

Contribution à la lutte contre l'effet de serre Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?

Une Expertise scientifique collective réalisée par l'INRA
à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable

15 Janvier 2003

Résumé. Peut-on contribuer à lutter contre l'effet de serre en stockant du carbone dans les sols agricoles de France ? L'expertise réalisée par l'Institut National de la Recherche Agronomique à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable relativise l'intérêt de cette option, du moins dans les conditions françaises : si le potentiel de stockage additionnel de carbone dans les sols agricoles métropolitains apparaît non négligeable, sa valorisation dans le cadre du Protocole de Kyoto se révèle difficile. La prise en compte de ce stockage devrait plutôt être envisagée dans un cadre plus large, incluant l'ensemble des gaz à effet de serre et intégré dans un plan global portant sur l'agriculture durable et la qualité des sols.

L'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (GES) induite par les activités humaines est considérée de plus en plus unanimement comme responsable du changement climatique. Le Protocole de Kyoto, qui pourrait entrer en vigueur en 2003, vise à limiter cette évolution par la réduction des émissions de GES, qui représente évidemment la politique la plus durable. Pour le gaz carbonique, qui est d'ailleurs le principal GES, le Protocole a également admis l'utilisation d'une solution complémentaire qui consiste à accroître la séquestration de CO₂ par la végétation et le stockage du carbone dans la biomasse et les sols. Les modalités de mise en oeuvre de cette seconde option font actuellement l'objet d'importantes négociations, pour lesquels les experts sont chargés de fournir des bases scientifiques.

Les enjeux du stockage de carbone dans les sols agricoles

Le rôle de "puits" temporaire de carbone des écosystèmes terrestres

La végétation, en synthétisant de la matière organique à partir du CO₂ qu'elle prélève dans l'atmosphère, "stocke" ainsi du carbone, sous forme organique. Une fraction importante de cette biomasse et de ces résidus est ensuite incorporée au sol où elle est soumise à diverses transformations et dégradations. Cette matière organique du sol finit par subir une minéralisation, processus qui restitue le carbone à l'atmosphère sous forme de CO₂. Le stockage de carbone organique dans le sol est donc toujours temporaire, mais il est plus ou moins important et long selon les conditions du milieu. Parce qu'ils peuvent jouer sur les apports de matière organique au sol et/ou sur la vitesse de minéralisation, l'usage des terres et les pratiques culturales sont susceptibles de modifier le niveau de ces stocks dans le sol. Or ces stocks de carbone dans les sols sont importants : à l'échelle planétaire, ils représentent quelque 1500 milliards de tonnes, soit deux fois plus que le stock dans l'atmosphère. Une augmentation même minime du stockage dans les sols pourrait donc jouer un rôle significatif dans la limitation du flux net de GES vers l'atmosphère.

Les enjeux du stockage de carbone dans les sols

Le stockage dans la biomasse forestière (article 3.3 du Protocole de Kyoto) a déjà fait l'objet d'accords internationaux qui fixent les contingents attribués aux différents pays. L'accroissement du stockage dans les sols au travers de changements d'occupation des sols et de pratiques agricoles ou sylvicoles a été retenu dans son principe (article 3.4), mais ses

modalités d'application ne sont pas encore définies. Les quantités de CO₂ que les pays pourront déduire de leurs émissions à ce titre ne seront pas plafonnées *a priori*, mais leur prise en compte sera conditionnée par l'obligation de prouver la séquestration revendiquée. Ce sont les procédures de cette vérification, actuellement en cours de négociation, qui font l'objet de controverses entre les pays signataires du Protocole.

L'enjeu est important pour la France qui ne dispose, pour respecter ses engagements à maintenir ses émissions de GES à leur niveau de 1990, que d'une marge de manœuvre limitée du fait d'émissions déjà relativement faibles (en raison de l'importance de l'électronucléaire) et qui pourrait tirer avantage de l'importance de sa surface agricole.

L'expertise commandée par le MEDD à l'INRA

C'est dans ce contexte que le Ministère chargé de l'environnement a demandé à l'INRA de conduire une expertise collective concernant les capacités d'accumulation de carbone organique dans les sols agricoles et leurs dynamiques temporelles. Il s'agissait d'examiner les changements d'usage des sols agricoles et de pratiques agricoles *a priori* éligibles au titre du Protocole de Kyoto, leur capacité à induire effectivement un stockage additionnel de carbone dans les conditions pédoclimatiques françaises, leur applicabilité dans le contexte technico-économique agricole actuel, les politiques susceptibles d'inciter les agriculteurs à adopter ces pratiques et les moyens à mettre en œuvre pour vérifier ce stockage.

Le travail d'expertise scientifique collective a consisté à établir une synthèse critique des données scientifiques disponibles, permettant de dégager les connaissances avérées mais aussi de mettre en évidence les incertitudes et les controverses qui subsistent. L'exercice était limité aux sols agricoles métropolitains, le puits de carbone forestier et le cas des sols agricoles tropicaux faisant l'objet d'autres travaux de synthèse. Il a été réalisé par un groupe d'experts de diverses disciplines (science du sol, agronomie, économie...).

Comme annoncé dans son Schéma stratégique 2000-2004, l'INRA développe ses activités d'expertise collective pour répondre aux demandes formulées notamment par les pouvoirs publics. Dans cette logique a été créée une Unité d'Expertise Scientifique Collective (UESC) : responsable du suivi des dossiers et des produits éditoriaux de l'expertise, elle est en outre chargée d'élaborer des procédures de travail pour la conduite de ces projets à l'INRA et de développer les relations avec les structures d'expertise des autres organismes de recherche.

Un potentiel de stockage de carbone non négligeable mais difficile à valoriser

L'expertise montre qu'en modifiant les usages des sols et/ou certaines pratiques agricoles, il est effectivement possible d'accroître significativement le stockage de carbone organique dans les sols agricoles métropolitains. Toutefois, la réalisation de ce potentiel de stockage se heurte à de nombreuses incertitudes et difficultés.

Les changements d'usage des sols et de pratiques agricoles favorables au stockage de carbone

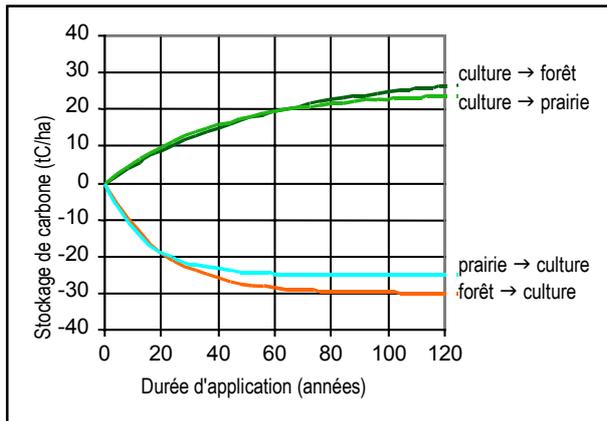
Ce sont certains changements d'usage des terres qui permettent les flux de stockage les plus élevés par unité de surface : l'afforestation ou la conversion en prairies permanentes de terres labourées peuvent induire des stockages de l'ordre d'une demi-tonne de C par ha et par an en moyenne sur une durée de 20 ans (voir Figure). L'afforestation induit de plus une augmentation du stockage dans la biomasse ligneuse et une diminution des intrants et des consommations énergétiques.

Malgré un stockage induit plus faible, certaines pratiques culturales, compte tenu des surfaces en jeu, présentent également une efficacité potentielle significative : c'est le cas de la suppression du labour, de l'implantation d'engrais verts en interculture, de l'enherbement permanent des vignobles et vergers. L'implantation de haies ou une modification des modes de gestion des prairies permanentes et temporaires, dont les effets sont plus difficiles à quantifier, sont également susceptibles de contribuer au stockage de carbone.

En revanche, les possibilités offertes par la gestion des résidus et effluents agricoles ou urbains sont apparues faibles, et l'intensification de productions déjà à hauts rendements n'apporte aucun bénéfice.

Le potentiel national de stockage de carbone

Divers scénarios d'adoption des pratiques favorisant le stockage de carbone ont été testés. Ces simulations ont montré que le potentiel maximal de stockage additionnel est de l'ordre de 3 à 5 millions de tonnes de C par an pour une durée de 20 ans sur le territoire métropolitain. Des hypothèses plus réalistes concernant les modifications de pratiques aboutissent à un stockage de l'ordre de 1 à 3 millions de tonnes par an. Ce potentiel global, estimé pour les conditions françaises, est plus faible que celui avancé par d'autres experts. Bien que n'étant équivalent qu'à 1 à 2% des émissions de GES françaises, il n'est pas négligeable, puisqu'il pourrait représenter une proportion importante de l'effort à consentir pour respecter les engagements pris dans le cadre du Protocole de Kyoto.



Evolutions du stock de carbone dans le sol associées aux changements d'usage des terres provoquant les stockages (0,5 tC/ha/an durant les 20 premières années) ou les déstockages (1 tC/ha/an) extrêmes.

Les incertitudes et la variabilité des stockages

Les potentiels de stockage retenus sont assortis d'une forte incertitude relative, de l'ordre de 50% au niveau des flux par unité de surface, de l'ordre de 100% au niveau de l'estimation nationale. Les résultats sont très sensibles aux conditions pédo-climatiques et agricoles locales, et donc très contrastés selon les régions.

De plus, les estimations réalisées ne tiennent pas compte des émissions d'autres GES (N₂O et CH₄ notamment) induites par l'adoption des pratiques favorisant le stockage de carbone, qui seraient à déduire de la séquestration de CO₂. Enfin, les stockages pourraient être plus faibles si le changement climatique devait avoir un effet sur la minéralisation de la matière organique des sols plus fort que prévu actuellement, ou s'il interdisait certaines options consommatrices d'eau.

Les conditions de réalisation

Les stockages de carbone envisagés impliquent des changements massifs de pratiques et d'usage des terres, dont certains sont contraires aux évolutions actuelles (tendance à la diminution des prairies permanentes...) ou nécessitent des choix de politique agricole forts (afforestation des jachères fixes...). Ils supposent des engagements de très longue durée des agriculteurs (pour la constitution de stocks additionnels puis leur maintien), d'autant plus difficiles à consentir que le contexte politico-économique agricole est susceptible d'évoluer rapidement. Ils nécessiteront des mesures incitatives, dont la nature, le critère d'attribution et le financement ne sont pas faciles à définir.

Les conditions techniques de vérification

Pour être pris en compte dans le bilan national, les stockages additionnels de carbone devront être

prouvés et contrôlables. Les procédures de vérification devraient comporter la vérification, d'une part du stockage par unité de surface induit par un changement d'usage ou de pratique agricole, d'autre part des surfaces concernées par ces changements. Pour aucun des deux volets, on ne dispose actuellement d'outils d'observation adéquats.

La mise en évidence de stockages additionnels annuels très variables, et faibles par rapport aux stocks (eux-mêmes très variables) ; la détermination de la base de référence (stockage en l'absence de mesures le favorisant) ; le contrôle des surfaces soumises à des changements de pratiques culturelles... seront de toute façon délicats à réaliser.

Les dispositifs de vérification seront nécessairement lourds et donc coûteux à mettre en œuvre. Si le niveau d'exigence retenu est trop élevé, la vérification sera techniquement impossible à mettre en place pour la première "période d'engagement" (2008-2012) définie par le Protocole, et son coût deviendra prohibitif par rapport au prix de la tonne de carbone.

Enfin, contrairement à la réduction des émissions, **le stockage de carbone dans les sols ne constitue pas une solution durable** de réduction du CO₂ atmosphérique, puisque les stocks cessent de croître après quelques dizaines d'années, et que les terres agricoles mobilisables sont en quantité finie.

Toutefois, ce stockage pourrait permettre une certaine flexibilité vis-à-vis des engagements pris dans le cadre du Protocole de Kyoto, et il s'accompagne le plus souvent de bénéfices agronomiques et environnementaux connexes.

La nécessité d'envisager une politique globale vis-à-vis de l'effet de serre, à intégrer dans une politique agricole plus large

Compte tenu des incertitudes sur les résultats, des contraintes de mises en œuvre et du prix vraisemblablement modeste de la tonne de carbone par rapport aux aides agricoles existantes, **une politique spécifique, limitée au stockage du C dans les sols, apparaît peu réalisable et peu efficace. Les mesures visant ce stockage de C devront être intégrées dans une politique plus large.**

Une politique globale de lutte contre l'effet de serre devrait permettre de :

- prendre en compte l'ensemble des gaz à effet de serre d'origine agricole, et notamment les émissions de N₂O. Ce dernier point devrait conduire à

considérer la gestion des intrants azotés comme prioritaire au même titre que la gestion du C ;

- s'assurer que l'adoption d'une pratique à un endroit n'induit pas ailleurs une émission ou un déstockage de carbone (question du *leakage*) ;
- comparer le stockage de C dans les sols à l'alternative énergétique (cultures pour la production de biocarburants et valorisation énergétique des résidus agricoles et urbains) ;
- et le comparer aux réductions d'émission possibles dans les autres secteurs économiques.

Les pratiques tendant à stocker du carbone dans le sol présentent quasi-systématiquement **d'autres bénéfices environnementaux** : limitation de l'érosion, amélioration de la qualité des sols et des eaux, économie d'énergie fossile, biodiversité plus élevée... Cette compatibilité avec d'autres objectifs environnementaux permet d'intégrer les mesures incitatives "carbone" dans des mesures agri-environnementales plus larges, dans le cadre de la PAC. L'existence de certains effets négatifs (emploi accru de pesticides en non-labour, fermeture des paysages par afforestation...) nécessitera toutefois quelques arbitrages entre objectifs environnementaux.

Réciproquement, des actions de politique agri-environnementale (agriculture intégrée, protection des sols...) peuvent s'accompagner de bénéfices en terme de stockage de carbone. Ces gains, à condition de pouvoir montrer leur caractère intentionnel, pourraient être revendiqués au titre de l'application du Protocole de Kyoto ; cette reconnaissance de politiques agri-environnementales globales incluant un volet "carbone" est nécessaire à la mise en œuvre de telles actions.

Toute politique de ce type aura nécessairement une dimension territoriale forte. Elle devra se raisonner selon les enjeux environnementaux et territoriaux locaux, en prenant en compte des unités de fonctionnement dépassant la parcelle agricole (exploitations, bassins versants, zones d'alimentation des nappes souterraines...).

Pour en savoir plus

Arrouays, D., J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana et P. Stengel (eds), 2002, *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France?* Expertise scientifique collective. Synthèse. INRA. 32 p.

Cette synthèse, ainsi que le rapport d'expertise (332 p.), sont disponibles sur le site INRA : www.inra.fr

La nécessité de développer les recherches et l'acquisition de références

L'examen critique de la bibliographie française et internationale réalisé pour cette expertise souligne les lacunes dans les connaissances et l'impossibilité de quantifier précisément la plupart des phénomènes. Cette situation se traduit par des estimations accompagnées de marges d'incertitude fortes. Or le potentiel de stockage de carbone des sols français ne pourra à terme être valorisé que si les conditions pédoclimatiques et agricoles assurant l'efficacité des mesures visant le stockage peuvent être identifiées systématiquement, et si des méthodes fiables de quantification des gains obtenus sont développées.

La poursuite des recherches et l'acquisition de références supplémentaires s'avèrent donc nécessaires dans plusieurs domaines :

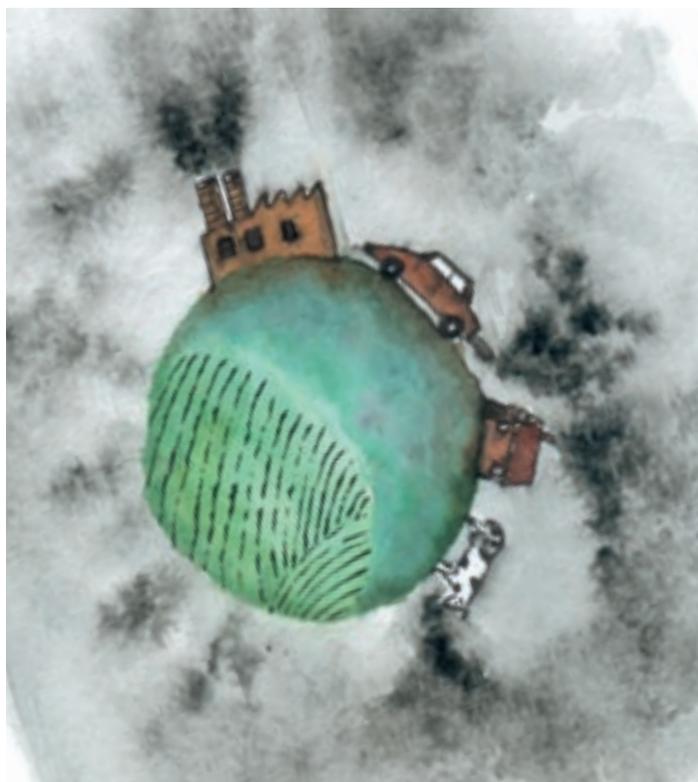
- la compréhension des mécanismes de biotransformation du carbone dans les sols ;
- la modélisation globale du comportement du carbone dans les sols, ainsi que le développement des dispositifs d'expérimentation de longue durée et d'observation pour acquérir les références nécessaires au calibrage puis à l'application des modèles ;
- l'établissement du bilan d'émission/séquestration de GES et du bilan environnemental global des activités agricoles ;
- le suivi des évolutions de l'utilisation des terres et des systèmes de production agricoles, nécessaire pour la vérification des pratiques revendiquées, mais aussi pour la conception et l'adaptation des politiques incitatives ;
- la modélisation intégrée, articulant les impacts des modifications de l'utilisation des terres, du changement climatique et des politiques agri-environnementales, à développer pour éclairer le décideur public et informer les agents économiques.

L'enjeu de ces travaux dépasse largement la question immédiate de la mise en œuvre nationale du Protocole de Kyoto ; il se situe dans le cadre de la gestion planétaire et à long terme du problème de l'effet de serre et d'une gestion durable des sols. L'importance de ces enjeux justifie l'intérêt que la recherche doit porter à ces questions.

Contacts :

. Dominique Arrouays : Unité Infosol – INRA – Avenue de la Pomme de Pin – Ardon – BP 20619 – 45166 Olivet cedex ; arrouays@orleans.inra.fr

. Claire Sabbagh : Unité d'Expertise Scientifique Collective – INRA – 147 rue de l'Université – 75338 Paris cedex 07 ; sabbagh@paris.inra.fr



Contribution à la lutte contre l'effet de serre

Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?

D. Arrouays, J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana, P. Stengel
Editeurs scientifiques

Expertise Scientifique Collective

Synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA
à la demande du Ministère de l'Ecologie
et du Développement Durable

Octobre 2002

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

1. CONTEXTE ET OBJET DE L'EXPERTISE	3
1.1. L'état de la négociation sur l'application du Protocole de Kyoto	
1.2. Les enjeux pour la France et ses engagements actuels	
1.3. L'expertise	
2. STOCKS ET STOCKAGE DE CARBONE DANS LE SOL : ÉTAT DE L'ART	5
2.1. Origine du carbone du sol et moyens d'en accroître l'accumulation	
2.2. Variabilité des teneurs en carbone des sols et difficultés d'évaluation des stocks	
2.3. Cinétique de stockage/déstockage de carbone dans les sols	
3. CRITÈRES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION DES PRATIQUES AGRICOLES SUSCEPTIBLES D'AUGMENTER LE STOCKAGE DE CARBONE DANS LES SOLS	9
3.1. L'évaluation du potentiel de stockage de carbone et de sa cinétique	
3.2. La prise en compte des autres effets des pratiques favorables au stockage de carbone sur le climat	
3.3. Les impacts agronomiques et environnementaux des pratiques stockant du carbone	
3.4. Les contraintes technico-économiques à l'adoption des usages du sol et pratiques stockant du carbone	
4. EVALUATION DES CHANGEMENTS D'USAGES DU SOL OU DE PRATIQUES AGRICOLES SUSCEPTIBLES D'AUGMENTER LE STOCKAGE DE CARBONE DANS LES SOLS	11
4.1. L'afforestation de terres agricoles	
4.2. Les modifications de pratiques en sols cultivés	
4.3. Les changements de gestion des systèmes fourragers	
4.4. Ordre de grandeur des stockages potentiels de carbone dans le sol et incertitudes	
5. SCÉNARIOS DE STOCKAGE DE CARBONE À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE FRANÇAIS MÉTROPOLITAIN	17
5.1. Méthode	
5.2. Potentiel de stockage selon différents scénarios	
6. COMPTABILISATION ET VÉRIFICATION DU STOCKAGE DE CARBONE	20
6.1. Les règles d'application des engagements de Kyoto	
6.2. Les procédures applicables de vérification du stockage de carbone	
7. OUTILS DE POLITIQUE ÉCONOMIQUE UTILISABLES POUR PROMOUVOIR LES PRATIQUES FAVORISANT LE STOCKAGE DE CARBONE	23
7.1. Cadre théorique	
7.2. Difficultés d'évaluation des coûts et bénéfices du stockage de carbone	
7.3. Les mesures incitatives envisageables	
8. BILAN ET CONCLUSIONS	27
Pour en savoir plus	30
Glossaire	31
Auteurs et éditeurs de l'expertise	33

AUTEURS ET ÉDITEURS DE L'EXPERTISE

■ RESPONSABLE INRA DU PROJET

Pierre STENGEL, Directeur Scientifique Environnement, Forêt et Agriculture, INRA Paris

EXPERTS

■ COORDINATION SCIENTIFIQUE

Responsable : Dominique ARROUAYS, *Ingénieur de Recherche, INRA Orléans ; expert auprès du GIEC*

Jérôme BALESSENT, *Directeur de Recherche, INRA/CEA Cadarache*

Jean-Claude GERMON, *Directeur de Recherche, INRA Dijon ; expert auprès du GIEC*

Pierre-Alain JAYET, *Directeur de Recherche, INRA Grignon*

Jean-François SOUSSANA, *Directeur de Recherche, INRA Clermont-Ferrand ; expert auprès du GIEC*

■ AUTEURS ET CONTRIBUTEURS

Dominique ARROUAYS, *IR**, INRA Orléans : *Inventaire et surveillance des sols, stocks de carbone, analyses géographiques, modélisation*

Jérôme BALESSENT, *DR**, INRA/CEA Cadarache : *Dynamique des matières organiques, traçage isotopique, modélisation, rhizosphère*

Claire CHENU, *DR*, INRA Versailles : *Dynamique des matières organiques et agrégation, effets des matières organiques*

Tiphaine CHEVALLIER, *IR*, INRA Orléans : *Dynamique des matières organiques et agrégation*

Mireille CHIROLEU-ASSOULINE, *Professeur, Université Paris 1 : Economie de l'environnement*

Philippe CIAIS, *DR au CEA, LSCE CEA-CNRS Gif-sur-Yvette* : *Cycle global du carbone, transport atmosphérique, modélisation*

Etienne DAMBRINE, *DR*, INRA Nancy : *Pédologie, sols forestiers, cycles biogéochimiques*

Stéphane DE CARA, *CR**, INRA Grignon : *Economie publique, politique agri-environnementale, modélisation, échanges agricoles*

Benoît GABRIELLE, *CR*, INRA Grignon : *Bilans environnementaux, grandes cultures*

Jean-Claude GERMON, *DR*, INRA Dijon : *Emissions de gaz par les sols, écologie microbienne*

Laurence GUICHARD, *IR*, INRA Grignon : *Agronomie, systèmes de culture, politiques agri-environnementales, évaluation*

Sabine HOUOT, *DR*, INRA Grignon : *Science du sol, recyclage d'effluents et déchets*

Pierre-Alain JAYET, *DR*, INRA Grignon : *Economie publique, régulation agri-environnementale, modélisation*

Claudy JOLIVET, *IR*, INRA Orléans : *Surveillance des sols, dynamique des matières organiques*

Pierre LOISEAU, *DR*, INRA Clermont-Ferrand : *Cycle du carbone et de l'azote dans les écosystèmes prairiaux*

Bruno MARY, *DR*, INRA Laon : *Agronomie, cycles du carbone et de l'azote*

Philippe MEROT, *DR*, INRA Rennes : *Hydrologie, fonctionnement hydrique des sols*

Guy RICHARD, *CR*, INRA Laon : *Agronomie, structure et travail du sol*

Jean ROGER-ESTRADE, *Maître de Conférences, INA P-G* : *Agronomie, systèmes de culture, structure et travail du sol*

Nicolas SABY, *IE**, INRA Orléans : *Systèmes d'Information géographique, analyse spatiale*

Uwe A. SCHNEIDER, *Chercheur, Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University* : *Economie agricole, modélisation appliquée à l'environnement*

Katheline SCHUBERT, *Professeur, Université Paris 1 : Economie de l'environnement*

Bernard SEGUIN, *DR*, INRA Avignon : *Climatologie, bilan radiatif et bilan d'énergie des surfaces continentales*

Marie-Françoise SLAK, *Maître de Conférences, ENITA Bordeaux* : *Ecologie, agronomie, occupation des sols*

Jean-François SOUSSANA, *DR*, INRA Clermont-Ferrand : *Dynamique des agro-écosystèmes prairiaux et changements globaux*

Pierre STENGEL, *Directeur Scientifique Environnement, Forêt et Agriculture, INRA Paris : Science du sol*

Christian WALTER, *Maître de Conférences, ENSA Rennes : Science du Sol, analyse spatiale, modélisation*

* *DR* : Directeur de recherche ; *CR* : Chargé de recherche ; *IR* : Ingénieur de recherche ; *IE* : Ingénieur d'études

■ UNITÉ EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE DE L'INRA

Annie CHARTIER, *IR*, INRA Versailles : *Ingénierie documentaire*

Claire SABBAGH, *IR*, INRA Paris : *Directrice de l'Unité, management de l'Expertise scientifique collective*

Isabelle SAVINI, *IR*, INRA Paris : *Rédaction et coordination éditoriale*

Le rapport d'expertise, source de cette synthèse, a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par le commanditaire ou l'INRA. La synthèse a été validée par les auteurs du rapport.

Les citations doivent faire référence aux éditeurs scientifiques nommés en couverture :

Arrouays, D., J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana et P. Stengel (eds). (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport. INRA (France), 32 pp.

Contacts : arrouays@orleans.inra.fr, BALESSENT@dsvsud.cea.fr, germon@dijon.inra.fr, jayet@grignon.inra.fr, soussana@clermont.inra.fr, stengel@paris.inra.fr

AVANT-PROPOS

Au Sommet de Johannesburg, les déclarations de certains états permettent d'espérer une entrée en vigueur du Protocole de Kyoto en 2003. Réduire les émissions s'avère évidemment la politique la plus durable pour lutter contre l'accumulation atmosphérique de gaz à effet de serre (GES) due aux activités humaines, qui est considérée de plus en plus unanimement comme responsable du changement climatique en cours et futur. Mais dans le cas du CO₂, des alternatives possibles consistent à accroître le rôle de puits temporaire que joue le stockage du carbone dans la biomasse, ses produits dérivés, et ses résidus dont la majeure partie alimente le pool des matières organiques du sol. Le stockage dans la biomasse forestière (article 3.3 du Protocole) a déjà fait l'objet d'accords internationaux avec des contingents stricts attribués aux différents pays. Favoriser l'accumulation à plus ou moins long terme des matières organiques dans les sols au travers de changements d'occupation des sols et de pratiques agricoles ou sylvicoles est une autre option (article 3.4) qui a été admise parmi les modalités d'application du Protocole de Kyoto. Pour cette option, il n'existe aucune limitation de quantité stockée ou de surface concernée, mais les modalités de vérification n'ont pas été encore définies.

Les sols mondiaux contiennent de l'ordre de 1 500 milliards de tonnes de carbone organique. Une augmentation, même minime en valeur relative, de ce stock, pourrait donc jouer un rôle significatif dans la limitation du flux net de GES vers l'atmosphère. Des changements dans l'usage des sols et dans les pratiques de production végétale peuvent y contribuer, en particulier en accroissant la durée de stockage du carbone organique dans les sols. Très variable, celle-ci dépend de la vitesse du processus de minéralisation par lequel le carbone organique est finalement restitué à l'atmosphère sous forme de CO₂. Il est donc important de connaître le potentiel offert par ce puits, selon les sols, leurs usages et les pratiques associées. Pour l'application du Protocole de Kyoto, il est par ailleurs nécessaire de savoir comment et avec quelle précision ce puits pourrait être comptabilisé et quelle politique d'incitation pourrait induire un stockage additionnel.

La démarche du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD)

Ces enjeux ne sont pas négligeables pour la France dans le contexte européen, compte tenu de l'extension de son territoire et de sa surface agricole. C'est pourquoi le Ministère chargé de l'environnement a formulé une demande d'expertise auprès de l'INRA. Elle concerne les capacités d'accumulation de carbone organique dans les sols agricoles et leurs dynamiques temporelles.

Cette expertise s'inscrit dans une stratégie de gestion des sols au niveau du territoire qui implique, dans un groupement d'intérêt scientifique, les principaux acteurs concernés (MEDD, ministère chargé de l'agriculture, Institut Français de l'Environnement, INRA), et la mise en œuvre d'un réseau de surveillance de la qualité des sols. Au niveau européen, cette réflexion rejoint les recommandations de la toute récente communication sur la protection des sols (dégradation, appauvrissement en matière organique...).

Les principales questions à traiter ont été formulées par le comité de pilotage de l'expertise, rassemblant les représentants des principaux acteurs publics intéressés et de l'INRA, sous la présidence de la Direction des Etudes Economiques et de l'Evaluation Environnementale du MEDD. Elles sont les suivantes :

- *Peut-on, en France, par des actions visant spécifiquement à augmenter l'accumulation du carbone organique dans les sols, contribuer à réduire l'effet de serre ? La réponse à cette question intéresse directement la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, et plus généralement la France, pour la prise en compte de l'agriculture dans le plan national de lutte contre l'effet de serre qui actuellement affiche un solde fortement négatif (émissions de N₂O et CH₄).*
- *Comment de telles actions pourraient-elles satisfaire aux conditions d'observance du protocole de Kyoto ? Il s'agit ici de proposer des solutions qui soient applicables au niveau technique et viables au plan économique.*

- *Quels outils de politique économique seraient efficaces pour promouvoir les changements souhaitables ? Pour cela, une intégration est à prévoir dans le dispositif de la PAC.*
- *Quels sont les besoins en recherches et en références ? Il s'agit de compléter les résultats des recherches en cours, notamment à l'INRA ou au CNRS, et les recommandations issus de programmes pilotés par le MEDD sur la gestion durable des sols et les impacts du changement climatique.*

La conduite du travail par l'INRA

L'expertise a été réalisée par un collectif d'experts, constitué de chercheurs spécialisés en sciences du sol, agronomie, bioclimatologie et économie publique appliquée à l'agriculture, de l'INRA et d'autres établissements, français et étrangers. La maîtrise d'œuvre du projet a été confiée par l'INRA à sa Direction scientifique Environnement, Forêt et Agriculture et à son Unité Expertise Scientifique Collective. Elles ont assuré la conformité de la réalisation aux principes méthodologiques des expertises collectives et à la demande des commanditaires. En l'occurrence, on peut constater qu'une expertise collective, rassemblant des chercheurs de différents horizons, était nécessaire pour aborder une série de questions scientifiques complexes qui effectivement prétaient à controverse. Cette expertise collective, en réalisant un état des lieux, sans omettre les divergences et les incertitudes, sera une aide précieuse à la prise de décision.

La présente "synthèse", destinée notamment aux décideurs, a été rédigée par l'Unité Expertise de l'INRA et validée par les experts. Elle constitue un résumé détaillé du rapport, aux chapitres duquel nous renvoyons les lecteurs soucieux d'accéder aux connaissances qui en fondent le contenu. Comme telle, nous souhaitons qu'elle permette à tous ceux qu'intéresse ce débat d'importance pour l'avenir de la planète, de disposer des éléments nécessaires à leur réflexion sur les initiatives nationales et européennes.

Dominique BUREAU

*Directeur des Etudes Economiques
et de l'Evaluation Environnementale
du Ministère de l'Ecologie et
du Développement Durable*

Marion GUILLOU

*Directrice générale de l'Institut
National de la Recherche
Agronomique*

STOCKER DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES DE FRANCE ?

L'hypothèse d'un changement climatique d'origine anthropique, induit par l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre* ¹ (GES), fait l'objet d'un consensus quasi général dans la communauté scientifique internationale. Cet accroissement des GES est dû principalement au gaz carbonique libéré par l'utilisation de combustibles fossiles.

L'accroissement réel du CO₂ atmosphérique s'est avéré moins fort qu'attendu au vu des émissions de CO₂ enregistrées, ce qui a conduit à postuler l'existence d'un "puits"* de carbone, au niveau des écosystèmes continentaux. La mise en évidence de ce puits a permis d'envisager son utilisation et son développement pour séquestrer du CO₂, et donc ralentir le renforcement de l'effet de serre.

1. signale les termes définis dans le glossaire figurant à la fin du document.

1. CONTEXTE ET OBJET DE L'EXPERTISE

Le Protocole de Kyoto autorise les pays signataires à décompter de leurs émissions de gaz à effet de serre la séquestration de GES induite par des "activités supplémentaires". Ces activités visent principalement le piégeage de carbone dans la biomasse et dans les sols. Elles concernent d'une part les opérations de boisement (article 3.3 du Protocole), d'autre part le secteur agricole et la gestion forestière ("utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie" ², objet de l'article 3.4). Les quantités déductibles au titre du volet "agricole" de l'article 3.4 ne sont pas plafonnées a priori ; chaque pays fixe les quantités sur lesquelles il s'engage, mais leur prise en compte est conditionnée par l'obligation de prouver la séquestration revendiquée.

2. UTCF ; Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF) en anglais.

La France, dont les émissions de CO₂ sont déjà relativement faibles, aura des difficultés à les réduire encore ; étant donné l'importance de ses surfaces agricoles, elle est logiquement intéressée par les perspectives ouvertes par l'article 3.4.

→ C'est dans ce contexte que le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable a demandé à l'INRA une expertise scientifique sur le sujet suivant : **Peut-on, en France, par des actions visant spécifiquement à augmenter l'accumulation du carbone organique dans les sols agricoles, contribuer à réduire l'effet de serre d'origine anthropique ?**

Il s'agit d'examiner les changements d'usage des sols agricoles et de pratiques agricoles a priori éligibles au titre des articles 3.3 et 3.4, leur capacité à induire effectivement un stockage additionnel de carbone dans les conditions pédoclimatiques françaises, leur applicabilité dans le contexte technico-économique agricole actuel et les moyens à mettre en œuvre pour vérifier ce stockage.

1.1. L'état de la négociation sur l'application du Protocole de Kyoto

Depuis la rédaction du Protocole de Kyoto (1997), les négociations se poursuivent, dans le cadre des Conférences des parties* (CoP) annuelles. Elles sont alimentées par des travaux scientifiques (recherches et expertises), menés par un groupe international d'experts, le GIEC* (IPCC* en anglais), qui a notamment rendu en 2000 un rapport sur les activités "LULUCF"*.

● Activités potentiellement éligibles au titre de l'article 3.4

Le GIEC a ainsi proposé une liste d'"activités anthropiques additionnelles" susceptibles d'accroître le stockage de C, potentiellement éligibles au titre de l'article 3.4. Elles concernent notamment la gestion des terres cultivées (fertilisation organique, travail du sol, incorporation de déchets organiques, rotations culturales, cultures de couverture, variétés à forte production, protection intégrée des cultures, optimisation de la fertilisation, irrigation...), la lutte contre l'érosion, la gestion des jachères et prairies, la restauration de zones humides ou de terres fortement dégradées...

● Règles de comptabilisation et de vérification

Ne sont déductibles au titre des articles 3.3 et 3.4 que les stockages additionnels "intentionnels", c'est-à-dire résultant d'une action volontaire (ce qui exclut par exemple le stockage de C lié au boisement spontané de zones agricoles abandonnées), engagée après 1990 (année de référence par rapport à laquelle ont été définis les objectifs de réduction d'émissions). Cette règle pose le problème de la détermination de la "baseline", niveau de référence en l'absence de mesures visant le stockage de C ("business as usual"). Enfin, la comptabilisation se fait sur des "périodes d'engagement" définies, dont la première est fixée à 2008-2012, et en référence à la situation de 1990.

La prise en compte des séquestrations de CO₂ déductibles étant limitée par l'obligation de prouver le stockage de C, les conditions de cette vérification s'avèrent cruciales. Actuellement, des principes ont été définis : ils prévoient la vérification d'une part de l'effet "stockant" de C de l'activité, d'autre part des surfaces soumises à cette activité ; ils imposent une double vérification (par deux méthodes indépendantes) du stockage revendiqué. Toutefois, les modalités d'application de ces principes sont encore en débat ; selon le niveau d'exigence qui sera retenu, les moyens à mettre en œuvre et leur coût pourraient s'avérer réhibitifs.

1.2. Les enjeux pour la France et ses engagements actuels

Dans le cadre du protocole de Kyoto, ratifié en mai 2002 par les pays de l'Union européenne, la France s'est engagée à maintenir ses émissions de GES à leur niveau de 1990. Cet objectif de simple stabilisation, retenu en raison d'émissions déjà relativement faibles (dues notamment à l'importance de l'électro-nucléaire), imposera tout de même de réaliser des efforts pour compenser les émissions croissantes dans des secteurs comme les transports.

Pour 2000, les émissions françaises brutes³ de GES ont été évaluées à 148 millions de tonnes équivalent carbone⁴, les émissions nettes à 133 MTEC. La contribution des différents GES à ces émissions nettes est de 69% pour le gaz carbonique (CO₂), 13% pour le méthane (CH₄), 16% pour le protoxyde d'azote (N₂O) et 2% pour les gaz fluorés. En 1990, les émissions nettes atteignaient 137,6 MTEC ; la baisse enregistrée depuis cette date correspond à une réduction d'émission des GES autres que le CO₂, notamment du N₂O d'origine industrielle.

● La place de l'agriculture

Les activités agricoles et forestières sont responsables de 16% des émissions brutes de GES françaises, soit près de 24 MTEC. Ces deux secteurs assurent par ailleurs une fixation nette de CO₂, estimée à 15 MtC par an.

Les activités agricoles sont à l'origine de :

- 67% des émissions françaises de N₂O (émissions par les sols agricoles et l'épandage des déjections animales),
- 54% des émissions françaises de CH₄ (fermentation entérique chez les ruminants et épandage des déjections animales).

Les émissions agricoles directes de CO₂ (consommation de carburant fossile des engins...) ne représentent en revanche qu'une faible part des émissions françaises.

→ Les stocks de carbone dans les sols métropolitains étant évalués (cf. infra) à environ 3 milliards de tonnes, les émissions françaises brutes (en équivalent C, CO₂), estimées à plus de 148 millions de tonnes par an, sont équivalentes à environ 4,9% des stocks dans les sols. Une augmentation de ces stocks de 0,2% par an (6 Mt) permettrait de compenser 4% des émissions brutes annuelles de GES, ou un quart environ des émissions des secteurs agricole et forestier. Ces ordres de grandeur justifient que l'on cherche à quantifier les effets des changements d'usage des sols ou de pratiques agricoles sur ce stockage de carbone.

● Enjeux et échéances

Ils sont multiples :

- engagement ou non de la France sur le volet agricole de l'article 3.4 pour la période 2008-2012 ; elle ne s'est pour l'instant engagée que sur le volet gestion forestière (à hauteur de 2,6 MtC) ;
- poursuite des négociations, dans le cadre des CoP annuelles, pour définir notamment les modalités de mise en œuvre de l'article 3.4. Ces questions donnent lieu à la commande d'expertises, au niveau européen notamment⁵ ; elles sont également étudiées par le nouveau panel du GIEC ;
- mise en place ou réforme de politiques, nationales ou européennes, non dédiées au carbone mais susceptibles de le prendre en compte (projets européens de Directives Biocarburants et Sols...) et/ou de concerner les pratiques favorables au stockage de C (PAC et ses déclinaisons françaises...).

1.3. L'expertise

● Les bornes de l'exercice

La question posée à l'expertise :

- est limitée aux sols agricoles : sols forestiers et biomasse aérienne sont exclus. Ne seront évalués que les stockages moyens dans les sols que l'on peut attendre du boisement de terres agricoles ;
- est limitée aux sols métropolitains⁶ ;
- nécessite de prendre en compte les autres effets des pratiques "stockantes" de C sur l'effet de serre, et

3. Emissions "brutes" = hors changement d'utilisation des sols, hors puits et hors sylviculture ; ces postes sont inclus dans les émissions "nettes". La différence entre ces 2 bilans tient principalement à la déduction de puits de CO₂.

4. Pour pouvoir établir des bilans de GES, alors que les différents gaz n'ont pas le même impact sur l'effet de serre, leurs contributions sont exprimées en terme de pouvoir de réchauffement global* (PRG), dans une unité commune, la Tonne équivalent carbone (TEC).

5. Cf. notamment la sortie, en mars 2002, d'une expertise demandée par la DG6 de la Commission européenne (Freibauer et al., 2002).

6. La question des sols tropicaux sera abordée dans un rapport spécifique du MEDD.

leurs effets connexes sur l'environnement, qui sont susceptibles de renforcer ou au contraire de réduire ou remettre en cause l'intérêt de ces pratiques. Ces points ne feront toutefois l'objet que d'une approche qualitative : identification des facteurs et du sens, positif ou négatif, de leur impact, mention des ordres de grandeur lorsqu'ils sont disponibles.

● Les connaissances mobilisées et leur traitement

Le travail réalisé comprend :

- une synthèse critique des connaissances scientifiques publiées sur le stockage de carbone, qui constitue le cœur de l'exercice ;
- un examen de la faisabilité agronomique et économique de la mise en œuvre des mesures favorisant le stockage de C et une revue des outils mobilisables en France pour la vérification de ce stockage. Cette analyse permet de ne pas s'en tenir à des "surfaces potentielles" d'application des mesures, mais de proposer des surfaces réalistes, tenant compte des contraintes ;
- une étude originale proposant des simulations de stockage de C pour l'ensemble du territoire à partir de scénarios d'adoption des pratiques jugées "stockantes", et une simulation de la détection des stockages par un dispositif de suivi des sols.

● Les étapes du diagnostic

La question initiale a été décomposée en sous-questions, correspondant à des étapes du diagnostic :

- estimation du stockage de C induit par différentes pratiques, par unité de surface (qui permet d'opérer un premier tri parmi les activités envisagées dans l'article 3.4) ;
- prise en compte des autres conséquences de ces pratiques sur l'effet de serre (émissions d'autres GES, économie de combustibles fossiles...);
- prise en compte des autres conséquences, agronomiques et environnementales, susceptibles de renforcer ou de limiter l'intérêt des activités "stockantes" ;
- examen des contraintes agronomiques et liées au fonctionnement des systèmes de production susceptibles de limiter l'extension de ces activités, et des conditions éventuelles de la levée de ces contraintes ;
- évaluation du stockage potentiel de carbone à l'échelle du territoire métropolitain, selon plusieurs scénarios d'adoption des pratiques "stockantes" ;
- examen des dispositifs nécessaires à une vérification du stockage de C et évaluation des outils existants ;
- revue des outils économiques et politiques utilisables pour inciter à l'adoption des pratiques favorisant le stockage de C ;
- bilan.

2. STOCKS ET STOCKAGE DE CARBONE DANS LE SOL : ÉTAT DE L'ART

2.1. Origine du carbone du sol et moyens d'en accroître l'accumulation

● Le cycle du carbone dans les écosystèmes terrestres

La photosynthèse est la voie quasi unique de fixation biologique du CO₂ atmosphérique dans ces écosystèmes. La matière organique (MO) ainsi synthétisée finit toujours, à un niveau ou un autre des réseaux trophiques, par être dégradée : par la respiration (avec libération de CO₂) ou, en conditions anaérobies, par fermentation (avec libération de CH₄). Cette MO peut également être détruite par combustion, qui dégage également du CO₂.

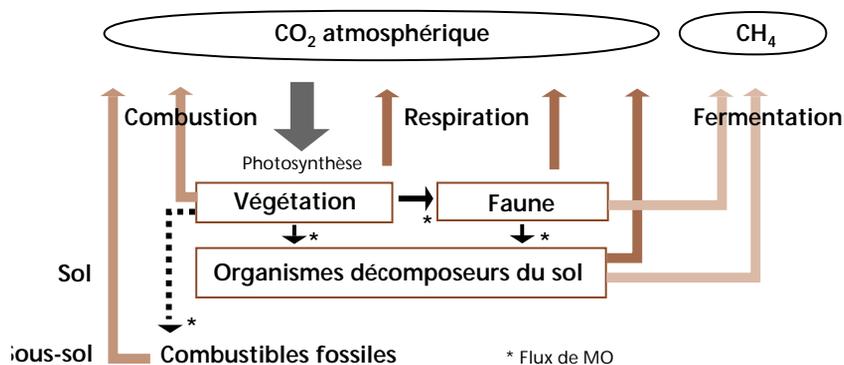


Figure 1. Le cycle du carbone

A l'échelle planétaire, les stocks de C atteignent 750 Gt dans l'atmosphère, 650 Gt dans la végétation, et 1500 Gt dans les sols. Les échanges moyens annuels entre biosphère continentale et atmosphère s'élèvent à 120 GtC/an.

- **Dynamique du carbone dans le sol**

Le carbone peut être stocké dans le sol essentiellement sous forme organique. Cette matière organique provient des organes (feuilles, racines...) et organismes morts, des déjections animales, mais aussi de la rhizodéposition (molécules organiques excrétées par les racines dans le sol), et comprend la biomasse microbienne.

La MO "morte" subit une série de biotransformations : décomposition et finalement minéralisation par des micro-organismes, avec libération de CO_2 . La vitesse de ces phénomènes dépend de la composition de la MO et des conditions physico-chimiques locales (humidité, température, oxygène...) ; elle est ralentie par l'association de la MO à des particules minérales (notamment argileuses) qui assurent une "protection" physique de cette MO contre l'activité des micro-organismes.

→ Il n'existe pas (quasiment) de stockage définitif de carbone dans les sols, car toute MO est à terme minéralisée. Les temps de résidence du C organique dans les sols, qui sont en moyenne de quelques dizaines d'années, vont de quelques heures à plusieurs millénaires. L'évolution du stock de C est déterminée par le bilan entrée de matière organique / sortie de CO_2 .

- **Les voies techniques d'accroissement du stockage de carbone dans les terres agricoles**

Les activités agricoles susceptibles de stocker du C sont celles qui permettent :

1/ d'accroître les "entrées" de matière organique :

- en augmentant la production primaire, qui accroît généralement les apports de MO au sol ;
- en accroissant les restitutions au sol des résidus de culture et déjections animales (fumiers...) ;
- en important des MO non agricoles (épandage de déchets organiques d'origine industrielle ou urbaine) ;

2/ de retarder les "sorties" par minéralisation :

- en ralentissant la décomposition puis la minéralisation en jouant sur la composition des MO, mais aussi sur les usages du sol et les pratiques agricoles qui peuvent modifier les conditions physico-chimiques et améliorer la protection physique de la MO ;
- en privilégiant les usages "durables" de la MO récoltée (ce point concerne principalement le bois).

→ Certains usages du sol ou pratiques agricoles jouent sur plusieurs de ces mécanismes. Ainsi, le stockage additionnel maximum est obtenu par le passage d'une culture annuelle à une végétation pérenne, qui cumule plusieurs effets : des apports de C parfois plus élevés (par les organes aériens et souterrains) ; des MO plus résistantes à la dégradation ; une incorporation accrue par voie racinaire, qui assure une protection physique de la MO plus importante ; une stabilisation, notamment par la suppression du travail du sol, des agrégats qui protègent la MO.

2.2. Variabilité des teneurs en carbone des sols et difficultés d'évaluation des stocks

- **Difficultés d'estimation des stocks de carbone**

Les estimations de stocks reposent toujours sur des mesures ponctuelles de teneurs en C des sols, converties ensuite en stock (passage d'une teneur rapportée à une masse de sol à un stock rapporté à un volume) ; des valeurs moyennes de stocks sont ensuite extrapolées à des surfaces considérées comme homogènes. Ces estimations se heurtent à deux difficultés majeures.

La grande variabilité des stocks

Il existe une forte variabilité temporelle et géographique des stocks de C dans les sols, ainsi qu'un gradient vertical marqué (les teneurs en C plus élevées en surface, décroissent en profondeur) mais variable. Les facteurs susceptibles d'affecter le stock de C sont multiples et leurs interactions complexes.

En France, type de sol et occupation du sol apparaissent comme les déterminants majeurs du niveau des stocks, mais la dispersion des valeurs des stocks reste importante même au sein de classes définies en croisant ces deux critères. Cette forte variabilité résiduelle traduit le poids d'autres paramètres non pris en compte, mais aussi le fait qu'un stock de C mesuré au temps t sous une occupation donnée ne correspond souvent pas au stock "à l'équilibre" et reflète en partie les usages antérieurs du lieu (cf. § 2.3).

La faiblesse des données

Les données disponibles sont trop peu nombreuses (échantillonnage insuffisant par rapport à la variabilité existante), pas toujours fiables et complètes (pas assez de mesures de la densité apparente...), ni souvent comparables entre elles (différences de techniques d'analyse, d'épaisseur de sol prise en compte...). Les risques d'erreurs et d'extrapolations abusives sont donc importants.

→ La connaissance même des stocks moyens est difficile ; les estimations mondiales publiées varient d'ailleurs du simple au double. Il est toutefois possible, en prenant quelques précautions méthodologiques, d'obtenir des estimations des stocks, dont il faut surtout retenir des ordres de grandeur.

→ Il est en revanche difficile de mettre en évidence des variations de stocks, qui restent très faibles comparées à des stocks eux-mêmes très variables.

● Estimation des stocks de carbone dans les sols français

L'exploitation des quelque 19 000 références disponibles dans diverses bases de données françaises a permis de produire une estimation des stocks par en fonction de l'occupation et/ou du type de sol, puis des stocks nationaux et de leur répartition régionale.

Stocks de carbone selon les modes d'occupation et les types de sols

Les stocks moyens par **occupation du sol** varient de 30 à 90 tC/ha ; ils se répartissent en 3 groupes :

- les sols sous cultures annuelles et cultures pérennes avec sol nu, dont les stocks sont inférieurs à 45 tC/ha. Vignes et vergers, cultures à très faibles restitutions organiques, présentent les stocks les plus faibles : environ 32 tC/ha. Les terres arables sont caractérisées par des stocks assez bas également : 43 tC/ha en moyenne ;
- les sols sous prairies permanentes et forêts (litière exclue), avec des stocks de près de 70 tC/ha ;
- les sols des pelouses d'altitude et des zones humides, dont les stocks sont supérieurs à 90 tC/ha (par effet, respectivement, des basses températures et de l'anoxie sur la minéralisation du carbone).

→ L'effet majeur en termes de stockage additionnel sera obtenu par passage du premier au second groupe. Prairies et forêts présentent des potentiels de stockage de C dans les sols très voisins.

Les stocks moyens de C par **types de sol** varient de 40 tC/ha (sols sableux ou squelettiques) à 100 tC/ha (sols argileux ou hydromorphes). Une forte teneur en argile est le principal facteur corrélé à des stocks importants ; toutefois, des taux élevés de calcaire (rendzines) ou d'aluminium échangeable (podzols) permettent d'atteindre des stocks moyens dans des sols pauvres en argile.

Les stocks de carbone au niveau français

A partir de ces valeurs moyennes des stocks de C par type de sol et d'occupation, et de bases de données géographiques des sols de France et de l'occupation du territoire, il est possible de produire une carte des stocks de C, puis de calculer une estimation du stock global des sols de France.

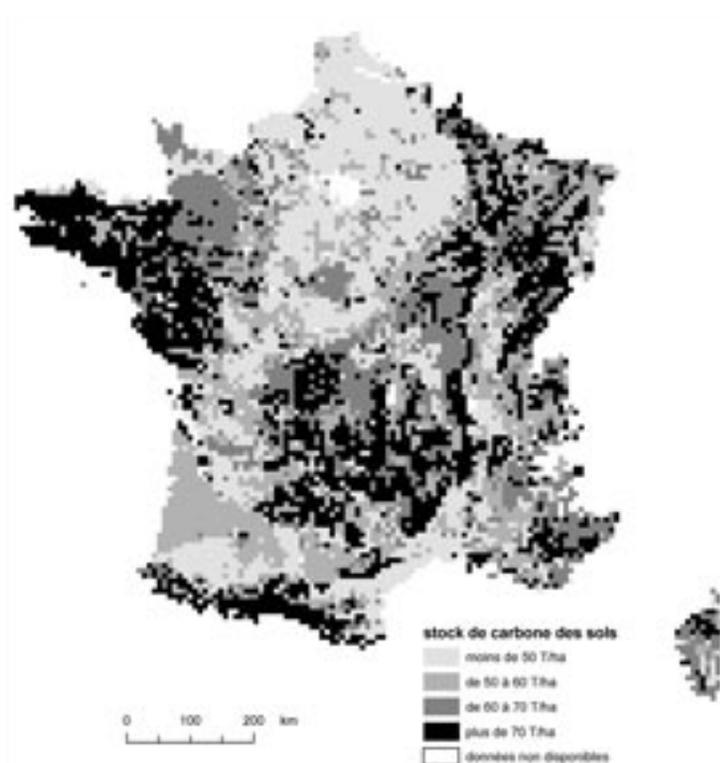


Figure 2. Distribution géographique du carbone organique dans les sols de France.

On trouve : les stocks les plus faibles (<40 tC/ha) en région viticole, à climat chaud et sols peu épais, mais aussi dans quelques zones de culture très intensive ; les stocks faibles (40-50 tC/ha) dans les grandes plaines de culture intensive ainsi que sur les sols limoneux plus ou moins dégradés ; les stocks moyens (50-70 tC/ha) dans les grandes régions forestières et/ou fourragères ; les stocks les plus élevés en situations climatiques (montagne), et/ou pédologiques (marais) extrêmes.

→ Ces disparités régionales traduisent des différences d'occupations du sol, mais aussi de conditions pédoclimatiques. Les potentiels de stockage de C sont très inégaux selon les régions.

Le stock global estimé est de 3,1 milliards de tonnes de carbone pour l'ensemble du territoire DOM-TOM exclus, et pour la couche de sol 0-30 cm.

2.3. Cinétiques de stockage/déstockage de carbone dans les sols

Les cinétiques de stockage de C sont :

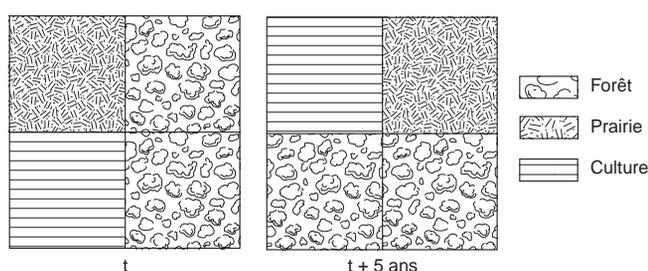
- **non linéaires** : elles sont plus rapides durant les premières années qui suivent l'adoption d'une pratique "stockante". La phase de stockage n'excède généralement pas quelques dizaines d'années. A pratique constante, les stocks tendent vers un palier correspondant à l'installation d'un nouvel équilibre (où entrées et minéralisation de MO se compensent).
- **plus lentes** que celles de déstockage. Sur 20 ans, par exemple, le stockage lié à la conversion terre arable → forêt est deux fois plus faible que le déstockage induit par la conversion inverse.

→ Ces caractéristiques ont plusieurs conséquences :

- il existe un risque de surestimation du stockage par extrapolation de flux annuels moyens sur des périodes trop longues ;
- le stockage dans les sols ne représente pas une solution durable sur le long terme de réduction du CO₂ atmosphérique. Après quelques dizaines d'années, les stocks n'augmentent plus – mais leur conservation nécessite le maintien des pratiques ayant permis leur accumulation ;
- l'abandon ou l'interruption temporaire des pratiques "stockantes" se traduit le plus souvent par un déstockage rapide. Pour être efficace, l'adoption d'une pratique devra donc s'accompagner d'un engagement à la maintenir à long terme. Si des interruptions s'avèrent nécessaires, le stockage revendiqué devra être revu à la baisse ;
- le flux annuel de stockage n'est pas indépendant de l'histoire de la parcelle. On ne peut donc évaluer le stockage de C intervenu entre deux dates à partir de la seule mesure des surfaces concernées par les changements d'usage ou d'activités intervenus durant cette période. Il est nécessaire de connaître les matrices de changement d'occupation du sol.

Figure 3.

La proportion des différentes occupations du sol ne varie pas entre les deux dates, mais 3 parcelles connaissent une modification de leur régime de stockage/ déstockage de C. Compte tenu de l'asymétrie entre stockage et déstockage, le bilan pour l'ensemble est une perte de C.



● Connaissance et modélisation des phénomènes de transformation du carbone dans le sol

Le MO qui arrive au sol subissant des biotransformations successives, le carbone organique se trouve sous diverses formes, dont les propriétés physico-chimiques et les temps de résidence diffèrent. Il n'existe pas aujourd'hui de modèle unique, global, intégrant l'ensemble des mécanismes de transformations du C et des facteurs les contrôlant, permettant de prévoir le sens des évolutions du stock de C. Les diverses modélisations qui ont été proposées correspondent chacune à des conditions d'application ou à des objectifs particuliers.

→ Nous sommes contraints actuellement de nous en tenir à des modèles un peu frustes mais robustes, n'exigeant pas trop de variables d'entrée. C'est le cas du modèle de Hénin-Dupuis, à un seul compartiment de C et 2 coefficients (l'un correspondant au taux de conversion en humus de la MO apportée au sol, l'autre à la vitesse de minéralisation de cet humus). Ce modèle présente de plus l'avantage d'être très documenté en France.

→ Le groupe d'experts a proposé un cadre formel unique, dérivé de ce modèle, pour intégrer les références disponibles et décrire le stockage de C, en évitant les biais cités précédemment.

3. CRITÈRES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION DES PRATIQUES AGRICOLES SUSCEPTIBLES D'AUGMENTER LE STOCKAGE DE CARBONE DANS LES SOLS

Les pratiques éligibles au titre des articles 3.3 et 3.4 doivent être évaluées par rapport à leur potentiel de stockage de carbone, mais aussi sur leurs impacts connexes, qui pourraient réduire, voire annuler, leur effet positif, ou au contraire renforcer l'intérêt de certaines pratiques.

3.1. L'évaluation du potentiel de stockage de carbone et de sa cinétique

Le cadre formel retenu dans l'expertise pour évaluer le stockage/déstockage intervenant suite à l'adoption d'une pratique B succédant à une pratique A initiale (supposée ayant atteint son stock d'équilibre) est une fonction exponentielle. Ses paramètres sont : la différence Δ entre les stocks de C à l'équilibre pour les pratiques A et B, et une constante de vitesse k de stockage/déstockage. Il est toujours possible d'extraire des valeurs de stocks ainsi calculées un flux annuel moyen pour une période choisie, les 20 premières années d'application de la nouvelle pratique, par exemple. Ce sont ces valeurs de flux moyens qui sont mentionnées dans le présent document.

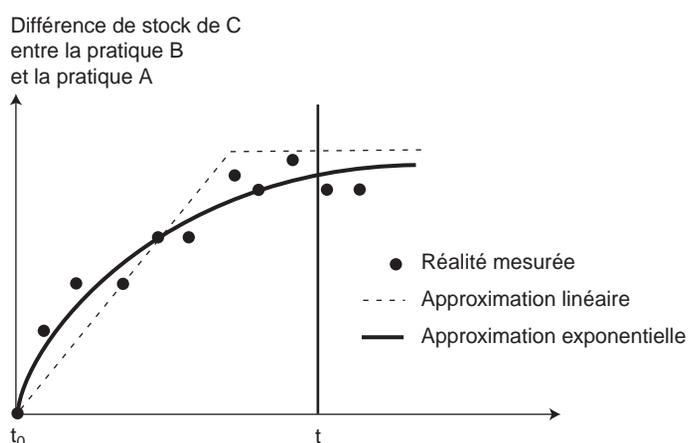


Figure 4. Deux modes d'approximation de la cinétique du stockage de carbone, dans le cas d'une pratique B succédant à une pratique A.

Le GIEC utilise l'approximation linéaire bornée.

C'est l'approximation exponentielle, définie par l'équation $Ct = \Delta (1 - e^{-kt})$, qui est retenue ici.

La courbe obtenue, plus conforme à la cinétique observée qu'une droite, présente une asymptote qui évite la surestimation du stockage par sommation d'un flux annuel moyen sur une période trop longue.

Pour chaque changement d'usage du sol ou de pratique, les 2 paramètres Δ et k sont déterminés d'après les références disponibles, en privilégiant les données acquises dans des conditions pédoclimatiques et agricoles proches de celles prévalant en France, et dans le cadre d'essais agronomiques de longue durée. Il faut noter que ces expérimentations sont très peu nombreuses, et que la majorité des références bibliographiques sont nord-américaines. Les données disponibles permettent d'identifier les facteurs de variation du stockage (taux d'argile, conditions climatiques...), mais pas d'en déduire des valeurs différenciées des paramètres Δ et k , correspondant aux différents contextes régionaux.

3.2. La prise en compte des autres effets des pratiques favorables au stockage de carbone sur le climat

● Les émissions d'autres GES

Le CH_4 d'origine agricole est produit à 90% par les ruminants (fermentation dans le rumen) ; ces émissions sont "hors sujet" par rapport à l'expertise, mais elles devront être intégrées dans les raisonnements sur les évolutions de l'élevage susceptibles d'optimiser le bilan de GES.

Les sols, hormis ceux des rizières (négligeables en France) et des zones humides, contribuent peu aux émissions de CH_4 et sont même très vraisemblablement des puits (par la présence de bactéries utilisant le CH_4).

Pour le N_2O au contraire, les émissions d'origine agricole sont largement imputables aux sols. Ces émissions ne sont pas évaluées par unité de surface, mais par facteur d'émission (pourcentage de l'azote apporté par les engrais). D'après les normes d'émission retenues par le GIEC, les émissions annuelles directes de N_2O du secteur agricole atteindraient 117 000 t pour le territoire français, soit l'équivalent, compte tenu du fort pouvoir de réchauffement global de ce gaz, d'un déstockage de 9,4 MtC/an.

→ Le bilan des émissions de GES n'est pas toujours connu avec précision. Mais il est probable que certaines pratiques favorables au stockage de C puissent présenter un bilan très faible en terme de réduction de l'effet de serre.

- La réduction des émissions de CO₂ d'origine fossile

Par diminution de la consommation agricole de carburants fossiles

La consommation d'énergie fossile atteint, pour les cultures annuelles non légumineuses en conduite conventionnelle par exemple, 20 000 MJ/ha, soit l'équivalent d'un déstockage de 0,40 tC/ha/an. Pour ces productions, le premier poste de consommation (40-60%) correspond aux engrais minéraux azotés (dont la synthèse exige beaucoup d'énergie), le second à la motorisation. Certaines pratiques stockant du C sont susceptibles d'être, en outre, plus économes en énergie fossile.

Par substitution de biocarburants aux combustibles fossiles

L'utilisation énergétique de la production carbonée végétale permet une économie d'émission de CO₂ d'origine fossile. Cette voie comprend d'une part la production de cultures bioénergétiques (colza pour la fabrication d'ester méthylique, à mélanger au diesel ; blé ou betterave pour l'obtention de bio-éthanol, à mélanger à l'essence après raffinage), et d'autre part la valorisation énergétique des résidus de culture (combustion des pailles). Le bilan de GES de ces options est à comparer à celui du stockage de C dans les sols.

- La modification des échanges d'énergie à la surface terrestre

Les changements d'occupation du sol peuvent avoir des effets sur le fonctionnement climatique, par modification des flux d'énergie de surface : parts relatives du rayonnement solaire réfléchi/absorbé par le sol, de la chaleur émise par le sol dissipée par évapotranspiration/échauffement de l'air. Cette question est hors application du Protocole de Kyoto, mais elle doit être considérée si l'on cherche à affiner les bilans réels ; elle fait d'ailleurs l'objet de débats scientifiques.

L'effet de l'usage des sols sur le climat est connu et quantifié à l'échelle locale. Cet impact sur le climat local (notamment la température) est susceptible de compenser un réchauffement climatique, ou au contraire de s'y ajouter. Les conséquences sur le climat global sont beaucoup plus difficiles à évaluer, et à comparer à l'effet du stockage de C. Des modifications d'usage sur de grandes étendues pourraient avoir des effets sur l'absorption d'énergie solaire par la surface terrestre susceptibles de réduire, voire d'annuler, les effets attendus du stockage de C sur l'effet de serre.

3.3. Les impacts agronomiques et environnementaux des pratiques stockant du carbone

Sur le plan agronomique, les effets d'un accroissement de la MO sont plutôt positifs : amélioration de la stabilité structurale des sols, de leur réserve en éléments fertilisants et de leur réserve en eau. Toutefois, ces effets sont difficilement quantifiables.

Bon nombre des pratiques "stockantes" s'accompagnent de bénéfices environnementaux connexes : réduction de l'érosion et de la pollution des eaux souterraines et superficielles, maintien de la biodiversité et/ou gains sur la consommation d'énergies fossiles... Toutefois, des effets négatifs sont possibles : l'abandon du labour nécessite une utilisation accrue de pesticides, des boisements importants entraînent la fermeture des paysages...

→ L'hypothèse "win-win" selon laquelle les stratégies visant un stockage additionnel de C seraient aussi toujours "gagnantes" sur les autres plans environnementaux, souvent mise en avant, est à vérifier au cas par cas, et en référence aux autres objectifs environnementaux qui peuvent être assignés à un territoire.

3.4. Les contraintes technico-économiques à l'adoption des usages du sol et pratiques stockant du carbone

Il est nécessaire d'identifier les contraintes technico-économiques susceptibles de s'opposer à l'adoption des pratiques "stockantes" (difficultés agronomiques, coûts des équipements, charge de travail supplémentaire, évolution des marchés, logique des aides agricoles actuelles...). Cette phase du diagnostic permet d'envisager les mesures d'accompagnement technique (conseil agricole...) et/ou les incitations économiques susceptibles de faciliter l'adoption et le maintien de ces pratiques.

Par ailleurs, la prise en compte de ces contraintes, des évolutions "spontanées" des usages du sol et pratiques agricoles, et des possibilités concrètes de vérification sert à définir les hypothèses qui fondent les simulations de stockage au niveau national.

→ Beaucoup de lacunes persistent dans les connaissances, qui se traduisent en incertitudes sur les quantifications, voire sur le sens des évolutions attendues. Les bilans sont donc difficiles à établir.

4. EVALUATION DES CHANGEMENTS D'USAGES DU SOL OU DE PRATIQUES AGRICOLES SUSCEPTIBLES D'AUGMENTER LES STOCKS DE CARBONE DANS LES SOLS

Une première sélection est opérée parmi les activités potentiellement éligibles au titre des articles 3.3 et 3.4 sur le critère "potentiel de stockage" et sur les éventuels autres effets sur les émissions de GES ou l'environnement. Les options retenues font ensuite l'objet d'un examen plus précis des conditions de mise en œuvre. Ces éléments sont récapitulés dans le Tableau 1.

4.1. L'afforestation de terres agricoles

● Afforestation de terres cultivées

L'analyse des données bibliographiques permet d'évaluer les flux moyens annuels de C induits par l'afforestation de terres labourées tous les ans à $0,45 \pm 0,25$ tC/ha/an sur un scénario à 20 ans. La conversion inverse, mise en culture de surfaces boisées, génère un déstockage très important, deux fois plus rapide que le stockage intervenant suite au boisement (figure 5).

Cette afforestation est intéressante en termes de stockage, mais les terres les plus médiocres ayant déjà été boisées, la "réserve" de surfaces est probablement limitée, à moins de recourir au boisement des terres actuellement en jachères fixes.

● Afforestation de surfaces en herbe

Au niveau du sol même, le stockage additionnel est faible ; un déstockage modéré peut même être observé dans certaines conditions pédoclimatiques.

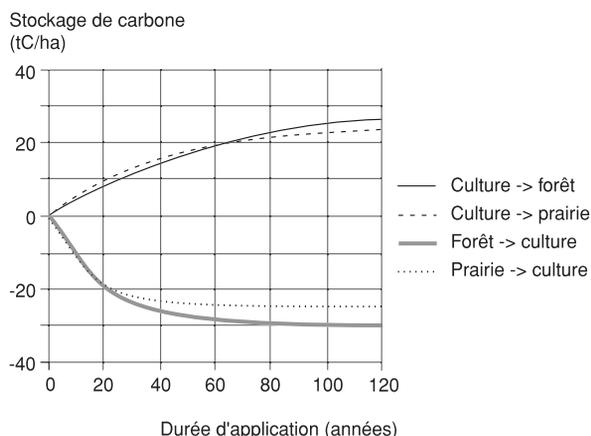


Figure 5. Evolutions du stock de carbone dans le sol associées aux pratiques provoquant les stockages (0,5 tC/ha/an durant les 20 premières années) ou les déstockages (1 tC/ha/an) extrêmes.

Il s'agit de valeurs modales pour le territoire français ; l'intervalle de confiance à 95% sur ces valeurs est de l'ordre de $\pm 40\%$.

Le boisement de terres agricoles permet en outre une accumulation de C dans la biomasse ligneuse (non comptabilisée ici) et présente d'autres effets positifs sur le bilan de GES : économie d'intrants (engrais azotés) et d'énergie de traction...

Pour être comptabilisée, cette afforestation de terres agricoles doit résulter d'une action humaine : le boisement spontané des zones en déprise ne pourra donc être pris en compte que s'il s'accompagne d'une gestion des accrues. Il est à noter que la restauration des forêts endommagées par les tempêtes de décembre 1999 réduit probablement les moyens, humains et matériels, disponibles actuellement pour de nouvelles opérations de boisement.

● Implantation de haies

La création de haies, bandes boisées étroites, induit bien un stockage additionnel de C, mais celui-ci est très variable selon les caractéristiques de la haie (largeur, hauteur...). L'ordre de grandeur serait de 0,1 tC/ha/an pour 100 m linéaires de haie par hectare. Sur pente, les haies parallèles aux courbes de niveau, en retenant la terre érodée en amont, évitent de plus l'exportation de la MO contenue dans cette terre.

Massivement supprimées lors des remembrements, les haies sont maintenant reconsidérées pour leur intérêt environnemental : lutte contre le ruissellement et l'érosion, effets positifs sur la biodiversité et le développement de la faune auxiliaire en protection intégrée, protection du bétail au pâturage, intérêt paysager... Les coûts d'implantation et d'entretien limitent toutefois leur développement.

4.2. Les modifications de pratiques en sols cultivés

Ne sont traitées ici que les terres en cultures annuelles, hors productions fourragères (qui font l'objet du § 4.3). Les changements de pratiques envisagés n'impliquent a priori pas de remise en cause des systèmes de production ; ils peuvent demander une révision plus ou moins importante des itinéraires techniques, et donc des ajustements des systèmes de culture.

● Niveau d'intensification des cultures

Ne sont **pas retenues** comme permettant un stockage additionnel de C des pratiques visant à augmenter la production primaire par intensification (fertilisation accrue ou irrigation), étant donnés les faibles gains possibles dans des systèmes déjà très intensifs, et les effets secondaires négatifs sur le bilan de GES (émission de N₂O...) et sur l'environnement d'une telle stratégie. L'amélioration génétique, qui augmente la production récoltée mais pas les parties restituées au sol, n'est pas retenue non plus.

Au contraire, une certaine "désintensification" des systèmes de culture intensifs européens ne pénalise pas le stock de C et présente un bilan de GES plus favorable : la réduction des apports d'engrais azotés abaisse les émissions de N₂O et la consommation énergétique ; la réduction du nombre de passages d'engins (interventions phytosanitaires moins nombreuses) permet d'autres économies de CO₂ fossile.

● Choix des cultures

Les cultures à restitutions organiques plus fortes

Le stockage induit par les résidus de culture restitués au sol diffère selon les productions : les pailles des céréales apportent davantage de C (0,15 tC/ha/an pour 7 t de pailles) que les résidus de pommes de terre ou de betteraves (cultures qui induisent un déstockage de C) par exemple. Mais accroître encore la part des cultures céréalières dans l'assolement irait à l'encontre de l'évolution vers des rotations plus diversifiées pour limiter les risques sanitaires (d'ailleurs encouragée par une "aide rotationnelle").

Les cultures énergétiques

Elles permettent une économie d'émission de C fossile supérieure à la séquestration par stockage de carbone dans le sol. De plus, elles constituent une solution durable, dont l'efficacité n'est pas limitée dans le temps, contrairement au stockage de C dans les sols.

Une conduite à bas niveau d'intrants (fertilisation modérée, travail du sol réduit...) devrait permettre d'optimiser le bilan de GES et le bilan environnemental de ces productions bio-énergétiques. Cependant, il n'est pas évident que cette option assure la plus forte rentabilité économique dans les conditions actuelles.

Pour l'instant, la filière de production de biocarburants liquides la plus développée en France est celle du "di-ester" ; elle ne représente toutefois que 300 000 ha de culture de colza. Le projet européen de développement des biocarburants pourrait cependant faire évoluer la situation.

● Gestion des résidus de culture et des apports exogènes

Gestion des résidus de culture

Les résidus de culture sont souvent déjà restitués au sol ; le brûlage des pailles sur le champ est actuellement peu pratiqué. Les possibilités de stockage additionnel de C sont donc très faibles.

La **valorisation énergétique** de ces résidus apparaît plus intéressante en terme de bilan de CO₂ que le stockage induit par leur restitution au sol. Pour 7 t de pailles, le stockage de C dans le sol est évalué à 0,15 tC/ha/an, alors que la combustion permettrait une économie de 2,4 tC, soit un gain de 2,25 tC/ha/an. Toutefois, le développement de cette utilisation énergétique pose des problèmes de collecte et d'équipements, et il induirait une baisse de MO préjudiciable dans les sols ne recevant aucun autre apport organique.

Gestion des effluents d'élevage

Les effluents d'élevage représentent un important gisement de carbone (environ 25 MtC/an), mais ils sont déjà épandus sur les terres agricoles. Des propositions d'"amélioration" de leur gestion, reposant sur l'épandage préférentiel sur les sols à taux de MO faible, ont été avancées par certains auteurs. Une telle option supposerait que cette MO soit stabilisée, et pourrait se traduire par un coût énergétique de transport supplémentaire. La gestion de ces effluents présente donc un potentiel supplémentaire de **stockage nul**.

Importation de MO exogènes non agricoles

Ces MO exogènes mobilisables sont les **déchets organiques** d'origine agro-industrielle ou urbaine (boues de stations d'épuration, composts ménagers et déchets verts) actuellement mis en décharge ou inciné-

rés. Les gains possibles sont en fait limités, car ces "gisements" de MO ne s'élèvent qu'à 0,3 MtC/an (à comparer aux 25 MtC des effluents agricoles) ; leur incorporation au sol présente un potentiel national de stockage de l'ordre de 0,15 MtC/an. De plus, en terme de bilan de GES, leur valorisation énergétique serait plus intéressante. L'épandage sur les terres agricoles constitue néanmoins une voie de recyclage local pour ces déchets.

L'épandage de ces produits peut poser des problèmes, solubles, de maîtrise de la fertilisation azotée (teneur en N variable des apports, minéralisation difficile à prévoir...). Il se heurte à la réticence des agriculteurs (et des propriétaires fonciers), qui craignent que les risques sanitaires et/ou la mauvaise image liés à ces épandages ne limitent ensuite les productions possibles sur les terres (clauses de non-épandage de boues pour les cultures légumières, par exemple).

→ En dehors de l'utilisation énergétique, le mode de gestion des résidus de culture, effluents agricoles et déchets urbains offre un potentiel de stockage supplémentaire de CO₂ faible.

● Gestion des surfaces non en production

Sont retenues les implantations de cultures intermédiaires (en intercultures et sur jachères) et intercalaires, qui accroissent la production primaire annuelle sans intrants supplémentaires, avec restitution complète de la MO puisque la production végétale n'est pas exportée.

Introduction d'engrais verts en interculture

La pratique de l'engrais vert, durant les intercultures suffisamment longues (entre une récolte d'été et un semis de printemps), représente une solution intéressante en terme de stockage : 0,15 tC/ha/an. Son adoption dans les systèmes de grande culture actuels ne présente pas de difficulté insurmontable. Le principal problème est la maîtrise de l'alimentation azotée de la culture suivante ; des problèmes de reconstitution de la réserve en eau du sol et de calendrier de travail peuvent également se poser. Restent à connaître précisément les effets à long terme de l'introduction systématique d'engrais verts dans les systèmes de culture actuels (minéralisation et gestion de l'azote, parasitisme...).

La pratique de l'engrais vert, déjà promue dans une logique CIPAN (culture intermédiaire piège à nitrates) et de protection des sols durant l'hiver, est déjà assez développée. L'utilisation des modèles de culture pourrait permettre d'optimiser les dates d'installation et de destruction de ces couverts, et de maîtriser leurs effets sur le cycle du carbone ou de l'azote, et sur le bilan hydrique.

Enherbement des cultures pérennes

L'enherbement permanent des inter-rangs dans les vignes et vergers permet un stockage additionnel de C presque équivalent à celui induit par la conversion d'une terre labourée en prairie permanente, soit environ 0,4 tC/ha/an.

Cette pratique, qui présente de plus l'intérêt d'améliorer la portance du sol, ne pose pas de problème particulier tant que l'alimentation hydrique n'est pas trop déficitaire. L'enherbement des vergers (pratique obligatoire en Production Fruitière Intégrée) est d'ailleurs déjà bien développé dans les régions où l'eau n'est pas trop limitante. L'enherbement des vignes implantées en climat plus sec apparaît plus problématique.

L'extension de cette pratique nécessiterait de développer les recherches sur l'effet de compétition pour l'eau et l'azote entre la plante de couverture et la culture, sur ses impacts éventuels sur la qualité du vin, et sur la maîtrise des parasites que le maintien d'un couvert herbacé pourrait favoriser.

Gestion des jachères

La jachère nue, qui induit un déstockage de C important (0,6 ± 0,2 tC/ha/an), est à proscrire ; elle n'a d'ailleurs été autorisée par la PAC que durant deux campagnes (1993 à 95).

Avec le taux de gel actuel, égal à 10% de la SCOP*, les jachères représentent environ 1,4 Mha en France, dont 0,4 Mha en cultures industrielles, les autres jachères portant généralement un couvert herbacé non récolté. Les jachères courtes se prêtent particulièrement aux cultures énergétiques. Les jachères longues (gel fixe) pourraient être gérées en végétation herbacée pérenne (équivalent en stockage à une prairie permanente) avec une localisation guidée par des objectifs environnementaux connexes (bandes enherbées anti-érosion ou en bordures de cours d'eau), ou faire l'objet d'autorisation de boisement.

Les extensions de ces trois types de couverture végétale postérieures à 1990 pourraient être revendiquées au titre de l'article 3.4.

● Suppression du labour

L'abandon du labour induit une augmentation des teneurs en C. Les techniques culturales simplifiées (TCS), définies par le non-labour, recouvrent une large gamme de pratiques, du semis direct à des travaux du sol plus ou moins profonds (sans retournement). Semis direct et travail superficiel du sol auraient des effets comparables : le stockage additionnel est évalué à $0,20 \pm 0,13$ tC/ha/an.

L'abandon du labour est une pratique qui s'étend "spontanément", pour les économies de travail qu'elle permet. Sa généralisation est limitée par le coût des équipements spécifiques (semoir, engins limitant le tassement) et par les problèmes agronomiques qu'elle peut générer ou aggraver (compactage du sol, prolifération d'adventices ou de ravageurs...). Ces difficultés conduisent les agriculteurs à alterner labour et semis direct, et à adopter des modalités de travail simplifié intermédiaires sur les terres qui se prêtent mal à l'abandon de tout travail du sol. Les agriculteurs manquant de références pour opérer ces choix techniques, il faudrait développer les travaux sur les conséquences des différentes options sur les états du milieu.

Le non-labour constitue un moyen de lutte contre l'érosion. Mais il présente aussi des effets négatifs : il induit généralement un recours accru aux pesticides pour détruire les adventices et ravageurs habituellement contrôlés grâce au labour (le non-labour est donc pratiquement inutilisable en agriculture biologique) ; certaines références montrent un accroissement des émissions de N_2O . Il serait donc nécessaire d'évaluer plus précisément l'impact sur le stockage de C et l'émission de N_2O des modalités de travail simplifié intermédiaires entre le labour et le semis direct.

4.3. Les changements de gestion des systèmes fourragers

● Conversion de terres labourées en prairies permanentes

Les flux de C induits par la conversion de terres labourées tous les ans en prairies permanentes sont estimés à $0,50 \pm 0,25$ tC/ha/an pour une durée de 20 ans. La variabilité des résultats est principalement liée à la diversité des conditions climatiques. Le stockage est deux fois plus lent que le déstockage qui suit le retournement d'une prairie (figure 5). La conversion en prairie exploitée (biomasse forte) stocke davantage que le développement spontané d'une végétation herbacée sur un sol cultivé abandonné.

La conversion en prairies permanentes de prairies temporaires ou artificielles pluriannuelles, dont les stocks de C sont déjà intermédiaires entre ceux des terres labourées et des prairies permanentes, induit un stockage additionnel plus limité.

Les bénéfices environnementaux des prairies permanentes sont nombreux : biodiversité accrue, réduction de la migration des nitrates vers les nappes...

Les exploitations d'élevage d'herbivores utilisent les deux tiers de la superficie agricole nationale et 60% des exploitations professionnelles ont une activité d'élevage d'herbivores. Toutefois, les prairies permanentes (surfaces toujours en herbe, STH), qui occupaient en France environ un tiers du territoire métropolitain en 1970, ont fortement régressé depuis, au profit de cultures (y compris des cultures fourragères comme le maïs ensilage) ou de friches et de landes.

Restaurer en 20 ans la moitié de la STH perdue depuis les années 70 conduirait à une augmentation annuelle moyenne de 90 000 ha de la superficie des prairies, qui pourrait s'accompagner d'un stockage important de carbone dans le sol. Toutefois, ceci supposerait des modifications des systèmes d'élevage et des changements des itinéraires techniques de gestion des prairies. De plus, les conséquences pour les émissions d'autres GES (CH_4 et N_2O) sont encore mal connues.

● Itinéraires techniques de gestion des prairies ⁷

Gestion des prairies permanentes

Une **fertilisation** accrue induit d'une part un accroissement de la production, d'autre part une accélération de la minéralisation et une plus grande décomposabilité des MO. Optimiser le stockage de C revient à trouver un compromis entre ces phénomènes ; il semble atteint pour les prairies moyennement riches. Les pratiques favorisant le stockage sont donc une certaine désintensification des prairies très fertilisées et une intensification modérée des prairies pauvres. Sont toutefois à **exclure** de cette dernière pratique, les pelouses de montagne et les prairies humides, qui présentent naturellement des stocks importants que l'intensification peut réduire de 1 tC/ha/an.

Dans les conditions européennes, le passage de la fauche au pâturage accroît souvent le stockage de C. Généralement, la conversion en prairie temporaire d'une prairie permanente se traduit par un déstockage de C.

7. Les effets en termes de stockage de C de la gestion des prairies font rarement l'objet de quantification ; ils ne sont, par exemple, pas chiffrés dans l'expertise européenne parue en mars 2002.

Gestion des prairies temporaires

Les prairies temporaires pluriannuelles ont un potentiel de stockage intermédiaire entre ceux des prairies permanentes et des cultures. Il s'accroît avec l'allongement de la durée de vie des couverts, c'est-à-dire des retournements moins fréquents.

L'introduction de légumineuses améliore la production annuelle tout en réduisant les apports d'engrais azotés ; il semble que les stocks les plus forts s'obtiennent avec des mélanges graminées-légumineuses.

La gestion des prairies et des stocks fourragers est toujours conçue en fonction des besoins alimentaires du troupeau et donc du système d'élevage. C'est pourquoi l'expertise propose une classification des systèmes fourragers et de leurs évolutions possibles.

● Modification des systèmes fourragers

Les exploitations d'élevage d'herbivores sont encore largement basées sur l'herbe puisque les prairies occupent plus de 80% des surfaces fourragères (contre 15% pour le maïs ensilage). Cette part de l'herbe est toutefois très différente selon les systèmes de production : elle atteint près de 95% dans les exploitations conduisant un troupeau allaitant, mais est beaucoup plus limitée dans, notamment, les 49 000 exploitations laitières qui produisent la moitié du lait français et 20% de la viande avec des systèmes bien plus intensifs (41% de maïs dans la surface fourragère principale, chargement de 1,7 UGB*/ha).

Extensifier les systèmes d'élevage d'herbivores intensifs

L'extensification des exploitations intensives d'élevage d'herbivores constitue une piste intéressante pour stocker du carbone dans le sol en utilisant davantage de prairies (conversion de cultures de fourrages annuels ou de céréales en prairies temporaires, conversions de prairies temporaires en prairies permanentes...). Cette extensification pourrait également s'accompagner d'une réduction des émissions par hectare de CH₄ (du fait d'un plus faible chargement animal) et de N₂O (apports d'azote limités). Pour N₂O cependant, il conviendra de tenir compte du coefficient d'émission associé à la fixation symbiotique par les légumineuses, que les évaluations actuelles situent au même niveau que celui des engrais azotés.

Une telle évolution est envisageable, comme l'atteste l'exemple d'éleveurs de l'Ouest qui ont radicalement modifié leur système d'alimentation du troupeau (abandon de l'ensilage de maïs, limitation du concentré et utilisation maximale du pâturage) et simplifié leur système de production. Cette extensification se traduit par une réduction importante des charges et une baisse modérée du produit (moins 1000 à 1500 l de lait par vache) pouvant déboucher sur une amélioration du revenu et une diminution du temps de travail.

Accroître l'utilisation de l'herbe dans les systèmes d'élevage

La "prime à l'herbe", associée à une politique de qualité (productions fromagères AOC, viande sous label...), a ralenti l'intensification des systèmes fourragers et favorisé le maintien des prairies permanentes dans les élevages extensifs des régions herbagères de moyenne montagne. Pour favoriser le développement des prairies, il convient d'optimiser l'utilisation de l'herbe dans les exploitations d'élevage. Plusieurs pistes peuvent être proposées : augmenter la durée de la saison de pâturage, utiliser les reports sur pied grâce à un pâturage différé, produire de l'herbe à moindre coût avec des légumineuses ou avec la prairie permanente, et mieux valoriser les engrais organiques.

→ Pour quantifier le potentiel de stockage au niveau national, un bilan global du secteur "prairies-élevages", s'avère nécessaire. Ce bilan devra notamment inclure les émissions de CH₄ par les ruminants, poste important d'émission agricole de GES, et les émissions de N₂O associées au pâturage et à la fixation symbiotique. Sa réalisation nécessitera une action de recherche spécifique.

4.4. Ordre de grandeur des stockages potentiels de carbone dans le sol et incertitudes

Les conversions de terres labourées en forêt et prairies permanentes présentent un potentiel très important, de l'ordre de 0,5 tC/ha/an sur 20 ans. Les changements de pratiques retenus (suppression du labour, implantation d'engrais verts ou de cultures intercalaires) permettent des stockages additionnels plus faibles, de l'ordre de 0,15 à 0,3 tC/ha/an. Le potentiel de stockage de C par les herbages apparaît également important : diverses modifications des systèmes de cultures fourragères pourraient permettre un flux de 0,3 à 0,5 tC/ha/an.

Ces valeurs ont été obtenues en sélectionnant les références qui correspondent aux conditions pédoclimatiques proches de celles de la France et présentant les garanties expérimentales les plus sérieuses. Elles doivent cependant être considérées avec précaution, étant données les limites suivantes.

TABLEAU 1. EVALUATION DES CHANGEMENTS D'USAGE DU SOL OU DE PRATIQUE DE GESTION SUSCEPTIBLES D'ACCROÎTRE LE STOCKAGE DE C

effets escomptés et réels** Usages/pratiques	Effet sur les entrées de MO (modification de la production primaire et/ou du % restitué au sol)	Effet sur les sorties de MO (vitesse de minéralisation)	Autres effets environnementaux positifs	Effets secondaires environnementaux négatifs	Bilan (retenu ou non comme activité "stockante")	Flux de stockage additionnel (scénario à 20 ans)
En terres labourées						
Non-labour	peut \rightarrow un peu la production \rightarrow in peu le taux de conversion de MO en humus	\rightarrow la vitesse (protection accrue de la MO)	\rightarrow l'érosion	\rightarrow l'utilisation de pesticides \rightarrow émission de N ₂ O à confirmer	retenu	0,2 \pm 0,13 tC/ha/an
Restitution des résidus de culture	\rightarrow le % restitué au sol	-		-	se fait déjà ; moins intéressant que la valorisation énergétique	0
Restitution des effluents d'élevage	apport de MO exogène \rightarrow la production par effet fertilisant	peut \rightarrow la vitesse par apport de N		si apports excessifs	se fait déjà bilan nul	0
Culture intermédiaire (engrais vert)	\rightarrow la production annuelle et le % restitué (culture non récoltée)	-	\rightarrow les fuites de nitrates \rightarrow l'érosion		retenu	0,16 \pm 0,08 tC/ha/an
Fertilisation accrue	\rightarrow la production	\rightarrow		risques de pollution (nitrates, N ₂ O)	non retenu	0
Irrigation	peu à gagner en culture déjà intensive	\rightarrow par allongement de la période de minéralisation		consommation d'eau, risque de "lessivage" des nitrates	non retenu	0
Apports organiques exogènes	apport de MO exogène \rightarrow la production par effet fertilisant	\rightarrow		présence d'éléments traces métalliques (ETM)	peu de "gisements" de MOE ; négligeable	ϵ en moyenne
Enherbement des vignes et vergers	\rightarrow la production annuelle et le % restitué (couvert non récolté)	\rightarrow	\rightarrow l'érosion	-	retenu	0,49 \pm 0,26 tC/ha/an
Conversion en prairie permanente	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow pollution, biodiversité...	-	retenu	0,44 \pm 0,24 tC/ha/an
Afforestation	\rightarrow	\rightarrow	+ stockage dans biomasse ligneuse \rightarrow biodiversité	fermeture du paysage	retenu	0,45 \pm 0,25 tC/ha/an
En prairies						
\rightarrow de la durée des PT* + intensification raisonnée	\rightarrow	\rightarrow		-	retenu	0,1 à 0,5 \pm 0,25 tC/ha/an
Conversion de PT en PP* à intensification \geq	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow biodiversité \rightarrow pollutions	-	retenu	0,3 à 0,4 \pm 0,25 tC/ha/an
Intensification modérée des PP pauvres	\rightarrow la production	-		-	retenu hors montagne et zone humide	0,2 \pm 0,25 tC/ha/an
Afforestation	\rightarrow	\rightarrow	+ stockage dans biomasse ligneuse	fermeture du paysage		Moins de 0,1 tC/ha/an
Implantation de haies	\rightarrow	\rightarrow	\rightarrow biodiversité \rightarrow l'érosion...	-	retenu mais effet très variable	0,1 \pm 0,05 tC/ha/an

** les italiques signalent les effets nuis ou défavorables au stockage

Incertitude et variabilité

Les flux de stockage retenus sont des valeurs modales pour le territoire ; elles sont assorties d'une **incertitude relative de l'ordre de 50%** liée notamment au trop faible nombre d'expérimentations de longue durée en France ou en Europe de l'ouest. La très grande variabilité des accroissements annuels de stocks tend aussi à montrer que les pratiques n'ont pas d'impacts univoques, les effets dépendant de l'interaction de nombreux facteurs.

Emissions d'autres GES

Les résultats atteints seront très sensibles aux effets induits par les changements de pratiques sur les autres flux de GES, notamment lorsque ces changements affectent le cycle de l'azote et potentiellement les émissions de N₂O.

Réversibilité

Le déstockage de carbone du sol étant plus rapide que le stockage, le bénéfice tiré de l'adoption de pratiques "stockantes" sera réduit si ces pratiques ne sont pas durables. Aussi, pour un bilan national, de ne pas comptabiliser les pratiques déstockant du carbone pourrait constituer un biais important. En terme de stratégie, il peut être ainsi plus important de conserver les stocks existants que de chercher à en créer de nouveaux.

Effets du changement climatique

Les effets potentiels du changement climatique et de la composition de l'atmosphère sur le cycle du C, non pris en compte dans ces estimations, représentent une incertitude supplémentaire.

Le réchauffement climatique et l'enrichissement en CO₂ de l'atmosphère sont susceptibles d'accroître la production végétale et, ce faisant, les restitutions au sol de MO ; mais par ailleurs, l'augmentation de température accélère la minéralisation. Le bilan de ces deux effets contraires ne sera probablement pas négligeable ; il pourrait entraîner une variation des stocks de C comprise entre +2 et -2% pour les 20 années à venir, selon que l'un ou l'autre des phénomènes primerait, soit un flux net de carbone compris entre +1,5 et -1,5 MtC/an pour les seules surfaces agricoles nationales.

Par ailleurs, les changements climatiques pourraient dans certains cas remettre en cause des options choisies pour accroître le stockage de C dans les sols : une augmentation de la fréquence des sécheresses pourrait, par exemple, conduire à l'abandon de l'enherbement de cultures pérennes dans le sud de la France ou à une baisse de la productivité des prairies permanentes favorisant le passage à des cultures annuelles récoltées en été.

5. SCÉNARIOS DE STOCKAGE DE CARBONE À L'ÉCHELLE DU TERRITOIRE FRANÇAIS MÉTROPOLITAIN

Il s'agit de tester l'intérêt des changements d'usages/de pratiques agricoles à l'échelle du territoire par simulation des stockages selon différents scénarios d'adoption des pratiques retenues.

5.1. Méthode

Pour chaque changement d'usage/de pratique agricole, un stockage additionnel au niveau national est calculé à partir de la courbe de stockage par hectare (obtenue par l'équation exponentielle, figure 4) et d'hypothèses d'extension spatiale de cette pratique. Ces superficies sont proposées en se référant aux surfaces potentiellement concernées (déterminées sur la base du Recensement général de l'agriculture 2000), puis en formulant des hypothèses d'extension plus limitée de la pratique, intégrant les contraintes de mise en œuvre.

Exemple de l'adoption du semis direct

Sont potentiellement concernés par cette pratique, les 18 millions d'hectares de cultures annuelles. L'extension possible est d'emblée limitée à 70% de cette surface, car environ 30% des sols labourés ne sont pas aptes au semis direct.

L'hypothèse d'un passage instantané de 20% des terres cultivées en semis direct conduirait à un stockage additionnel de 0,55 MtC/an sur 50 ans et de 0,7 MtC/an sur 20 ans. Comme il est peu probable que ce type de conversion puisse se réaliser de façon immédiate, on retient l'hypothèse plus réaliste d'adoption progressive de cette pratique sur 20 ans. L'hypothèse d'un recours périodique au labour, une année sur 4 en moyenne, est également envisagée.

TABLEAU 2. HYPOTHÈSES ET RÉSULTATS DES SIMULATIONS DE STOCKAGE ADDITIONNEL DE CARBONE

Changement d'usage ou de pratique	Rappel du stockage annuel moyen par ha (sur scénario à 20 ans)	Contraintes agronomiques et applicabilité	Potentiel de surface retenu dans l'estimation	Stockage additionnel annuel pour le territoire français (sur un scénario à 20 ans) en millions de tonnes de C / an	Vérifiabilité des surfaces mises en jeu	Vérifiabilité du stockage de carbone
Afforestation de terres agricoles	TL* → forêt : 0,5 tC/ha/an STH* → forêt : 0,1 tC/ha/an	Concernera principalement les terres à faible potentiel (sauf boisement de jachères)	de 30 000 à 80 000 ha par an - à partir de terres labourées..... - sur 80% de friches et prairies et 20% de terres labourées..... (le rythme actuel d'accroissement des surfaces boisées est de 80 000 ha/an)	.....0,15 à 0,40 MtC/an.....0,04 à 0,10 MtC/an	Faisable par télédétection	Nécessité de mettre en place des sites d'observation complémentaires
Conversion de terres labourées en prairies permanentes	0,5 tC/ha/an	Ne peut concerner que des terres rattachées à une exploitation avec élevage	de 10 000 à 80 000 ha par an..... (90 000 ha/an pendant 20 ans = restauration de 1/2 de la STH perdue depuis 1970)	.....0,06 à 0,45 MtC/an		
Enherbement des vignes et vergers	0,4 tC/ha/an	Concurrence pour l'eau	Base : 1 Mha de vignes et vergers adoption sur 20 à 50% des surfaces.....	.....0,08 à 0,20 MtC/an		
Adoption du semis direct	0,2 tC/ha/an	Maîtrise des adventives et ravageurs Contraintes liées au sol, compactage	Base : 18 Mha de terres cultivées adoption progressive, en 20 ans, sur 20 à 50% des cultures + hypothèse d'un labour tous les 4 ans...	.....0,4 à 1 MtC/an.....0,23 à 0,58 MtC/an	Très difficile hors système de déclaration	D'autant + facile que la surface en semis direct est importante Problème de la base line
Implantation de cultures intermédiaires	0,16 tC/ha/an	Interculture assez longue (avant semis de printemps) Concurrence pour l'eau avec la culture suivante Organisation du travail Gestion des effets de long terme	Base : 4 Mha en cultures de printemps adoption sur 0,5 à 2,5 Mha.....	.....0,07 à 0,33 MtC/an	Faisable par télédétection, mais coûteux (contrôles annuels)	Difficile : problème de la base line

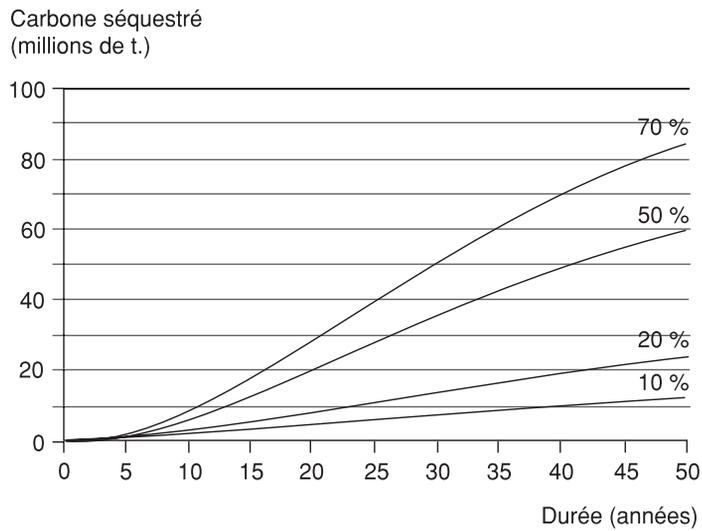


Figure 6. Simulation du stockage additionnel de C dans les terres arables françaises sous hypothèse d'une conversion progressive au semis direct en 20 ans.

Hypothèses de conversion au semis direct de 10, 20, 50 et 70% des terres arables.

La même procédure est appliquée aux autres changements d'usages du sol et de pratiques (voir Tableau 2). L'expertise fournit ainsi des scénarios élémentaires, à combiner pour calculer le stockage total attendu de scénarios d'adoption des différentes pratiques.

5.2. Potentiel de stockage selon différents scénarios

En raison de l'histoire des changements d'occupation des sols, et notamment de l'extension des surfaces boisées, les sols français présenteraient un stockage de carbone toujours positif depuis 1850, à l'exception d'une courte période liée à la mise en place des jachères nues européennes. Pour la période 1980-1990, le flux net de stockage est estimé à $1,5 \pm 0,5$ MtC/an (soit $0,03 \pm 0,01$ tC/ha/an).

Un scénario extrême de changements d'usage des sols, correspondant à la conversion en 10 ans de 3 Mha de terres labourées et de 0,8 Mha de jachères (soit 3,8 Mha) pour moitié en prairies permanentes et pour moitié en forêts, permettrait un stockage additionnel de **2,9 MtC/an** sur 20 ans.

Un scénario plus réaliste, soit :

- 50% de la surface cultivée convertie au semis direct en 20 ans, avec 1 labour tous les 4 ans en moyenne : 0,6 MtC/an
 - l'implantation de cultures intermédiaires sur toutes les surfaces potentielles, soit 4 Mha : 0,6 MtC/an
 - 30 000 ha/an d'afforestation (sur 80% de friches et prairies et 20% de terres labourées) : 0,1 MtC/an
 - 30 000 ha/an de mise en prairie permanente à partir de cultures : 0,1 MtC/an
- aboutirait à un stockage additionnel total de **1,4 MtC/an** sur 20 ans.

Cette estimation n'intègre pas de stockages additionnels par modification de la gestion des systèmes fourragers, plus difficiles à chiffrer.

→ Il convient de retenir un ordre de grandeur vraisemblable de **1 à 3 MtC/an** pour le potentiel de stockage additionnel de C sur les 20 années à venir pour l'ensemble du territoire métropolitain.

Ces scénarios donnent des estimations sensiblement plus faibles que celles établies par d'autres auteurs en Europe. Ces différences tiennent principalement :

- à une évaluation plus faible des flux de stockage de C par unité de surface, à partir de références correspondant aux conditions françaises ;
- à une appréciation plus restrictive des surfaces potentiellement concernées par les changements d'usage ou de pratique, suite à la prise en compte de l'usage actuel des sols au niveau national, des tendances lourdes (baisse des surfaces en prairies...), et des considérations de faisabilité agronomique... ;
- à l'intégration du fait que certaines pratiques peuvent difficilement être appliquées de façon continue (interruption par exemple du semis direct par des labours occasionnels).

Même l'hypothèse modérée d'un stockage de l'ordre de 1 à 3 MtC/an n'est possible qu'au prix de changements affectant plus de la moitié des surfaces cultivées :

- les modifications de pratiques culturales envisagées sont massives ;
- les hypothèses de surfaces affectées par les changements d'usage sont relativement fortes, notamment la conversion de terres labourées en prairies et en forêts, qui n'est possible à cette échelle qu'en mobilisant les terres en jachère fixe.

Il faut également noter que :

- ce stockage potentiel est limité dans le temps et dans l'espace. Il s'agit donc d'une solution finie, qui peut permettre une certaine flexibilité vis-à-vis des engagements de Kyoto, mais ne constitue en aucun cas une solution durable à long terme, en l'état actuel de nos connaissances ;
- les connaissances et les données disponibles sont actuellement insuffisantes pour permettre une estimation spatialisée du potentiel de stockage de carbone dans les sols. Or de fortes disparités régionales sont attendues en fonction des caractéristiques pédoclimatiques (teneur en argile, régime hydrique...) et des stocks et dynamiques actuels ;
- le bilan environnemental complet de certaines pratiques, en particulier le bilan de GES du non-labour, reste à réaliser.

6. COMPTABILISATION ET VÉRIFICATION DU STOCKAGE DE CARBONE

6.1. Les règles d'application des engagements de Kyoto

● Règles de comptabilisation

Rappelons que ne seront comptabilisés que les stockages supplémentaires intentionnels, résultant d'une action volontaire, engagée après 1990. Si le bilan est établi sur une base dite "nette-nette", le stockage sera calculé en soustrayant aux flux des cinq années 2008-2012 la valeur du flux de l'année 1990 multipliée par 5.

L'application de ces règles sera rendue difficile par le fait que l'extension géographique actuelle de nombreuses activités éligibles au titre de l'article 3.4 n'est pas toujours connue avec précision, et qu'il n'existe généralement pas de statistiques à ce sujet pour l'année 1990.

● Règles de vérification

Les procédures proposées par le GIEC prévoient généralement une vérification décomposée en :

- une **vérification du stockage par unité de surface** induit par une pratique, fondée sur la mesure des variations locales de stock de C (réalisée par échantillonnage et/ou modélisation numérique), et sur le suivi périodique de sites de référence comprenant des parcelles témoins et d'autres soumises à un changement d'usage ou de pratique ;
- une **vérification des surfaces** concernées par ces changements d'usage ou de pratique, réalisée, par exemple, grâce à des méthodes de télédétection.

Le niveau d'exigence requis pour ces vérifications n'a pas encore été fixé par les parties à la Convention.

Une vérification stricte supposerait l'échantillonnage en début et fin de période d'engagement de chaque zone soumise à une activité au titre de l'article 3.4, et la comparaison avec un nombre suffisant d'échantillons issus de zones témoins. Les données obtenues seraient agrégées pour obtenir une estimation au plan national. D'autres méthodes seraient par ailleurs nécessaires pour fournir un second jeu indépendant de données de vérification. Une telle procédure serait difficile à mettre en œuvre au plan national et son coût serait vraisemblablement prohibitif.

A l'inverse, si une procédure de vérification peu exigeante était retenue, l'estimation des surfaces concernées ne serait pas géoréférencée, et des valeurs par défaut des variations des stocks de C induites par chaque pratique seraient utilisées pour estimer les effets d'une activité sur les stocks nationaux de carbone. Toutefois, même l'estimation de la surface concernée par une activité donnée peut s'avérer invérifiable en l'absence de référence géographique.

Un niveau intermédiaire d'exigence conduirait à une vérification fondée sur un inventaire géoréférencé des surfaces concernées (par télédétection ou relevés au sol), et une estimation des variations des stocks de C à partir d'expérimentations (dans des régions climatiques et des sols représentatifs), d'observations sur des sites de référence, ou encore de modèles bien évalués, documentés et archivés.

6.2. Les procédures applicables de vérification du stockage de carbone

C'est dans ce cadre d'un niveau intermédiaire d'exigence que la faisabilité de la vérification, et notamment la pertinence d'outils existants, ont été examinées.

● Vérification du stockage de carbone par unité de surface

Les mesures de variations des stocks de carbone

La grande variabilité des accroissements annuels de stocks et des stocks de C eux-mêmes, et les effets prolongés des usages anciens, rendent difficile la mise en évidence de faibles variations relatives des stocks pendant une période courte (5 ans). Ces stockages devront de plus être référés à une "ligne de base" mouvante étant donné l'évolution continue et spontanée des usages du sol et des techniques, et les effets du changement climatique. Du fait de la variabilité spatiale, le nombre d'échantillons et d'analyses nécessaire pour certifier une variation des stocks de C du sol peut être très élevé.

Les essais de longue durée (particulièrement utiles pour l'étude des mécanismes de stockage/déstockage du carbone dans le sol) ne sont pas suffisamment nombreux en France et dans le monde pour rendre compte de la diversité des situations agro-pédo-climatiques. Un suivi de sites de référence devra nécessairement être mis en place, et il exigera un maillage dense du territoire et un géoréférencement très précis des points d'observation.

La capacité d'un réseau de type RMQS* (réseau de 2 100 points d'observation répartis sur le territoire, dédié au suivi de la qualité des sols, en cours d'installation) à fournir des preuves du stockage additionnel durant la période d'engagement a été testée. Connaissant la proportion des différentes occupations du sol en France, la distribution des valeurs des stocks de C par type d'occupation et les cinétiques de stockage, il est en effet possible de simuler les résultats de campagnes successives de mesures, et donc de tester la capacité du réseau à détecter une variation de stock significative. Dans les différents scénarios de changements de pratiques testés, les durées moyennes nécessaires à la détection d'un changement de stock de C du sol varient de 3 à 15 ans ; dans les scénarios les plus défavorables, ces durées atteignent 10 à 25 ans. Pour obtenir l'information recherchée, il faudrait prévoir la densification du réseau et/ou la mise en place de suivis spécifiques dédiés à certains usages, qui posent la question centrale du coût d'installation du réseau puis de réalisation des contrôles. Si les changements de pratiques sont rapides et nombreux, le nombre de sites à suivre pour contrôler la cinétique de stockage deviendra très rapidement prohibitif.

La vérification du stockage induit par les activités nécessiterait de :

- multiplier les essais agronomiques de longue durée afin de calibrer les modèles dans des situations agro-pédo-climatiques variées ;
- développer un réseau de surveillance systématique (ou dédié à certains changements) afin de disposer de bilans statistiques et d'outils de validation des prédictions fournies par les modèles ;
- valoriser les observatoires de parcelles de longue durée qui existent déjà localement, quitte à les enrichir de certaines analyses ;
- prévoir, pour tenter de répondre au problème de la "baseline", la mise en place de sites témoins ;
- développer des techniques de spatialisation et/ou les inventaires donnant accès aux paramètres d'entrée des modèles ;
- développer des méthodes de passage entre les mesures et les modèles aux diverses échelles.

Les méthodes de mesure des flux de CO₂

Ces méthodes, qui consistent à mesurer les échanges de gaz entre le sol et l'atmosphère, présentent l'avantage de fournir des données indépendantes de celles obtenues par mesure des stocks de carbone du sol. Mais elles présentent plusieurs limites : elles nécessitent une infrastructure coûteuse et peu de sites sont actuellement équipés (environ une vingtaine de sites en Europe sur des terres agricoles) ; elles ne donnent pas un stockage dans le sol, puisque le bilan mesuré intègre le CO₂ stocké dans la biomasse, y compris celle exportée lors de la récolte.

Le rapport du GIEC note que la fiabilité actuelle de ces méthodes n'est pas suffisante pour constituer la base des estimations des stockages, mais qu'elles peuvent en revanche servir à la vérification en tant que méthode indépendante.

TABLEAU 3. DONNÉES D'INVENTAIRES ET D'ENQUÊTES POTENTIELLEMENT UTILISABLES POUR LE SUIVI DE L'OCCUPATION DES SOLS ET DES PRATIQUES

Opération	Recensement	Télé-détection	Photographies aériennes	Inventaires sur le terrain		Enquête chez agriculteurs	Déclarations des agriculteurs et contrôles	
				enquête TERUTI*	enquête européenne LUCAS*		Pour primes PAC	Dossier CTE et suivi
Type de données	RGA	CORINE Land Cover	Inventaire Forestier National (IFN)	occupation du sol	Occupation du sol (extension de TERUTI à l'UE)	enquête SCEES	Pour primes PAC	Dossier CTE et suivi
Nombre/nature des classes	Utilisation du territoire agricole des exploitations	Occupation du territoire	Occupation du sol, pratiques sylvicoles	Occupation du sol	Occupation du sol (extension de TERUTI à l'UE)	Pratiques culturales pour 10 productions (dont prairie temporaire) et jachère	Utilisation des terres SCOP et/ ou surfaces fourragères uniquement	Cultures et pratiques sur 5 ans pour les parcelles sous contrat
Fréquence Dates	Par culture	44 postes, dont 12 agricoles	Peu de postes pour le hors forêts	Par culture	Par culture	Pour 10 cultures + jachère	Par culture	Par culture
Echelle d'acquisition Résolution	Tous les 10 ans Le dernier en 2000	10 ans Fait en 1992	Tous les 10 ans environ	Annuelle	Annuelle	Tous les 4/5 ans Le premier en 2001 Grandes cultures en 1994	Annuelle	En fonction des mesures choisies
Agrégation Information disponible	A l'exploitation	30x30 m	Photographies aériennes + placettes échantillons	1 point/100 ha (= 550 000 points) échantillon constant (sur un pas de temps de 10 ans)	Points d'observation (100 000 pour toute l'UE) + transects	Sous-échantillon des points de sondage de TERUTI*	A la parcelle, à l'exploitation	Parcelles déclarées d'une exploitation
Géo-référencement	A la commune (biais : localisation au siège de l'exploitation)	250x250 m nombreux pixels mixtes	A la petite région forestière Localisation des données possible	A la petite région agricole Localisation des données possible	Au niveau départemental ou régional	Non connu actuellement (dépeuplement en cours)	A la commune (biais : uniquement les "déclarants")	Enregistrements stockés chez les agriculteurs → accès délicat
Matrice de transition	Exhaustif	Exhaustif	Exhaustif	Uniquement sur échantillon	Uniquement sur échantillon	Non	Non	Uniquement sur déclarations CTE
	Non	Oui pour les grands types d'usages	Oui pour les grands types d'usages	Oui pour tous usages	Oui	Oui	Reconstitution des successions éventuellement possible	Oui pour tous usages et pratiques

● Vérification des surfaces

Cette vérification n'est guère possible en l'absence de géoréférencement des données. Plusieurs méthodes sont envisageables pour comptabiliser et géoréférencer des surfaces soumises à un changement d'occupation ou de pratique (voir Tableau 3. l'évaluation des dispositifs existants) :

- les **inventaires**, exhaustifs ou sur un échantillon représentatif du territoire

Les inventaires présentent l'avantage de fournir des données systématiques (y compris sur les évolutions induisant des déstockages). Ils sont réalisables par télédétection pour les changements d'usage et quelques pratiques ; les informations sont alors exhaustives ; une fréquence infra-annuelle est possible, mais coûteuse. L'identification des autres pratiques (non-labour...) exige des observations sur le terrain ; ce type d'identification à la parcelle n'est évidemment envisageable que sur un échantillon.

→ Il n'existe pas en France de programme d'inventaire permettant un géoréférencement précis de l'ensemble des changements d'occupation du sol avec une résolution compatible avec les recommandations du rapport LULUCF, et un pas de temps permettant un suivi durant la période d'engagement.

- les **déclarations par les exploitants agricoles**

C'est la méthode utilisée pour les primes PAC* ou pour les CTE* ; elle s'accompagne d'une procédure de contrôle au sol de l'effectivité des activités déclarées, sur un échantillon réduit.

→ Les déclarations PAC et les contrats CTE ne concernent pas l'ensemble des agriculteurs, ce qui posera la question de la représentativité de ces données et des conditions de leur extrapolation.

Pour produire une vérification des surfaces soumises à ces activités, il faudrait :

- développer des méthodes permettant de connaître les matrices de changement d'occupation des sols avec précision et sur des pas de temps courts ;

- développer un suivi des pratiques au travers de procédures d'inventaires, d'enquêtes, ou d'engagements contractuels des exploitants.

→ Si l'on prétend établir un bilan fiable et vérifiable du stockage dans les sols durant la période d'engagement, l'investissement à réaliser est très important, et l'on peut craindre que le coût d'une vérification complète ne dépasse les bénéfices escomptés en séquestration de CO₂.

→ Les mesures les plus simples à vérifier et apportant le stockage unitaire le plus important sont celles concernant des changements d'occupation majeurs comme la conversion de terres labourées en forêts ou en prairies.

7. OUTILS DE POLITIQUE ÉCONOMIQUE UTILISABLES POUR PROMOUVOIR LES PRATIQUES FAVORISANT LE STOCKAGE DE CARBONE

Il s'agit de déterminer les modalités de l'action publique qui permettraient d'inciter les agriculteurs à adopter les pratiques assurant un stockage de carbone plus important. L'analyse économique fournit des outils pour évaluer l'adéquation des instruments de régulation existant à cet objectif, et notamment leur efficacité économique, c'est-à-dire leur capacité à induire le stockage le plus élevé au meilleur coût.

7.1. Cadre théorique

La recherche de l'efficacité dans l'établissement d'un choix de politique publique conduit à utiliser la méthode de l'**analyse coûts-bénéfices**. Cette analyse cherche à évaluer en termes monétaires les avantages et inconvénients que chacun peut tirer d'une décision collective en s'assurant de n'oublier aucun des impacts directs et indirects. Elle fournit ainsi une grille d'analyse des différents instruments de régulation possibles, des conditions à remplir pour définir leurs modalités de mise en œuvre et assurer leur efficacité, et des impacts possibles.

Externalités et instruments d'internalisation

Emission de CO₂ et stockage de carbone constituent des externalités*, respectivement négative et positive. Par définition, les externalités ne sont pas prises en compte spontanément par le marché, et leur internalisation peut nécessiter l'intervention de l'Etat. La régulation des externalités repose souvent sur

le principe pollueur-payeur, qui consiste à taxer les agents responsables de la dégradation de la qualité environnementale ; appliqué à une externalité positive, ce principe revient à rémunérer l'agent qui produit les aménités pour le bien de la collectivité.

Les instruments permettant d'inciter les agents à intégrer dans leurs décisions individuelles des effets dont ils ne tiennent pas spontanément compte relèvent de deux logiques : les instruments normatifs (normes diverses, sur les produits, les procédés...) et les instruments économiques (taxes, subventions, marchés de droits). Ces derniers présentent l'avantage de permettre une décentralisation des choix optimaux en matière d'effort de réduction de la pollution. Ces divers instruments présentent des intérêts et limites différents, mais supposent tous, à des degrés divers, une connaissance du coût des dommages potentiels qui peuvent être attribués à la pollution, des bénéfices associés à la diminution de la pression sur l'environnement et des coûts de dépollution et/ou de mise en conformité. Il convient dans cette perspective de disposer d'évaluations chiffrées des différents postes qui composent l'analyse coûts-bénéfices.

7.2. Difficultés d'évaluation des coûts et bénéfices du stockage de carbone

L'évaluation des coûts de stockage additionnel de carbone

Ces coûts comprennent les coûts liés aux changements de pratiques (coûts, directs et indirects, du stockage même ; coûts d'ajustement et d'opportunité pour l'exploitation agricole ; coûts culturels...) et ceux liés à la mise en place des appareils normatifs et des instruments économiques (coûts de transaction liés à la vérification ; impacts sur les marchés et les prix...).

Le manque de références et la diversité des situations pédoclimatiques et agricoles, qui induit une grande variabilité de l'efficacité du stockage de C et de ses coûts, rendent d'autant plus difficile le chiffrage de ces coûts – et des bénéfices liés au stockage dans les sols agricoles. Concernant les coûts directs, une solution pragmatique consiste à fonder les évaluations sur une régionalisation des scénarios de stockage qui rende compte de cette diversité. Une première approximation des coûts est alors obtenue en simulant la perte de revenu associée à l'adoption de différentes pratiques stockantes ; ces coûts sont ensuite à mettre en regard des bilans de carbone atteints dans chaque cas. La difficulté tient au recueil de données économiques cohérentes avec la réalité des processus au niveau pédologique. De plus, du fait de la nature dynamique du stockage, l'évaluation de ces coûts doit intégrer la dimension temporelle et l'historique des pratiques.

Mesure des coûts et des potentiels d'abattement dans le secteur agricole

Peu de travaux économiques se sont attachés à évaluer les coûts spécifiques du stockage additionnel de carbone dans les sols agricoles, la plupart des travaux portant sur les aspects "forêt" du stockage de carbone. Quelques études intègrent néanmoins cet aspect dans des évaluations plus larges incluant les différentes sources et puits de GES d'origine agricole. Elles sont fondées sur une modélisation couplant des modèles de simulations du fonctionnement technico-économique des exploitations et des bilans complets des différentes sources et puits de gaz à effet de serre.

C'est le cas d'une étude portant sur le secteur agricole américain, qui fournit une évaluation des coûts d'abattement et des réductions potentielles d'émission nette de CO₂ pour différentes valeurs de la tonne de carbone. Ce travail montre que l'efficacité des actions envisageables pour réduire ces émissions dépend fortement de la valeur de la tonne de carbone : pour des valeurs inférieures à 50\$, le stockage du carbone dans les sols agricoles est une option économiquement intéressante ; pour des valeurs plus élevées, les stratégies d'afforestation et de production de bio-carburants s'avèrent moins coûteuses.

Une étude du même type a été réalisée au niveau français. Elle confirme les fortes disparités existant dans les coûts individuels d'abattement et montre l'impact important d'une éventuelle autorisation de boisement sur jachère. Cette mesure permettrait de diminuer sensiblement le coût total d'abattement – et donc d'augmenter le potentiel de réduction économiquement efficace –, mais elle n'est pas neutre du point de vue de la répartition du poids de l'effort de réduction (les éleveurs supporteraient la majeure partie des coûts d'abattement). Elle montre également que le stockage de C dans les sols agricoles peut participer sensiblement à l'amélioration du bilan de GES, mais reste néanmoins relativement secondaire par rapport aux potentiels de l'afforestation ou des réductions d'émissions de méthane.

Les recherches portant spécifiquement sur les coûts du stockage de C dans les sols agricoles français restent à mener. Les modélisations à développer devront prendre en compte les interactions avec les autres émissions de GES, les caractéristiques de la dynamique de stockage du C, ainsi que les possibles comportements stratégiques des agriculteurs (nécessité de recourir à des instruments moins efficaces mais qui sont moins coûteux en terme de contrôle public destiné à éviter les comportements de fraude).

Le contrôle de l'effectivité du stockage

La régulation économique – qu'elle implique un système de norme, de taxes/prime ou de quotas transférables – doit pouvoir reposer sur des instruments de contrôle et de vérification des actions individuelles qui permettent de discerner la variabilité naturelle des stocks de C du stockage induit par des actions volontaires.

Du point de vue de l'efficacité, il est important que les instruments incitatifs mis en place agissent "au plus près" de la source de l'aménité. Une prime à la tonne de carbone stockée apparaît donc préférable en théorie. Toutefois, dans le cas du stockage de C, le coût d'un système individualisé et fiable de contrôle et de vérification peut rendre préférables des solutions dites "de second rang", qui font reposer les primes sur des critères moins variables comme les pratiques ou les surfaces. On peut alors envisager d'intégrer ces mesures à moindre coût dans des dispositifs de type PAC.

Le bénéfice lié au stockage

L'évaluation directe de ces bénéfices est très difficile du fait de la grande incertitude qui pèse sur l'ampleur du changement climatique, sur le chiffrage des dommages potentiels qui pourraient en résulter, et sur la part qui doit être attribuée à la modification anthropique de la composition de l'atmosphère. Le principe d'un marché international de permis négociables d'émissions étant accepté, cette approche peut fournir une appréciation quantifiée de la valeur d'une tonne de carbone à retenir pour l'analyse. Les fourchettes d'estimations découlant de simulations du fonctionnement d'un tel marché sont encore très larges (de moins de 10 à 150 \$ la tonne). Supposons un prix de 80 €. Sachant que les changements de pratiques les plus efficaces permettent un stockage additionnel de 0,3 tC/ha/an, une prime au stockage ne pourrait excéder au mieux 24 €/ha/an (coûts de vérification non retranchés). Un tel montant apparaît faible comparé aux 400 €/ha des aides européennes directes proposées pour les principales productions.

→ En l'état actuel des méthodes de contrôle, il est techniquement et économiquement impossible d'asseoir un système de taxation ou d'incitation sur les émissions de CO₂ ou le stockage de C dans les sols. On est contraint de fonder tout dispositif sur les pratiques agricoles et usages du sol et sur les surfaces concernées. (La situation est différente de celle des émissions de N₂O, que l'on peut associer à l'utilisation d'un produit, ce qui légitime – si l'on accepte l'hypothèse de faible variabilité des facteurs d'émissions – la taxation des engrais).

→ Fonder la rémunération du stockage de carbone additionnel sur des coefficients de stockage moyens obtenus par des pratiques pré-déterminées et la valeur de la tonne de carbone pose deux problèmes :

- un tel système implique de négliger, au moins en partie, la variabilité spatio-temporelle des coefficients de stockage ;
- la variation temporelle de la valeur de la tonne de carbone – fixée au niveau de l'ensemble de l'économie – est peu compatible avec les actions à long terme et peu réversibles que doivent engager les exploitants pour augmenter significativement le stockage de C.

7.3. Les mesures incitatives envisageables

La norme

Recourir à la norme consisterait à fixer un niveau plancher, c'est-à-dire une quantité minimale de C à stocker obligatoirement dans le sol, par exploitation ou unité de surface. La mauvaise appréciation des coûts et des bénéfices étant source d'inefficacité, le principal problème se situe alors dans la fixation du niveau optimal de stockage de C exigé.

De plus, le recours à une norme n'incite pas les agents à essayer d'obtenir un niveau d'externalité positive supérieur au niveau plancher. Au contraire même, l'incitation à tricher est importante et le système requiert donc un dispositif de contrôles rigoureux et fréquents, associé à un système de pénalité dissuasif.

La prime/subvention

Les systèmes de primes/subventions ont l'avantage d'inciter les agents à réaliser l'objectif de stockage au meilleur coût, et donc de constituer une incitation dynamique à l'innovation.

La difficulté est de trouver une assiette pour la prime qui soit suffisamment corrélée avec les résultats attendus sans toutefois impliquer des coûts de contrôle prohibitifs. Une subvention à l'hectare attribuée dès lors qu'une pratique réputée stockante est adoptée peut être efficace à condition que soit dépassée la difficulté de la variabilité géographique des capacités de stockage de C associées aux différentes pratiques.

Tout système de prime, dans la mesure où il est financé par l'impôt, peut aussi poser un problème d'acceptabilité sociale s'il n'est pas complété par une taxe sur les activités génératrices d'émissions de GES. Dans la mesure où c'est le stockage additionnel qui doit être pris en compte, les primes à l'adoption excluront nécessairement les agriculteurs qui auraient adopté ces pratiques antérieurement. Si cet élément n'est pas problématique du point de vue de l'efficacité, il peut être source de difficultés d'acceptation sociale des mesures et engendrer des comportements d'attente.

Le marché de droits

On peut imaginer que le principe d'un marché de permis/crédits d'émissions négociables*, retenu au niveau international, soit étendu au niveau des agents individuels. Ce système a l'avantage de permettre d'atteindre l'objectif fixé (qui définit le montant global des permis accordés) au moindre coût si les permis sont négociables sur un marché parfaitement concurrentiel. Il permet aussi de s'affranchir de la connaissance a priori des coûts d'abattement, puisque les interactions entre vendeurs et acheteurs permettent d'atteindre en théorie un prix de la tonne de carbone qui assure la minimisation du coût total. Une première difficulté tient à la distribution initiale des permis accordés. Si l'efficacité n'est pas en cause ici, l'attribution de permis initiaux peut poser des problèmes d'acceptabilité sociale : s'ils sont accordés en fonction des pratiques individuelles du moment, les agents déjà "vertueux" se voient pénalisés. Une deuxième difficulté réside dans l'établissement d'un marché qui puisse fonctionner de manière fluide et concurrentielle. Enfin, les problèmes de contrôle subsistent, puisque le stockage additionnel dans les sols "échangé" au moyen des permis doit être effectif, contrôlable et connu de manière fiable.

Spécificités liées au stockage du carbone dans les sols agricoles

- Les dynamiques d'accumulation du C dans les sols et de déstockage imposent que les pratiques favorisant le stockage soient appliquées en continu et sur une longue période pour être efficaces. Les mesures incitatives doivent alors s'inscrire dans le cadre de contrats de longue durée passés avec les agriculteurs. La réduction des choix futurs de production résultant d'un tel engagement accroît le coût d'opportunité du stockage.
- Pour limiter le "leakage" ("fuites", par émission de CO₂ ou déstockage de C sur une parcelle induits par l'adoption d'une pratique stockant du C sur une autre parcelle), l'éligibilité à la subvention doit être intégrée dans un bilan complet des émissions de GES au niveau de l'exploitation.
- Les systèmes d'incitations mis en place doivent être cohérents avec les dispositifs institutionnels en place. En particulier, les conflits entre mesures relevant de la PAC et incitations au stockage de C doivent être limités.
- L'adoption de mesures d'incitation au stockage du carbone dans les sols agricoles peut renforcer les disparités existantes entre exploitations, notamment entre éleveurs et producteurs de grandes cultures (les primes carbone allant aux agriculteurs disposant de ressources importantes en termes de surfaces, les taxes sur les émissions de méthane pesant sur les éleveurs). Là encore, il ne s'agit pas d'une considération sur l'efficacité économique des mesures à mettre en place, mais sur leur acceptabilité sociale.

→ La voie la plus appropriée paraît être le contrat individuel global sur l'exploitation. Ce type de contrat pourrait être inséré dans les contrats de type CTE. S'il n'est pas démontré qu'il soit plus efficace économiquement qu'une mesure uniforme, un tel dispositif présente plusieurs avantages : reposer sur un diagnostic et un projet individualisés, impliquer le producteur, prendre en compte l'ensemble du système d'exploitation, assurer une coordination entre les volets "purement" agricoles, les autres préoccupations environnementales (pollutions des eaux, gestion des effluents d'élevage...) et les incitations au stockage de carbone. Afin d'éviter le phénomène de leakage, un tel contrat doit intégrer des dispositions incitant à réduire dans le même temps les autres sources d'émissions de GES. Cette option du contrat suppose évidemment que soit impliquée une part importante des exploitations et du territoire et que la pérennité du contrat soit crédible. Des contrats-types régionalisés permettraient d'atteindre un compromis entre la prise en compte suffisante de la variabilité pédo-climatique et le coût des contrôles. Enfin, une telle option va dans le sens d'une politique agricole européenne dont la justification devra de plus en plus reposer sur sa composante environnementale.

8. BILAN ET CONCLUSIONS

Un potentiel de stockage de carbone non négligeable mais difficile à valoriser

L'expertise montre qu'en modifiant les usages des sols et/ou certaines pratiques agricoles, il est effectivement possible d'accroître significativement le stockage de carbone organique dans les sols agricoles métropolitains. Des divers scénarios testés, il ressort que le potentiel maximal de ce stockage additionnel est de l'ordre de 3 à 5 millions de tonnes de C par an pour une durée de 20 ans. Une combinaison d'hypothèses plus réalistes concernant l'adoption des pratiques favorisant le stockage de C aboutit à un stockage de l'ordre de 1 à 3 millions de tonnes par an.

Ce sont certains changements d'usage des terres qui permettent les flux de stockage les plus élevés par unité de surface : afforestation, accroissement de la surface toujours en herbe. L'afforestation induit de plus une augmentation du stockage dans la biomasse ligneuse et une diminution des intrants et des consommations énergétiques. Certaines pratiques culturales, compte tenu des surfaces en jeu, présentent également une efficacité potentielle significative : la suppression du labour, l'implantation d'engrais verts en interculture, l'enherbement permanent des vignobles et vergers. L'implantation de haies ou une modification des modes de gestion des prairies permanentes et temporaires, dont les effets sont plus difficiles à quantifier, sont également susceptibles de contribuer au stockage de C. En revanche, les possibilités offertes par la gestion des résidus et effluents agricoles ou urbains sont apparues faibles, et l'intensification de productions déjà à hauts rendements n'apporte aucun bénéfice.

Ce potentiel global, estimé pour les conditions françaises, est plus faible que celui avancé par d'autres experts. Bien que n'étant équivalent qu'à 1 à 2% des émissions de GES françaises, il n'est pas négligeable, puisqu'il pourrait représenter une proportion importante de l'effort à consentir pour respecter les engagements pris dans le cadre de Kyoto.

Toutefois, la réalisation de ce potentiel de stockage de C se heurte à de nombreuses incertitudes et difficultés.

Les incertitudes et la variabilité des stockages

- Les potentiels de stockage retenus sont assortis d'une forte incertitude relative, de l'ordre de 50% au niveau des flux unitaires, de l'ordre de 100% au niveau de l'estimation globale.
- Les résultats sont très sensibles aux conditions pédoclimatiques et agricoles locales, et donc très contrastés selon les régions.
- Les estimations réalisées ne tiennent pas compte des émissions d'autres GES (N₂O notamment) induites par l'adoption des pratiques favorisant le stockage de C, qui seraient à déduire de la séquestration de CO₂.
- Les stockages pourraient être plus faibles, si le changement climatique devait avoir un effet sur la minéralisation plus fort que prévu actuellement, ou s'il interdisait certaines options consommatrices d'eau.

Les conditions de réalisation

- Les stockages de C envisagés impliquent des changements massifs de pratiques et d'usage des terres, dont certains sont contraires aux évolutions actuelles (tendance à la diminution des prairies permanentes...) ou nécessitent des choix de politique agricole forts (afforestation des jachères fixes...).
- Ils supposent des engagements de très longue durée des agriculteurs (pour la constitution de stocks additionnels puis leur maintien), d'autant plus difficiles à consentir que le contexte politico-économique agricole est susceptible d'évoluer rapidement.
- Ils exigeront, pour être pris en compte dans le bilan national, un dispositif de vérification lourd et donc coûteux à mettre en œuvre.
- Ils nécessiteront des mesures incitatives, dont la nature, le critère d'attribution et le financement ne sont pas faciles à définir.

Les conditions techniques de vérification

- La mise en évidence de stockages additionnels annuels très variables, et faibles par rapport aux stocks, eux-mêmes très variables, sera délicate ; elle exigera la mise en place de dispositifs d'observation lourds et coûteux.
- La détermination, obligatoire, de la "ligne de base" (baseline) sera particulièrement difficile.
- Les changements de pratiques et leurs effets seront intrinsèquement plus difficiles à observer et à quantifier que les changements d'usages.

- Les procédures les plus strictes seront techniquement impossibles à mettre en œuvre pour la première période d'engagement, et avec un niveau de vérification trop exigeant, le coût de cette vérification deviendrait prohibitif par rapport au prix de la tonne de carbone.

Enfin, contrairement à la réduction des émissions, le stockage de carbone dans les sols ne constitue pas une solution durable de réduction du CO₂ atmosphérique, puisque les stocks cessent de croître après quelques dizaines d'années, et que les terres agricoles mobilisables sont en quantité finie.

En revanche, ce stockage pourrait permettre une certaine flexibilité vis-à-vis des engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto, et s'accompagne le plus souvent de bénéfices agronomiques et environnementaux connexes.

La nécessité d'envisager une politique globale vis-à-vis de l'effet de serre, à intégrer dans une politique agri-environnementale plus large

Compte tenu des incertitudes sur les résultats, des contraintes de mises en œuvre et du prix vraisemblablement modeste de la tonne de C par rapport aux aides agricoles existantes, **une politique spécifique, limitée au stockage du C dans les sols, apparaît peu réalisable et peu efficace**. Les mesures visant ce stockage de C devront être intégrées dans une politique plus large.

Une politique globale de lutte contre l'effet de serre devrait permettre de :

- prendre en compte l'ensemble des gaz à effet de serre d'origine agricole, et notamment les émissions de N₂O. Ce dernier point devrait conduire à considérer la gestion des intrants azotés comme prioritaire au même titre que la gestion du C. En effet, une réduction de 10% des engrais azotés correspondrait déjà à un gain de l'ordre de 0,6 MtC/an (émission de N₂O et énergie de synthèse) ;
- s'assurer que l'adoption d'une pratique à un endroit n'induit pas ailleurs une émission ou un déstockage (*leakage*) ;
- comparer le stockage de C dans les sols à l'alternative énergétique (cultures pour la production de biocarburants et valorisation énergétique des résidus agricoles et urbains) ;
- et le comparer aux réductions d'émission possibles dans les autres secteurs économiques.

Les pratiques tendant à stocker du carbone dans le sol présentent quasi-systématiquement **d'autres bénéfices environnementaux** : limitation de l'érosion, amélioration de la qualité des sols et des eaux, économie d'énergie fossile, biodiversité plus élevée... Cette compatibilité avec d'autres objectifs environnementaux permet d'intégrer les mesures incitatives carbone dans des mesures agri-environnementales plus larges, dans le cadre de la PAC. L'existence de certains effets négatifs (emploi accru de pesticides en non-labour, fermeture des paysages...) nécessitera toutefois quelques arbitrages entre objectifs environnementaux.

Réciproquement, des actions de politique agri-environnementale (agriculture intégrée, protection des sols, biocarburants...) peuvent s'accompagner de bénéfices en terme de stockage de carbone. Ces gains, à condition de pouvoir montrer leur caractère intentionnel, pourraient être revendiqués au titre de l'application du Protocole de Kyoto ; cette reconnaissance de politiques agri-environnementales globales incluant un volet "carbone" est nécessaire à la mise en œuvre de telles actions.

Toute politique de ce type aura nécessairement une dimension territoriale forte. Elle devra se raisonner selon les enjeux environnementaux et territoriaux locaux, en prenant en compte des unités de fonctionnement dépassant la parcelle agricole (exploitations, bassins versants, zones d'alimentation des nappes souterraines...).

La nécessité de développer les recherches et l'acquisition de références

L'examen critique de la bibliographie française et internationale réalisé pour cette expertise souligne les lacunes dans les connaissances et/ou l'impossibilité de quantifier précisément la plupart des phénomènes. Cette situation se traduit par des estimations accompagnées de marges d'incertitude fortes, et l'impossibilité de spécifier avec la précision nécessaire les conditions pédoclimatiques et agricoles assurant l'efficacité des mesures visant le stockage de C. Un potentiel, important par rapport aux abattements qui devront être réalisés, pourra à terme être valorisé efficacement si les situations offrant les meilleures conditions peuvent être identifiées systématiquement, et si des méthodes économiques et fiables de quantification des gains obtenus sont développées. La poursuite des recherches

et l'acquisition de références supplémentaires s'avèrent donc nécessaires dans plusieurs domaines. Leur enjeu dépasse largement la question immédiate de la mise en œuvre nationale du Protocole de Kyoto. Il se situe évidemment dans le cadre de la gestion planétaire et à long terme du problème de l'effet de serre et d'une description plus exacte des fonctions puits et source du sol. L'importance des flux en cause, par rapport au bilan atmosphérique du CO₂, justifie l'intérêt que la recherche doit porter à leur devenir.

Connaissance des mécanismes de biotransformation du carbone dans les sols

Certains processus sont encore mal connus ou étudiés dans une gamme de situations trop restreinte pour permettre une généralisation des résultats. C'est le cas notamment de la rhizodéposition, des effets des facteurs physico-chimiques et de la protection physique sur les matières organiques, des temps de résidence très longs du carbone, de la fonction puits de méthane des sols...

Une connaissance plus complète des processus en jeu pourrait d'ailleurs fournir des pistes pour concevoir des pratiques originales visant à augmenter le C du sol.

Modélisation globale du comportement du carbone dans les sols et projection sur le territoire

La complexité des mécanismes et la multiplicité des facteurs et des interactions imposent l'utilisation de modèles de dynamique du carbone, pour prévoir son évolution.

Le calibrage des modèles exigera le développement de dispositifs d'observation de longue durée, en conditions contrôlées d'expérimentation de terrain, et en situations naturelles pour l'acquisition de références dans des conditions pédoclimatiques et agricoles variées. L'utilisation des modèles pour l'estimation spatialisée dépendra ensuite de la disponibilité des variables explicatives, concernant le sol, le climat et l'usage des terres. Pour le sol, les programmes de création de bases de données en cours (inventaire cartographique et suivi de la qualité) permettront au prix de compléments spécialisés de répondre dans l'avenir au besoin. En revanche, les informations disponibles sur les usages, leurs changements et les pratiques sont insuffisantes et des actions nouvelles sont à concevoir et à mettre en œuvre. L'utilisation des techniques de télédétection spatiales ne peut, à elle seule, produire l'ensemble des informations nécessaires mais devra néanmoins être privilégiée comme source la plus économique d'accès aux données.

Etablissement du bilan d'émission/séquestration de GES et du bilan environnemental global des activités agricoles

Ces bilans sont à établir pour les différentes pratiques de culture (travail du sol réduit, engrais verts et cultures intercalaires, production intégrée), et changements d'usage des terres (passage culture-prairie). La modélisation de leur variation est une question de recherche. Les progrès dépendent d'une meilleure connaissance des mécanismes, mais aussi de l'acquisition de références expérimentales encore beaucoup trop rares.

La connaissance des différentes composantes des bilans doit ensuite être intégrée au niveau des systèmes de culture et de production, le cas des systèmes fourragers justifiant un investissement particulier du fait des fortes interactions entre production végétale et animale dans le bilan de GES.

Suivi des évolutions de l'utilisation des terres et des systèmes de production agricoles

La connaissance de ces évolutions, et de leurs logiques technico-économiques, est nécessaire pour la vérification des pratiques revendiquées, mais aussi pour la conception et l'adaptation des politiques incitatives. Au niveau des systèmes de production, l'enjeu est de développer et entretenir des bases de données, géoréférencées et reliées à des types d'exploitation sur ces systèmes. Performances économiques des systèmes de production et comportements des acteurs devront également être suivis.

Enfin, la **modélisation intégrée**, articulant les impacts des modifications de l'utilisation des terres, du changement climatique et des politiques agri-environnementales, devra être développée pour éclairer le décideur public et informer les agents économiques.

POUR EN SAVOIR PLUS

Rapport de l'expertise

Arrouays, D., J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana et P. Stengel (eds) (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Rapport. INRA. 332 pp.

Autres références

Académie d'Agriculture de France (1999). Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France 85 (6) n° sp. 392 pp.

Freibauer, A., M.D.A. Rounsewell et al. (2002). Background paper on carbon sequestration in agricultural soils under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. Contract Report N° 2001.40.CO001 within the framework of the Communication on "EU policies and measures to reduce greenhouse gas emission: Towards a European Climate Change Programme (ECCP)", COM (2000) 88, Working Group Sinks, Subgroup Soils. 50 pp.

IPCC (2000). Land use, land-use change and forestry (LULUCF). Watson, R.T. et al. (eds). Cambridge University Press. 375 pp.

Lal, R., J.M. Kimble et al. (eds) (1997). Management of carbon sequestration in soil. Advances in Soil Science. CRC Press. Boca Raton, USA. 457 pp.

Le Treut, H. (2001). L'effet de serre ; allons-nous changer le climat ? Flammarion Coll. Dominos. 128 pp.

Robert, M. (2001). Soil carbon sequestration for improved land management. World Soil Resources Report 96. FAO Rome. 57 pp. (traduction sous presse)

Wigley, T.M.L. et D.S. Schimel (eds) (2000). The carbon cycle. Cambridge University Press. 279 pp.

GLOSSAIRE

Annexe I : Annexe à la CCNUCC qui liste les pays ou groupes de pays ("Parties") ayant souscrit des engagements quantitatifs d'encadrement de leurs émissions de GES. Il s'agit des pays qui étaient membres de l'OCDE en 1992, des pays de la Communauté Européenne, et de 11 pays en transition vers une économie de marché.

CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (en anglais : UNFCCC).

Conférence des Parties (CoP) : organe suprême de la CCNUCC, qui réunit les pays signataires habituellement une fois par an pour évaluer les progrès de la Convention et développer des amendements : c'est à la fois un organe institutionnel et un forum de discussion et de négociation. La 1re CoP s'est tenue en 1995.

Contrat Territorial d'Exploitation (CTE) : Dispositif français d'aide aux exploitations agricoles, à objectifs environnementaux et socio-économiques (dispositif français du 2^e pilier de la PAC).

Corine Land Cover : Base de données d'occupation du sol couvrant la totalité de l'Europe, obtenue par exploitation de données de télédétection (résolution de 250x250 m).

Culture intercalaire : Culture établie entre les rangs d'une culture d'une espèce différente.

Culture intermédiaire : Couvert végétal installé entre deux cultures successives afin d'éviter de laisser le sol nu durant la période d'interculture.

Effet de serre : Réchauffement de l'atmosphère et de la surface de la Terre dû au fait que certains gaz (GES*) absorbent le rayonnement infra-rouge thermique émis par la Terre et le renvoient en partie vers le sol. Cet effet est un phénomène naturel, mais il est renforcé par les émissions anthropiques de GES.

Engrais vert : Culture généralement semée entre deux cultures principales et qui est ensuite enfouie dans le sol.

Equivalent CO₂ : Unité commune dans laquelle peuvent être exprimées les quantités de GES ; l'équivalence est définie à partir du Pouvoir de réchauffement global* des différents gaz.

Externalités (ou effets externes) : Influences positives ou négatives, intentionnelles ou non, qu'un agent exerce à l'égard d'autres agents, sans que ces avantages ou ces dommages fassent l'objet d'une évaluation par le marché, ni par conséquent, d'une compensation monétaire spontanée.

Gaz à effet de serre (GES) : Gaz qui absorbent en partie le rayonnement de grande longueur d'onde (infra-rouge) émis par la surface de la Terre et par les nuages, et qui échauffent les basses couches de l'atmosphère. Les principaux GES sont : la vapeur d'eau (H₂O), le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄), les chlorofluorocarbonés (CFC), les hydrofluorocarbonés (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF₆) et l'ozone (O₃).

Géoréférencement d'une donnée : Enregistrement de ses coordonnées géographiques permettant de la localiser spatialement. Permet une identification des surfaces concernées par un usage particulier, et le suivi de leurs évolutions.

Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) : groupe constitué en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, pour évaluer les informations disponibles sur l'évolution du climat et l'effet de serre, et fournir des avis à la CoP. Il fait appel à environ 2 500 experts. (en anglais : IPCC).

IFN : Inventaire Forestier National.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique.

IPCC : Intergovernmental Panel of Climate Change (en français : GIEC).

Ligne de base (baseline) : Situation de référence à partir de laquelle on mesure les changements d'émissions de GES résultant d'un projet ou d'un scénario réduisant ces émissions.

LUCAS : Outil de simulation et de modélisation ("Land Use Change and Analysis System") multidisciplinaire pour l'évaluation des décisions en matière d'utilisation des terres.

LULUCF : Land Use, Land Use Change and Forestry (en français : UTCF).

Matière organique (MO) du sol : Ensemble des êtres vivants et des résidus végétaux, animaux ou microbiens en cours de décomposition dans les sols.

Matière organique exogène (MOE) : Matière organique apportée aux sols ne provenant pas de la végétation en place. Comprend des déchets de l'élevage et d'origines urbaine et industrielle.

MEDD : Ministère de l'Écologie et du Développement Durable.

MIES : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre.

PAC : Politique Agricole Commune.

Permis d'émissions négociables (PEN) : Quotas d'émission de GES échangeables entre pays, permettant aux pays soumis à des quotas d'émissions de les respecter en achetant des permis additionnels à d'autres pays.

Pouvoir (ou potentiel) de réchauffement global (PRG) : Paramètre permettant d'évaluer l'importance relative des différents GES : c'est le rapport de l'effet de réchauffement d'un gaz à celui du CO₂, tenant compte du temps durant lequel ce gaz reste actif dans l'atmosphère.

PP : Prairie permanente.

Pratique culturale : Interventions techniques ou opérations culturales mises en œuvre sur une parcelle.

Protocole de Kyoto : Protocole à la CCNUCC* adopté à Kyoto en 1997 : accord international sur la réduction des émissions de GES qui fixe des engagements chiffrés (en équivalents CO₂) pour lutter contre le réchauffement de la planète. Il n'entrera en vigueur que lorsqu'il aura été signé par 55% des Pays de l'Annexe I, représentant au moins 55% des émissions totales de ces pays.

PT : Prairie temporaire.

Puits de carbone : Ecosystème qui séquestre davantage de CO₂ qu'il n'en émet.

RGA : Recensement Général de l'Agriculture.

RMQS : Réseau de Mesures de la Qualité des Sols : Réseau de mesure et d'observation d'environ 2 100 points répartis sur le territoire français, fournissant un suivi (tous les 5 ans) de données quantitatives sur l'état des sols en France.

Rhizodéposition : Relargage de matière organique par les racines : exsudation de composés organiques, exfoliation de cellules mortes.

SAU : Surface Agricole Utile.

SCOP : Surface en céréales, oléagineux et protéagineux.

Semis direct : Semis sans aucun travail préalable du sol.

Séquestration de GES : Appliqué aux GES, s'oppose à émission. On parlera de séquestration de CO₂, mais de stockage de C (sous forme de matière organique) dans les sols.

Source de carbone : Ecosystème qui émet davantage de CO₂ qu'il n'en séquestre, ou activité humaine émettrice de CO₂.

STH : Surface Toujours en Herbe.

Stockage de carbone : Piégeage (temporaire et réversible) de carbone sous forme organique.

TEC : Tonne Equivalent Carbone.

TERUTI : Enquête statistique annuelle, réalisée par le Ministère de l'Agriculture, sur l'utilisation et l'occupation des terres (550 000 points d'observation répartis sur le territoire français selon un maillage régulier).

TL : Terres labourées.

UGB : Unité Gros Bétail.

UTCFC : Utilisation des Terres, Changements d'affectation des terres et Foresterie (en anglais : LULUCF).

Win-win : Hypothèse selon laquelle les stratégies d'accroissement de stockage de carbone seraient aussi toujours "gagnantes" sur d'autres objectifs environnementaux.

Directeur de la publication : Claire Sabbagh
Conception et rédaction de la synthèse : Isabelle Savini
Conseil rédactionnel : Françoise Juille

Couverture : dessin de Daoud Abnane
Maquette/PAO/Impression : ROYER communication graphique

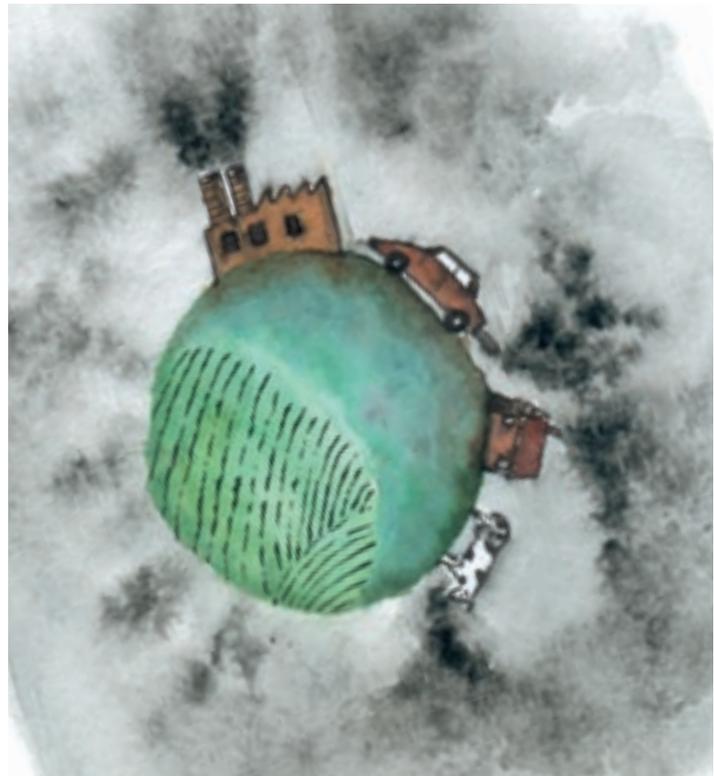
Octobre 2002

Unité Expertise Scientifique Collective



147, rue de l'Université – 75338 Paris cedex 07 – France
Tél.: 01 42 75 90 00 – Fax : 01 47 05 99 66
www.inra.fr

ISBN 2-7380-1054-7



Mitigation of the greenhouse effect

Increasing carbon stocks in French agricultural soils?

*D. Arrouays, J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana, P. Stengel
(eds)*

Scientific Assessment Unit for Expertise

Synthesis of an Assessment Report by the French
Institute for Agricultural Research (INRA)
on request of the French Ministry for Ecology and
Sustainable Development

October 2002

TABLE OF CONTENTS

FOREWARD

1. CONTEXT AND OBJECTIVES OF THE ASSESSMENT REPORT	3
1.1. Current state of negotiations concerning the implementation of the Kyoto Protocol	
1.2. Challenges for France and current commitments	
1.3. The Assessment Report	
2. CARBON SEQUESTRATION IN THE SOIL AND CARBON STOCKS: MECHANISMS AND VERIFICATION METHODS	5
2.1. Sources of soil carbon and means to increase its accumulation	
2.2. Changes in soil carbon levels and problems in verifying carbon stocks	
2.3. Kinetics of soil carbon accumulation and release	
3. CRITERIA FOR THE ASSESSMENT OF AGRICULTURAL ACTIVITIES AND OF THEIR EFFECTS ON SOIL CARBON STOCKS	9
3.1. Assessment of the carbon accumulation potential and its kinetics	
3.2. Accounting for non CO ₂ greenhouse gas emissions and for radiative forcing	
3.3. Agronomic and environmental impacts of agricultural activities accumulating carbon	
3.4. Technical and economic constraints on adopting soil uses and practices which accumulate carbon	
4. MAIN LAND USE AND AGRICULTURAL PRACTICES LIKELY TO INCREASE SOIL CARBON STOCKS	11
4.1. Afforestation of agricultural land	
4.2. Changes in agricultural practices	
4.3. Changes to fodder and livestock management systems	
4.4. Order of magnitude of potential soil carbon stocks and uncertainties	
5. CARBON ACCUMULATION SCENARIOS AT THE SCALE OF MAINLAND FRANCE	17
5.1. Method	
5.2. Accumulation potential according to different scenarios	
6. INVENTORY AND VERIFICATION OF SOIL CARBON STOCKS	20
6.1. Rules governing the implementation of the Kyoto Protocol	
6.2. Possible procedures for the verification of carbon accumulation	
7. ECONOMIC POLICY TOOLS WHICH COULD BE USED TO ENCOURAGE PRACTICES FAVOURING CARBON ACCUMULATION	23
7.1. Theoretical context	
7.2. Difficulties encountered in evaluating the costs and benefits of carbon accumulation	
7.3. Possible incentive measures	
8. REVIEW - CONCLUSION	27
For further information	30
Glossary	31
Authors and Editors of the Report	33

AUTHORS AND EDITORS OF THE REPORT

■ HEAD OF THE PROJECT

Pierre STENGEL, *Scientific Director for the Environment, Forestry and Agriculture, INRA Paris.*

EXPERTS

■ SCIENTIFIC EDITORS

Editor in chief: Dominique ARROUAYS, *Senior Research Assistant, INRA Orléans; IPCC Expert*

Jérôme BALESSENT, *Research Director, INRA/CEA Cadarache*

Jean-Claude GERMON, *Research Director, INRA Dijon; IPCC Expert*

Pierre-Alain JAYET, *Research Director, INRA Grignon*

Jean-François SOUSSANA, *Research Director, INRA Clermont-Ferrand; IPCC Expert*

■ LEAD AUTHORS AND CONTRIBUTORS

Dominique ARROUAYS, *SRA*, INRA Orleans: Inventory and monitoring of soils, carbon stocks, geographical analyses, modelling*

Jérôme BALESSENT, *RD*, INRA/CEA Cadarache: Dynamics of organic matter, isotopic tracing, modelling, rhizosphere*

Claire CHENU, *RD, INRA Versailles: Dynamics of organic matter and aggregation, effects of organic matter*

Tiphaine CHEVALLIER, *SRA, INRA Orleans, Dynamics of organic matter and aggregation*

Mireille CHIROLEU-ASSOULINE, *Professor Université Paris I: Environmental economics*

Philippe CIAIS, *RD at the CEA, LSCE CEA-CNRS Gif-sur-Yvette: Global carbon cycle, atmospheric transport, modelling*

Etienne DAMBRINE, *RD, INRA Nancy: Pedology, forest soils, biogeochemical cycles*

Stéphane DE CARA, *SR, INRA Grignon: Public economics, agricultural and environmental policies, modelling, agricultural exchanges*

Benoît GABRIELLE, *SR, INRA Grignon: Environmental accounting, arable crops*

Jean-Claude GERMON, *RD, INRA Dijon: Greenhouse gas emissions by soils, microbial ecology*

Laurence GUICHARD, *SRA, INRA Grignon: Agronomy, cropping systems, agricultural and environmental policies, evaluation*

Sabine HOUOT, *RD, INRA Grignon: Soil sciences, recycling of wastes*

Pierre-Alain JAYET, *RD, INRA Grignon: Public economics, agricultural and environmental regulation, modelling*

Claudy JOLIVET, *SRA, INRA Orleans: Soil monitoring, dynamics of organic matter*

Pierre LOISEAU, *RD, INRA Clermont-Ferrand: Carbon and nitrogen cycles in grassland ecosystems*

Bruno MARY, *RD, INRA Laon: Agronomy, carbon and nitrogen cycles*

Philippe MEROT, *RD, INRA Rennes: Hydrology, soil water behaviour*

Guy RICHARD, *SR, INRA Laon: Agronomy, soil structure and tillage*

Jean ROGER-ESTRADE, *Senior Lecturer, INA P-G: Agronomy, cropping systems, soil structure and tillage*

Nicolas SABY, *RA, INRA Orleans: Geographical information systems, spatial analysis*

Uwe A. SCHNEIDER, *Researcher, Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University: Agricultural economics, modelling applied to the environment*

Katheline SCHUBERT, *Economics Professor, Université Paris I: Economics of the environment, macroeconomic modelling*

Bernard SEGUIN, *RD, INRA Avignon: Climatology, radiation budget and energy budget of continental surfaces*

Marie-Françoise SLAK, *Senior Lecturer, ENITA Bordeaux: Ecology, agronomy, land use*

Jean-François SOUSSANA, *RD, INRA Clermont-Ferrand: Grassland ecosystems and global change*

Pierre STENGEL, *Scientific Director for the Environment, Forestry and Agriculture, INRA Paris: Soil sciences*

Christian WALTER, *Senior Lecturer, ENSA Rennes: Soil sciences, spatial analysis, modelling*

*RD: Research Director; SR: Senior Researcher; SRA: Senior Research Assistant; RA: Research Assistant

■ INRA SCIENTIFIC ASSESSMENT UNIT FOR EXPERTISE

Annie CHARTIER, *SRA, INRA Versailles: Documentation and information systems*

Claire SABBAGH, *SRA, INRA Paris: Head of the Scientific Assessment Unit*

Isabelle SAVINI, *SRA, INRA Paris: Editorial coordination*

This synthesis refers to an assessment report elaborated by scientific experts without any previous approval from orderers nor INRA. This synthesis has been approved by the authors of this report.

Please refer as shown:

Arrouays, D., Balesdent, J., Germon, J.C., Jayet, P.A., Soussana, J.F. and Stengel, P. (eds). (2002). Mitigation of the greenhouse effect.

Increasing carbon stocks in French agricultural soils? An assessment report compiled by the French Institute for Agricultural Research (INRA) on the request of the French Ministry for Ecology and Sustainable Development, 32 pp.

Contacts : arrouays@orleans.inra.fr, BALESSENT@dsvsud.cea.fr, germon@dijon.inra.fr, jayet@grignon.inra.fr, soussana@clermont.inra.fr, stengel@paris.inra.fr

FOREWORD

At the Earth Summit in Johannesburg, declarations by some States raised hopes that the Kyoto Protocol could be implemented in 2003. A reduction in the human induced greenhouse gas emissions is clearly the most sustainable policy to slow down the accumulation of these gases in the atmosphere, which is causing, according to a large scientific consensus, climate change. However, in the case of CO₂ emissions, possible alternatives consist in stocking for some time some additional organic carbon in the biomass and in the soil organic matter. Carbon stocks in the forest biomass (Article 3.3. of the Protocol) have already been the subject of international agreements, with strict quotas being imposed on different countries. Favouring a more or less long-term accumulation of organic matter in soils, through changes in land use and agricultural or forestry practices, is another alternative (Article 3.4.) which was accepted as a mode of application of the Kyoto Protocol. With respect to this alternative, there are no limitations as to the amounts accumulated or the land surface concerned, but no methods for verification have yet been defined.

Worldwide, soils contain about 1500 gigatons of organic carbon. A relatively small increase in these stocks could therefore play a significant role in limiting the net flux of greenhouse gases towards the atmosphere. Changes in land use and agricultural production practices could contribute to this, notably by increasing the magnitude and the duration of organic carbon storage in soils. The residence time of carbon in the soil organic matter is highly variable, as it varies with the rate of carbon mineralisation, through which organic carbon is finally returned to the atmosphere in the form of . It is therefore important to determine the potential offered by this pool, as a function of soils, their uses and associated practices. In order to apply the Kyoto Protocol, it is also necessary to know how and with what precision this pool could be measured, and which incentive policies could induce additional accumulations in soils.

The approach adopted by the French Ministry for Ecology and Sustainable Development (MEDD)

These challenges are not negligible for France in a European context, because of its large agricultural land and surface area. For this reason, the Ministry for Ecology and Sustainable Development requested an Assessment Report from INRA, which concerns the capacity for organic carbon accumulation in agricultural soils and its time-related dynamics.

This Expert Report should be read in the context of a strategy for soil management on a national basis, bringing together the principal actors in a Scientific Interest Group (Ministry for Ecology and Sustainable Development, Ministry for Agriculture, French Institute for the Environment, Agency for the Environment and energy resources, INRA) and the implementation of a soil quality monitoring network. At the European level, this report is in line with the recommendations of the recent Communication of the European Commission on soil protection.

The main questions for this assessment have been formulated by a Steering Committee, consisting of representatives from the main public bodies concerned and from INRA, and chaired by the Director for Economic Studies and Environmental Evaluation at the MEDD. These questions are as follows:

- *Can we, in France, through actions specifically targeting an increase in organic carbon accumulations in soils, contribute to reduce the greenhouse effect? The answer to this question is of direct interest to the French Interministerial Mission on the Greenhouse Effect, and France in general, so that agriculture can be taken into account in the national plan to combat the greenhouse effect.*
- *How could such actions meet the conditions of compliance with the Kyoto Protocol? It is necessary to propose solutions which will be technically feasible and economically viable.*
- *Which economic policy tools would be effective to promote the changes required? In this respect, it must be possible to integrate the tools in the Common Agricultural Policy.*

- *What are the needs in terms of research and references? What is required to further develop the research results and recommendations arising from MEDD pilot programmes concerning the sustainable management of soils and the impacts of climate change?*

Implementation of the project by INRA

This Assessment Report was drafted by an Expert Group consisting of researchers specialised in soil sciences, agronomy, bioclimatology and public economics applied to agriculture, from INRA and from other French and foreign organisations. INRA was designated for organising the project, which was entrusted to the Scientific Assessment Unit at the Environment and to the Forestry and Agriculture Scientific Directorate. They ensured compliance of the study with the methodologies of Assessment Reports, and with the requirements from the Steering Committee. Indeed, an Assessment Report, bringing together researchers from different areas, was necessary to consider a series of complex, scientific questions which are controversial. This report, through the assessment it has enabled and without omitting any debates and uncertainties, will provide an unquestionable aid for decision-makers.

This "Synthesis", more particularly drafted for Decision-Makers, was compiled by the Scientific Assessment Unit of INRA and was validated by the scientific experts. It forms a detailed summary of the report, with cross references to the chapters of the expertise which will provide readers with a more comprehensive information. As such, we hope it will provide all those interested in this important debate for the future of the planet with the ideas necessary for their thinking on national and European initiatives.

Dominique BUREAU

*Director
Economic Studies and Environmental
Evaluation Directorate
Ministry for Ecology and Sustainable
Development*

Marion GUILLOU

*Director
National Institute for Agricultural
Research (INRA)*

INCREASING CARBON STOCKS IN FRENCH AGRICULTURAL SOILS?

The hypothesis of climate changes due to anthropogenic activities, induced by an increase in atmospheric greenhouse gas levels* ¹, is the subject of almost unanimous consensus in the international scientific community. This increase in greenhouse gas levels is due principally to CO₂ arising from the use of fossil fuels.

The actual increase in atmospheric CO₂ levels has proved to be less marked than was previously anticipated from CO₂ emission records and oceanic uptake, which has led to postulate the existence of a carbon "sink"^{**} in continental ecosystems. Demonstration of this sink has made it possible to envisage its use and development to sequester carbon and thus slow down the current rise in the greenhouse effect.

1.* denotes terms defined in the glossary to be found at the end of this document

1. CONTEXT AND OBJECTIVES OF THE ASSESSMENT REPORT

The Kyoto Protocol allows signatory countries listed in Annex I to subtract from their national greenhouse gas emissions any sequestration of greenhouse gases induced by "additional human activities". These activities principally target the uptake of carbon in biomass and the soil. They concern firstly forestry activities (Article 3.3. of the Protocol), and secondly agriculture and forestry management ("Land Use, Land Use Change and Forestry"², the subject of Article 3.4.). The amounts deductible under the terms of the "agriculture" section of Article 3.4. are not, in principle, limited; each country fixes the levels it undertakes to ensure, but their accounting is conditioned by the requirement to verify by an independent method the sequestration it claims.

2. Land Use, Land Use Change and Forestry (LULUCF)

France already emits low levels (per inhabitant) of CO₂, and will encounter problems in further reducing such emissions. Given the amount of land devoted to agriculture in France, the prospects opened by Article 3.4 may be of interest for the national policy of greenhouse gas mitigation.

→ In this context, the Ministry for Ecology and Sustainable Development has asked INRA to carry out a scientific assessment study on the following theme: **Can we, in France, through actions aimed specifically at increasing organic carbon stocks in agricultural soils, contribute to reduce the anthropogenic greenhouse effect?**

It is necessary to examine the changes in the use of agricultural land and in farming practices which are covered in principle by the terms of Articles 3.3. and 3.4., their ability to actually increase carbon stocks under French pedoclimatic conditions, their possible application to the current technical and economic context of French agriculture and the means necessary to verify these stocks.

1.1. Current state of negotiations concerning the implementation of the Kyoto Protocol

Since the Kyoto Protocol (1997), negotiations have been continuing through the annual Conferences of the Parties in the UN Framework Convention on Climate Change. The negotiations are supported by scientific assessments and by special reports produced periodically by an international panel of experts, the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, or GIEC in French). The IPCC has published in 2000 a special report on Land Use Land Use Change and Forestry (LULUCF) and has also provided in 2001 revised guidelines for greenhouse gas inventories.

- **Activities potentially eligible under the terms of Article 3.4.**

In its LULUCF report, the IPCC has proposed a list of "additional anthropogenic activities" liable to increase carbon stocks, and potentially eligible under the conditions of Article 3.4. These include notably the management of cultivated land (organic fertilisation, tillage, incorporation of organic waste, crop rotations, optimisation of fertilisation, irrigation, etc.), the control of erosion, the management of set-aside lands and pastures, the restoration of wetlands or markedly degraded lands, etc.

- **Accounting and verification rules**

Under the terms of Articles 3.3. and 3.4., only "intentional" additional carbon stocks, i.e. resulting from voluntary actions (therefore excluding, for example, carbon accumulation linked to the spontaneous growth of trees on abandoned agricultural land) undertaken since 1990 (the reference year from which all targets concerning the reduction of emissions have been defined). This rule raises the problem of determining the baseline, the reference level under a business as usual scenario. Finally, carbon accounting is based on defined "commitment periods", the first of which is fixed in 2008-2012, with reference to the situation prevailing in 1990.

The accounting of deductible carbon sequestration being limited by the obligation to prove carbon accumulation, the conditions governing this verification are crucial. At present, some principles have been defined. They allow for verification on the one hand of the carbon sink enhancing effect of the activity, and on the other of the surface areas involved in the activity. They require double checks (using two independent methods) of the carbon accumulation claimed. However, the modes of application of these principles are still under debate; depending on the level of requirement retained, the means of implementing them and their cost may prove prohibitive.

1.2. Challenges for France and its current commitments

In the context of the Kyoto Protocol, which was ratified in May 2002 by European Union countries, France has undertaken to maintain its greenhouse gas emissions at their 1990 level. This objective of straightforward stabilisation, fixed because the emissions are already relatively low (due in part to the importance of French nuclear energy generating capacity) will nonetheless require efforts to compensate for increasing emissions from sectors such as transport.

For 2000, gross French emissions³ of greenhouse gases were estimated at 148 million tons of carbon equivalent⁴, and net emissions at 133 MTCE. Carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and fluorinated gases contribute to 69, 13, 16 and 2 % of these net emissions, respectively. In 1990, net emissions reached 137.6 MTCE. The reduction recorded since that time corresponds to a reduction in non CO₂ greenhouse gas emissions, and mostly of N₂O from the industry sector.

● The role of agriculture

Agricultural and forestry activities are responsible for 16% of gross French greenhouse gas emissions, or nearly 24 MTCE. These two sectors also contribute to carbon storage at a rate estimated at 15 MtC per year.

Agricultural activities are the cause of:

- 67% of French emissions of N₂O (emissions from agricultural land and from animal wastes),
- 54% of French emissions of CH₄ (enteric fermentation in ruminants and animal wastes).

In contrast, direct agricultural emissions of CO₂ (fossil fuel consumption by agricultural machinery) only account for a small proportion of total French emissions.

→ Soil carbon stocks in mainland France have been estimated (*cf. infra*) at approximately 3 billion tons.

Therefore, French emissions, which are estimated at 148 million tons equivalent per year, are equivalent to approximately 4.9 % of the soil organic pool. An annual increase in these stocks of 0.2 % (6 Mt) would compensate for 4 % of gross annual greenhouse gas emissions, or about a quarter of the emissions from the agricultural and forestry sectors. These orders of magnitude justify attempts to quantify the effects of land use changes and agricultural practices on soil carbon stocks.

● Challenges and timing

The challenges are numerous:

- should France undertake additional agricultural activities complying with the conditions of Article 3.4. for the period 2008-2012? For the time being, only forestry management activities have been proposed with an emission reduction target of 2.6 MtC;
- the pursuit of the UNFCCC negotiations, in the context of annual CoP, to define in particular the methods required to implement Article 3.4. These questions require the opinions of experts, particularly at a European level⁵; they are also being studied by a new IPCC panel;
- the implementation or reform of national or European policies, not targeting carbon specifically but likely to take it into account (European proposal for a Directive on Biofuels and Soils, etc.), and/or concerning practices favourable to carbon accumulation (CAP and national agricultural policy in France, etc.).

1.3. The Assessment Report

● Scope of the report

The issues to be dealt with :

- are limited to agricultural land: forestry land and canopy biomass are excluded. Concerning forests, the evaluation will only concern the average accumulations in soils which can be expected from the afforestation of agricultural land;
- are limited to land in mainland France⁶;
- need to take account of the other effects of carbon sink-enhancing practices on the greenhouse effect,

3. "Gross" emissions = not accounting for land use changes, sinks and forestry; these items are included in "net" emissions. The difference between these two figures is principally due to subtraction of the carbon sinks.

4. To draw up greenhouse gas accounts, the contributions of each gas are expressed in terms of global warming potential* (GWP), using a common unit, the ton of carbon equivalent (TCE). The global warming potential of each greenhouse gas is calculated from its radiative forcing effect and from its residence time in the atmosphere.

5. Cf. particularly the publication in March 2002 of an Expert Report requested by DG6 at the European Commission (Freibauer et al., 2002).

6. The question of tropical soil will be considered in a special assessment report from the MEDD.

and their related environmental impact, which may reinforce or, on the contrary, reduce or call into question the usefulness of these practices. However, these points will only be approached qualitatively: identification of factors and their positive or negative impact, reference to their order of magnitude when available.

- The knowledge mobilised and its processing

This study includes:

- a critical synthesis of scientific findings published on carbon accumulation, which constitutes the core of this project;
- an examination of the agronomic and economic feasibility of implementing measures to enhance carbon stocks, and a review of the tools which could be used in France to verify these stocks. This analysis makes it possible to go beyond the definition of "potential surface areas" of application of measurements, and to propose more realistic land areas taking account of prevailing constraints;
- an original study which proposes carbon accumulation simulations for the entire country, based on scenarios which adopt practices deemed to increase carbon uptake, and a simulation of the detection of changes in stocks using a land monitoring system.

- The different stages of the diagnosis

The initial question has been broken down into subsidiary questions which correspond to the different stages of the diagnosis:

- an estimate of the additional carbon storage induced by different practices per unit of surface area (which enables an initial screening of the activities envisaged in Article 3.4),
- accounting of the other consequences of these practices on the greenhouse effect (emission of other greenhouse gases, economies in fossil fuels, etc.),
- accounting of other agronomic and environmental consequences which might reinforce or limit the usefulness of carbon sink-enhancing activities,
- an examination of agronomic constraints related to the behaviour of farming systems likely to restrict the extension of these activities, and an analysis of possible conditions for lifting these constraints,
- an evaluation of potential carbon storage in mainland France, according to several scenarios based on different carbon accumulating practices,
- an examination of the rules necessary to verify carbon stocks and an evaluation of existing verification methods,
- a review of economic and political tools which could be used as incentives for additional carbon storage practices,
- an overview.

2. CARBON STOCKS AND CARBON SEQUESTRATION IN THE SOIL: MECHANISMS AND METHODS FOR EVALUATION

2.1. The source of soil carbon and means to increase its accumulation

- The carbon cycle in terrestrial ecosystems

Photosynthesis is almost the sole pathway for the biological uptake of atmospheric CO_2 in these ecosystems. The organic matter (OM) thus synthesised is always ultimately degraded at one level or another of the trophic networks: by respiration (with the release of CO_2) or, under anaerobic conditions, by fermentation (with the release of CH_4). This OM can also be destroyed by combustion, which also gives rise to CO_2 .

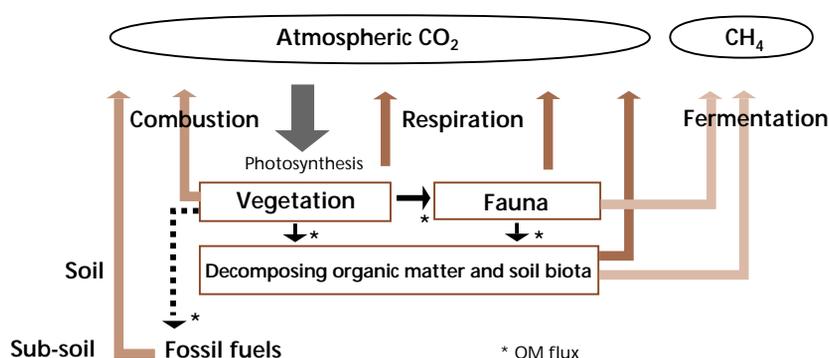


Figure 1. The carbon cycle.

At a planetary level, carbon stocks reach 750 Gt in the atmosphere, 650 Gt in the vegetation and 1500 Gt in the soil. Average gross annual exchanges between the continental biosphere and the atmosphere reach 120 GtC/year.

- **Carbon dynamics in the soil**

Carbon can be accumulated in the soil, mainly in an organic form. This organic matter arises from plant parts (leaves, roots, etc.), dead organisms, animal waste and also rhizodeposition (deposition of organic compounds excreted by roots in the soil), and includes microbial biomass.

"Dead" OM undergoes a series of biotransformations, including decomposition and finally mineralisation by micro-organisms, with the release of CO₂. The rate of these phenomena depends on the composition of the OM and local physicochemical conditions (humidity, temperature, oxygen, etc.); it is slowed when OM is associated with mineral particles (particularly clay) which provide physical "protection" for this OM against the activity of micro-organisms.

→ There is (almost) no definitive storage of carbon in the soil, because in the long term, any OM is mineralised. The residence times for organic carbon in the soil, which average some tens of years, can range from a few hours to several millennia. The evolution of carbon stocks is determined by the balance between the input of organic matter and the output of CO₂.

- **Technical means of increasing the carbon pool in agricultural land**

The agricultural activities likely to accumulate carbon are those which allow:

1/ an increase in the "input" of organic matter:

- by increasing primary production, which generally elevates the OM content in the soil;
- by increasing restitution to the soil of crop residues and animal waste (manure, etc.);
- by importing non-agricultural OM (spreading of organic waste of industrial or urban origin).

2/ a delay in "output" due to mineralisation:

- by slowing decomposition and then mineralisation through changes to the composition of OM, and also through land uses and agricultural practices which can modify physicochemical conditions and improve the physical "protection" of OM;
- by preferring "sustainable" uses for harvested OM (this point mainly concerns wood).

→ Some land uses or agricultural practices affect several of these processes. Thus maximum additional accumulations are achieved by changing from an annual crop to perennial vegetation, which cumulates several effects: carbon inputs which may sometimes be higher (from above-ground and below-ground plant parts); OM is kept physically protected in the absence of tillage and bare soil.

2.2. Variations in soil carbon levels and problems in stock evaluation

- **Problems encountered in estimating carbon stocks**

Stock estimates are always based on point measurements of soil carbon contents, which are then converted into a pool (change from a content with reference to a soil mass to a pool with reference to a volume using bulk density); mean stock values are then extrapolated to surface areas considered as homogeneous. Such estimates come up against two major obstacles.

The broad variability of stocks

There are considerable temporal and geographical variations in soil carbon stocks, as well as a marked but variable vertical gradient (higher carbon levels on the surface, which decline with depth). Factors which may affect carbon stocks are numerous and their interactions complex.

In France, soil type and land use appear to be the principal controlling factors governing stock levels, but the dispersion of these values remains considerable, even within classes defined by crossing these two criteria. This marked residual variability is indicative of the importance of other parameters which are not taken into account, and also of the fact that carbon stocks measured at time t under a given land use does not often correspond to "steady state" stocks and reflects in part the previous uses of the site (cf. § 2.3).

The scarceness of the data available

The data available are too few in number (insufficient sampling in the context of the existing variations), not always reliable and complete (no measurement of bulk density, etc.) and not often comparable between each other (differences in analytical techniques, soil depth taken into account, etc.). The risks of errors and inappropriate extrapolations are therefore high.

→ It is even difficult to obtain accurate estimates on average stocks; indeed, the world-wide estimates published vary by a considerable percentage. However, by taking some methodological precautions, it is nevertheless possible to obtain stock estimates, but only the orders of magnitude should be retained in this respect.

→ In contrast, it is difficult to demonstrate variations in stocks. The relative amplitude of the changes is generally low and the evolution slow, and often masked by spatial and seasonal variations. Best estimates are obtained from long-term experiments.

● Carbon stock estimates in French soil

A review of around 19,000 references available in French databases has made it possible to produce an estimate of stocks by soil type and land-use class, then of national stocks and their regional distribution. All the data refer to the upper 30 cm of soils. This layer is supposed to account for 80 to 90% of the potential stock variations to be observed over decades.

Carbon stocks according to land use and soil type

Average stocks according to land use range from 30 to 90 tC/hectare, and can be broken down into 3 groups:

- land under annual crops and perennial crops with bare soil, where stocks are lower than 45 tC/ha. Vineyards and orchards and crops with a very low organic return have the lowest stocks: approximately 32 tC/ha. Arable land is also characterised by relatively low stocks: 43 tC/ha on average;
- land under permanent grassland and forests (excluding litter) exhibits average stocks of nearly 70 tC/ha;
- land under high-altitude pastures and in wetlands, where stocks are higher than 90 tC/ha (due to low temperatures and the effect of anoxia on carbon mineralisation, respectively).

→ The most marked effect in terms of carbon accumulation is obtained by a change from the first (arable) to the second group. Grasslands and forests exhibit very similar soil carbon stock potentials.

Average carbon stocks by soil type range from 40 tC/ha (sandy or skeletal soils) to 100 tC/ha (clay or hydromorphic soils). A high clay content is the principal factor correlated with high soil carbon levels; however, high contents of calcareous (rendzinas) or aluminium (podzols) also make it possible to attain medium stock levels in low-clay soils.

Carbon stocks in France

Based on these mean carbon stock values by soil type and land use, and overlaying soil and land use maps, it is possible to compile a map of carbon stocks per hectare and then to calculate an estimate of global carbon stocks in French land.

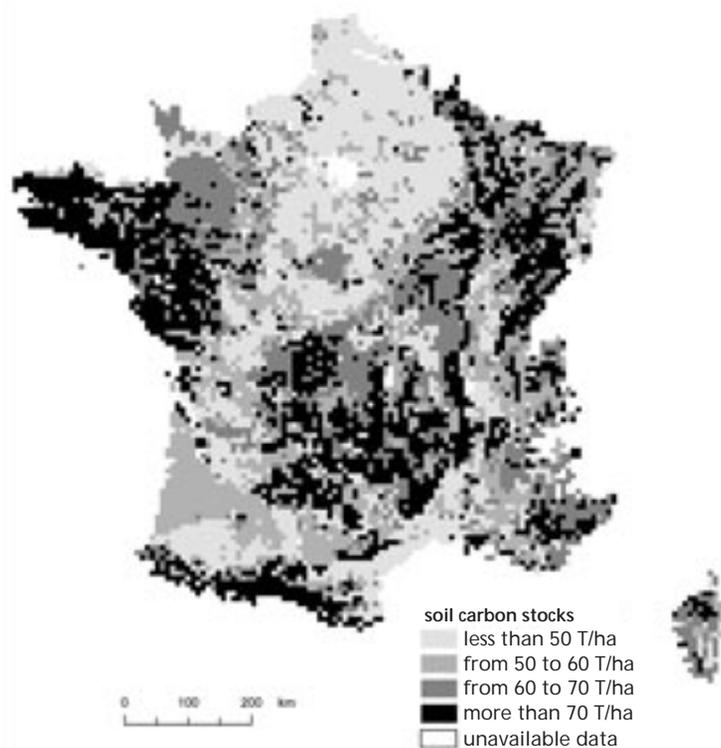


Figure 2. Geographical distribution of soil organic carbon stocks in France (0-30 cm).

We can see: the smallest stocks (<40 tC/ha) in wine-producing regions, with a hot climate and thin soil layer, and also in a few areas of highly intensive cultivation; small stocks (40-50 tC/ha) are found in the major plains of intensive cropping and in more or less degraded silt soils; average stocks (50-70 tC/ha) are found in the major forestry and/or pasture regions, and the highest levels are found where extreme climatic (mountains) and/or pedological (marshes) conditions prevail.

→ These regional disparities indicate differences in both land use and pedo-climatic conditions. Carbon stock potentials vary considerably from region to region.

Estimated global stocks reach 3.1 Billion tons of carbon for the whole of mainland France, excluding overseas territories and dominions, for a soil depth of 0 – 30 cm.

2.3. Kinetics of the accumulation and release of soil carbon

The kinetics of carbon accumulation following change in land use or practices are:

- **non-linear**: they are more rapid during the first years after adopting a practice which enhances accumulation. This phase does not usually exceed a few decades. If practices remain constant, the stocks tend to remain at a level corresponding to the establishment of a new equilibrium (where the input and mineralisation of OM compensate for each other).

- **slower than those of carbon release**. For example, over a period of twenty years, the accumulation arising from a conversion from arable → forestry use is half that of the release induced by conversion from forestry to arable use.

→ These characteristics have several consequences:

- there is a risk of overestimating stocks by extrapolating mean annual fluxes over periods which are too long;

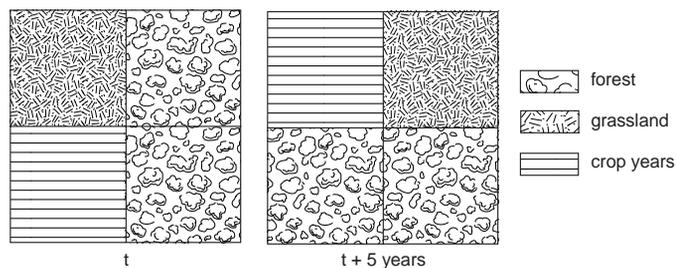
- soil stocks do not represent a sustainable, long-term solution to reducing atmospheric CO₂ levels. After a few decades, accumulation no longer increases, but stock conservation requires maintenance of the practices which enabled its accumulation;

- the abandon or temporary interruption of stock-enhancing practices usually results in rapid release. To be effective, adopting a particular practice must be accompanied by an undertaking concerning its long-term pursuit. If interruptions prove necessary, the stocks claimed must be revised downwards;

- annual pool fluxes are not independent of the history of the plot. It is therefore not possible to evaluate carbon stocks which have accrued between two dates based solely on measuring the surface area concerned by changes in use or activities occurring over that period. It is necessary to know the land use change matrices.

Figure 3.

The proportions of different land uses do not vary between the two dates, but three plots have seen a change to their carbon accumulation/release equilibrium. In view of the asymmetry between accumulation and release, the overall result is a carbon loss.



● Knowledge and modelling of carbon transformation processes in the soil

Organic matter which arrives in the soil undergoes successive biotransformations, so that organic carbon may be found in different forms with different physicochemical properties and residence times.

No single, global model exists today which can integrate all carbon transformation mechanisms and factors, allowing a prediction of the course of carbon stock evolutions. The different models which have been proposed each correspond to specific conditions of application or particular objectives.

→ At present, we have limited ourselves to models which are somewhat rougher but more robust than complex models, and which do not require too many input variables. This is the case of the Hénin-Dupuis model which has a single carbon compartment and two coefficients (one corresponding to the rate of conversion into humus of the OM added to the soil and the other to the rate of mineralisation of this humus). This model also has the advantage of being widely documented in France.

→ The Expert Group has proposed a single, formal framework derived from this model to integrate the references available and describe the accumulation of carbon, while avoiding the biases referred to above.

3. CRITERIA AND EVALUATION METHODS CONCERNING AGRICULTURAL PRACTICES LIKELY TO INCREASE SOIL CARBON STOCKS

The practices eligible under the terms of Articles 3.3. and 3.4. need to be evaluated with respect to their carbon accumulation potential and also their related impact which may reduce or even cancel out their positive effect or, on the contrary, reinforce the usefulness of some activities.

3.1. Evaluation of carbon accumulation potential and its kinetics

The formal framework retained in the Expert Report to assess the carbon accumulation/release occurring after practice B has been adopted in place of the initial practice A (supposed to have attained its stock equilibrium) is an exponential function. Its parameters are: the difference Δ between carbon stocks at the steady state for practices A and B, and a constant rate k of accumulation/release. It is always possible to subtract from the stock values thus calculated a mean annual flux for a given period, for example, the first 20 years during which a new practice is applied. It is these mean flux values which are given in the present document.

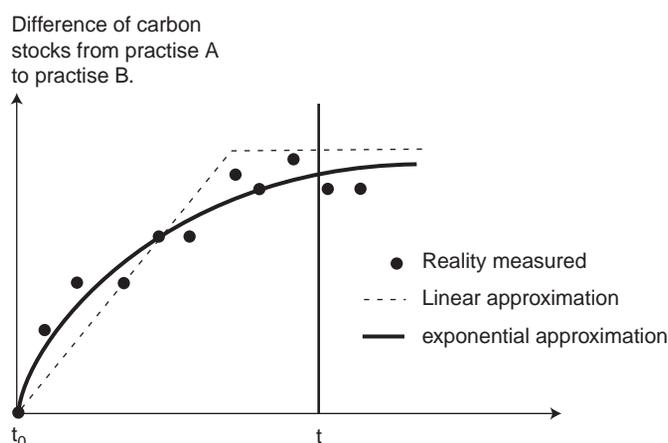


Figure 4. Two modes can be used to approximate carbon stock kinetics in the case of practice B replacing a different practice A.

The IPCC uses the bounded linear approximation.

An exponential approximation defined by the equation $Ct = \Delta (1 - e^{-kt})$, is retained here. The curve obtained, which complies better with the kinetics observed than a line, presents an asymptote which avoids an overestimation of the stocks due to adding mean annual fluxes over a too long period.

For each change in land use or practice, the two parameters have been estimated from the references available, priority being given to data gathered under pedoclimatic and agricultural conditions similar to those prevailing in France, and in the context of long-term agronomic experiments. It should be noted that in other reports the great majority of bibliographical references are American.

3.2. Accounting for other climatic effects of practices enhancing soil carbon stocks

● Emissions of other greenhouse gases

90% of total CH_4 of agricultural origin is produced by ruminants (enteric fermentation in the rumen); these emissions are not covered by this Assessment Report, but need to be included in any reasoning concerning breeding or livestock husbandry systems likely to optimise the greenhouse gas budget.

With the exception of rice paddies (negligible in France) and wetlands, land contributes little to CH_4 emissions, and very likely acts as a sink (due to the presence of CH_4 consuming bacteria).

In contrast, N_2O emissions of agricultural origin are largely attributable to the land. These emissions are not evaluated in terms of surface area but by emission factor (percentage of nitrogen arising from fertilisers). According to the emission standards retained by the IPCC, direct annual emissions of agricultural N_2O may reach 117,000 tonnes for mainland France which, in view of the high global warming potential of this gas, is equivalent to carbon release of 9.4 MtC/year.

→ The greenhouse gas budget is not always known with precision. We expect that some practices favourable to carbon accumulation may in fact exhibit a very weak result in terms of greenhouse effect reduction, because of increased emissions of non CO₂ greenhouse gases.

- **Reductions in fossil fuel CO₂ emissions**

- **By reducing the agricultural consumption of fossil fuels**

If we take the example of non-leguminous annual crops under standard management, fossil energy consumption reaches, for example, 20,000 MJ/ha, which is equivalent to the carbon release of 0.40 tC/ha/year. For such crops, 40 to 60% of fossil fuel consumption corresponds to inorganic nitrogen fertilisers (the synthesis of which requires considerable energy), which can be saved by using N₂-fixing legumes. Furthermore, some practices which accumulate carbon may also save more fossil energy, e.g. by reducing energy use by agricultural machinery.

- **By substituting green fuels for fossil fuels**

The use of carbon from plants to produce energy enables economies in the emission of fossil fuel CO₂. This approach covers both the production of crops for green energy (oil seed rape to produce a methyl ester to be mixed with diesel, wheat or sugar beet to obtain bio-ethanol to be mixed with petrol after refining), and energy valorisation of crop residues (burning of straw). The greenhouse gas budget for these options should be compared with their effects on soil carbon stocks.

- **Modifications to energy exchanges on the land surface**

Land use changes may have effects on the climate system because of changes in surface energy fluxes: the relative proportion of reflected solar energy and that absorbed by the ground, heat emitted by the ground dissipated by evapotranspiration/heating of the air. This question falls outside the application of the Kyoto Protocol, but it must be taken into account if we are seeking to refine the radiative budgets of land areas, and is indeed the subject of scientific debate.

The effect of land use on the climate is well known and quantified at a local level. This impact on local climate (notably temperature) may compensate for climate warming or, on the contrary, enhance it. The consequences on the global climate lead to many difficulties in assessment and comparison with the effects of carbon accumulation. Changes to the use of large areas of land may have effects on the absorption of solar energy by the land and thus may reduce or even cancel out the expected effects of carbon accumulation on the greenhouse effect.

3.3. Agronomic and environmental impact of practices accumulating carbon

From an agronomic point of view, the effects of increasing OM are mainly positive: an improvement in the structural stability of soils, in their levels of nutrients and water reserves. However, these effects are difficult or even impossible to quantify.

A large number of "stock-enhancing" practices are accompanied by related environmental benefits: reduction in erosion and the pollution of underground and surface water, maintenance of biodiversity and/or gains regarding the consumption of fossil energy. However, some negative effects are possible: the cessation of tillage requires an increase in the use of pesticides, and major afforestation can result in the closure of landscapes, etc.

→ The frequently proposed "win-win" hypothesis, according to which strategies aimed at increasing carbon accumulation will always bring other environmental benefits, needs to be verified on a case-by-case basis, and with reference to other environmental objectives which may be assigned to a region.

3.4. Technical and economic constraints on adopting land uses and practices which accumulate carbon

It is necessary to identify the technical and economic constraints which might oppose the adoption of practices which enhance accumulation (agronomic problems, cost of equipment, additional workload, evolution of markets, the ideas governing current agricultural grant schemes, etc.). This phase of the diagnosis provides an opportunity to envisage the technical assistance (consulting, etc.) and/or economic incentives which might facilitate the adoption and maintenance of these practices.

In addition, taking account of these constraints, of "spontaneous" developments in land use and agricultural practices, and of concrete opportunities to verify them serves to define the hypotheses which form the basis of stock simulations at a national level.

→ There remain many gaps in our knowledge, resulting in uncertainties as to any quantifications or even the direction any expected developments will take. It is therefore difficult to draw up these accounts.

4. EVALUATION OF CHANGES TO LAND USE OR AGRICULTURAL PRACTICES LIKELY TO INCREASE SOIL CARBON STOCKS

A preliminary selection has been made amongst activities which might be eligible under the terms of Articles 3.3. and 3.4. regarding the "accumulation potential" criterion, and with respect to other massive effects on greenhouse gas emissions or the environment. The options retained have then been examined more closely with respect to their conditions of implementation. These points are summarised in Table 1.

4.1. Afforestation of agricultural land

Afforestation of arable land

Analysis of the data in the literature has enabled an evaluation of the mean annual soil carbon storage induced by the afforestation of arable land at $0.45+0.25$ tC/ha/year, based on a 20-year scenario. Conversion the other way (cultivation of woodland) generates a considerable release of carbon which is twice as rapid as the accumulation which results from afforestation (Figure 5).

Such afforestation is interesting in terms of accumulation, but since the poorest soils have already become forests, the "reserves" of land are probably limited, unless land currently in permanent set-aside is made available for afforestation.

Afforestation of grassland areas

Supplementary accumulation in soil would be minor due to similar stocks in grassland and woodland; a moderate release may even be observed under certain pedoclimatic conditions.

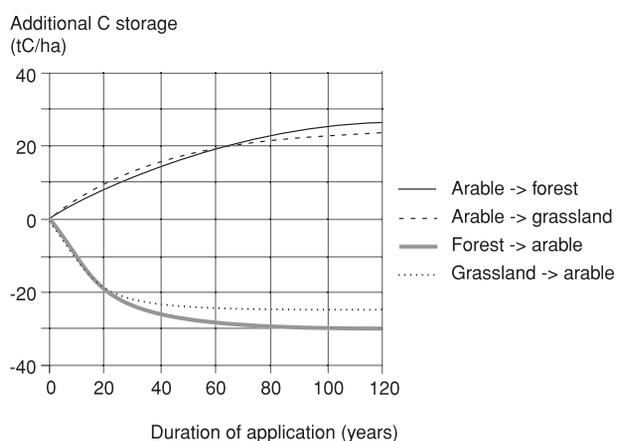


Figure 5. Evolutions in soil carbon stocks associated with practices which enhance extremes of accumulation (0.5 tC/ha/year for the first 20 years) or release (1 tC/ha/year).

These are modal values for mainland France; the 95% confidence interval of these values is about $\pm 40\%$.

The afforestation of agricultural land also enables an accumulation of C in the woody biomass (not included in the context of this report) and has other positive effects on the greenhouse gas budget: saving of inputs (nitrogen fertilisers) and traction energy, etc.

To be included under the Kyoto terms, such changes from arable land to forestry must result from a voluntary human action: the spontaneous afforestation of abandoned land can not therefore be taken into account unless it is accompanied by management of this extension. It should be noted that the restoration of forests damaged in France by the storms in December 1999 has probably reduced the human and material means available at present to implement new afforestation operations.

Planting of hedgerows

The creation of hedgerows, narrow, wooded bands, does induce an increase in carbon stocks, but this varies considerably as a function of the characteristics of the hedgerow (size, height, location in landscape, etc.). The order of magnitude may be 0.1 tC/ha/year for 100 linear metres of hedgerow per hectare. On a slope, when hedgerows run parallel with the contours, they retain eroded soil above them, thus preventing the export of OM from this soil.

Previously removed in mass during land consolidations, hedgerows are now being reconsidered for their environmental value: they control run-off and erosion, have positive effects on the biodiversity and development of wildlife in integrated protection systems, they protect cattle at pasture and are of value to the landscape, etc. However, the costs of planting and maintaining hedgerows have limited their development.

4.2. Changes to land cultivation practices

We only consider here land under annual crops, and we do not include fodder crops nor conversion to grassland (which are the subject of § 4.3). The envisaged changes to practices do not, in principle, call into question these production systems; they may require a more or less extensive review of management sequences and hence adjustments to cropping systems.

- **Level of cropping intensification**

Practices aimed at increasing primary production by intensification (increased fertilisation or irrigation) are **not retained** as enabling an increase in carbon stocks, given the slight gains possible in systems which are already highly intensive, and the negative side effects of such a strategy on the greenhouse gas budget (emission of N₂O, etc.) and on the environment. Nor have genetic improvements, which increase the amounts harvested but not the quantities returned to the soil, been retained.

In contrast, some degree of "de-intensification" in European intensive agricultural systems does not penalise carbon storage and exhibits a more favourable greenhouse gas budget; reductions in nitrogen fertiliser lead to lower emissions of N₂O and energy consumption, and fewer machine runs (fewer plant health procedures) allow further savings in fossil CO₂.

- **Choice of crops**

Crops ensuring a higher organic return

The carbon accumulation induced by crop residues returned to the soil differ as a function of crop production type: for example, cereal straws provide more carbon (0.15 tC/ha/year for 7 tons of straw) than the residues of potatoes or sugar beet (crops inducing a release of carbon). But a further increase in the share of cereal crops in a rotation plan is contrary to developments towards more diversified cropping plans aimed at limiting pest risks (and which are indeed encouraged by "rotation premiums").

Energy crops

These enable savings in fossil carbon emissions which exceed sequestration through an accumulation of carbon in the soil. Furthermore, they may constitute a sustainable solution, the efficacy of which is not limited over time, unlike soil carbon stocks.

Low-fertiliser crop management (moderate fertilisation, reduced tillage) should make it possible to optimise the greenhouse gas and environmental budgets of these energy crops. However, it is not sure that this option ensures the best economic profitability under current conditions.

At present, the most advanced production of biofuels in France is that of diester using high levels of inputs; however, it represents only 300,000 hectares of oil seed rape. The European Biofuels Development Project should nevertheless ensure further development of this activity.

- **Management of crop residues and exogenous inputs**

Management of crop residues

Most crop residues are already returned to the soil – the burning of straw in fields is now quite uncommon. The possibilities of enhancing carbon stocks in this respect are therefore almost nonexistent.

The **energy valorisation** of these residues may be of more interest in terms of the CO₂ budget than the accumulations induced by their return to the soil. For 7 tons of straw, the soil carbon accumulation is estimated at 0.15 tC/ha/year, while combustion would allow economies of 2.4 tC, or a gain of 2.25 tC/ha/year. However, development of this energy use raises problems of collection and equipment, and would cause a reduction in OM which could be harmful to soils receiving no other organic input.

Management of farm animal wastes

Farm animal wastes represent a major carbon pool (approximately 25 MtC/year), but they are already spread on agricultural land. Proposals to "improve" their management, based on spreading them on other soils with low OM levels, have been put forward by some authors. This option would suppose that this OM would be stabilised, and could result in additional costs in terms of energy for transportation. According to our present scientific knowledge, management of these wastes therefore represents a **nil potential for supplementary accumulation**.

Import of exogenous, non-agricultural organic matter

The exogenous OM which could be utilised consists of **organic wastes** from the agrofood industry or towns (sludge from waste water treatment plants, household compost and green wastes). The possible gains are in fact limited, because, in France, most of these wastes are presently dumped or incinerated

with production of energy; the incorporation in the soil of the material that is currently incinerated without production of energy represents a potential national accumulation of ca. 0.15 MtC/year. In terms of greenhouse gases, their energy valorisation would be of more value. Nevertheless, spreading on agricultural land constitutes a local recycling pathway for this waste.

Spreading of these products may raise problems (which can be solved) in terms of controlling nitrogen fertilisation (variable N content of inputs, mineralisation difficult to predict, etc.). It also comes up against the reticence of farmers (and landowners) who fear that the health hazards (e.g. heavy metal load) and/or the poor image linked to such spreading would then restrict the crops which could be grown on this land (for example, regulations limiting the spreading of sludge on land used for vegetable crops).

→ With the exception of their use to produce energy, the management of crop residues, farm waste and urban waste offer a low potential for supplementing CO₂ stocks.

● Management of unproductive land

The planting of intermediate crops (as intercrops or on set-aside land) or catch crops is retained, as they increase annual primary production without the use of supplementary inputs, and imply the total restitution of OM because plant products are not exported.

Introduction of green manure into intercropping systems

The use of green manure (non harvested production) during sufficiently long intercrop periods (between a summer harvest and spring sowing) represents an interesting solution in terms of carbon accumulation: 0.15 tC/ha/year. Its introduction in present-day cash crop systems does not involve any insurmountable difficulties. The main problem is control of the nitrogen input for the next crop; reconstituting soil water reserves and the labour calendar must also be considered. We need to have a clearer idea of the long-term effects of systematically introducing green manure into current cropping systems (mineralisation and management of nitrogen, parasitism, etc.).

The use of green manure, already encouraged in the context of intermediate nitrogen fixing crops and protecting soils during the winter, is already quite widely developed. The use of cropping models would enable optimisation of the dates of establishment and destruction of these plant canopies, and control of their effects on the carbon or nitrogen cycle and on the water balance.

Sowing grass under perennial crops

The sowing of permanent grass between rows of vines or fruit trees enables an increase in carbon accumulation nearly equivalent to that induced by converting arable land into permanent grassland, i.e. 0.4 tC/ha/year.

This practice, which is also of value to improving soil bearing capacity, does not raise any particular problems if the water supply is not too deficient. Grass in orchards (which is obligatory in integrated fruit production systems) is indeed quite common in regions where water is not too restricted. Sowing grass between vines in regions with a dryer climate, is more problematical.

An extension to this practice would require the development of research on the effects of competition for water and nitrogen between the cover plants and the crop, on its possible impact on wine quality and on the control of pests that a maintained grass cover would encourage.

Management of set-aside land

Bare set-aside land, which induces a marked release of carbon (0.6 ±0.2 tC/ha/year) must be proscribed; indeed, it was only authorized by the CAP during two years (1993 to 1995).

The current level of bare set-aside in France is 0.4 Mha. Other set-aside land is usually covered by unharvested grassland. Short-term set-aside land is particularly well suited to energy crops. Long-term set-aside land (fixed) could be managed as perennial grass cover (equivalent in terms of carbon accumulation to a permanent grassland), sites being chosen as a function of related environmental objectives (anti-erosion grassy strips or river banks) or be authorised for afforestation.

Extensions of these three types of plant cover realized since 1990 could be claimed under the conditions of Article 3.4.

- **Suppression of tillage**

No till induces an increase in soil carbon levels. Simplified cropping techniques (SCT), defined by no-tillage, cover a broad range of practices, ranging from direct drilling to more or less deep ploughing (but without turning the soil). Direct drilling and minimal soil cultivation would have comparable effects: the increase in carbon accumulation is evaluated at 0.20 ± 0.13 tC/ha/year.

No-tillage is a practice which spreads "spontaneously" because of the economies of labour it produces. Its generalisation may be limited by the cost of special equipment (drills, machines which limit the packing of soil) and by the agronomic problems it may generate or aggravate (compacting of soil, proliferation of weeds or pests, etc.). These difficulties lead farmers to alternate tillage and direct drilling, and to adopt intermediate simplified working practices on land where a lack of any cultivation would be detrimental. Farmers lack references to make such technical choices, and studies should be performed on the consequences of the various options available under different environmental conditions.

No-tillage constitutes a means of combating erosion. It also has certain negative effects: it generally induces an increase in the use of pesticides to destroy the weeds and pests which are usually controlled by tillage (no-tillage is therefore practically impossible for organic farming); some references in the literature have shown an increase in N_2O emissions. It would therefore be necessary to evaluate more precisely the impact on carbon accumulation and N_2O emissions of other conservation practices, halfway between tillage and no till. It should also be noticed that carbon stocks accumulated with no-till will be partly released by a single tillage event.

4.3. Changes to fodder management systems

- **Conversion of arable land into permanent grassland**

The carbon fluxes induced each year by converting arable land into permanent grassland are estimated at 0.50 ± 0.25 tC/ha/year over a 20-year period. The variability in these results is due principally to the diversity of climatic conditions. Carbon accumulation is half as slow as the carbon release which occurs after a grassland is ploughed (Figure 5). Conversion into a managed grassland (high biomass level) accumulates more carbon than the spontaneous development of temporary grass on abandoned arable land.

The conversion into permanent grasslands of temporary or artificial, multiannual pastures, where carbon stocks are already intermediate between that of arable land and permanent grassland, induces a more limited increase in accumulation.

The environmental benefits of permanent grasslands are numerous: increased biodiversity, reduction in nitrate leaching to the water table, etc.

Farms raising domestic herbivores occupy two-thirds of farmland in France, and 60% of all professional farms raise some herbivores. However, grasslands (land under permanent grass), which in mainland France occupy about one third of the land, have markedly declined since 1970, to the benefit of arable land (including fodder crops such as maize silage), fallow land and heathland.

Restoration over 20 years of half the amount of land under permanent grass lost since the 1970s would lead to a mean annual increase of 90,000 hectares in the surface of grasslands, and could be accompanied by a marked increase in soil carbon stocks. However, this would imply major changes to breeding systems and grassland management sequences. In addition, the consequences on the emissions of other greenhouse gases (CH_4 and N_2O) are still unknown.

- **Grassland management sequences ⁷**

Management of permanent grasslands

Increased **fertilisation** induces not only a rise in production but also an acceleration in mineralisation and enhanced decomposition of OM. Optimisation of carbon stocks requires a compromise between these different phenomena; it seems to have been attained for rich grasslands. Carbon stock-enhancing practices are therefore those which involve a certain reduction in the intensification of highly fertilised grasslands and a moderate intensification of poor grasslands. However, mountain pastures and wetlands should be **excluded** from the latter practice, because they are naturally endowed with high carbon levels which intensification could reduce by 1 tC/ha/year.

Under the conditions prevailing in Europe, grazing often increases carbon accumulation when compared with cutting. In general, the conversion of permanent grasslands into temporary grasslands results in carbon release.

7. The effects of grassland management on carbon accumulation are rarely quantified; for example, no figures are given in the European Expert Report published in March, 2002

Management of temporary grasslands

Temporary, multiannual grasslands exhibit an intermediate potential for carbon accumulation, between those of permanent grasslands and arable land. This potential increases in line with **prolonging the lifespan** of covers, i.e. less frequent ploughing.

The **introduction of legumes** improves annual productivity while reducing inputs of nitrogen fertilisers; it appears that the highest carbon levels are obtained with mixtures of grasses and pasture legumes.

The management of grasslands and fodder crops is always designed as a function of herd feed requirements and thus the raising system. For this reason, the Expert Report proposes a classification of fodder systems, and describes the possibilities for their development.

● Changes to fodder systems

Domestic herbivore breeding is still generally based on grassland use, since herbivores occupy more than 80% of all land put down to fodder crops (as opposed to 15% for maize silage). However, the share of grass differs considerably as a function of production system: it reaches nearly 95% in cattle farms which breed for meat production, but is much smaller in, for example, the 49,000 dairy farms which produce half of all French milk and 20% of French meat using much more intensive production systems (with 41% of maize silage and a stocking rate of 1.7 Livestock Unit/ha).

Extensification of intensive herbivore raising systems

The extensification of intensive herbivore raising systems constitutes an interesting option to enhance soil carbon accumulation by using more grasslands (conversion of annual fodder or cereal crops into temporary grasslands, conversion of temporary grasslands into permanent grasslands, etc.). This extensification could also be accompanied by a reduction in CH₄ emissions per hectare (because of a lower stocking rate) and in N₂O emissions (limited nitrogen inputs). In the latter case, however, it is necessary to take account of the emission coefficient associated with symbiotic nitrogen fixation by leguminous crops, which current evaluations place at the same level as nitrogen fertilisers.

Such a development can be envisaged, as shown by the example of breeders in Western France who have radically changed their herd feeding system (abandoning maize silage, limiting concentrates and ensuring a maximum use of grazing) and simplified their production system. This extensification results in a considerable reduction in costs and a moderate fall in productivity (1000 to 1500 litres less milk per cow), which may lead to improved revenues and shorter working times.

Increasing the use of grass in raising systems

The "extensive grazing system subsidy", associated with policies targeting quality (production of wines, cheeses, labelled meats, etc.) has slowed the intensification of fodder systems and favoured the maintenance of permanent grasslands on extensive farms in medium-altitude grassland regions. To favour the development of grasslands, several options can be proposed to optimise the use of grass on these farms: an increase in the length of the grazing season, the use of deferred grazing, the production of grass at a lower cost by using grass-legume mixtures or permanent grassland and an improvement in the valorisation of organic fertilisers.

→ To quantify potential additional carbon storage at a national level, a global assessment of the "grasslands-livestock farming" sector is necessary. This should in particular include emissions of CH₄ by ruminants, which make an important contribution to agricultural emissions of greenhouse gases, and emissions of N₂O associated with grazing and with symbiotic nitrogen fixation. This assessment will require specific research efforts.

4.4. Order of magnitude of potential soil carbon stocks and uncertainties

The conversion of arable land into forest and permanent grassland displays considerable potential, of about 0.5 tC/ha/year over 20 years. The changes in practices which have been retained (suppression of tillage, planting of green fertilisers or catch crops) make a smaller contribution to carbon accumulation of about 0.15 to 0.3 tC/ha/year. The potential for carbon accumulation in grasslands may also be important: different changes to fodder cropping systems could enable a flux of 0.3 to 0.5 tC/ha/year.

These values were obtained by selecting references which corresponded to pedoclimatic conditions similar to those in France, and presenting the most reliable experimental evidence. They should nevertheless be considered with caution, given the limits described below.

TABLE 1. EVALUATION OF CHANGES TO LAND USE OR MANAGEMENT PRACTICES LIKELY TO INCREASE CARBON STOCKS

Anticipated and real effects** Habits/practices	Effect on OM input (changes to primary production and/or % supplied to the soil)	Effect on OM output (rate of mineralisation)	Other positive environmental effects	Negative secondary environmental effects	Assessment (retained or not as increasing carbon stocks)	Additional stock accumulation (20-year scenario)
Arable land						
No-tillage	may slightly \nearrow production \nearrow slightly level of OM conversion into humus	\nearrow rate (increased protection of OM)	\nearrow erosion	\nearrow use of pesticides \nearrow emission of N ₂ O, to be confirmed	retained	0.2 ± 0.13 tC/ha/year
Restitution of crop residues	\nearrow % restored to the soil	-		-	already performed: less value than valorisation as energy	0
Restitution of animal waste	exogenous OM input \nearrow production by fertilising effect	may \nearrow rate through the input of N		if excessive inputs	already performed nil balance	0
Intermediate crops (green fertiliser)	\nearrow annual production and % returned (crop not harvested)	-	\nearrow nitrate leaching \nearrow erosion		retained	0.16 ± 0.08 tC/ha/year
Increased fertilisation	\nearrow production	\nearrow		risks of pollution (nitrates, N ₂ O)	not retained	0
Irrigation	little to gain if already intensive system	\nearrow by prolonging the period of mineralisation		consumption of water, risk of nitrate leaching	not retained	0
Exogenous organic inputs	input of exogenous OM \nearrow production by fertilising effect	\nearrow		presence of metal trace elements	few "reserves" of OM negligible	ε on average
Sowing to grass of vines and orchards	\nearrow annual production and % returned (cover not harvested)	\nearrow	\nearrow erosion	-	retained	
Conversion into permanent grassland	\nearrow	\nearrow	\nearrow pollution, \nearrow biodiversity, etc.	-	retained	0.49 ± 0.26 tC/ha/year
Afforestation	\nearrow	\nearrow	+ stocks in woody biomass	closure of landscape	retained	0.44 ± 0.24 tC/ha/year
Grasslands						
\nearrow duration of TG + planned intensification	\nearrow	\nearrow	no-tillage effect	-	retained	0.1 to 0.5 ± 0.25 tC/ha/year
Conversion of TG into PG with ≥ intensification	\nearrow	\nearrow	\nearrow biodiversity \nearrow pollution	-	retained	0.3 to 0.4 ± 0.25 tC/ha/year
Moderate intensification of poor permanent grasslands	\nearrow production	-		-	retained except for mountains and wet regions	0.2 ± 0.25 tC/ha/year
Afforestation	\nearrow	\nearrow	+ stocks in woody biomass	closure of landscape		0.1 tC/ha/year
Planting of hedgerows	\nearrow	\nearrow	\nearrow biodiversity, etc.	-	retained but highly variable effect	0.1 ± 0.05 tC/ha/an

** Italics imply no or unfavourable effects on stocks ; TG : temporary grasslands ; PG : permanent grasslands.

Uncertainties and variations

The stock fluxes retained are modal values for the country: they should be considered as having a relative uncertainty of about 50%, linked in particular to the insufficient numbers of long-term studies in France or Western Europe. The very considerable variations in annual increases in carbon stocks also tend to demonstrate that practices do not have a univocal impact, as their effects depend upon the interaction of numerous factors.

Emissions of non-CO₂ greenhouse gases

The results obtained will be highly sensitive to the effects on non-CO₂ greenhouse gas fluxes induced by changes in practices, particularly when these changes affect the nitrogen cycle and possibly the emissions of N₂O.

Reversibility

Because soil carbon release is more rapid than its accumulation, the benefits to be expected from adopting practices which enhance accumulation will be reduced if these practices are not sustained. Thus, for national accounting, not to take account of practices which cause a release of soil carbon could result in serious bias. In terms of strategy, it may therefore be more important to conserve existing stocks than to try to create new ones.

Climate change effects

The potential effects on the carbon cycle of climate changes and the composition of the atmosphere, which are not taken into account in these estimates, represent a further uncertainty.

Global warming and increases in atmospheric CO₂ are likely to increase plant production and hence the restitution of OM to the soil; however, the rise in temperature will also accelerate mineralisation. The balance between these two contrary effects will probably not be negligible: it may cause changes in carbon levels of between +2 and -2% for the 20 years to come, depending on which of these phenomena predominate, or a net carbon flux of between +1.5 and -1.5 MtC/year for French agricultural land alone.

Moreover, climate change may, in some cases, call into question the options chosen to enhance soil carbon stocks: for example, an increase in the frequency of droughts may lead to an abandonment of sowing to grass in vines and orchards in the South of France, or a reduction in the productivity of permanent grasslands, thus encouraging a change to annual crops harvested in the summer.

5. CARBON ACCUMULATION SCENARIOS AT THE SCALE OF MAINLAND FRANCE

The aim is to test the usefulness of changes in land use or farming practices on a national level by simulating the accumulations achieved according to different scenarios, dependent upon the practices chosen.

5.1. Method

For each change in use or farming practice, an increase in accumulation at a national level is calculated based on the accumulation curve per hectare (obtained using the exponential equation in Figure 4) and spatial extension hypotheses concerning this change. These surface areas are proposed with reference to the areas which might be concerned (determined on the base of the Agricultural Census, 2000), and then by formulating hypotheses concerning a more limited extension to the practice and integrating the constraints on its implementation.

Example of adopting no-till

The 18 million hectares of land covered by annual crops could be concerned by this practice. Its possible extension is limited to 70% of this surface area, as about 30% of arable land is not suited to no-till.

The hypothesis of a simultaneous change on 20% of arable land to no-till would produce additional carbon accumulation of 0.55 MtC/year over 50 years and 0.7 MtC/year over 20 years. Since it is unlikely that this type of conversion could be achieved immediately, a more realistic hypothesis is used, that of its gradual adoption over a period of 20 years. The hypothesis of a periodic tillage, on average once every four years, is also envisaged.

TABLE 2. HYPOTHESES AND RESULTS OF SIMULATIONS ON ADDITIONAL CARBON SEQUESTRATION.

Change in land use or practice	Mean annual additional storage per hectare (20-year scenario)	Constraints in terms of agronomic feasibility and applicability	Potential surface area retained for the estimate	Additional annual stocks for mainland France (20-year scenario) in millions of tonnes carbon/year	Possibilities for verifying surface areas involved	Possibilities for verifying carbon stocks
Afforestation of agricultural land	arable → forest: 0.5 tC/ha/year grass → forest: 0.1 tC/ha/year	Will mainly affect low potential land (except afforestation of set-aside)	from 30,000 to 80,000 ha per year - from arable land - 80% of fallow and grassland and 20% of arable land (the current rate of increase in forested areas is 80,000 ha/year)	.....0.15 to 0.40 M tC/year.....0.04 to 0.10 M tC/year	Feasible using remote sensing	requires organisation of supplementary observation sites
Conversion of arable land into permanent grasslands	0.5 tC/ha/year	Can only affect land belonging to animal farms	from 10,000 to 80,000 ha per year (90,000 ha/year for 20 years = restoration of permanent grassland lost since 1970)	.....0.06 to 0.45 M tC/year		
Sowing to grass in vines and orchards	0.4 tC/ha/year	Competition for water	Base: 1 Mha of vines and orchards adoption on 20 to 50% of surface area...	.....0.08 to 0.20 M tC/year		
Adoption of direct drilling	0.2 tC/ha/year	Control of weeds and pests Constraints linked to soil, compacting	Base: 18 Mha of arable land, gradual adoption, over 20 years, on 20 to 50% of crops + hypothesis of tillage every 4 years.....	.....0.4 to 1 M tC/year.....0.23 to 0.58 M tC/year	Very difficult without a declaration system	Becomes easier as the surface area under direct drilling increases. Problem with baseline
Planting of intermediate crops	0.16 tC/ha/year	Relatively long period between crops (before spring sowing) Competition for water with subsequent crop Organisation of work Management of long-term effects	Base: 4 Mha in spring crops adoption on 0.5 to 2.5 Mha .....	.....0.07 to 0.33 M tC/year	Feasible using remote sensing, but costly (annual checks)	Difficult: problem with baseline

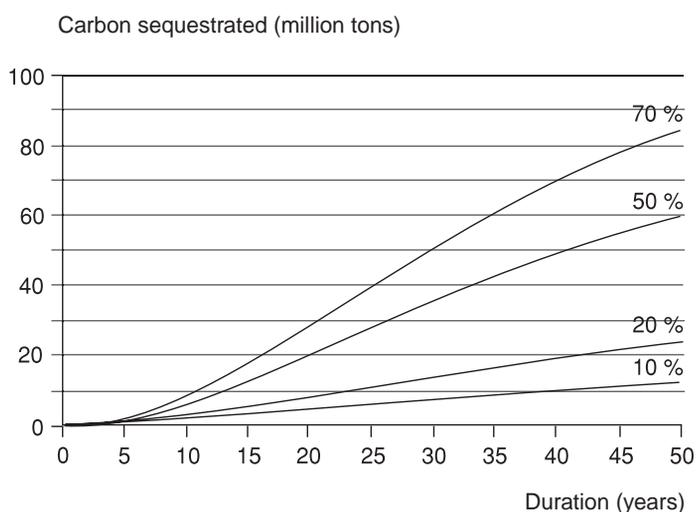


Figure 6. Simulation of additional carbon accumulation in French arable land under the hypothesis of a gradual conversion to no-till over a 20-year period. Hypotheses concerning the conversion of 10, 20, 50 and 70% of arable land.

The same procedure is applied to other changes in land use or practices (see Table 2). The Expert Report thus provides elementary scenarios which should be combined to calculate the total increase in accumulation expected under scenarios for the different practices.

5.2. Accumulation potential according to different scenarios

In view of the history of changes to land use, and notably the extension of forested areas, French land has always exhibited an increase in C stocks since 1850, except for a short period during the implementation of European bare set-aside land procedures. For the period 1980-1990, the net accumulation flux is estimated at 1.5 ± 0.5 MtC/year (or 0.03 ± 0.01 tC/ha/year).

An extreme scenario for land use changes, corresponding to the conversion over a 10-year period of 3 Mha of arable land and 0.8 Mha of set-aside (or a total of 3.8 Mha), half into permanent grasslands and half into forestry, would enable an additional accumulation of 2.9 MtC/year over 20 years.

A more realistic scenario, or:

- 50% of arable land converted to direct drilling in 20 years, with tilling on average once every 4 years: 0.6 MtC/year
 - the planting of intermediate crops on all possible land, or 4 Mha: 0.6 MtC/year
 - 30,000 ha/year of afforestation (80% on fallow and grasslands and 20% on arable land): 0.1 MtC/year
 - 30,000 ha/year conversion from arable to permanent grassland: 0.1 MtC/year
- would produce an additional accumulation of 1.4 MtC/year over 20 years.

This estimate does not include additional accumulations due to changes in the management of fodder systems, which are more difficult to quantify.

→ It is necessary to retain a more probable order of magnitude of 1 to 3 MtC/year for potential additional carbon storage for the next 20 years, for the whole of mainland France.

These scenarios give rise to **markedly lower estimates** than those found by other authors in Europe. These differences mainly arise from:

- a generally lower evaluation of carbon accumulation fluxes per surface unit, based on references which either correspond to the conditions prevailing in France, or conclude on less potential due to different hypotheses.
- a more restrictive assessment of the areas potentially concerned by changes in use or practices, if account is taken of current land use at a national level and major trends (reduction in grassland areas, etc.), as well as problems with regards to agronomic feasibility, etc. ;
- account being taken of the fact that it may be difficult to apply some practices continuously (for example, interruption of direct drilling by occasional tillage).

Even the moderate hypothesis of carbon accumulation reaching about 1 to 3 MtC/year would only be possible if the changes made affected more than half of all farmland:

- the changes to farming practices envisaged are considerable;
- the hypotheses concerning the areas affected by changes in use go counter to mainstream practices, particularly regarding the conversion of arable land into grasslands and forests. The conversion to grassland would imply heavy changes in forage production and livestock farming systems.

It should also be noted that:

- this accumulation potential is limited in time and space. It is therefore a finite solution, which may allow a certain flexibility with respect to the Kyoto commitments but in no case constitutes a sustainable, long-term solution, as our knowledge stands at present.
- the knowledge and data available at present are insufficient to enable a spatial estimate of carbon accumulation potential in the land. In fact, major regional disparities can be anticipated as a function of pedoclimatic conditions (clay content, soil water status, etc.) and current carbon stocks and dynamics;
- a complete environmental assessment of some practices (particularly the greenhouse gas budget concerning no-tillage) is still to be made.

6. ACCOUNTING AND VERIFICATION OF SOIL CARBON STOCKS

6.1. Rules governing the application of the Kyoto Protocol

● Accounting rules

We must recall that only intentional additional accumulation will be taken into account, resulting from voluntary actions undertaken since 1990. If measurements are based on the "net-net" accounting system, accumulations will be calculated by subtracting from the fluxes for the five years 2008-2012 the value of the flux in 1990 multiplied by 5.

Application of these rules will be rendered difficult by the fact that the current geographical extension of many of the practices eligible under the terms of Article 3.4. is still not known with precision, and in general no statistics are available on this subject for the year 1990.

● Rules for verification

The procedures proposed usually involve verifications which can be broken down as follows:

- **verifications of the accumulation by surface area induced by a practice**, based on measuring local variations in carbon stocks (achieved by sampling and/or numerical modelling) and on the periodic monitoring of reference sites which include control plots and others subjected to a change of use or practice;
- **verifications of the surface areas concerned by these changes in use or practice**, performed for example using remote sensing methods.

The level of stringency required for these verifications has not yet been fixed by parties to the Convention.

A strict verification implies sampling at the beginning and the end of the commitment period on each area subjected to an activity defined under Article 3.4., and a comparison with a sufficient number of samples from control areas. The data obtained will be aggregated to produce an estimate on a national level. Other methods will also be necessary to produce a second set of independent data for verification. Such procedures are difficult to implement on a national level and their cost will probably be prohibitive.

In contrast, if a less demanding verification procedure were retained, the estimate of the surface areas concerned would not be georeferenced, and default values for changes in carbon stocks induced by each practice would be used to estimate the effects of an activity on national carbon stocks. However, even an estimate of the surface area concerned by a given activity may prove to be unverifiable if no geographical references are available.

An intermediate level of stringency would lead to verifications based on a georeferenced inventory of the surface areas concerned (by remote sensing or determinations in the field) to enable an estimate of changes in carbon stocks based on experiments (in representative regions in terms of climate and soil), observations on reference sites or well-established, documented and archived models.

6.2. Applicable procedures for the verification of carbon accumulation

It is in this context of an intermediate level of stringency that the feasibility of verifications, and notably the relevance of existing tools, have been examined.

● Verification of carbon accumulation per unit surface area

Measurements of changes to carbon stocks

The considerable variability in annual carbon accumulation and in the carbon pool itself, and the sustained effects of ancient use, make it difficult to demonstrate low relative changes in carbon stocks over a short period (5 years). In addition, any accumulations need to refer to a moving baseline given the continuous and spontaneous development of land uses and techniques, and the effects of climate change. Because of spatial variations, the number of samples and analyses necessary to certify changes in soil carbon stocks may be very high.

Long-term experiments (particularly useful when studying mechanisms for the accumulation/release of carbon in the soil) are not sufficiently numerous in France or in the world to reflect the diversity of agricultural and pedoclimatic conditions. The monitoring of reference sites will be necessary, which will require dense coverage of the entire country and extremely precise georeferencing of these observation sites.

The capacity of a network similar to the Soil Quality Measurement Network* (which is currently being set up and comprises 2100 observation points spread over the country, devoted to monitoring soil quality) to supply proof of additional carbon accumulation during the commitment period, has been tested. Knowing the proportion of different land uses in France, the distribution of present carbon stock values by type of use and soils, and running hypotheses on the kinetics of these stocks, it was possible to simulate the results of successive measurement campaigns, and thus to test the ability of the network to detect a significant change in stocks. Under the different scenarios for changes in practices which have been tested, the mean periods necessary to detect a change in the soil carbon pool range from 3 to 15 years; in unfavourable scenarios, these periods can reach 10 to 25 years. To obtain the information required, it is necessary to ensure an increased density of the network and/or the implementation of specific monitoring dedicated to certain uses, thus raising the central question of the cost of setting up such a network and then the completion of all verifications. If changes in practice are rapid and numerous, the number of sites needed to monitor carbon stock kinetics will soon become prohibitive.

The verification of carbon accumulation induced by different activities would require:

- an increase in the number of long-term agronomic studies to enable calibration of the models under varied agricultural and pedoclimatic conditions;
- the development of a systematic monitoring network (or one dedicated to certain changes) to obtain statistical evaluations and tools to validate the predictions supplied by models;
- the use of observations on long-term plots which already exist locally, even if they need to be supplemented by specific analyses;
- in order to respond to the baseline issue, the setting up of control sites;
- the development of spatialisation techniques and/or inventories providing access to input parameters for the models;
- to bridge the gap between measurements and models at different scales, and to progress in the generalisation of local models and techniques for the inversion of global models.

Methods for the measurement of CO₂ fluxes

These methods, which consist in measuring gas exchanges between the ground and the atmosphere, have the advantage of supplying data which are independent of those obtained by measuring soil carbon stocks. However, they do have several limitations: they require a costly infrastructure and few sites are as yet equipped (approximately twenty sites in Europe on agricultural land); they do not reflect accumulations in the soil because the amounts measured also include the CO₂ stored in biomass, including that which is released at harvest.

The IPCC report notes that the reliability of these methods is insufficient at present to constitute a basis to estimate accumulation, but on the other hand they may serve as an independent method for verification.

TABLE 3. INVENTORY AND SURVEY DATA WHICH COULD BE USED TO MONITOR LAND USE AND AGRICULTURAL PRACTICES

Operation	Census	Remote sensing	Aerial photographs	Inventories in the field		Surveys of farmers	Declarations by farmers and follow-up	
				TERUTI survey	LUCAS European survey		For PAC premiums	FFYFC dossier and monitoring
Type of data	RGA Use of agricultural land by farms	CORINE Land Cover Land use	National Forestry Inventory (NFI) Land use, forestry practices	Land use	Land use (extension of TERUTI EU)	SCEES survey Agricultural practices for 10 crop types (incl. temp. pasture) + set-aside	Use of arable land and/or fodder areas only	Crops and practices over 5 years for plots under contract
Number/type of categories	By crop	44 types, of which 12 agricultural	Few types for land outside forests	By crop	by crop	For 10 crop types + set-aside	By crop	By crop
Frequency Dates	Every 10 years The last one performed in 2000	10 years Performed in 1992	About every 10 years	Annual	Annual	Every 4/5 years The first in 2001 Arable crops in 1994	Annual	Depending on measures chosen
Scale of acquisition Magnification	At a farm level	30x30 m	Aerial photographs + sample plots	1 point/100 ha (= 550 000 points) constant sample (over a timespan of 10 years)	Observation points (100,000 for the entire EU) + transects	Sub-sample of TERUTI sample points	Ranges from plots to farms	Declared déclarées plots within a farm
Aggregation of data available	By administrative division (bias: location of farm office)	250x250 m numerous mixed pixels	Small forestry regions. Localisation of data possible	Small agricultural regions. Localisation of data possible	Region level départemental ou regional	Not currently known (under analysis)	Administrative division (bias: declarations only)	Records held by farmers → difficult access
Georeferencing	exhaustive	Exhaustive	Exhaustive	On samples only	On samples only	No	No	Based solely on FFYFC declarations
Transition matrix	No	Yes for principal uses	Yes for all uses	Yes for all uses	Yes	Yes	Reconstitution of successive crops may be possible	Yes for all uses and practices

- **Verification of surface areas**

This verification is not possible if georeferenced data are unavailable. Several methods have been envisaged to account for and georeference the surface areas subject to changes in use or practices (see Table 3: Evaluation of existing systems):

- **Inventories**, which may be exhaustive or based on samples representative of the country

Inventories have the advantage of supplying systematic data (including on changes which induce carbon release). They can be performed using remote sensing with respect to changes in use or certain practices; the information gathered is then exhaustive; checks several times a year are possible but expensive. The identification of other practices (no-tillage, etc.) requires observations in the field; this type of plot-based identification would be evidently restricted to sample areas.

→ No inventory programme exists in France which allows a precise georeferencing of all changes in land use, or a periodicity which allows monitoring over the commitment period.

- **declarations by farmers**

This is the method used for CAP premiums or for French Land Management Contracts (LMC); it is accompanied by a control procedure in the field of the truthfulness of the activities declared, on a reduced sample of declarations.

→ CAP declarations and LMCs do not concern all farmers, which raises the questions of how representative these data may be and the problems encountered in their extrapolation.

To produce a verification of the surface areas subject to these activities, it is necessary to:

- develop methods which will provide information on land use change matrices which is precise and based on a short period of time;

- develop the monitoring of practices based on inventories, surveys or contractual commitments by farmers.

→ If the aim is to draw up a reliable and verifiable account of soil carbon accumulation over the period of the commitment, the investment required is considerable, and there must be fears that the cost of a complete verification will exceed the benefits anticipated in terms of CO₂ sequestration.

→ The measures which are the easiest to verify and which will ensure the largest unit accumulation of soil carbon are those concerning major changes of use such as the conversion of arable land to forests or grasslands.

7. ECONOMIC POLICY TOOLS WHICH COULD BE USED TO ENCOURAGE PRACTICES FAVOURING CARBON ACCUMULATION

It is necessary to determine the methods to be used by national authorities to encourage farmers to adopt practices which will ensure a higher level of soil carbon accumulation. Economic analysis supplies tools which can evaluate the adequacy of existing regulatory instruments to this objective, and notably their economic efficacy, i.e. their ability to induce the highest additional storage at the lowest costs.

7.1. Theoretical context

The search for efficiency leads policy makers to use **cost-benefit analysis**. Such an analysis aims to evaluate in monetary terms the individual advantages and disadvantages which can be drawn from a collective decision, while ensuring that none of the direct or indirect effects are forgotten. It thus provides a grid to analyse the different regulatory instruments, the conditions required to define their implementation and efficiency and their possible impact.

- **Externality and internalisation instruments**

CO₂ emissions and increasing carbon sinks constitute externalities* which are respectively negative and positive. By definition, externalities are not taken into account spontaneously by the market, and their internalisation may require State intervention. The regulation of externalities is often based on the "polluter pays" principle, which consists in taxing those agents responsible for

deteriorating the quality of the environment; if applied to a positive externality, this principle results in remunerating the agent which produces amenities for the good of the community.

The instruments which make it possible to encourage agents to integrate in their individual decisions effects which they do not spontaneously take into account are based on a dual logic: standards (affecting the products or the process) and economic instruments (taxes, subsidies, emission permits market). The latter have the advantage of allowing a decentralisation of optimum choices in terms of abatement. These different instruments vary in terms of their usefulness and limitations, but to different degree, they all suppose knowledge of the cost of pollution damage attributable to pollution, of the benefits associated with reducing pollution and the costs of pollution monitoring and/or ensuring compliance. In this perspective, calculations must be available on the different aspects making up the cost-benefit analysis.

7.2. Difficulties encountered in evaluating the costs and benefits of carbon accumulation

Evaluation of the cost of additional carbon accumulation

These costs include those linked to changes in practices (direct and indirect costs of the additional storage itself; adjustments and opportunity costs, etc) and those linked to implementing normative systems and economic instruments (transaction costs linked to verifications; impact on markets and prices, etc.).

The lack of references and the diversity of pedoclimatic and agricultural situations, which induce considerable variations in the efficiency of carbon accumulation and its costs, make it even more difficult to quantify these costs and the benefits linked to additional storage in agricultural land. With respect to direct costs, a pragmatic solution consists in basing evaluations on a regionalisation of additional storage scenarios which takes account of this diversity. A preliminary approximation of costs is then obtained by simulating the loss of income associated with adopting different accumulation-enhancing practices; these costs are then compared with the carbon balances attained in each case. The difficulty arises with respect to collecting economic data which are coherent with the reality of processes at a pedological level. In addition, because of the dynamic nature of carbon storage, evaluation of these costs must integrate the temporal dimension and history of these practices.

Measurement of costs and potential for abatement in the agricultural sector

Few economic studies have evaluated the specific costs of additional carbon storage in agricultural land, most of them having addressed their "forestry" aspects. Nevertheless, a few studies have included this aspect in broader evaluations, covering the different sources and sinks of greenhouse gases from agriculture. They are based on models which couple simulations of the technical and economic functioning of farms and wide-ranging assessments of different greenhouse gas sources and sinks.

This is the case of a study which looked at the American agricultural sector and supplied an evaluation of the costs of abatement and potential net reductions in CO₂ emissions for different values of a ton of carbon. This study showed that the efficiency of actions which could be envisaged to reduce these emissions were strongly dependent upon the value of a ton of carbon; at values below \$50, the accumulation of carbon in agricultural land was an economically viable option, but at higher values, afforestation strategies and the production of biofuels proved less costly.

A similar study was performed in France. It confirmed the major disparities existing in the individual costs of abatement, and demonstrated the important impact of authorisations for forest plantation on set-aside land. This measure would allow a marked reduction in the total cost of abatement (and thus increase the potential for an economically efficient reduction) but it is not neutral in terms of redistribution of the abatement costs (breeders bearing the major costs of abatement). It also showed that an accumulation of carbon in agricultural soils could make a marked contribution to improving the greenhouse gas budget, but nevertheless this was relatively less important than the potentials obtained by afforestation or reductions in methane emissions.

Specific research on the costs of accumulating carbon in French agricultural soils still needs to be performed. The models which need to be developed must take account of interactions with other greenhouse gas emissions, the characteristics and dynamics of carbon accumulations and the possible strategic behaviour of farmers (need for recourse to instruments which may be less effective but also less costly in terms of public control, aimed at preventing fraudulent behaviour).

Control of the effectiveness of accumulation

Economic regulation – whether this implies a standards system, taxes/subsidies or transferable quotas – must be based on instruments which can control and verify individual activities which allow a distinction between natural variations in carbon stocks and those induced by voluntary actions.

From an efficiency standpoint, it is important that the incentives implemented should be active as close as possible to the source of the amenity. Thus, in theory, a premium per ton of carbon accumulated appears preferable. However, in the case of carbon accumulation, the cost of an individualised and reliable system for control and verification may make so-called "second best" solutions more attractive, which make premiums rely on less variable criteria such as practices or surface areas. It is then possible to envisage integrating these measures at lower cost in systems such as the CAP.

The benefits linked to carbon accumulation

A direct evaluation of these benefits is very difficult because of the considerable uncertainty concerning the degree of climate change and the costing of its potential for harm, as well as that share which must be attributed to anthropogenic changes in the composition of the atmosphere.

The principle of an international market for Certified Emission Reduction (CER) credits having been accepted, this approach may provide a quantified assessment of the value of a ton of carbon to be retained for analysis. The ranges of estimates resulting from simulations of the functioning of such a market are still very broad (from less than \$10 to \$150 per ton). Let us suppose a value of €80. In the knowledge that the most efficient changes in practice allow additional stocks of 0.3 tC/ha/year, an additional storage subsidy could not at best exceed €24/ha/year (verification costs not subtracted), to be compared with the €400/ha direct European grants proposed for the principal crops.

→ As current methods of control stand, it is technically and economically impossible to base a system of taxes or incentives on CO₂ emissions or additional soil carbon storage. We are forced to base any system on agricultural practices and land use and on the surface areas concerned (the situation differs from the emission of N₂O, which can be associated to the use of a product, which is legitimate – if we accept the hypothesis of small variations in emission factors – the taxing of fertilisers).

→ Basing the remuneration of additional carbon storage on the mean stock coefficients obtained using predetermined practices and the value of a ton of carbon raises two problems:

- firstly, such a system implies neglecting, at least in part, the spatial and temporal variability of accumulation coefficients,
- and secondly, temporal variations in the value of a ton of carbon (fixed for the entire economy) is little compatible with the long-term actions which are difficult to reverse which would have to be undertaken by farms in order to significantly increase carbon accumulation.

7.3. Possible incentive measures

Standards

Recourse to a standard would involve fixing a floor limit, i.e. a minimum quantity of carbon which must obligatorily be accumulated in the soil, per farm or per unit surface area. Because a poor assessment of costs and benefits is a source of inefficiency, the principal problem therefore concerns fixing the optimum level of carbon accumulation required.

In addition, recourse to a standard does not encourage agents to try and obtain a level of positive externality higher than the floor limit. Indeed, on the contrary, this would encourage fraud, so the system requires a system of rigorous and frequent controls, associated with a dissuasive system of penalties.

Subsidies

Subsidy systems have the advantage of encouraging agents to attain accumulation objectives at the lowest cost, so they therefore constitute a dynamic incentive for innovation.

The problem is to set a base for the premium which is sufficiently well-correlated with the results anticipated, but without involving prohibitive control costs. A per-hectare subsidy, allocated when a practice reputed to be accumulation-enhancing is adopted, could be efficient, on condition of finding a solution to the problems of geographical variations in carbon accumulation capacities associated with the different practices.

Any subsidy system, insofar as it is funded by the tax-payer, can also raise problems of social acceptability.

ty if it is not supplemented by an environmental tax on activities which generate greenhouse gas emissions.

Inasmuch as it is supplementary stocks which need to be taken into account, subsidies for adopting practices will necessarily exclude those farmers who adopted these practices previously. Although this aspect is not problematic in terms of efficiency, it may be a source of problems regarding the social acceptability of such measures, and cause people to wait before implementing any changes.

The market for emission permits

It is possible to imagine that the principle of a market for certified emission reduction (CER) credits, decided on an international level, could be extended to individual agents. This system has the advantage that the objectives fixed can be attained (the objectives being to define the global number of credits granted) at a lower cost if the credits are negotiable in a fully competitive market. It also avoids the need for prior knowledge of the costs of abatement, since the interactions between sellers and purchasers mean that in theory, a price per ton of carbon will be fixed which will assure minimisation of the total cost.

A first problem arises with respect to the initial distribution of the credits granted. Although efficiency is not called into question in this case, the allocation of initial credits may raise problems of social acceptability; if they are granted as a function of past practices, agents who are already "virtuous" will be penalised. A second difficulty is establishing a market which can function freely and competitively. Finally, the control problems referred to above remain, because the additional soil stocks "exchanged" on the basis of credits must be efficient, controllable and reliably confirmed.

Specificities linked to carbon storage in agricultural soils

- Carbon storage and release dynamics in the soil require that practices favouring sequestration must be applied continuously and over a long period to be effective. Incentive measures must therefore be laid down in the context of long-term contracts with farmers. Such contracts induce supplementary opportunity costs inasmuch as they reduce the choices available under such a commitment.

- To prevent "leakage" ("leaks" through CO₂ emissions or carbon loss induced by adopting one accumulating-enhancing practice), eligibility for a grant must be included in an overall assessment of greenhouse gas emissions from the farm.

- The incentive systems set up must be coherent with the institutional systems already in place. In particular, conflicts between measures covered by the CAP and incentives for carbon accumulation must be limited.

- The adoption of measures to encourage carbon accumulation in agricultural soils may increase the disparities existing between farms, particularly between animal breeders and cash crop farmers (carbon subsidies going to farmers with considerable resources in terms of surface area, and taxes on methane emissions weighing on animal breeders). Once again, this consideration does not concern the economic efficiency of the measures to be implemented, but their social acceptability.

→ The most appropriate method seems to be a comprehensive, farm-based individual contract. Such a contract could be inserted in contracts of a LMC type. Although it has not been shown that it is more economically efficient than a uniform measurement, such a system would have several advantages: it is based on a diagnosis and an individualised project, it involves the producer, it takes account of the entire farm strategy, it ensures coordination between "purely" agricultural aspects, other environmental concerns (water pollution, management of animal waste, etc.) and incentives for carbon accumulation. So as to prevent any leakage, such a contract must include conditions which encourage a reduction at the same time in other sources of greenhouse gas emissions. Of course, this contract option supposes that a large number of farms and a large proportion of French land would be involved, and that the lasting nature of the contract would be credible. Regionalised standard contracts would make it possible to reach a compromise between taking sufficient account of pedoclimatic variations and the cost of controls. Finally, such an option is well suited to a European agriculture policy which must increasingly base its justification on environmental aspects.

8. REVIEW AND CONCLUSIONS

A carbon accumulation potential which is not negligible but difficult to valorise

The Assessment Report shows that by changing land use and/or certain agricultural practices, it is indeed possible to increase significantly the accumulation of organic carbon in French agricultural soils. From the different scenarios tested, it appears that the maximum potential for enhancing carbon stocks is about 3 to 5 million tons of carbon per year over a period of 20 years. A combination of more realistic hypotheses concerning the adoption of practices which enhance carbon accumulation produces an increase of about 1 to 3 million tons per year.

It is specific changes to land use which will enable the highest accumulation fluxes per unit surface area: afforestation and an increase in permanent grasslands. Afforestation also induces increased accumulation in the woody biomass and a reduction in inputs and energy consumption. Because of the surface areas involved, some farming practices also suggest significant potential efficacy: the suppression of tillage and the use of shallow ploughing, the planting of green manures between crops, sowing grass between rows in vines and orchards. The planting of hedgerows or changes to the management of permanent and temporary grasslands, where the effects are more difficult to quantify, may also contribute to enhancing carbon stocks. In contrast, the opportunities offered by the management of agricultural or urban residues or agricultural waste appear to be small, and an intensification of crops which already have a high yield produces no benefits.

This global potential, estimated for the conditions prevailing in France, is smaller than that suggested by other experts. However, although it is only equivalent to 1 to 2% of French greenhouse gas emissions, it is not negligible, as it may represent a large proportion of the efforts required to comply with the commitments to the Kyoto Protocol.

However, realising the potential of carbon accumulation will come up against numerous uncertainties and problems.

Uncertainties and the variability of carbon pools

- The carbon accumulation potentials retained must be seen in the light of marked relative uncertainty of about 50% concerning unit fluxes, and more in terms of the national estimate.
- The results are highly sensitive to pedo-climatic and local agricultural conditions, and thus markedly contrasted as a function of regions.
- The estimates made do not take account of the emissions of other greenhouse gases (notably N₂O) induced by the adoption of practices enhancing carbon accumulation, which must be deducted from the sequestration of CO₂.
- Actual storage may be smaller if climate change has an effect on increasing mineralisation, or if they prohibit certain options which imply high water consumption.

Conditions of implementation

- The carbon accumulations envisaged imply massive changes to practices and land use, some of which run contrary to current evolutions (trend towards reducing permanent grasslands, etc.) or require important choices in terms of agricultural policy (afforestation of fixed set-aside land, etc.).
- They suppose commitments by farmers for a very long period (so as to build up additional stocks and then maintain them), which will be particularly difficult to obtain because of the likelihood of rapid developments in the political and economic context of agriculture.
- To be taken into account in the national balance, they will require a complicated system of verification, which will therefore be costly to implement.
- They will require incentive measures, the type, criteria of allocation and funding of which are not easy to define.

Technical conditions for verifications

- The demonstration of highly variable increases in additional storage, which will be very small when compared to the broad variability in stocks themselves, will be difficult and require the implementation of costly observation systems.
- The obligatory determination of a baseline will be particularly difficult to achieve.
- Changes in practices and their effects will be intrinsically more difficult to observe and quantify than changes to land use.

- The procedures might be technically impossible to implement for the first commitment period, and if the level of verification is too demanding, its cost will become prohibitive when compared with the price of a ton of carbon.

Unlike reductions in emissions, the accumulation of soil carbon does not constitute a permanent solution to reducing atmospheric CO₂ levels, since stocks will cease to grow after a few decades, and the agricultural land which can be used is finite in quantity.

On the other hand, an increase in accumulation may allow some degree of flexibility with respect to the commitments made in the context of the Kyoto Protocol, and usually be accompanied by connected agricultural and environmental benefits.

The need to envisage a global policy with respect to the greenhouse effect, to be integrated in broader agricultural and environmental policies

In view of the uncertainties concerning its results, the constraints affecting its implementation and the probably low cost of a ton of carbon when compared with existing agricultural subsidies, a specific policy, restricted to carbon soil accumulations, seems difficult to achieve and little effective. Measures aimed at increasing carbon accumulations should be integrated into a broader policy.

A global policy to fight against the greenhouse effect should make it possible to:

- take account of all greenhouse gases of agricultural origin, and notably emissions of N₂O. This latter point should lead to considering also the management of nitrogen inputs as a priority, rather than the management of carbon only. Indeed, a 10% reduction in nitrogen fertilisers would already correspond to a gain of about 0.6 MtC/year (emission of N₂O and synthesised energy);
- ensure that adopting a practice in an area does not induce any emissions or carbon leakage elsewhere;
- compare carbon soil accumulations with energy alternatives (crops for the production of biofuels and energy valorisation of agricultural and urban residues);
- and compare these with the emission reductions possible in other economic sectors.

Practices which tend to accumulate carbon in the soil almost always engender **other environmental benefits**: limitation of erosion, improvements in soil and water quality, economies in fossil energy, greater biodiversity, etc. This compatibility with other environmental objectives allows the integration of carbon incentive measures in broader agricultural and environmental policies adopted in the context of the CAP. The existence of certain negative effects (increased use of pesticides with no-tillage, closure of landscapes) will nevertheless require certain choices between environmental objectives.

Reciprocally, agricultural and environmental policy actions (integrated agriculture, soil protection, biofuels, etc.) may be accompanied by benefits in terms of carbon accumulation. If it is possible to demonstrate the intentional nature of these gains, they could be claimed as actions in application of the Kyoto Protocol; such recognition of global agricultural and environmental policies including actions on carbon is necessary to the implementation of these actions.

Any policies of this type will necessarily have a strong national dimension. They should be justified in the light of local environmental and land needs, taking account of the effective functional units which go beyond the plot (farms, watersheds, catchment areas of ground water aquifers, etc.).

The need to develop research and acquire references

The critical examination of the French and international literature which was done for this Assessment Report underlined the gaps in our knowledge and/or the impossibility of precisely quantifying some of the processes. This situation results in estimates which are accompanied by a considerable uncertainty, and the impossibility in specifying with sufficient precision the pedoclimatic and agricultural conditions which ensure the efficacy of measures aimed at increasing carbon stocks. Such a potential, if sufficiently important when compared with the abatements necessary, could in the long term be valorised effectively if situations offering the best conditions can always be identified, and if economical and reliable methods to quantify the gains achieved can be developed. It is therefore necessary to pursue research and acquire additional references in several areas. The challenge

goes far beyond the immediate question of French implementation of the Kyoto Protocol. It is clear that it must be seen in the context of global, long-term management of the problem of the greenhouse effect and a more exact description of the sink and source functions of soils. The importance of the soil fluxes concerned, when concerned with the atmospheric CO₂ budget, justifies the research which should be devoted to their future.

Knowledge of carbon biotransformation mechanisms in the soil

Some processes are still poorly understood or insufficiently studied in a range of situations which is too limited to allow a generalisation of results. This is notably the case for rhizodeposition, the effects of physicochemical factors and the physical protection of organic matter, the very long residence times of some carbon pools and the sink function of soils for methane, etc.

A clearer understanding of these processes would also provide opportunities for the design of novel practices aimed at increasing the soil carbon pool.

Global modelling of carbon behaviour in the soil and broader national projections

The complexity of mechanisms and the multiplicity of factors and interactions require the use of models for the dynamics of carbon, in order to predict its evolution.

The calibration of models will require the development of long-term observation systems under experimentally-controlled conditions in the field, as well as in natural situations, so as to acquire knowledge under diversified pedo-climatic and agricultural conditions. The use of spatialised estimate models will then depend on the availability of the controlling variables, concerning soil, vegetation, climate and land use. For the soil, current programmes to create databases (cartographical inventory and monitoring of quality) will, with the help of specialised supplements, provide a response to needs in the future. In contrast, the information available on land use and changes in land use and practices is insufficient, and new projects must be designed and implemented. The use of spatial remote sensing techniques cannot, alone, produce all the data necessary, but should nonetheless be investigated as it is the most economic means of access to this information.

Establishment of a greenhouse gas emission/sequestration balance and a global environmental account of agricultural practices

These balances need to be drawn up for different farming practices (reduced tillage, green fertilisers and catch crops, integrated production) and also changes in land use (change from crops to grassland). Modelling of their variations is a question of research. Progress will depend on a clearer understanding of mechanisms, and also on acquiring experimental data which remain much too scarce.

Knowledge of the different components in the greenhouse gas or environmental balance should then be integrated in farming and cropping practices, the case of fodder systems justifying special investment because of the strong interactions between plant and animal production in the greenhouse gas budget.

Monitoring of the changes in land use and agricultural production systems

Knowledge of these changes and the technical and economic conditions governing them, is necessary to verify the practices claimed, and also to design and adjust incentive policies. At the level of production systems, the challenge is to develop and maintain databases which are georeferenced and related to different types of farms using these systems. The economic performance of production systems and the behaviour of actors should also be monitored.

Finally, **integrated modelling**, combining the impact of land use changes, climate changes and agricultural and environmental policies, should be developed as an aid to public decision-makers and to inform economic agents.

FOR FURTHER INFORMATION

Assessment Report

Arrouays, D., J. Balesdent et al. (eds) (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise Scientifique Collective, Rapport. INRA. 332 pp.

Other references

Académie d'Agriculture de France (1999). Bilan et gestion des gaz à effet de serre dans l'espace rural. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France 85 (6) n° sp. 392 pp.

Freibauer, A., M.D.A. Rounsewell et al. (2002). Background paper on carbon sequestration in agricultural soils under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. Contract Report N° 2001.40.CO001 within the framework of the Communication on "EU policies and measures to reduce greenhouse gas emission: Towards a European Climate Change Programme (ECCP)", COM (2000) 88, Working Group Sinks, Subgroup Soils. 50 pp.

IPCC (2000). Land use, land-use change and forestry (LULUCF). Watson, R.T. et al. (Eds). Cambridge University Press. 375 pp.

Lal, R., J.M. Kimble et al. (eds) (1997). Management of carbon sequestration in soil. Advances in Soil Science. CRC Press. Boca Raton, USA. 457 pp.

Le Treut, H. (2001). L'effet de serre ; allons-nous changer le climat ? Flammarion Coll. Dominos. 128 pp.

Robert, M. (2001). Soil carbon sequestration for improved land management. World Soil Resources Report 96. FAO Rome. 57 pp. (traduction sous presse)

Wigley, T.M.L. et D.S. Schimel (eds) (2000). The carbon cycle. Cambridge University Press. 279 pp.

GLOSSAIRE

Annex I: Annex to the UNFCCC which lists the countries or groups of countries (Parties) which have subscribed to quantitative framework commitments on greenhouse gas emissions. These are countries which were OECD members in 1992, member states in the European Union and 11 countries moving towards a market economy.

Arable crops: Cereals, oil seeds and protein-rich legumes.

Baseline: Reference situation from which changes in greenhouse gas emissions are measured, resulting from a project or scenario reducing these emissions.

CAP: Common Agricultural Policy (in French: PAC).

Carbon accumulation: Uptake (temporary and reversible) of carbon in an organic form.

Carbon sink: Ecosystem which accumulates more CO₂ than it releases.

Carbon source: Ecosystem which emits more CO₂ than it accumulates, or human activity emitting CO₂.

Catch crop: Crop grown between rows of a crop of a different species.

Certified Emission Reduction (CER) credits: Quotas for the emission of greenhouse gases which can be exchanged between countries and which allow countries subject to emission quotas to comply with them by purchasing additional credits from other countries.

CO₂ Equivalent: Common unit which can be used to express quantities of greenhouse gases: equivalence is defined based on the Global Warming Potential* of different gases.

Conference of the Parties (CoP): Supreme body of the UNFCCC which brings together signatory countries, usually once a year, to assess the progress of the Convention and propose amendments: it is both an institutional body and a forum for discussion and negotiation. The First Conference of the Parties took place in 1995.

Corine Land Cover: Land use database covering the whole of Europe, built up by exploiting remote sensing data (magnification 250x250 m).

Direct drilling: Sowing without prior tillage of the soil.

ECT: Equivalent Carbon Ton.

Exogenous organic matter (EOM): Organic matter put into the soil but not arising from vegetation in situ. Includes animal waste and waste of urban and industrial origin.

Externalities (or extreme effects): Positive or negative influences, intentional or not, exerted by an agent with respect to other agents, without this benefit or harm being the subject of an evaluation by the market or, consequently, of spontaneous monetary compensation.

Farming practice: Technical procedures or cropping operations implemented on a plot.

Georeferencing of data: Recording of its geographical coordinates enabling its spatial localisation. Allows identification of surfaces concerned by a particular use, and the monitoring of their development.

GIEC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (in English: IPCC).

Global Warming Potential (GWP) : Parameter allowing evaluation of the relative importance of different greenhouse gases: ratio between the warming effect of a gas and that of CO₂, taking account of the time during which this gas remains active in the atmosphere.

Green fertiliser: Crop usually sown between two major crops which is then buried in the soil.

Greenhouse effect: Warming of the atmosphere and surface of the Earth caused by certain gases (greenhouse gases) which absorb the thermal infrared rays emitted by Earth and reflect them partially towards the ground. This effect is a natural phenomenon, but it is reinforced by anthropogenic emissions of greenhouse gases.

Greenhouse gas: Gas which partially absorbs long wavelength rays (infrared) emitted by the Earth's surface and by clouds, which heat the lower levels of the atmosphere. The principal greenhouse bases are: water vapour (H₂O), carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxide or nitrous oxide (N₂O), methane (CH₄), chlorofluorocarbons (CFC), hydrofluorocarbons (HFC), perfluorochemicals (PFC), sulphur hexafluoride (SF₆) and ozone (O₃).

INRA: National Institute for Agricultural Research.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): A group founded in 1988 by the World Meteorological Organisation (WMO) and the United Nations Environment Programme (UNEP) to evaluate the data available on evolutions in the climate and the greenhouse effect, and to supply advice for CoP. It can call upon help from some 2500 experts (in French: GIEC).

Intermediate crop: Plant cover between two successive crops so as to avoid leaving the soil bare during the intercropping period.

Kyoto Protocol: UNFCCC Protocol adopted in Kyoto in 1997: an international agreement on reducing emissions of greenhouse gases which fixes quantified commitments (in CO₂ equivalents) to combat global warming. It will not become regulatory until it has been signed by 55% of the countries listed in Annex 1, representing at least 55% of the total emissions in these countries.

Land Management Contract (LMC) (in French, CTE): French system of aid to farmers, with environmental and socioeconomic objectives (French implementation of the 2nd principle of the CAP).

Livestock Unit (LU): Corresponds to a theoretical animal with energy needs of 3000 fodder units (in French: UGB).

LUCAS: Multidisciplinary simulation and modelling tool ("Land Use Change and Analysis System") to evaluate decisions in terms of land use.

LULUCF: Land Use, Land Use Change and Forestry (in French : UTCF).

Maize silage: Maize for fodder stored in silos (lactic acid fermentation).

MEDD: Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (French Ministry for Ecology and Sustainable Development).

MIES : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (French Interministerial Mission on the Greenhouse Effect).

NFI: National Forestry Inventory (IFN).

PG : Permanent grassland.

RGA : Recensement Général de l'Agriculture (French General Census on Agriculture).

Rhizodeposition: Release of organic matter by roots: exudation of organic components, exfoliation of dead cells.

RMQS : Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (French Network for Soil Quality Measurements). A measurement and observation network of about 2100 points spread throughout France, providing monitoring (every 5 years) of quantitative data on the state of soils in France.

SAU: Surface Agricole Utile (Useful Agricultural Surface).

Sequestration of greenhouse gases: Applied to greenhouse gases, the opposite of emission. Reference is made to CO₂ sequestration but to carbon accumulation (in the form of organic matter) in the soil.

Soil organic matter (OM): decaying remains of all plants and animals.

STH : Surface Toujours en Herbe (area under permanent grass).

TERUTI : Annual statistical survey performed by the French Ministry of Agriculture on the use and occupation of land (550,000 observation points spread over France on a regular grid).

TG: Temporary grassland.

Trophic network: All food chains linking organisms in a biocenosis.

UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change (in French: CCNUCC).

UTCf: Utilisation des Terres, Changements d'affectation des terres et Foresterie (in English: LULUCF).

Waste: Liquid residue, containing solid matter or not, arising from industrial, agricultural or domestic activities.

Win-win: Hypothesis according to which strategies to increase carbon accumulation will also always bring other environmental benefits.

Editor in chief : Claire Sabbagh
Editor of the synthesis : Isabelle Savini
Editorial advisor : Françoise Juille

Cover : Drawing by Daoud Abnane
Lay-out, desktop publishing, printing : ROYER communication graphique

October 2002

Scientific Assessment Unit for Expertise



147, rue de l'Université – 75338 Paris cedex 07 – France
Tel.: 00 33 1 42 75 90 00 – Fax : 00 33 1 47 05 99 66
www.inra.fr

ISBN 2-7380-1054-7