



**HAL**  
open science

## Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Synthèse du rapport d'expertise

Dominique Arrouays, Jérôme Balesdent, J.C. Germon, Pierre-Alain P.-A. Jayet, Jean-François Soussana, Pierre Stengel

### ► To cite this version:

Dominique Arrouays, Jérôme Balesdent, J.C. Germon, Pierre-Alain P.-A. Jayet, Jean-François Soussana, et al.. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Synthèse du rapport d'expertise. [0] INRA. 2002, 32 p. hal-02832661

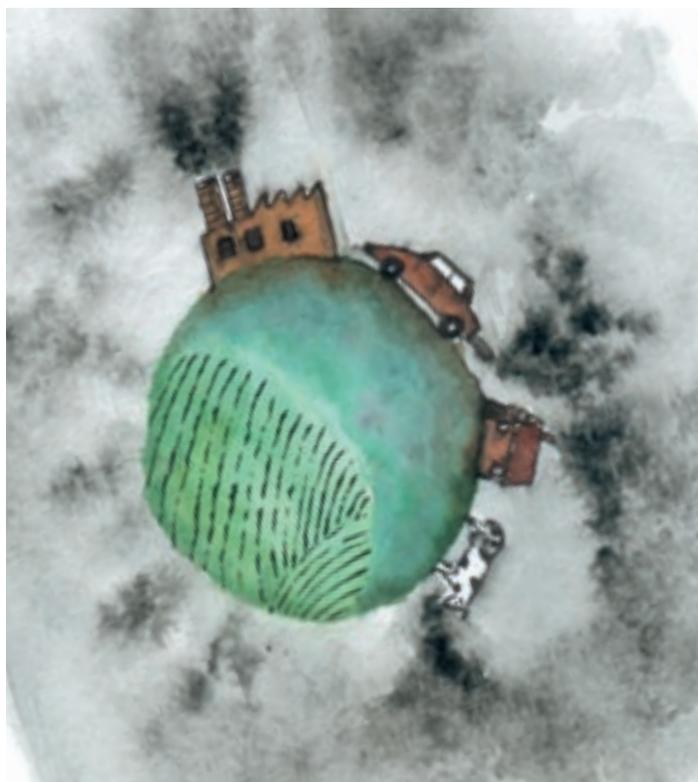
**HAL Id: hal-02832661**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02832661>**

Submitted on 8 Mar 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



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

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. CONTEXTE ET OBJET DE L'EXPERTISE</b>   | <b>3</b>  |
| 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   |           |
| <b>2. STOCKS ET STOCKAGE DE CARBONE DANS LE SOL : ÉTAT DE L'ART</b>  | <b>5</b>  |
| 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   |           |
| <b>3. CRITÈRES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION DES PRATIQUES AGRICOLES<br/>SUSCEPTIBLES D'AUGMENTER LE STOCKAGE DE CARBONE DANS LES SOLS</b>            | <b>9</b>  |
| 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<br>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<br>et pratiques stockant du carbone                                     |           |
| <b>4. EVALUATION DES CHANGEMENTS D'USAGES DU SOL OU DE PRATIQUES AGRICOLES<br/>SUSCEPTIBLES D'AUGMENTER LE STOCKAGE DE CARBONE DANS LES SOLS</b> | <b>11</b> |
| 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   |           |
| <b>5. SCÉNARIOS DE STOCKAGE DE CARBONE À L'ÉCHELLE<br/>DU TERRITOIRE FRANÇAIS MÉTROPOLITAIN</b>  | <b>17</b> |
| 5.1. Méthode   |           |
| 5.2. Potentiel de stockage selon différents scénarios  |           |
| <b>6. COMPTABILISATION ET VÉRIFICATION DU STOCKAGE DE CARBONE</b>  | <b>20</b> |
| 6.1. Les règles d'application des engagements de Kyoto   |           |
| 6.2. Les procédures applicables de vérification du stockage de carbone   |           |
| <b>7. OUTILS DE POLITIQUE ÉCONOMIQUE UTILISABLES POUR PROMOUVOIR<br/>LES PRATIQUES FAVORISANT LE STOCKAGE DE CARBONE</b>                         | <b>23</b> |
| 7.1. Cadre théorique   |           |
| 7.2. Difficultés d'évaluation des coûts et bénéfices du stockage de carbone  |           |
| 7.3. Les mesures incitatives envisageables   |           |
| <b>8. BILAN ET CONCLUSIONS</b>   | <b>27</b> |
| Pour en savoir plus  | <b>30</b> |
| Glossaire  | <b>31</b> |
| Auteurs et éditeurs de l'expertise   | <b>33</b> |

## 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](mailto:arrouays@orleans.inra.fr), [BALESSENT@dsvsud.cea.fr](mailto:BALESSENT@dsvsud.cea.fr), [germon@dijon.inra.fr](mailto:germon@dijon.inra.fr), [jayet@grignon.inra.fr](mailto:jayet@grignon.inra.fr), [soussana@clermont.inra.fr](mailto:soussana@clermont.inra.fr), [stengel@paris.inra.fr](mailto: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 CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>. 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 N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub>).*
- *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\* <sup>1</sup> (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 CO<sub>2</sub> atmosphérique s'est avéré moins fort qu'attendu au vu des émissions de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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" <sup>2</sup>, 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 rétroactifs.

## 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 brutes<sup>3</sup> de GES ont été évaluées à 148 millions de tonnes équivalent carbone<sup>4</sup>, les émissions nettes à 133 MTEC. La contribution des différents GES à ces émissions nettes est de 69% pour le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), 13% pour le méthane (CH<sub>4</sub>), 16% pour le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) 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 CO<sub>2</sub>, notamment du N<sub>2</sub>O 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 CO<sub>2</sub>, estimée à 15 MtC par an.

Les activités agricoles sont à l'origine de :

- 67% des émissions françaises de N<sub>2</sub>O (émissions par les sols agricoles et l'épandage des déjections animales),
- 54% des émissions françaises de CH<sub>4</sub> (fermentation entérique chez les ruminants et épandage des déjections animales).

Les émissions agricoles directes de CO<sub>2</sub> (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, CO<sub>2</sub>), 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 notamment<sup>5</sup> ; 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 métropolitains<sup>6</sup> ;
- 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 CO<sub>2</sub>.

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>) ou, en conditions anaérobies, par fermentation (avec libération de CH<sub>4</sub>). Cette MO peut également être détruite par combustion, qui dégage également du CO<sub>2</sub>.

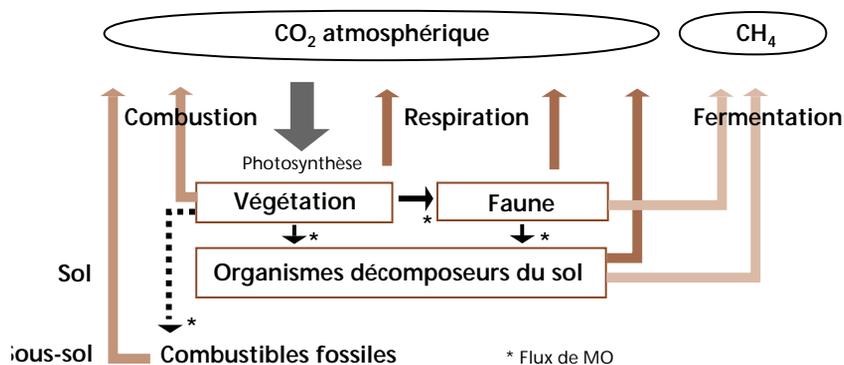


Figure 1. Le cycle du carbone

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  $\text{CO}_2$ . 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  $\text{CO}_2$ .

- **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 :

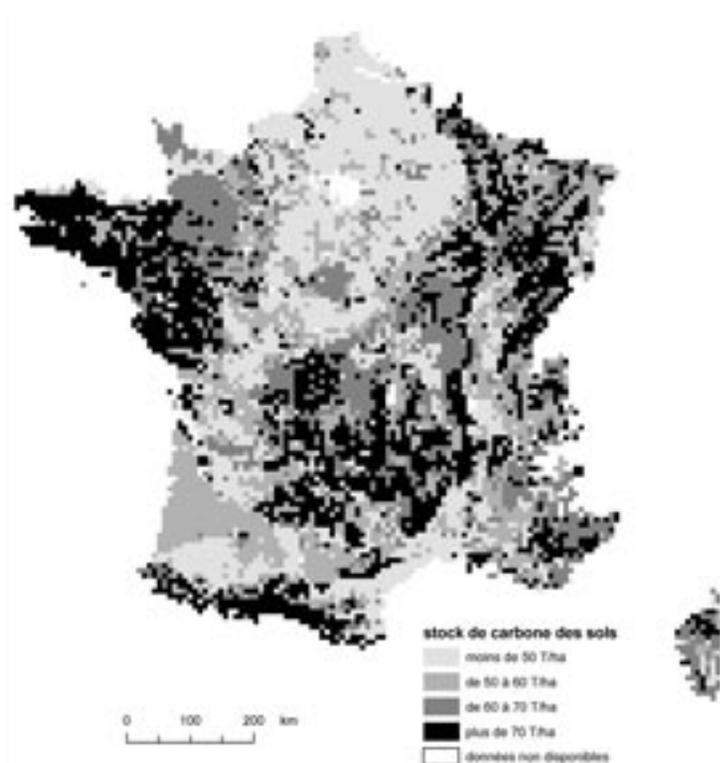
- les sols sous cultures annuelles et cultures pérennes avec sol nu, dont les stocks sont inférieurs à 45 tC/ha. Vignes et vergers, cultures à très faibles restitutions organiques, présentent les stocks les plus faibles : environ 32 tC/ha. Les terres arables sont caractérisées par des stocks assez bas 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 :

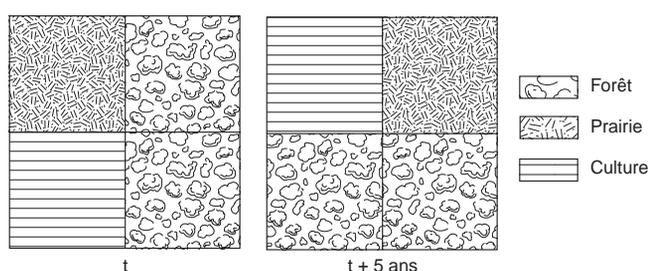
- **non linéaires** : elles sont plus rapides durant les premières années qui suivent l'adoption d'une pratique "stockante". La phase de stockage n'excède généralement pas quelques dizaines d'années. A pratique constante, les stocks tendent vers un palier correspondant à l'installation d'un nouvel équilibre (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 CO<sub>2</sub> 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  $\Delta$  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.

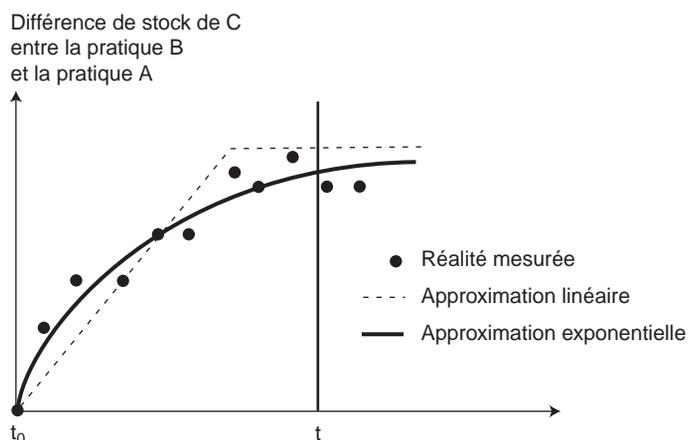


Figure 4. Deux modes d'approximation de la cinétique du stockage de carbone, dans le cas d'une pratique B succédant à une pratique A.

*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  $\Delta$  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  $\Delta$  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  $\text{CH}_4$  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  $\text{CH}_4$  et sont même très vraisemblablement des puits (par la présence de bactéries utilisant le  $\text{CH}_4$ ).

Pour le  $\text{N}_2\text{O}$  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  $\text{N}_2\text{O}$  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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.

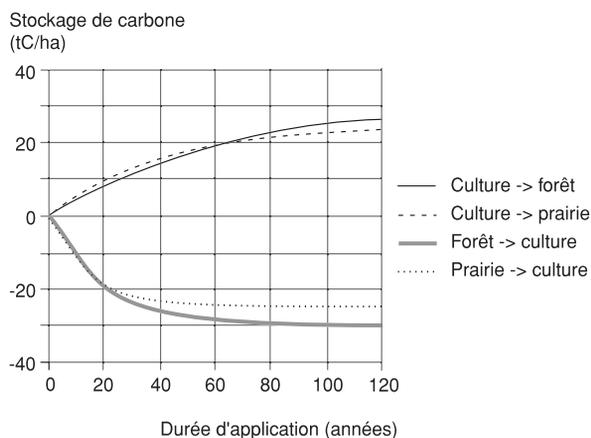


Figure 5. Evolutions du stock de carbone dans le sol associées aux pratiques provoquant les stockages (0,5 tC/ha/an durant les 20 premières années) ou les déstockages (1 tC/ha/an) extrêmes.

*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 N<sub>2</sub>O...) 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 N<sub>2</sub>O et la consommation énergétique ; la réduction du nombre de passages d'engins (interventions phytosanitaires moins nombreuses) permet d'autres économies de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 <sup>7</sup>

##### 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 CH<sub>4</sub> (du fait d'un plus faible chargement animal) et de N<sub>2</sub>O (apports d'azote limités). Pour N<sub>2</sub>O 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 CH<sub>4</sub> par les ruminants, poste important d'émission agricole de GES, et les émissions de N<sub>2</sub>O 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**<br>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) |
|--|---|--|--|---|--|--|
| <b>En terres labourées</b>                                 |   |  |  |   |  |  |
| Non-labour   | peut $\uparrow$ un peu la production<br>$\uparrow$ in peu le taux de conversion de MO en humus  | $\uparrow$ la vitesse (protection accrue de la MO)         | $\uparrow$ l'érosion   | $\uparrow$ l'utilisation de pesticides<br>$\uparrow$ émission de $N_2O$ à confirmer | retenu   | 0,2 $\pm$ 0,13 tC/ha/an                          |
| Restitution des résidus de culture                         | $\uparrow$ le % restitué au sol   | -  |  | -   | se fait déjà ; moins intéressant que la valorisation énergétique | 0  |
| Restitution des effluents d'élevage                        | apport de MO exogène<br>$\uparrow$ la production par effet fertilisant                          | peut $\uparrow$ la vitesse par apport de N                 |  | si apports excessifs  | se fait déjà bilan nul   | 0  |
| Culture intermédiaire (engrais vert)                       | $\uparrow$ la production annuelle et le % restitué (culture non récoltée)                       | -  | $\uparrow$ les fuites de nitrates<br>$\uparrow$ l'érosion    |   | retenu   | 0,16 $\pm$ 0,08 tC/ha/an                         |
| Fertilisation accrue                                       | $\uparrow$ la production  | $\uparrow$   |  | risques de pollution (nitrates, $N_2O$ )  | non retenu   | 0  |
| Irrigation   | peu à gagner en culture déjà intensive  | $\uparrow$ 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<br>$\uparrow$ la production par effet fertilisant                          | $\uparrow$   |  | présence d'éléments traces métalliques (ETM)  | peu de "gisements" de MOE ; négligeable                          | $\epsilon$ en moyenne                            |
| Enherbement des vignes et vergers                          | $\uparrow$ la production annuelle et le % restitué (couvert non récolté)                        | $\uparrow$   | $\uparrow$ l'érosion   | -   | retenu   | 0,49 $\pm$ 0,26 tC/ha/an                         |
| Conversion en prairie permanente                           | $\uparrow$  | $\uparrow$   | $\uparrow$ pollution, $\uparrow$ biodiversité...             | -   | retenu   | 0,44 $\pm$ 0,24 tC/ha/an                         |
| Afforestation  | $\uparrow$  | $\uparrow$   | + stockage dans biomasse ligneuse<br>$\uparrow$ biodiversité | fermeture du paysage  | retenu   | 0,45 $\pm$ 0,25 tC/ha/an                         |
| <b>En prairies</b>   |   |  |  |   |  |  |
| $\uparrow$ de la durée des PT* + intensification raisonnée | $\uparrow$  | $\uparrow$   |  | -   | retenu   | 0,1 à 0,5 $\pm$ 0,25 tC/ha/an                    |
| Conversion de PT en PP* à intensification $\geq$           | $\uparrow$  | $\uparrow$   | $\uparrow$ biodiversité<br>$\uparrow$ pollutions             | -   | retenu   | 0,3 à 0,4 $\pm$ 0,25 tC/ha/an                    |
| Intensification modérée des PP pauvres                     | $\uparrow$ la production  | -  |  | -   | retenu hors montagne et zone humide                              | 0,2 $\pm$ 0,25 tC/ha/an                          |
| Afforestation  | $\uparrow$  | $\uparrow$   | + stockage dans biomasse ligneuse                            | fermeture du paysage  |  | Moins de 0,1 tC/ha/an                            |
| Implantation de haies                                      | $\uparrow$  | $\uparrow$   | $\uparrow$ biodiversité<br>$\uparrow$ l'érosion...           | -   | retenu mais effet très variable                                  | 0,1 $\pm$ 0,05 tC/ha/an                          |

\*\* les italiques signalent les effets nuls 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 N<sub>2</sub>O.

### 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 CO<sub>2</sub> 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<br>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<br>- à partir de terres labourées.....<br>- sur 80% de friches et prairies et 20% de terres labourées.....<br>(le rythme actuel d'accroissement des surfaces boisées est de 80 000 ha/an) | .....0,15 à 0,40 MtC/an<br>.....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.....<br>(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 adventices et ravageurs<br>Contraintes liées au sol, compactage   | Base : 18 Mha de terres cultivées adoption progressive, en 20 ans, sur 20 à 50% des cultures.....<br>+ hypothèse d'un labour tous les 4 ans...   | .....0,4 à 1 MtC/an<br>.....0,23 à 0,58 MtC/an   | Très difficile hors système de déclaration                   | D'autant + facile que la surface en semis direct est importante<br>Problème de la base line |
| Implantation de cultures intermédiaires                | 0,16 tC/ha/an  | Interculture assez longue (avant semis de printemps)<br>Concurrence pour l'eau avec la culture suivante<br>Organisation du travail<br>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  |

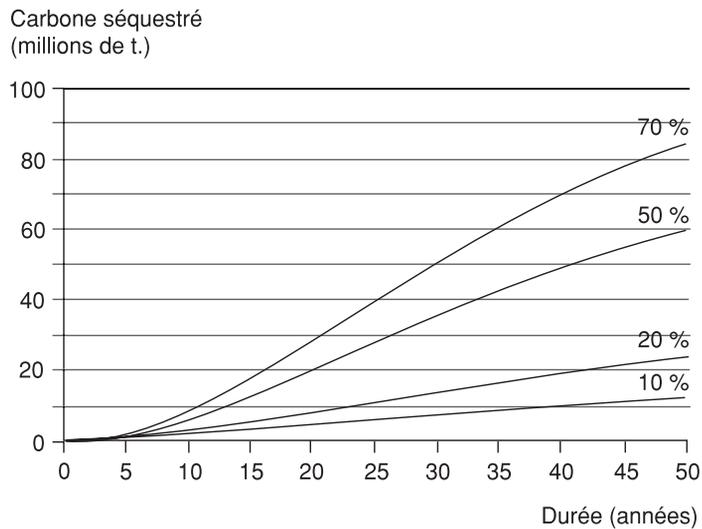


Figure 6. Simulation du stockage additionnel de C dans les terres arables françaises sous hypothèse d'une conversion progressive au semis direct en 20 ans.

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 CO<sub>2</sub>

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 CO<sub>2</sub> 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  |
| Utilisation du territoire agricole des exploitations | Occupation du territoire                                       | 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 |
| Nombre/nature des classes                            | 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   |
| Fréquence Dates                                      | 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                                |
| Echelle d'acquisition Résolution                     | 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                          |
| Agrégation Information disponible                    | 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   |
| Géo-référencement                                    | Exhaustif  | Exhaustif                          | Exhaustif   | Uniquement sur échantillon   | Uniquement sur échantillon                                 | Non   | Non  | Uniquement sur déclarations CTE                                 |
| Matrice de transition                                | 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 CO<sub>2</sub>.

→ 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 N<sub>2</sub>O, 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 CO<sub>2</sub> 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 (N<sub>2</sub>O notamment) induites par l'adoption des pratiques favorisant le stockage de C, qui seraient à déduire de la séquestration de CO<sub>2</sub>.
- 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 CO<sub>2</sub> 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 N<sub>2</sub>O. 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 N<sub>2</sub>O 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 CO<sub>2</sub>, 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<sup>e</sup> 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 CO<sub>2</sub>** : 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 (H<sub>2</sub>O), le gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), le méthane (CH<sub>4</sub>), les chlorofluorocarbonés (CFC), les hydrofluorocarbonés (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) et l'ozone (O<sub>3</sub>).

**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 micro-organismes 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 CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>) 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, mais de stockage de C (sous forme de matière organique) dans les sols.

**Source de carbone** : Ecosystème qui émet davantage de CO<sub>2</sub> qu'il n'en séquestre, ou activité humaine émettrice de CO<sub>2</sub>.

**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](http://www.inra.fr)

ISBN 2-7380-1054-7