

# Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français

Jérôme Balesdent<sup>1</sup> et Sylvie Recous<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INRA-CNRS-UPMC, Laboratoire de Biogéochimie Isotopique, 4, Place Jussieu CC 120, F-75252 Paris cedex 05; et <sup>2</sup>INRA, Unité d'Agronomie, Rue Fernand Christ, F-02007 Laon Cedex.

Balesdent, J. et Recous, S. 1997. **Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français.** Can. J. Soil. Sci. 77: 187–193. Afin de prévoir la capacité des sols à séquestrer du carbone, en réponse aux changements climatiques ou aux changements d'utilisation, nous avons estimé les flux et la distribution des temps de résidence du carbone dans les sols cultivés français. Nous avons utilisé les abondances naturelles en isotopes <sup>13</sup>C et <sup>14</sup>C pour mesurer cette distribution dans des expérimentations agricoles en maïs de longue durée en France. Les trois quarts du carbone du sol y ont un temps moyen de résidence de 40 ans. Les fractions granulométriques grossières contiennent la majeure partie du carbone à durée de vie plus courte. La datation au carbone 14 des matières organiques permet d'introduire un compartiment de carbone stable. Les restitutions végétales souterraines stockent autant de carbone que les restitutions aériennes. L'effet de la température sur la minéralisation du carbone du sol se traduit uniquement par une modification des constantes de vitesses, avec un  $Q_{10}$  de 3.1 constant dans l'intervalle 1–25°C. Ces données, synthétisées dans un modèle simple, permettent de prévoir un effet faible ou nul des changements climatiques globaux sur le stockage net de carbone dans les sols. Le mode d'occupation du sol aura en France une influence sur la séquestration de carbone plus importante que celle des changements atmosphériques.

**Mots clés:** Carbone du sol, France, gaz à effet de serre, minéralisation, modèle, stockage, température

Balesdent, J. and Recous, S. 1977. **The residence times of C, and the potential for C storage in some French cultivated soils.** Can. J. Soil Sci. 77: 187–193. In order to predict the potential of soils to store carbon in response to land use or climate changes, we measured the fluxes and distribution of residence times of C in French cultivated soils. We used the natural abundances in <sup>13</sup>C and <sup>14</sup>C to measure this distribution in long-term experiments of maize cultivation in France. 75% of the topsoil carbon had a mean residence time of 40 yr. Coarse particle-size fractions contained most of the younger carbon. A compartment of stable C was estimated using radiocarbon dating. Belowground plant material inputs stored as much as C as aboveground inputs. The effect of temperature on soil carbon mineralization affected only rate constants, with a  $Q_{10}$  = 3.1 constant in the range 1–25°C. The data were summarized in a simple simulation model, which predicted a nil or low effect of climatic change on soil carbon storage in the next 50 yr. In France, land use changes will have more influence than atmospheric changes on C storage.

**Key words:** France, greenhouse gases, mineralization, model, soil carbon, storage, temperature

En raison de la taille importante du réservoir de carbone que constituent les matières organiques du sol, le potentiel de stockage de carbone atmosphérique dans les sols est largement discuté actuellement (Houghton 1995). Parmi les conséquences de l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère, on prévoit deux modifications principales affectant le cycle du carbone dans les écosystèmes et les matières organiques du sol. D'une part, une augmentation de température affecterait l'activité des organismes décomposeurs du sol et augmenterait les flux de destruction des matières organiques. D'autre part, l'augmentation de la pression partielle de CO<sub>2</sub> augmenterait la productivité carbonée des végétaux (principalement celle des espèces C3) et en conséquence augmenterait les flux d'apports, de création de matières organiques des sols. Au niveau planétaire, les flux en jeu sont importants: Jenkinson et al. (1991) ont par exemple estimé qu'une augmentation de température pouvait libérer autant de C des sols que 19% de l'émission de combustible fossile, si elle restait inchangée. Au niveau local, de chaque écosystème, il est nécessaire d'évaluer l'effet de ces nouveaux facteurs, entre-autres pour les hiérarchiser par rapport aux autres.

Pour aborder quantitativement les évolutions à long terme, il est nécessaire de passer par des modèles, *pro-parte* mécanistes, de simulation de la dynamique des matières organiques des sols. En effet, les durées requises pour la mise en évidence des changements se prêtent mal à l'approche expérimentale seule. L'approche par comparaison des fonctionnements d'écosystèmes sous des climats différents, ne peut pas non plus, seule, décrire les vitesses de transition au cours du changement. Pour les simulations, un des aspects importants des modèles est la description des temps de résidence du carbone dans les sols et des facteurs affectant ces temps. A l'échelle temporelle du siècle passé et du siècle à venir, les compartiments à transit lent sont particulièrement importants, car ce sont eux qui présentent un potentiel de stockage élevé. Ils sont aussi à l'origine de l'inertie de l'écosystème. Nous proposons ici des simulations de l'effet de ces changements sur les stocks et les flux nets annuels de carbone, dans le cas de sols cultivés français. Nous avons voulu caler ces simulations sur des données internes, acquises sur ces sols, indépendamment des modèles proposés dans la littérature.

Tableau 1. Principales caractéristiques des sites de calage du modèle. Valeurs moyennes pendant la période d'étude

	Auzeville (Midi-Pyrénées)	La Minière (Ile de France)	Boigneville (Ile de France)
Durée de la monoculture de maïs (ans)	12 1970–1981	5 1987–1991	23 1970–1992
Température moyenne annuelle (air, °C)	12	11	10,5
Moyennes de Janvier et Juillet (°C)	5–22,5	3–18,5	2–18,5
Horizon étudié			
Profondeur (m)	0,30	0,35	0,30
Argile (mg g <sup>-1</sup> )	150–270	150	220
Carbone organique initial (mg g <sup>-1</sup> )	9–10,5	8,9	9,4
Carbone organique final (mg g <sup>-1</sup> )	8,5–10,0	9,0	9,5
pH	6,5	6,7	6,5
Densité apparente (g cm <sup>-3</sup> )	1,4	1,42	1,35
δ <sup>13</sup> C de la référence C3 (‰)	-26,2	-26,4	-25,2
Δ <sup>14</sup> C en fin de période (‰)	103±10	70+12	76±13
âge moyen (ans, hypothèse en texte)	85	125	116
Rendement moyen en grains (t MS ha <sup>-1</sup> )	5,2–8,9	6,8	6,0

## MATERIELS ET METHODES

### Sites d'élaboration du modèle

Nous avons choisi trois sites où des centres de recherche agronomique ont mis en place des monocultures de maïs de longue durée, sur des sols n'ayant jamais porté de maïs, ceci afin d'exploiter les possibilités offertes par la composition isotopique naturelle du maïs. A Auzeville, Midi-Pyrénées (Balesdent et al. 1987), la Station d'Agronomie de l'INRA avait mis en place huit parcelles différentes, et prélevé le sol tous les deux ans. A Boigneville, Ile-de-France (Balesdent et al. 1990), l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages a mis en place, pour un essai de travail du sol, des rotations maïs-blé et des monocultures de blé et de maïs. Nous avons prélevé ces deux dernières après 17 ans et 22 ans d'essai. Enfin à La Minière, Ile-de-France, nous avons mis en place avec le Domaine Expérimental de l'INRA un essai destiné à tracer le cycle de C et de N dans le sol sur 5 ans (Balabane et Balesdent 1992). Ces trois sites (Tableau 1), sont assez semblables concernant le type de sol (brun eutrophe à faiblement lessivé), ses caractéristiques analytiques, son stock de carbone, comme le type de conduite du maïs. Il s'agit de maïs grain avec labour et restitution des résidus de récolte. Les trois sites seront en première approximation considérés comme appartenant à la même chronoséquence. Leur stock de C a peu évolué durant les essais, seule, une baisse sur certaines des parcelles d'Auzeville, a été mise en évidence de façon significative. Ces sites seront donc considérés comme étant en régime stationnaire, concernant la dynamique du carbone organique.

### Méthodes d'analyse

Chaque échantillon de sol est un échantillon moyen de 8 à 16 prélèvements de l'ensemble de la profondeur étudiée, intégrant horizontalement les distances à la plante. Les échantillons obtenus, pesant plusieurs kg, sont réduits progressivement à 2 cm puis 2 mm. Sur une partie des échantillons, on a effectué un fractionnement granulométrique des matières organiques, décrit par Balesdent et al. (1991). La méthode consiste, après une dispersion du sol par agitation des billes de verre, à séparer sur des tamis de maille 2000,

200 et 50 µm, des particules organiques, principalement des structure héritées des tissus végétaux. Ces particules sont séparées des minéraux sableux par sédimentation différentielle dans l'eau. Tout échantillon, lyophilisé ou séché, a été broyé à 200 µm avant analyse élémentaire ou isotopique. Le carbone a été dosé par combustion sèche et dosage coulométrique du CO<sub>2</sub>, ou par autoanalyseur Erba NA1500.

Les rapports isotopiques ont été mesurés au Laboratoire de Biogéochimie Isotopique, soit sur le CO<sub>2</sub> obtenu par oxydation à 850°C dans un tube de quartz scellé en présence de CuO. Le CO<sub>2</sub> est purifié et analysé sur un spectromètre de masse (Finnigan Mat Delta E) à triple collecteur et double introduction. Les abondances en <sup>13</sup>C sont exprimées en unités δ<sup>13</sup>C:

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \left( \frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{référence}}} - 1 \right) \times 1000$$

où  $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ . La référence est PDB, calibrée au laboratoire par l'intermédiaire du standard NBS19.

Les datations au carbone 14 sont effectuées à la Station de Science du Sol de Versailles par comptage en scintillation liquide à bas bruit de fond, sur benzène pur, synthétisé à partir du carbone de l'échantillon. Les activités <sup>14</sup>C sont exprimées en unités Δ<sup>14</sup>C:

$$\Delta^{14}\text{C} (\text{‰}) = \left( \frac{A_{\text{échantillon}}}{A_{\text{référence}}} - 1 \right) \times 1000$$

où  $A$  est la radioactivité spécifique de l'échantillon, normalisée à un δ<sup>13</sup>C de -25‰. La référence est 0,95 fois l'activité de l'acide oxalique SRM-4990, calibrée par l'intermédiaire du standard IAEA ANU-sucrose.

### Calcul du carbone nouveau dans le sol

La détermination de la quantité du carbone nouveau dans le sol, provenant du maïs, est basée sur la différence de δ<sup>13</sup>C entre le maïs et les matières organiques du sol d'origine, provenant des végétations C3 précédentes. Nous avons utilisé l'équation (Balesdent et Mariotti 1996):

$$C_m = C \cdot (\delta - \delta_0) / \Delta$$

où  $C_m$  est la quantité de carbone nouveau, provenant du maïs,  $C$  est la quantité de carbone total de l'échantillon,  $\delta$  son  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta_0$  le  $\delta^{13}\text{C}$  de l'échantillon correspondant provenant d'une parcelle de référence sous végétation C3.  $\Delta$  est la différence entre le carbone dérivé du maïs et le carbone des matières organiques ayant contribué aux matières organiques de la parcelle de référence C3,  $\Delta$  est estimé d'après les débris végétaux de taille  $> 2$  mm. Les parcelles de référence sont une prairie à Auzeville, une parcelle en blé à Boigneville et une parcelle nue à La Minière ;  $\Delta = +14.3\%$ ,  $+13.8\%$  et  $+14.6\%$ , respectivement.

### Effet de la température sur la minéralisation du carbone

L'effet de la température sur la minéralisation des matières organiques du sol a été établi en conditions contrôlées de température et d'humidité dans l'intervalle 25–1°C. Le sol incubé est un sol brun faiblement lessivé, cultivé en rotation intensive (betterave sucrière, blé, maïs) depuis de nombreuses années, de la Station expérimentale INRA de Mons en Chaussée (Nord du Bassin Parisien) et prélevé dans la couche 0–10 cm (C organique 13 mg g<sup>-1</sup>, N total 1,4 mg g<sup>-1</sup>, argiles 168 mg g<sup>-1</sup>). Les échantillons de sols sont constitués d'agrégats de diamètre 2,0 à 3,15 mm obtenus par tamisage du sol frais et élimination par tri manuel de tout résidu visible. Chaque échantillon est constitué de 30 g d'agrégats humides (25 g sol sec) portés à un potentiel hydrique calculé pour une humidité optimale sans saturation des agrégats (-30 à 50 kPa, soit 20% d'humidité). On apporte 100 mg d'azote sous forme de nitrate d'ammonium. Les échantillons sont incubés en bocaux hermétiques de 11 à température constante de 25, 20, 15, 10, 5 et 1°C ± 0,5°C pendant une durée variable selon la température soit 25 semaines (à 25°C) à plusieurs années (à 1°C). Le carbone minéralisé au cours du temps a été mesuré à intervalles périodiques (dépendant de la température) par piégeage du CO<sub>2</sub> dégagé par NaOH 0.25M renouvelé périodiquement (Recous et al. 1995).

### Scénarios climatiques

Nous avons simulé l'effet de changements à venir de productivité carbonée et de température. Les scénarios climatiques sont tirés de "l'estimation la plus probable" calculée par Wigley et Raper (1992) d'après le scénario socio-économique moyen (IPCC92a) de l'Intergovernmental Panel on Climate Change, réuni en 1992. La température moyenne du globe y augmente, de façon quasiment linéaire, de +1,2°C entre 1990 et 2050, puis augmente encore pour atteindre +2,5°C en 2100. Nous proposons ici une augmentation moyenne à notre latitude 1,5 fois plus élevée, soit +1,8°C de 1990 à 2050. La concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique passe de 350 ppmV en 1990 à 520 ppmV en 2050 et 730 ppmV en 2100. Nous utilisons ici une réponse de la productivité  $P$  des plantes C3 de type

$$P = P_0 [1 + 0,5 \ln(C/C_0)]$$

où  $C$  est la concentration en CO<sub>2</sub> troposphérique,  $C_0 = 350$  ppmV,  $P_0$  productivité sous  $C_0$ . Ceci correspond à une augmentation (presque linéaire) de la productivité, atteignant

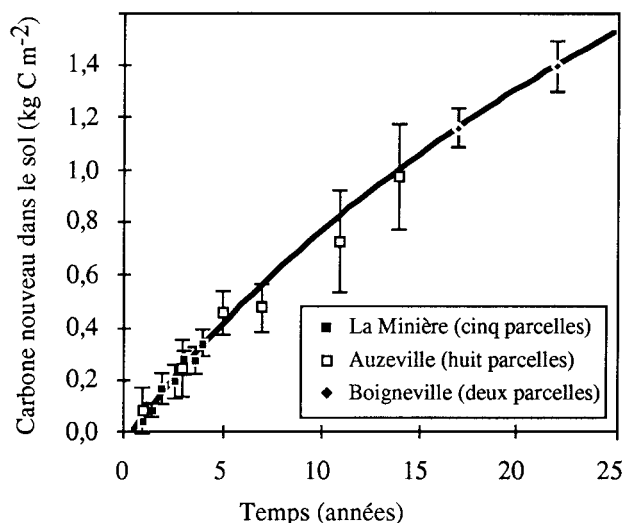


Fig. 1. Quantités de carbone nouveau incorporées au sol par le maïs sur trois sites expérimentaux en monoculture de maïs. Moyenne et écart-type de deux à cinq parcelles par site. Simulation par le modèle décrit figure 4 (courbe).

+20% en 2050. Les conditions initiales sont celles d'un sol en équilibre avec la production et les températures moyennes 1987–1991 du sol en Ile de France (moyenne annuelle 11°C, amplitude 15°C). Le calcul est effectué au pas de temps mensuel. La température mensuelle  $T$  du sol à 10 cm a été approximée par une fonction sinusoïdale de type

$$T(t) = T_{\text{moy}} \text{ annuelle}(t) + \text{Amplitude}(t) / 2 \times \sin(2\pi t/\text{an})$$

Nous avons calculé les stocks de carbone selon quatre scénarios.

*Scénario A:* augmentation linéaire de la température moyenne annuelle du sol de 0,03°C an<sup>-1</sup> (+1,8°C en 2050), avec conservation de l'amplitude intra-annuelle de 15°C (écart des moyennes mensuelles). La production primaire reste constante.

*Scénario B:* augmentation linéaire de la production, de +20% en 2050 par rapport à 1990, la température est inchangée.

*Scénario C:* les deux augmentations simultanées.

*Scénario D:* augmentation de la température moyenne annuelle de 0,03°C an<sup>-1</sup> (scénario 1), mais avec augmentation de l'amplitude: les minima de janvier sont conservés; les maxima de juillet augmentent de 0,06°C an<sup>-1</sup>. La production primaire est constante.

## RESULTATS

### Les temps de résidence du carbone

La figure 1 reporte l'augmentation des quantités de carbone nouveau, provenant du maïs, mesurée d'après l'augmentation des  $\delta^{13}\text{C}$ . L'accumulation progressive du C nouveau est lente et régulière. Comme les stocks de carbone total évoluent peu, ces quantités correspondent également aux quantités nettes de carbone minéralisées à partir du carbone initial. Une description monocompartimentale de la dynamique en

donnerait une approximation correcte pour des scénarios à 30 ans. Ses paramètres seraient un apport annuel de  $0,082 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  engagé dans un compartiment de vitesse de minéralisation de  $0,020 \text{ an}^{-1}$ . Ces valeurs sont remarquablement proches de celles du modèle de Hénin et Dupuis (1945) dans Rémy et Marin-Lafèche (1976). Afin de caler la modélisation sur la production végétale, on a mesuré les biomasses moyennes de tiges et feuilles à la récolte:  $0,29$  et  $0,32 \text{ kg C m}^{-2}$  respectivement en Ile de France et à Auzeville. On a également mesuré à La Minière les quantités de carbone d'origine racinaire à la date de la récolte ( $0,145 \text{ kg C m}^{-2}$ ). Dans le détail, le site d'Auzeville, le plus méridional, présente une légère baisse de carbone, et l'on peut y calculer en coefficient moyen de minéralisation du carbone ancien ( $0,029 \text{ an}^{-1}$ ) plus élevé qu'en Ile de France. Inversement, la production y est plus élevée, conduisant à une accumulation annuelle de carbone nouveau identique aux autres sites. Sur les différentes parcelles de ce site, on a pu corrélérer l'apport annuel moyen de carbone du maïs au sol ( $60$  à  $92 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ) avec la production aérienne de tiges et feuilles moyenne annuelle ( $250$  à  $420 \text{ g C m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ ,  $P < 0,001$ ). On a également montré que le coefficient de minéralisation est peu dépendant des niveaux de carbone et des textures de sol, variables.

Les fractions granulométriques  $0$ – $50 \mu\text{m}$ ,  $50$ – $200$  et  $200$ – $2000 \mu\text{m}$  contiennent en moyenne  $3,60$ ;  $0,30$  et  $0,12 \text{ kg C m}^{-2}$ . Bien que les fractions supérieures à  $50 \mu\text{m}$  ne représentent que  $10\%$  du carbone total, elles contiennent une proportion importante ( $30\%$ ) du carbone nouveau dans le sol après  $20$  ans, et on les propose comme estimateurs de la taille et de la durée de vie d'un compartiment à renouvellement rapide, avec une durée de vie de  $4$  ans et une taille de  $0,4 \text{ kg C m}^{-2}$ .

A partir de parcelles où seules sont restituées les parties souterraines de la production (La Minière), nous avons montré que la quantité de carbone nouveau dans le sol provenant des parties souterraines (dont le collet) seules représente  $55\%$  de la quantité provenant de l'ensemble tiges, feuilles+parties souterraines. Ce rapport est beaucoup plus élevé que le rapport équivalent mesuré sur les biomasses ( $35\%$ ) (Balesdent et Balabane 1996). Ce dernier résultat montre que l'estimation de la productivité souterraine est un point-clé de la simulation du stockage de carbone dans les sols.

On ne peut pas extrapoler sans risque des observations collectées sur  $25$  ans seulement à des durées plus longues. C'est pour cette raison qu'on a fait appel aux datations  $^{14}\text{C}$  des fractions  $< 50 \mu\text{m}$ . Les activités  $^{14}\text{C}$  ont été d'abord traduites en terme d'âge moyen, selon une hypothèse de distribution exponentielle des âges de la forme

$$F = 1/a \exp(-\text{age}/a)$$

en tenant compte de l'incorporation de  $^{14}\text{C}$  d'origine thermonucléaire. Les valeurs (Tableau 1) indiquent des âges moyens de l'ordre du siècle, donc deux fois plus élevées que la projection sur tout le carbone de la cinétique de renouvellement décrite par le  $^{13}\text{C}$ . On traduit cette présence de C âgé par un compartiment stable, à temps de résidence supérieur au millénaire, tel qu'on avait pu le mettre en évi-

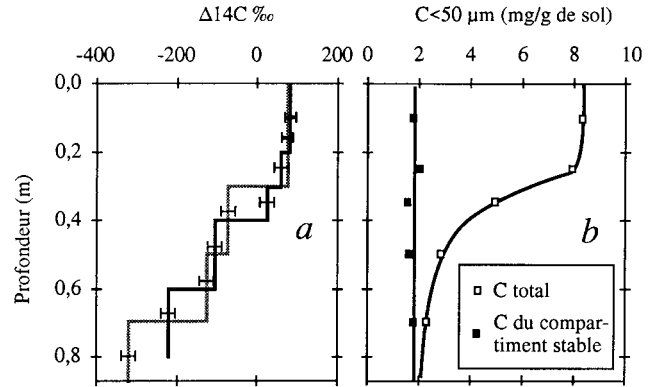


Fig. 2. Profils d'activité  $^{14}\text{C}$  des deux sols de l'Ile de France (fractions  $< 50 \mu\text{m}$ ) (a). Elles sont interprétées par répartition du carbone en deux compartiments: l'un d'âge moyen  $40$  ans, l'autre, stable, d'âge moyen  $4000$  ans. Ce dernier serait uniformément réparti le long du profil par bioturbation (b).

dence sur d'autres sites (Balesdent et al. 1988, Hsieh 1992). L'interprétation de la datation s'inscrit dans le cadre du modèle décrit plus bas et sert à y caler cette quantité de carbone stable. Le principe repose sur le fait que la distribution des âges récents est obtenue par le marquage  $^{13}\text{C}$  et permet de calculer assez précisément les quantités de  $^{14}\text{C}$  d'origine thermonucléaire. Ainsi, les données  $^{14}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}$  sont compatibles avec un compartiment stable compris entre  $1$  et  $2,5 \text{ mg C g}^{-1}$  ( $800 \text{ g C m}^{-2}$ ,  $25\%$  du C) avec un âge moyen de  $4000$  ans. Le reste du carbone  $< 50 \mu\text{m}$  a alors un temps moyen de résidence de  $40$  ans. Ce choix est étayé par l'activité  $^{14}\text{C}$  des horizons profonds des sites de Boigneville et de La Minière. Le carbone stable serait ainsi présent à concentration constante tout le long du profil (Figure 2).

### Effet de la température sur la minéralisation

Les cinétiques de minéralisation du carbone du sol ont été établies sur  $175$  jours à  $25^\circ\text{C}$  jusqu'à  $668$  jours à  $10^\circ\text{C}$  (Figure 3a), les incubations à  $5$  et  $1^\circ\text{C}$  étant encore en cours. On peut superposer les courbes obtenues à  $20$ ,  $15$ ,  $10$ ,  $5$  et  $1^\circ\text{C}$  à celle obtenue à  $25^\circ\text{C}$  en divisant l'abscisse de temps par un coefficient  $\alpha(T)$ , fonction de la température  $T$  (Figure 3b). Nous montrons ainsi que la température n'affecte que les constantes de vitesse de la minéralisation du carbone. On obtient une relation exponentielle entre ce coefficient et la température:

$$\alpha(T) = \exp[-0,115(T-25)], r^2 = 0,997$$

Puisque le coefficient thermique de cette relation de Vant'Hoff est égal à  $0,115$ , on en déduit une valeur unique de  $Q_{10}$ :  $3,1$ , valable entre  $1$  et  $25^\circ\text{C}$ . Cette loi est proche de celle de Ross et Cairns (1978), et de la relation adoptée par Jenkinson et al. (1991). Cette loi d'action de la température ne peut être appliquée à la minéralisation de résidus végétaux fraîchement apportés au sol, comme le démontrent les résultats obtenus dans les mêmes conditions expérimentales, avec des résidus de maïs (Recous et Marin-Lafèche 1995).

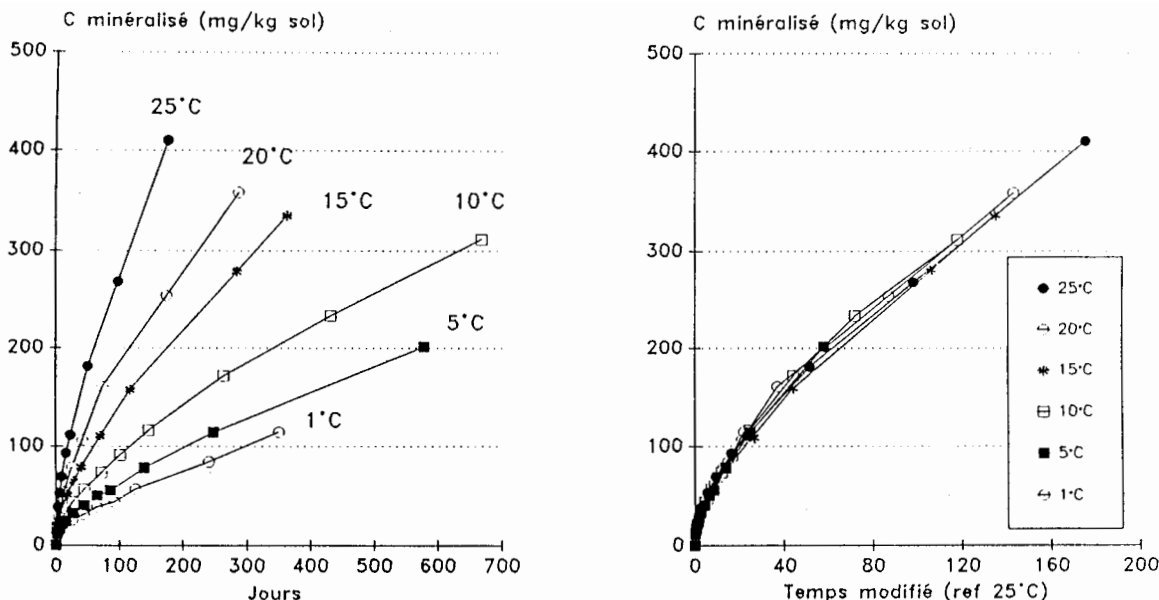


Fig. 3. Cinétique de minéralisation du carbone organique de sols incubés à différentes températures (CO<sub>2</sub>-C, mg kg<sup>-1</sup> sol) (a). Mêmes courbes après division du temps par un facteur 1.0 (25°C), 2.0 (20°C), 2.7 (15°C), 6.0 (10°C), 10.0 (5°C), 16.0 (1°C).

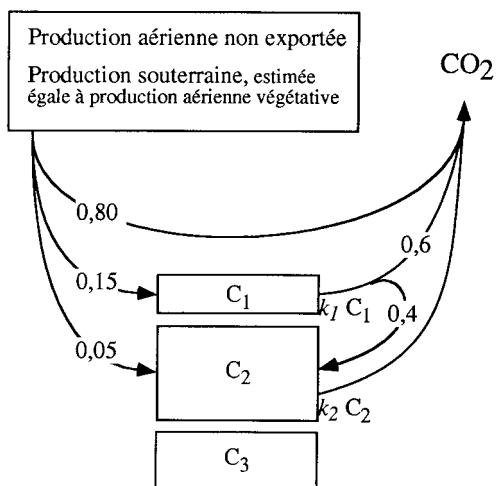


Fig. 4. Modèle à trois compartiments utilisé pour décrire la dynamique du carbone organique des sols cultivés. Pour les sites de l'Ile de France,  $k_1 = 0,24 \text{ an}^{-1}$ ;  $k_2 = 0,024 \text{ an}^{-1}$ ,  $C_3 = 0,8 \text{ kg C m}^{-2}$ .

**Un modèle simple**

Il s'agit du modèle de dynamique des matières organiques à long terme, le plus simplifié possible pour l'objectif présent, faisant la synthèse des résultats précédents.

Le modèle (Figure 4) suppose une production souterraine égale à celle des parties aériennes végétatives (tiges et feuilles). Une partie du carbone de la production retournée au sol est rapidement minéralisée. Le reste se répartit vers deux compartiments (15% et 5% respectivement). Chaque compartiment suit une équation de décomposition du premier ordre. Une partie du carbone quittant le premier compartiment (40%) est transférée au second, le reste est

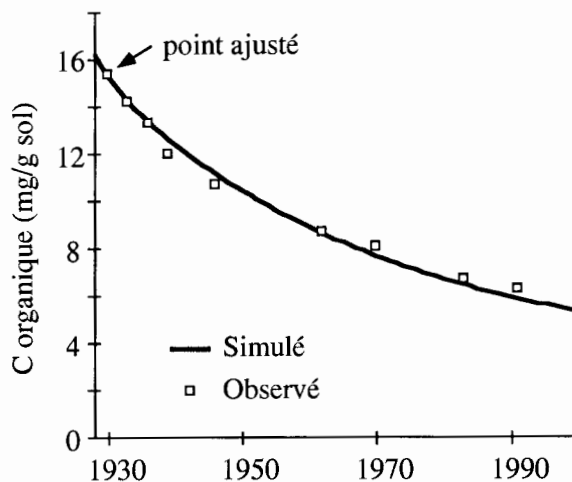


Fig. 5. Une validation du modèle présenté figure 4. Il s'agit d'une parcelle maintenue sans aucun apport organique depuis 1928 à Versailles (horizon 0-20 cm). Seul a été ajusté le niveau initial, supposé à l'équilibre, par ajustement au premier point.

minéralisé. Enfin le sol contient un troisième compartiment de carbone stable à l'échelle du siècle. Son stock est ici fixé à 0,8 kg C m<sup>-2</sup>. Les constantes de décomposition des compartiments sont:  $k_1$  (20°C) = 0,554 an<sup>-1</sup>,  $k_2$  (20°C) = 0,0554 an<sup>-1</sup>,  $k_3 = 0 \text{ an}^{-1}$ . Les valeurs moyennes annuelles des conditions initiales en 1990:  $k_1 = 0,23 \text{ an}^{-1}$ ;  $k_2 = 0,023 \text{ an}^{-1}$ . La cinétique de renouvellement du carbone pour les sols de l'Ile de France est celle de la courbe de la figure 1. La structure compartimentale et les paramètres moyens en Ile-de-France ont été validés sur un dispositif expérimental mis en place en 1928 à Versailles (Figure 5). La parcelle, supposée initialement à l'équilibre, a été maintenue sans végétation,

**Tableau 2. Simulations de l'évolution du stock de C de sols cultivés sous l'effet de l'augmentation de la température et/ou de la production végétale**

scénario	"équilibre"	A "T+1,8°C"	B "Pro+20%"	C "T+1,8°C Pro+20%"	A' "T+1,8°C A+3,6°C"
Températures: incrément annuel moyenne annuelle (°C an <sup>-1</sup> )	0	0,03	0	0,03	0,03
amplitude saisonnière (°C an <sup>-1</sup> )	0	0	0	0	0,06
pCO <sub>2</sub> :					
Incrément annuel (ppmV an <sup>-1</sup> )	0	0	2,8	2,8	0
Production annuelle en 2050 (indice 1 en 1990)	1	1	1,20	1,20	1
<b>Stock de C en 2050</b>	<b>4,00</b>	<b>3,67</b>	<b>4,31</b>	<b>3,95</b>	<b>3,52</b>
Stock virtuel d'équilibre avec les condition 2050.	4,00	3,38	4,63	3,90	3,14

donc sans apport organique, mais avec travail du sol. La très bonne qualité de la prévision est probablement en partie fortuite, car en sol nu, d'une part l'humidité estivale est plus forte que sous culture, d'autre part l'absence d'apports carbonés limite la co-minéralisation du carbone du sol. L'expérience offre cependant une bonne validation du modèle pour les évaluations à long terme.

Les vitesses de décomposition sont multipliées par un facteur thermique selon la loi ci-dessus:

$$k_i(T) = k_i(T_0) \exp[0,115 (T - T_0)]$$

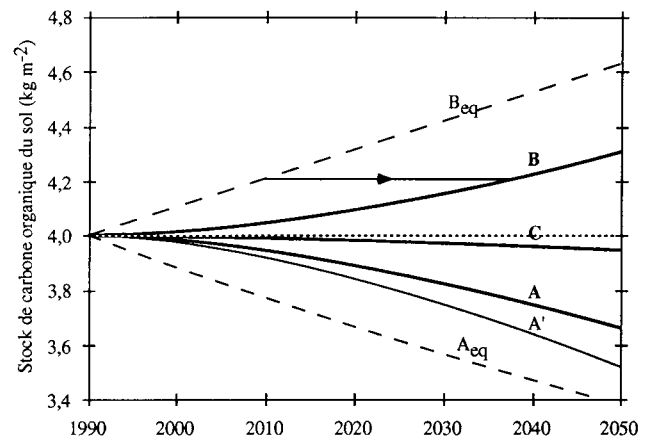
$T$  température du sol à 10 cm en °C. Elle correspond à un  $Q_{10}$  de 3,1, constant dans l'intervalle de températures explorés. Les coefficients de partage entre compartiments ne sont pas affectés par la température.

### Scénarios de changement climatique

Les scénarios d'augmentation de la température et d'augmentation de la production primaire décrivent respectivement une baisse et une augmentation du stock de carbone (Tableau 2 et Figure 6). Les stocks en 2050 s'écartent d'environ 8% des stocks en 1990. Le scénario cumulant changement de productivité et de température décrit un stock pratiquement inchangé. On a porté sur la figure 6 les stocks virtuels de sols en équilibre avec les conditions atmosphériques de l'année, pour les scénarios A et B. On remarque le retard de réponse des matières organiques du sol, par rapport à ces conditions. Le scénario modifiant l'amplitude intra-annuelle des températures, décrit des stocks plus bas que le scénario A (tableau 1). L'effet thermique (minéralisation estivale) y est de l'ordre de 30% plus élevé. L'amplitude thermique est donc à prendre en compte dans un scénario de changement de température moyenne.

### DISCUSSION

Le modèle proposé, dans son esprit, est du même type que ceux qui ont été développés jusqu'à présent. Son originalité est d'être calé sur le traçage du carbone incorporé *in situ*, et non pas par comparaison de traitements différenciés. Par rapport aux modèles à cinq compartiments de Jenkinson et Rayner (1977) ou Parton et al. (1987), il considère les durées de vie des petits compartiments à renouvellement



**Fig. 6.** Scénarios de l'effet de changements climatiques (tableau 2) sur le stock de carbone organique de sols cultivés français, supposés initialement à l'équilibre.

A: augmentation de la température moyenne. A': identique à A, avec augmentation de l'amplitude saisonnière. B: augmentation de la production carbonée. C: conditions de A et B réunies. Aeq et Beq correspondent à des stocks qui seraient en équilibre avec les conditions de l'année des scénarios A et B. Noter le retard, de près de 30 ans, de l'état du sol avec ces conditions (flèche).

rapide (compartiment métabolique végétal et biomasse microbienne) comme nulles, ce qui n'affecte pas les tendances à long terme. Le modèle ayant été calé sur le renouvellement du carbone en régime stationnaire, on accepte donc implicitement la linéarité du modèle (proportionnalité des vitesses aux stocks). Celle-ci est d'ailleurs validée sur l'expérimentation de la figure 5. L'eau et les éléments minéraux ne sont pas pris en compte explicitement dans ce modèle. Ces éléments sont limitants pour la décomposition du C, comme pour la production végétale. Leur effet limitant étant pris en compte implicitement dans le calage de ce modèle sur les cinétiques actuelles de minéralisation, on suppose seulement que ces éléments seront présents en quantités telles que l'écart d'effet limitant soit négligeable dans les scénarios. Cet exercice de style visait à évaluer l'amplitude de la réponse du stock de carbone des sols aux seuls changements thermiques et changements de pCO<sub>2</sub>. Pour les 20 années à venir, elle est faible, probablement

comprise entre +1 et -1% par rapport au stock actuel, soit moins de 20 kg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, selon que l'augmentation de la production ou de la température primerait. La réponse serait nulle si les deux facteurs jouaient ensemble.

Les matières organiques du sol répondent avec une inertie importante aux modifications du milieu. Le retard, par rapport à des stocks organiques en équilibre avec les conditions atmosphériques, est de l'ordre de 30 ans. Les scénarios à 50 ans sont courts par rapport à la durée de vie moyenne du C des sols. La mesure directe de telles variations *in situ*, par des expérimentations ou des observatoires par exemple, serait illusoire, particulièrement dans les deux décennies à venir.

L'influence des modifications climatiques sur le stock de carbone des sols Français sera probablement plus faible que l'influence potentielle d'autres modifications, d'origine anthropique, des agrosystèmes ou écosystèmes. Les seuls changements de conduite agricole adaptés à supporter une productivité augmentée de 20%, auraient probablement une incidence sur le bilan carboné plus grande que les seules modifications d'origine climatique décrites ici. Les changements d'occupation du sol mettent en jeu des quantités de carbone plus grandes. En effet en France les surfaces boisées ont augmenté de + 40% au cours du dernier siècle, d'abord par suite d'abandon de terres cultivées, puis d'une politique active de reforestation. Bien que la vague de retournement de prairies des années 1970, suivie de l'imposition de la jachère par l'Union Européenne, libèrent actuellement du carbone vers l'atmosphère, le bilan sur le territoire français est encore au stockage net de carbone dans les sols. Nous avons évalué ce stockage entre 20 et 40 kg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>, par les seules changements d'affectation des terres 5 (Balesdent 1996b). D'autres causes possibles de stockage de carbone dans les sols, comme l'augmentation des productivités forestières, ou la stabilisation de carbone associée à la fertilisation azotée des agrosystèmes, n'ont pas pu être évaluées. Il est prévu que ce stockage augmente encore, par suite d'enherbage de sols cultivés et de l'arrivée à maturité de jeunes forêts. On confirme ici la conclusion de Burke et al. (1991) "Les décisions concernant l'occupation des sols seront probablement plus importantes que les changements climatiques, pour le bilan du carbone dans le futur proche".

### REMERCIEMENTS

Cette étude a été soutenue par le Ministère de l'Agriculture, et réalisée grâce à l'amicale participation de F. Cornen, O. Delfosse, M. Grably, J. Guillemot, J.-P. Pétraud, C. Picot, D. Varoteaux.

**Balabane, M. et Balesdent, J. 1992.** Input of fertilizer-derived N to soil organic matter during a growing season of maize in the field. *Soil Biol. Biochem.* **24**: 89–96.

**Balesdent, J. 1996a.** The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.* **47**: 485–493.

**Balesdent, J. 1996b.** Potentiel de stockage de carbone dans les sols français en fonction de leur usage. Ministère de l'Environnement, Paris, rapport multigraphié, 45 p.

**Balesdent, J. et Balabane, M. 1996.** Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. *Soil Biol. Biochem.* **28**: 1261–1263.

**Balesdent, J. et Mariotti, A. 1996.** Measurement of soil organic matter turnover using <sup>13</sup>C natural abundances. Pages 83–111 *dans* T. W. Boutton et S. I. Yamasaki, eds. *Mass spectrometry of soils*. Marcel Dekker Inc., New York, NY.

**Balesdent, J., Mariotti, A. et Boissongier, D. 1990.** Effect of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from <sup>13</sup>C abundance in maize fields. *J. Soil Sci.* **41**: 587–596.

**Balesdent, J., Mariotti, A. et Guillet, B. 1987.** Natural <sup>13</sup>C abundance as a tracer for soil organic matter dynamics studies. *Soil Biol. Biochem.* **19**: 25–30.

**Balesdent, J., Pétraud, J. P. et Feller, C. 1991.** Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. *Sci. Sol.* **29**: 95–106.

**Balesdent, J., Wagner, G. H. et Mariotti, A. 1988.** Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by the carbon-13 natural abundance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **52**: 118–124.

**Burke, I. C., Kittel, T. G. F., Lauenroth, W. K., Snook, P., Yonker, C. M. et Parton, W. J. 1991.** Regional analysis of the Central Great Plains. *Bioscience* **41**(10): 485–492.

**Hénin, S. et Dupuis, M. 1945.** Essai de bilan de la matière organique du sol *Ann. Agron.* **15**: 17–29.

**Houghton, R. A. 1995.** Pages 133–152 *in* R. G. Zepp and Ch. Sonntagi, eds. *The role of non-living organic matter in the Earth's carbon cycle*. Dahlem Workshop reports, John Wiley & Sons, New York, NY.

**Hsieh, Y. P. 1992.** Pool size and mean age of stable soil organic carbon in cropland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 460–464.

**Jenkinson, D. S., Adams, D. E. et Wild, A. 1991.** Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming. *Nature* **351**: 304–306.

**Jenkinson, D. S. et Rayner, J. H. 1977.** The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* **123**: 298–305.

**Parton, W. J., Schimel, D. S., Cole, C. V. et Ojima, D. S. 1987.** Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51**: 1173–1179.

**Recous, S. et Marin-Lafleche, A. 1995.** Effect of temperature on C and N dynamics during soil organic matter and straw decomposition. Driven by nature: Plant litter quality and decomposition. Wye College, University of London, 17–20 September.

**Recous, S., Robin, D., Darwis, D. et Mary, B. 1995.** Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. *Soil Biol. Biochem.* **27**: 1529–1538.

**Rémy, J. C. et Marin-Lafleche, A. 1976.** L'entretien organique des terres. Coût d'une politique de l'humus. *Entreprises Agricoles nov* **1976**: 63–67.

**Ross, D. J. et Cairns, A. 1978.** Influence of temperature on biochemical processes in some soils from tussock grasslands. *New Z. J. Sci.* **21**: 581–589.

**Wigley, T. M. L. et Raper, S. C. B. 1992.** Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios. *Nature* **357**: 293–300.