \text{ kg.m}^{-2}$. Après une période de flux intenses entre 1967 et 1974, les pertes annuelles globales diminuent à l'échelle de la petite région naturelle. La prédiction pour la fin du siècle donne une estimation de l'ordre de 350 000 tonnes.

DISCUSSION

Estimation des stocks sous forêt

Les stocks de C sous forêt sont généralement difficiles à estimer à cause de l'inaccessibilité des données d'entrées nécessaires : concentrations en C et densités apparentes sur des profondeurs et des nombres d'échantillons suffisants. La modélisation de la distribution verticale du C permet d'alléger

considérablement les procédures d'acquisition de ces données.

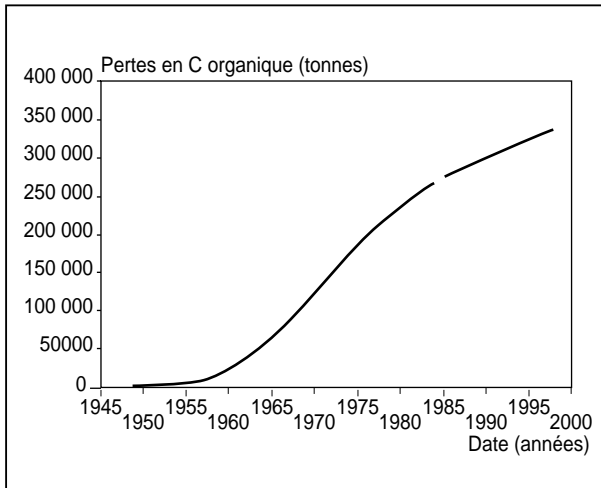
L'analyse des profils sous forêt montre que ces sols ont accumulé de grandes quantités de carbone. Les valeurs calculées sur un mètre de profondeur par intégration de l'équation (1) varient de $16,1$ à $33,6 \text{ kg.m}^{-2}$. Ces valeurs sont supérieures à celles calculées par plusieurs auteurs pour différents types de sols (Post *et al.*, 1982 ; Huntington *et al.*, 1988 ; Kimble *et al.*, 1990 ; Eswaran *et al.*, 1993).

Chute des teneurs en C après déforestation

L'importance des stocks forestiers explique en partie la forte libération de carbone suite à la mise en culture. Il a en effet déjà été montré que les pertes en carbone des sols suite à une déforestation étaient proportionnelles à l'importance des stocks initiaux (Allen, 1985 ; Mann, 1986 ; Weaver *et al.*, 1987 ; Brown et Lugo, 1990). La chute des stocks de carbone, et tout particulièrement celle des fractions légères, suggère qu'une part importante du carbone a pu être déprotégé par la mise en culture. Cette augmentation de la vitesse de minéralisation peut avoir plusieurs origines : l'importance des teneurs en aluminium échangeable et la faiblesse des pH initiaux qui ont été corrigées par chaulage, l'apport d'azote pour les cultures, les modifications de la structure et des régimes hydriques et thermiques induites par le travail du sol. De nombreuses études

Figure 8 - Modélisation globale des pertes en C organique des sols de la terrasse d'Aire sur Adour, de 1948 à nos jours, évaluation pour les 4 000 hectares défrichés depuis 1948.

Figure 8 - Global C release by soils from 1948 to now. Estimate for a cleared area of 4 000 ha.



(par exemple Van Veen et Paul, 1981 ; Voroney *et al.*, 1981 ; Brown et Lugo, 1990) ont déjà montré ce type de modification lié à la mise en culture d'écosystèmes naturels. La chute des fractions légères semble ainsi un indicateur pertinent, en particulier pour étudier des changements à court-terme après déforestation, ceci avait déjà été signalé ailleurs par Turchenek et Oades (1979) et Janzen *et al.*, (1992).

L'étude chronoséquentielle permet de construire un modèle simple bi-exponentiel de décroissance des stocks de C applicable à ces sols. Elle ne permet cependant pas de prédire un taux d'équilibre à très long terme, ni de prendre en compte les aspects liés au renouvellement des matières organiques par les résidus du maïs. Des études sur la concentration en isotope ^{13}C du carbone organique débutent en collaboration avec le laboratoire de Biogéochimie Isotopique de Paris VI afin de répondre à ces questions.

L'interprétation de l'étude chronoséquentielle est fondée sur une constance des stocks forestiers depuis 1948. Nous ne disposons malheureusement pas des données nécessaires pour estimer les possibles variations de ces stocks sous l'action de l'exploitation ou de modifications de la conduite. Quoiqu'il en soit, ces variations seraient probablement d'un ordre de gran-

deur beaucoup plus faible que celles induites par la mise en culture.

Importance et progression spatiale des défrichements

On constate l'importance des surfaces défrichées et l'allure logistique de l'augmentation des surfaces mises en culture. Celles-ci progressent lentement depuis le début des années 50, puis suivent une croissance quasi exponentielle à partir des années 60 sous les influences conjointes du besoin en nouvelles terres agricoles, de l'arrivée des maïs hybrides, et du perfectionnement de la mécanisation. Une telle courbe de progression à déjà été montrée dans ce milieu par analyse d'archives communales répertoriant les changements d'affectation des terres (Arrouays, 1992b). On notera qu'aujourd'hui, dans les zones tempérées (et tout spécialement au sein de l'Union Européenne), la déforestation n'est plus d'actualité en raison de la surproduction agricole. Cependant, la technique d'analyse utilisée serait applicable à d'autres massifs forestiers ayant subi des transformations partielles en terres labourables depuis le début des années 50 (par exemple les Landes de Gascogne).

La progression spatiale s'effectue depuis les bordures des plateaux où sont localisées les habitations et les zones les plus anciennement cultivées. Ceci suggère qu'un modèle de progression spatiale de ce front de colonisation pourrait être élaboré. Les résultats seront bien entendu propres à ce milieu, mais une telle approche méthodologique pourrait s'appliquer à d'autres phénomènes de colonisation ou de déprise de l'espace.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats démontrent que les sols tempérés peuvent aussi constituer une source de C atmosphérique, lorsqu'ils sont initialement riches en C, puis cultivés intensivement sans gestion du stock organique. La libération de carbone est en effet ici comparable à ce qui a été observé après déforestation en milieu tropical (Allen, 1985 ; Brown et Lugo, 1990). L'approche retenue permet de produire une estimation des pertes globales en C des sols, de 1948 à nos jours. Elle fournit également un outil de cartographie de ces stocks, de simulation de l'évolution à venir, et combinée avec des modèles de sensibilité à la bat-tance établis par ailleurs (Arrouays *et al.*, 1994a ; Le Bissonnais, travaux en cours), elle permettra de réaliser une analyse spatiale et une simulation prospective des risques de dégradation physique de ces sols limoneux.

Le passage à l'estimation sur des surfaces plus grandes (les sols de "tuyas" représentent environ 75 000 hectares)

suppose la mise au point de modèles d'intégration dans l'espace faisant appel à des données d'entrées plus accessibles.

Parmi les voies de recherche que nous explorons, la télédétection semble constituer un outil intéressant dans ce milieu (Arrouays et Vion, 1993 ; Arrouays *et al.*, 1994b). D'autre part, nous avons montré sur une portion de terrasse que la progression spatio-temporelle des défrichements ne s'effectuait pas au hasard, mais selon une logique d'éloignement par rapport aux bordures des plateaux, qui regroupent les zones habitées. Une tentative de modélisation spatiale de cette progression en fonction de la distance aux zones habitées est en cours. Celle-ci sera ultérieurement testée sur une autre portion de terrasse afin d'en vérifier la robustesse.

Il a été également montré à l'échelle de l'ensemble des terrasses concernées que les taux initiaux de C sous forêt

obéissaient à un gradient amont-aval (Arrouays, 1992b ; Arrouays *et al.*, 1992). Une analyse multivariée des relations entre les stocks initiaux de C et les différents caractères supposés influents (granulométrie, position géomorphologique, température, précipitations) devrait permettre de disposer d'un modèle géographique de la distribution des taux initiaux à l'échelle de l'ensemble de ces terrasses anciennes des gaves pyrénéens.

REMERCIEMENTS

Les recherches présentées ici ont bénéficié d'un financement du Ministère de l'Environnement dans le cadre du programme ECLAT et d'un appui technique et financier de la part de la Chambre d'Agriculture des Landes.

BIBLIOGRAPHIE

- Allen J.C., 1985 - Soil response to forest clearing in the United States and the tropics: Geological and biological factors. *Biotropica* 17, 15-27.
- Arrouays D., 1992a - Veracrisols. In *Référentiel Pédologique*, Baize D et Girard M C (Eds), INRA éditions, paris, pp. 171-174.
- Arrouays D., 1992b - Dynamique spatiale de défrichement, utilisation des sols et statut organique. Un modèle géographique d'évolution au sein d'un paysage pédologique. In : *Gestion de l'Espace Rural et Système d'Information Géographique*, P Buche, D King et S Lardon (Eds), INRA Editions, pp. 99-108.
- Arrouays D., 1994 - Intérêt du fractionnement densimétrique des matières organiques en vue de la construction d'un modèle bi-compartimental d'évolution des stocks de carbone du sol. Exemple après défrichement et monoculture de maïs grain des sols de "touyas". *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 318, série II, 787-793.
- Arrouays D., et Vion I., 1993 - Utilisation de la couleur des sols pour l'évaluation de leur taux de matière organique. Un test simple pour les sols limoneux du piémont pyrénéen. *Science du Sol*, 31, 1-16.
- Arrouays D., et Pélissier P., 1994a - Modelling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Sci.* 157, 185-192.
- Arrouays D., et Pélissier P., 1994b - Changes in carbon storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. *Plant Soil*, 160, 215-223.
- Arrouays D., Baize D., et Hardy M., 1992 - Les sols de touyas issus d'alluvions anciennes des gaves pyrénéens: Veracrisols. Intégration au Référentiel Pédologique. *Science du Sol*, 4, 227-247.
- Arrouays D., Pélissier P., King D. et Le Bissonnais Y., 1994a - Changes in carbon storage in humic soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. A geographical study for a reliable estimation of global C release in a small natural area. Plenary lecture paper. In 15th Int. Congress of Soil Science. Acapulco, July 10th to 16th (sous presse).
- Arrouays D, King C. et Vion I., 1994b - Détection de variations du taux de matières organiques de parcelles sous cultures intensives pour une cartographie des risques de dégradation des sols. Evaluation de l'apport spécifique de la bande MIR. In *Six. Symp. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*. Janvier 1994, Val d'Isère, France, (sous presse).
- Balesdent J., Mariotti A. et Boissongier D. 1990 - Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ¹³C abundance in corn fields. *J. Soil Science*, 41, 587-596.
- Brown S. et Lugo A E., 1990 - Effects of forest clearing and succession on the carbon and nitrogen content of soils in Puerto Rico and US Virgin Islands. *Plant and Soil* 124, 53-64.
- Callot G., Juste C., 1971 - Caractérisation des sols humifères acides développés sur alluvions anciennes des Gaves pyrénéens. *Science du Sol*, 2, 5-26.
- Cerri C., Feller C., Balesdent J., Victoria R. et Plenecassagne A., 1985 - Application du tracage isotopique naturel en ¹³C à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 300, 423-428.
- Eswaran H., Van den Berg E. et Reich P., 1993 - Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 192-194.
- Grigal D F. et Ohmann L F., 1992 - carbon storage in upland forest of the Lake States. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56, 935-943.
- Huntington T G., Ryan D F. et Hamburg S P., 1988 - Estimating soil nitrogen and carbon pools in a Northern hardwood forest ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52, 1162-1167.
- Janzen H H., Campbell C A., Brandt S A., Lafond G P. et Townley-Smith L., 1992 - Light fraction organic matter in soils from long term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1799-1806.
- Kimble J, Cook T. et Eswaran H., 1990 - Organic matter in soils of the tropics. In *Proc. Symp. Characterization and role of organic matter indifferent soils*. In *Int. Cong. Soil Sci.*, 14th, Jyoto, Japon, pp. 250-258.
- Mann L K., 1986 - Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Sci.* 142, 279-288.
- Mariotti A. et Balesdent J., 1990 - ¹³C natural abundance as a tracer of soil organic matter turnover and paleoenvironment dynamics. *Chem. Geol.* 84, 317-319.
- Martin A., Mariotti A., Balesdent J., Lavelle P. et Vuattoux R., 1990 - Estimate of organic matter turnover rate in a savannah soil by ¹³C natural abundance. *Soil Biol. Biochem.* 22, 517-523.
- Monnier G., Turc L. et Jeanson-Luusinang C. 1962 - Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol, *Annales Agronomiques*, 13, 55-63.

- Post W M., Emmanuel W R., Zinke P J. et Stangenberger A G., 1982 - Soil carbon pools and world life zones. *Nature (London)*, 298, 156-159.
- Schlesinger W H 1984 - Soil organic matter: a source of atmospheric CO₂. In: *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: measurement by remote sensing*. G M Woodwell (Ed). John Wiley & Sons, Londres, pp. 11-127.
- Schlesinger W H., 1986 - Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery. In *The Changing Carbon Cycle a Global Analysis*. Eds. J R Trabalka et D E Reichle. pp 194-220. Springer-Verlag, New York.
- Schlesinger W., 1991 - *Biogeochemistry an Analysis of Global Change*. Academic Press Inc. New York. 443 p.
- Stone E L., Harris W G., Brown R B. et Kuehl R J., 1993 - Carbon storage in Florida spodosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 179-182.
- Turchenek L W. et Oades J M., 1979 - Fractionation of organo-mineral complexes by sedimentation and density techniques. *Geoderma*, 21, 311-343.
- Van Veen J A. et Paul E A., 1981 - Organic carbon dynamics in grassland soils. I. Background information and computer simulation. *Can. J. Soil Sci.* 61, 185-201.
- Voroney R P., Van Veen J A. et Paul E A. 1981 - Organic carbon dynamics in grassland soils. II. Model validation and simulation of the long term effects of cultivation and rainfall erosion. *Can. J. Soil Sci.* 61, 211-224.
- Weaver P L., Birdsey R. et Lugo A E., 1987 - Soil organic matter in secondary forests of Puerto Rico. *Biotropica*, 19, 17-23.