

# STOCKAGE NATUREL DU CARBONE :

## Etat des lieux des connaissances et estimations régionales

### Rapport technique

Octobre 2008



# Sommaire

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>4</b>
<b>PARTIE 1 : DONNEES GENERALES.....</b>	<b>5</b>
<b>1. CONTEXTE POLITIQUE ET SCIENTIFIQUE .....</b>	<b>5</b>
<b>2. LES PRINCIPAUX RESERVOIRS DE LA PLANETE .....</b>	<b>6</b>
<b>3. QUELQUES DEFINITIONS .....</b>	<b>7</b>
<b>4. LES FACTEURS IMPACTANT LE STOCKAGE DE CARBONE.....</b>	<b>9</b>
4.1. LES MECANISMES D'INSTABILITE .....	9
4.1.1. <i>Le cycle du carbone</i> .....	9
4.1.2. <i>Rythme de stockage et durée</i> .....	10
4.2. L'EFFET CLIMATIQUE SUR LE CYCLE .....	10
4.2.1. <i>Dans le puits biosphérique</i> .....	10
4.2.2. <i>Dans le puits lithosphérique</i> .....	11
4.3. L'EFFET DES PRATIQUES AGRICOLES SUR LE CYCLE .....	12
4.3.1. <i>Changement d'utilisation des sols</i> .....	12
4.3.2. <i>Les pratiques agricoles</i> .....	13
4.3.3. <i>Tableaux récapitulatifs</i> .....	14
<b>PARTIE 2 : ESTIMATION DES STOCKS DE CARBONE EN BOURGOGNE.....</b>	<b>16</b>
<b>1. ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE.....</b>	<b>16</b>
1.1. LE RESERVOIR « BOIS ET FORET » .....	16
1.2. LE RESERVOIR « SOLS » .....	17
1.3. LES STOCKS DE CARBONE REGIONAUX : RESULTATS .....	18
<b>2. ESTIMATION DES FLUX DE CARBONE ANNUELS .....</b>	<b>18</b>
2.1. LES FLUX DU RESERVOIR « FORET ».....	18
2.2. LES FLUX LIES AU CHANGEMENT D'OCCUPATION DES SOLS.....	20
2.2.1. <i>Variations mesurées</i> .....	20
2.2.2. <i>Evaluation théorique</i> .....	20
2.3. LES FLUX DUS AUX PRATIQUES CULTURALES.....	22
2.4. LES FLUX DUS AUX AMENDEMENTS ORGANIQUES .....	22
2.5. LES FLUX DES AUTRES PUIITS BIOSPHERIQUES .....	23
<b>3. RECAPITULATIF DES ESTIMATIONS.....</b>	<b>23</b>
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>25</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>26</b>

Remerciements : Bernard Nicolardot (ENESAD) ; Marie-Sophie Petit (CRAB) ; Annie Duparque (Agro-transfert Picardie) ; Arnaud Vautier (CA58) ; Nicolas Saby (INRA Orléans) ; Dominique Degueurce et Xavier Migieu (DRAF)

## INTRODUCTION

---

Faire le bilan des émissions nettes de GES au niveau régional, c'est en estimer les « sorties » ou émissions par grand système et les « entrées » ou stockage dans les milieux naturels ou artificiels. Les connaissances sur les mécanismes naturels de stockage sont encore insuffisantes. Cependant, les estimations faites par l'INRA<sup>1</sup> nous indiquent qu'elles ne sont pas négligeables : des pratiques favorables contribueraient à limiter de 1 à 2 % les émissions de GES. En dehors des milieux marins, les milieux agricole et forestier sont les principaux secteurs pouvant stocker naturellement du carbone, dans les végétaux et dans les sols. La matière organique du sol est un compartiment essentiel, mais c'est une forme très instable en perpétuelle évolution. Examiner les facteurs d'instabilité conduit à détecter des pistes d'actions pour réduire nos émissions ou nos pertes de GES. Le premier facteur d'instabilité est le changement brutal de couverture des sols (déforestation, retournement de prairies) ; le déstockage est alors plus rapide que le stockage. Viennent ensuite les pratiques agricoles et sylvicoles qui peuvent contribuer à maintenir ou non une capacité de stockage.

L'objet de cette étude est de compléter le bilan des émissions de GES réalisé tous les 4 ans par ALTERRE BOURGOGNE, avec une réactualisation des estimations de stockage de carbone. Pour ce faire, elle fera le point des dernières connaissances sur le stockage du carbone et des derniers débats scientifiques. Malgré les interactions entre cycle du carbone et cycle de l'azote, l'étude se limitera au stockage de carbone (CO<sub>2</sub>), du fait de l'absence de connaissances (et de coefficients) sur le stockage des autres GES. Elle s'efforcera d'identifier et d'explicitier les techniques favorables à ce stockage.

---

<sup>1</sup> « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? » Expertise scientifique collective – rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du ministère de l'Ecologie et du Développement durable – octobre 2002

# PARTIE 1 : DONNEES GENERALES

---

## 1. CONTEXTE POLITIQUE ET SCIENTIFIQUE

La maîtrise des émissions de GES est une priorité inscrite dans le Protocole de Kyoto entré en vigueur en février 2005. Parmi les signataires, l'UE devra baisser ses émissions de 8 % pendant la période 2008-2012 sur la base de 1990. En fonction des redistributions par pays, cela s'est traduit pour la France par une obligation à stabiliser ses émissions sur cette période. Mais l'engagement politique sur le long terme est plus ambitieux pour la France : diviser par 4 les émissions de GES d'ici 2050 pour lutter contre le réchauffement climatique. L'engagement de l'UE sur le long terme est plus modéré : réduire de 30 à 50 % les émissions de GES d'ici 2020. Quoiqu'il en soit, l'effort de tous, états, collectivités et citoyens, est sollicité. Il porte essentiellement sur les consommations de carburants et combustibles d'origine fossile par les transports et les logements.

Un autre axe de la maîtrise des émissions de GES a été exprimé dans le Protocole de Kyoto : le stockage (appelé aussi « séquestration ») de carbone dans les réservoirs naturels, tels que les sols et la végétation. Il est rappelé aux parties signataires de prendre en considération les incidences de leurs activités de boisement, reboisement et déboisement (BRD), ainsi que de leurs autres activités relatives à l'utilisation et du changement d'affectation des terres. Le dernier rapport du GIEC (2007) considère que la séquestration du carbone dans les sols constitue le mécanisme ayant le plus fort potentiel de réduction des émissions du secteur agricole. La part des émissions de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O des sols contribuerait dans une moindre mesure (respectivement 9 % et 2 %) à ce potentiel de réduction théorique.

Les **évaluations du stock** mondial de carbone montrent l'importance stratégique de préserver le fonctionnement des puits de carbone : l'accumulation de carbone dans les sols « absorbe » 1/4 de nos émissions de CO<sub>2</sub>. Bien qu'instable, le stockage dans les sols représente un tonnage plus fort que celui de l'atmosphère et de l'ensemble de la végétation réunis. Un puits de carbone peut se transformer en source, sous l'influence de phénomènes climatiques, anthropiques ou naturels. La matière organique est l'élément clé du cycle du carbone dans le sol et toute action visant à stabiliser ou accroître la teneur de la matière organique des sols sera favorable au stockage de carbone avec, de plus, des effets bénéfiques sur la fertilité, la rétention en eau et la préservation de la biodiversité.

**L'évolution de la capacité de stockage** des systèmes naturels reste encore très mal connue. Le temps de stockage dans le sol et les végétaux est relativement court rendant le stockage précaire<sup>2</sup>. Le puits biosphérique est fragile : il est connu que la biosphère peut évoluer rapidement sous l'influence des conditions climatiques (réchauffement, humidité), ainsi que sous l'effet de l'activité humaine (déforestation, feux de forêts). Les variations interannuelles des flux de carbone stockés dans la biosphère sont de l'ordre de 5 Gt C, ce qui en fait la cause principale des variations interannuelles de stocks de carbone dans l'atmosphère. De plus, le stockage dans la biosphère n'est que provisoire, et le support de stockage doit être en permanence remplacé, à une vitesse correspondant au temps de vie de la végétation.

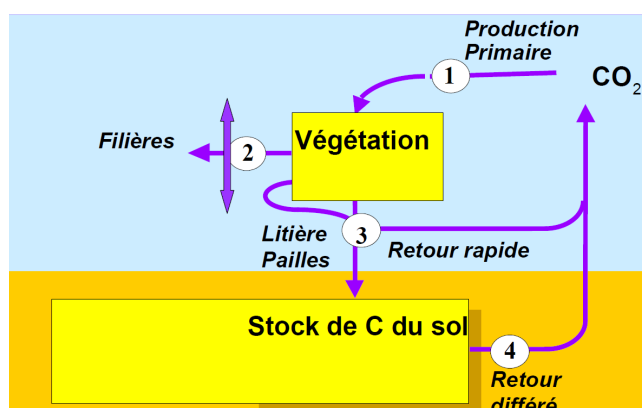
Malgré un manque de connaissances sur le cycle du carbone dans les sols souligné par les chercheurs, il est de plus en plus reconnu que la gestion des sols et de leur couverture joue un rôle dans l'atténuation (ou l'amplification) du changement climatique et dans l'adaptation à ce phénomène. Des travaux récents de l'INRA ont montré qu'en France, le potentiel maximal de stockage additionnel de carbone pourrait être de 1 à 3 millions de tonnes de carbone par an sur une durée de 20 ans<sup>3</sup>. Cela suppose l'adoption de pratiques favorables. Ce sont tout de même 1 à 2 % des émissions de GES qui pourraient ainsi être contrôlées.

---

<sup>2</sup> « Le Cycle perturbé du carbone », P. Monfray

<sup>3</sup> « Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols en France ? », expertise scientifique collective réalisée par l'INRA – octobre 2002

La gestion du carbone est résumée comme suit par D. ARROUAYS de l'INRA d'Orléans :

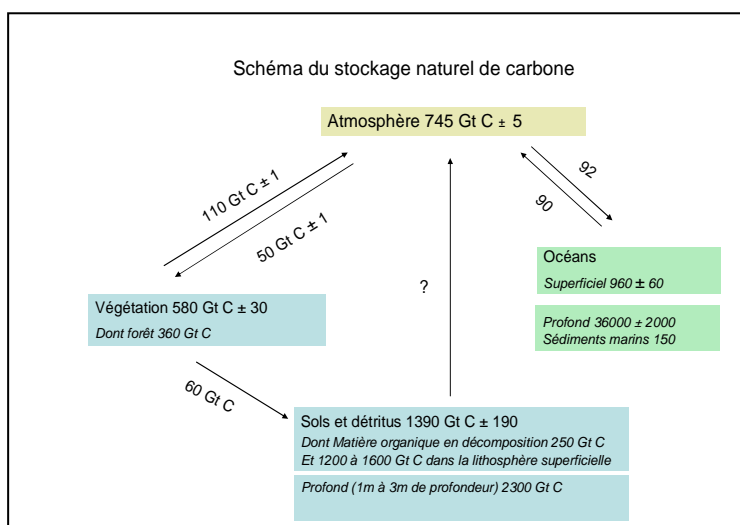


L'enjeu de la maîtrise des émissions de GES de la bio-lithosphère apparaît à plusieurs niveaux :

1. Favoriser la production primaire : couvert végétal long (prairie, forêt, boisement...), moins de sols nus et plus de couverture végétale pendant l'interculture par exemple ;
2. Maîtriser les émissions de GES dans les filières (agrocarburant, production animale intégrant les prairies, cultures alimentaires, bois d'œuvre, bois énergie...) ;
3. Eviter le retour rapide des litières ou destruction des végétaux : interdiction du brûlage des pailles, lutte contre les incendies de forêt, incorporation des matières organiques et paille dans le sol...
4. Différer au mieux le retour du carbone du sol : pratiques agricoles contribuant au maintien du taux de matière organique dans les sols (apports d'amendements organiques animaux et urbains, engrais verts, allongement de la durée des prairies...), limiter les pratiques accélérant la décomposition de la matière organique (travail minimum du sol, retournement de prairies ou drainage de zones humides, priming...).

## 2. LES PRINCIPAUX RESERVOIRS DE LA PLANETE

Les principaux réservoirs naturels capables d'échanger du carbone sur une échelle courte sont l'atmosphère, l'océan et surtout la biomasse continentale (végétaux et sols). Le réservoir « sols et détritux » représente les sols sur 1 m de profondeur. Les flux entre le carbone organique des sols et l'atmosphère sont importants, et peuvent être positifs (séquestration) ou négatifs (émission de CO<sub>2</sub>)<sup>4</sup>. Les autres grands réservoirs (sédiments et roches) n'échangent du carbone que sur une période géologique.



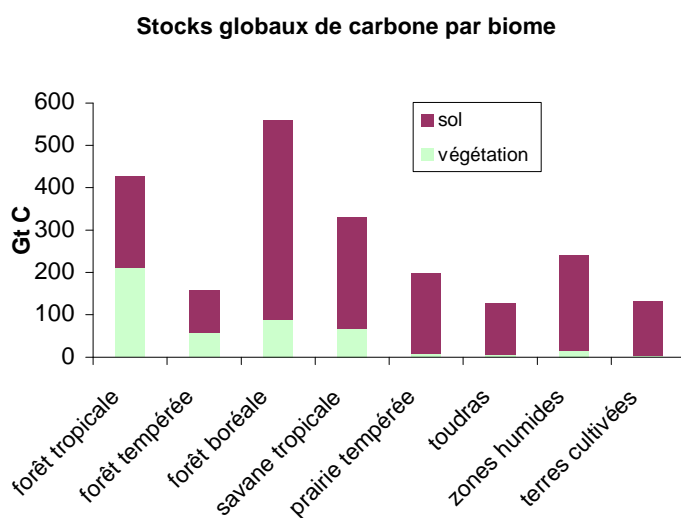
(GR : d'après IPCC 2000)

<sup>4</sup> « La Séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres », FAO – 2003

Les données utilisées par l'IPCC (2000), bien que très approximatives, permettent d'évaluer le rôle des écosystèmes terrestres. On estime que les sols, jusqu'à 1 m de profondeur, renferment plus de carbone que l'atmosphère et la végétation réunies. Le temps moyen de résidence du carbone dans le sol s'accroît fortement dans les couches profondes.

Les estimations des quantités de carbone stockées dans les différents « réservoirs » de la nature au niveau mondial montrent que les océans profonds constituent l'essentiel du stockage carbone. Ce stockage n'est pas statique et les échanges, ou flux, évoluent avec la température. Le danger d'acidification des océans du fait de l'augmentation des teneurs en CO<sub>2</sub> de l'air et donc de l'absorption de CO<sub>2</sub> par les eaux est évoquée par les scientifiques comme un risque majeur.

NB : 1 gigatonne de carbone (GtC) = 10<sup>12</sup> tonnes de carbone



*Biome = ensemble d'écosystèmes*

Aux latitudes moyennes et élevées, les stocks de carbone du sol sont bien plus grands dans les écosystèmes non forestiers (IPCC 2000).

Précautions :

Des incertitudes considérables pèsent sur les chiffres et sur la délimitation des biomes. Il ne s'agit là que d'estimations permettant d'identifier les réservoirs les plus importants.

### 3. QUELQUES DEFINITIONS

**Stockage, séquestration, capture, piégeage** : on s'entend à utiliser les mots de stockage ou de séquestration lorsqu'on fait référence à des réservoirs et des mécanismes naturels, et plutôt de piégeage ou de capture lorsqu'on évoque des technologies visant à créer des réservoirs artificiels. Les deux sujets sont travaillés au GIEC et ont fait l'objet d'un rapport chacun. On parle plus précisément de séquestration quand il s'agit d'augmenter le stockage.

**Le cycle du carbone** : c'est l'ensemble des transformations qui affecte le devenir du carbone dans les écosystèmes. Le passage d'une phase à une autre est régi par un ensemble de réactions chimiques (ou biochimiques). Le cycle peut être de type biologique, lorsque le carbone est stocké par différents supports biologiques, y compris ceux du sol qui font intervenir les micro-organismes, ou géochimique pour le carbone stocké dans les roches et combustibles fossiles (phase ultime d'une dégradation biologique) et qu'aucun organisme biologique n'intervient dans la réaction. La compréhension de ce cycle permet de « décoder » les effets des pratiques (labour, engrais verts...).

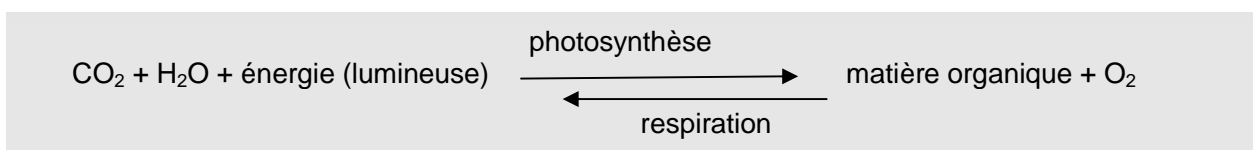
**Puits de carbone** (de l'anglais *carbon sink*) : lieu de capture et de stockage du carbone. Il peut s'agir des roches, des océans, des plantes et des sols. La durée de stockage est plus ou moins longue avant recyclage (quelques années pour les prairies, quelques décennies à quelques siècles pour l'humus du sol ou une forêt, plusieurs centaines de millions d'années pour la séquestration par les roches calcaires avant déstockage par désagrégation et érosion).

**Source de carbone** : lieu d'émission ou de libération du carbone. Ce terme est utilisé pour mettre en évidence la réversibilité du stockage et montrer qu'un puits de carbone peut se transformer en source sous certaines conditions naturelles (minéralisation de la matière organique, décomposition des composés organiques) et/ou anthropiques (incendie de forêt, déforestation, retournement de prairies). Ce sont donc les puits/sources qui sont étudiés dans le cadre de bilan des GES pour tenter de limiter les émissions.

**Le puits biosphérique** est constitué de l'ensemble du carbone piégé dans la biosphère sous forme de matière organique vivante. En fait la biosphère désigne l'ensemble des compartiments où s'est développée la vie : atmosphère, lithosphère et hydrosphère. La notion de puits biosphérique se limite aux vies développées dans l'atmosphère (organismes végétaux et animaux). Le carbone animal et végétal est sous forme réduite. L'ordre de grandeur de la quantité de carbone stockée annuellement dans la biosphère est 1 à 10 Gt C. Suivant les auteurs, ces estimations varient de manière importante.

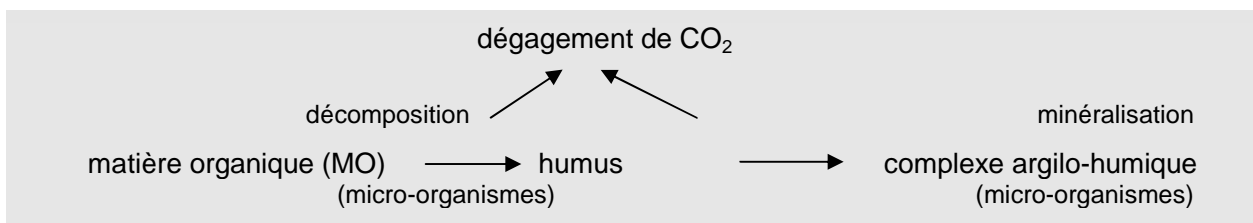
**Le puits lithosphérique ou édaphique** est constitué de l'ensemble du carbone stocké dans la lithosphère. Alors que la lithosphère désigne l'ensemble terre et roches des sols et sous-sols, on restreint souvent la notion de puits lithosphérique à celle qui interagit avec l'atmosphère et les végétaux, c'est-à-dire la partie superficielle des sols<sup>5</sup>. Le carbone est stocké sous forme de matière organique issue des déchets végétaux et animaux (en incluant les micro-organismes du sol et la litière végétale sous forêt) et sous forme minérale. Plus en profondeur, du carbone est également stocké, essentiellement sous forme minérale (hydrocarbures et gaz). Le stockage s'opère sur une durée moyenne allant de quelques dizaines à quelques centaines d'années.

**Respiration et photosynthèse** : La respiration de tous les organismes vivants, y compris les micro-organismes, rejette du CO<sub>2</sub>. La photosynthèse est le fait des végétaux chlorophylliens, et fonctionne comme une pompe à CO<sub>2</sub>.



Les mécanismes de respiration et de photosynthèse sont responsables des énormes flux de carbone entre l'atmosphère et la biosphère : ces flux sont dix fois plus importants que les émissions dues à la combustion des matières fossiles. Cependant les flux biosphériques responsables des fortes variabilités inter saisonnières et annuelles des concentrations en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère produisent en moyenne **un bilan net nul**.

**Matière organique, décomposition, minéralisation** : lorsque les organismes vivants, plantes et animaux meurent, ils se décomposent en matière organique complexe, appelée aussi **humus**, sous l'action de micro-organismes, soit au contact de l'air (décomposition aérobie) pour donner essentiellement du CO<sub>2</sub>, soit en l'absence d'air (décomposition anaérobie, fermentation) en dégageant du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub>.



<sup>5</sup> « Le Cycle du carbone et le changement climatique », Atelier changement climatique 2003-2004 – FAO



Actuellement, on retient que la biomasse microbienne représente 1 à 5 % de la matière organique totale. La matière organique se mélange ensuite et s'associe aux composants minéraux du sol. Sa composition chimique évolue plus ou moins lentement, toujours sous l'action de micro-organismes jusqu'à la séparation finale entre partie minérale et partie gazeuse ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ...). La température et l'humidité interviennent dans l'équilibre de ces réactions biochimiques complexes : un réchauffement et une bonne humidité accélèrent l'activité des micro-organismes et donc la décomposition de la matière organique, d'où une augmentation de dégagement de  $\text{CO}_2$ . La destination de ce dégagement (air, sol, eau) est mal connue. Mais la taille des particules de matière organique et la force de l'association avec le minéral interviennent aussi : La matière organique est soit libre, soit associée à des agrégats de taille plus ou moins importante. Plus la matière organique sera intimement associée à la phase minérale du sol, plus le temps de résidence du « complexe argilo-humique » dans le sol sera élevé et offrira une stabilité au carbone emprisonné. On parle aussi de « compartiments » de la matière organique pour qualifier les différents types d'agrégats organo-minéraux ou des matières organiques du sol. Ce fonctionnement physico-chimique complexe est fondamental pour appréhender les flux de carbone.

**L'effet priming** : c'est la stimulation de la minéralisation de la matière organique du sol par l'apport de matière organique fraîche. Des recherches sont actuellement menées pour mieux comprendre ce phénomène à différentes profondeurs de sol.

## 4. LES FACTEURS IMPACTANT LE STOCKAGE DE CARBONE

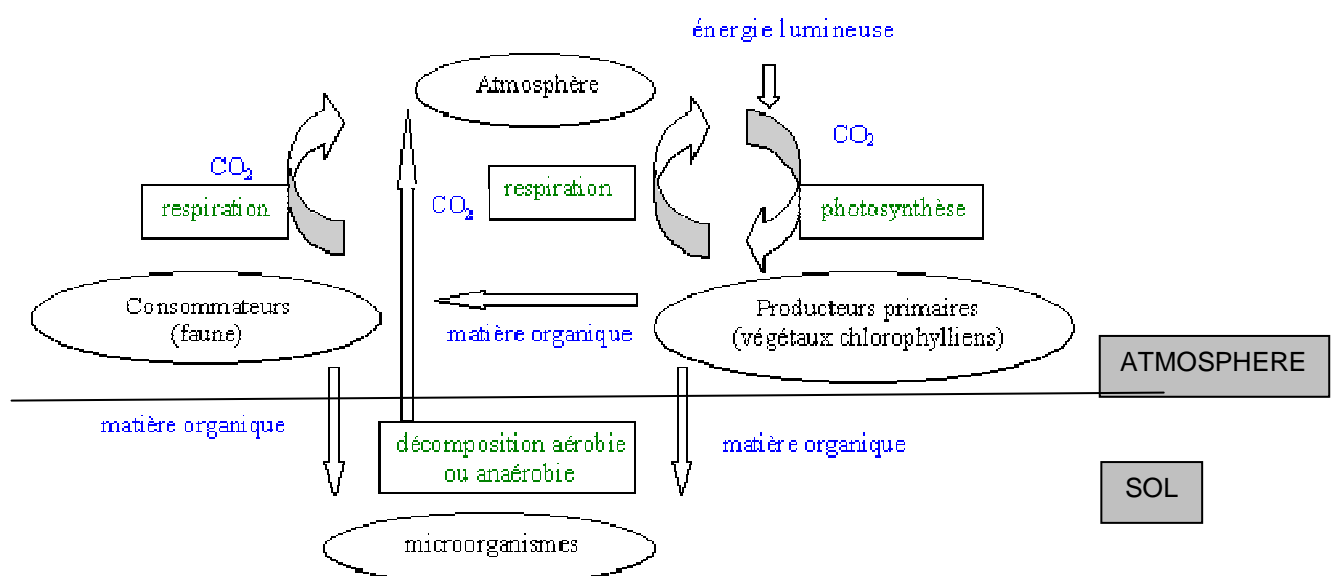
Le stockage du carbone dans le sol et les végétaux est temporaire. Comme dans tout cycle biologique, différents facteurs, climatiques, écosystémiques et anthropiques, expliquent le passage entre les différentes phases. Mais il reste encore de nombreuses inconnues. De plus, les 2 cycles biologiques, carbone et azote, sont interdépendants, bien que leurs interactions soient encore mal identifiées.

### 4.1. Les mécanismes d'instabilité

#### 4.1.1. Le cycle du carbone

Les mécanismes qui régissent le cycle du carbone au niveau de la biosphère sont la photosynthèse, la respiration et la décomposition de matière organique (voir définitions).

Ces mécanismes peuvent être résumés dans le schéma<sup>6</sup> suivant :

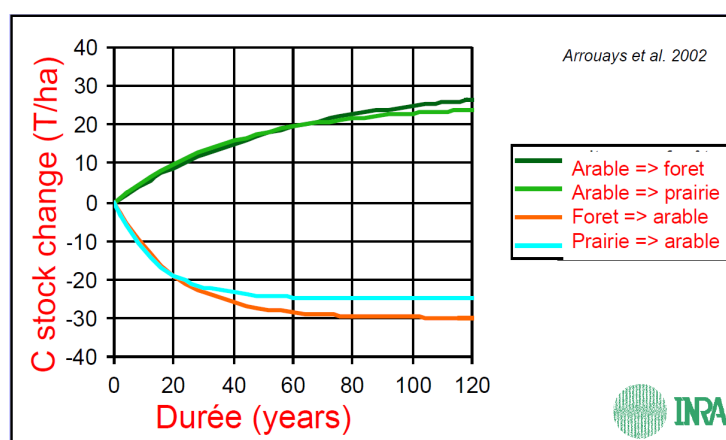


<sup>6</sup> « Le Cycle du carbone et le changement climatique », Michael HUHE, Patricia PESUDO, Floriane TORCHIN – Atelier changement climatique, ENPC – 2003-2004

La fabrication de matière organique vivante par photosynthèse est l'élément clé du stockage de carbone (forestation, enherbement...). Mais sa destruction peut être très rapide (incendie de forêt, retournement de prairies...).

Les phénomènes de stockage et déstockage sont plus complexes lors de la décomposition de la matière organique par les micro-organismes et la microfaune. Les principaux facteurs jouant sur l'évolution de la matière organique concernent la végétation (exportation ou restitution de la biomasse produite, composition de la plante et teneur en lignine), les pratiques de travail du sol et d'entretien de sa fertilité, puis les facteurs climatiques (température, conditions d'humidité) et les propriétés des sols (texture, teneur en argile, minéralogie, acidité) et enfin les micro-organismes (effet priming).

#### 4.1.2. Rythme de stockage et durée



**Les rythmes de stockage et de déstockage sont non linéaires et dissymétriques.** Ils s'échelonnent sur une durée plus ou moins longue selon le type de couvert végétal : une vingtaine d'années pour les cultures, 70-80 ans pour les prairies et quelques siècles pour la forêt. Le déstockage de carbone dans le sol est plus rapide que le stockage. 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. L'abandon ou l'interruption de pratiques « stockantes » se traduit le plus souvent par un déstockage rapide. On a donc tendance à surestimer le stockage dans les estimations moyennes.

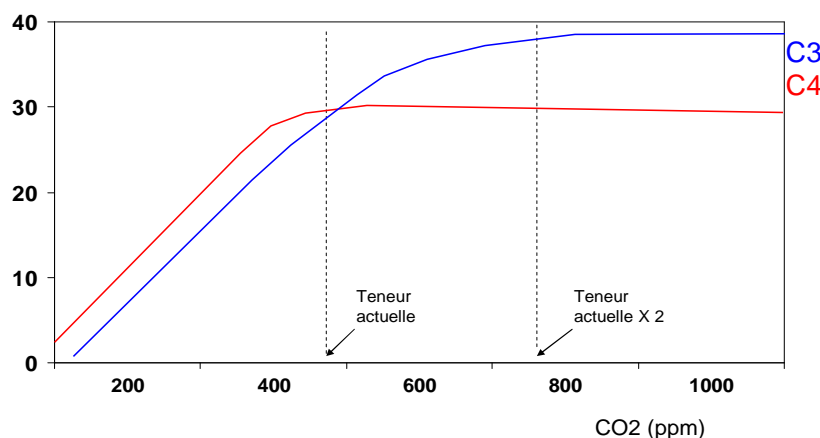
## 4.2. L'effet climatique sur le cycle

### 4.2.1. Dans le puits biosphérique

Les vitesses de réaction augmentent généralement avec la température. Ceci est notamment le cas pour les réactions de photosynthèse, de respiration et de décomposition. Avec l'hypothèse d'un doublement du CO<sub>2</sub> atmosphérique, on estime que l'activité photosynthétique des plantes serait stimulée de 20 à 30 %, soit une assimilation de 10 à 20 %. Il en résulterait un accroissement de la biomasse des plantes, en condition de bonne alimentation en eau et en éléments nutritifs, et en l'absence de stress thermique. Les plantes dites en C3 (majoritairement cultivées dans les zones tempérées) répondent mieux à ces augmentations de teneur que les plantes en C4 (maïs, sorgho, canne...).

Influence de la concentration en CO<sub>2</sub> sur la photosynthèse des plantes en C3 et en C4

Photosynthèse  
( $\mu\text{mole M}^2/\text{s}$ )



D'après B. SEGUIN, INRA

Mission « Changement climatique et effet de serre »

#### 4.2.2. Dans le puits lithosphérique

Les faibles températures inhibent plus l'activité des micro-organismes que la photosynthèse. Ainsi, la décomposition de la matière organique est plus ralentie que le stockage brut de carbone (par photosynthèse) dans la matière organique en années froides, et également dans des sols à forte humidité (zones humides). **Le puits litho-biosphérique effectue donc un stockage net de carbone plus important les années froides que les années chaudes.** A l'inverse, l'impact climatique de l'été exceptionnel 2003 a été estimé en Europe : il y aurait eu une perte de 0,5 Gt C sur toute l'Europe, correspondant à 4 ans de stockage de carbone dans les forêts et les sols. (CIAIS et als., 2005).

Des mesures précises réalisées en Grande Bretagne depuis 25 ans ont permis d'estimer les pertes de carbone dans les sols britanniques. BELLAMY et al. (2005) ont estimé les pertes entre 2 et 6 g/kg de sol et par an. Ce seraient ainsi quelques 13 millions de tonnes de gaz carbonique perdus chaque année, soit près de 10 % des émissions industrielles de ce pays, ou encore l'équivalent de la réduction annuelle des émissions entre 1990 et 2002<sup>7</sup>. Les chercheurs attribuent ce phénomène au réchauffement climatique de 0,5 °C survenu en Grande Bretagne pendant la période considérée. Cela pose plus généralement la question de l'influence du climat sur le cycle du carbone dans les sols, mais aussi de l'action à mener en faveur de la rétention de la matière organique des sols. Des résultats analogues sur prairies de semi-montagne viennent confirmer ces travaux<sup>8</sup>.

Mais par ailleurs, le stockage de carbone en profondeur est stable du fait de l'absence de substrat fournisseur d'énergie (absence de litière végétale) nécessaire à l'activité des micro-organismes.<sup>9</sup>

<sup>7</sup> BELLAMY et al. – rapporté dans *Nature* du 8 septembre 2005 par Réseau Action Climat France « L'Effet de serre se nourrit jusqu'au sol »

<sup>8</sup> « Caractéristique des stocks de carbone organique de sols prairiaux de semi-montagne gérés en agriculture conventionnelle et biologique » G. ALVAREZ, L. ANDANSON, N. VASSAL, ENITA Clermont-Ferrand

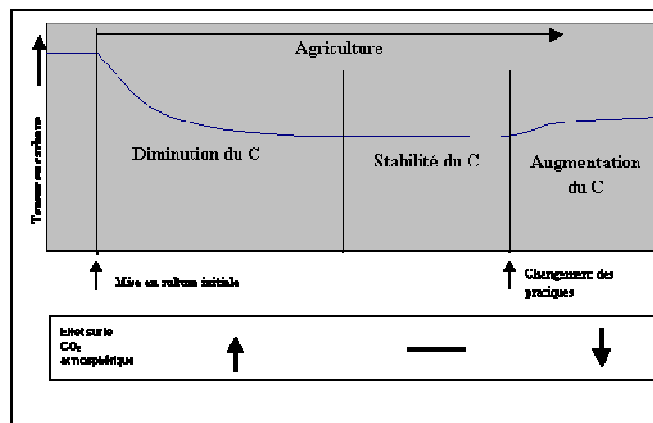
<sup>9</sup> « Stability of organic carbon in deep layers controlled by fresh carbon supply », *Nature*, 8 novembre 2007 – S. FONTAINE, S. BAROT, P. BARE, N. BDIU, B. MARY, C. RUMPEL

### 4.3. L'effet des pratiques agricoles sur le cycle

Toute modification de la gestion des terres a pour effet de perturber le cycle du carbone. Par exemple, lorsque les forêts et les prairies naturelles sont défrichées pour faire place à l'agriculture, une grande quantité de la matière organique est transformée en  $\text{CO}_2$  et relâchée dans l'atmosphère. Puis, quand le sol est cultivé pendant quelques décennies, les quantités stockées dans le sol se stabilisent à nouveau<sup>10</sup>. Pour un sol déterminé soumis à une pratique constante, un pseudo équilibre est atteint pour le contenu en matière organique du sol après 30 ou 50 ans (Greenland, 1995).

#### Effet de la gestion des terres agricoles sur les quantités de carbone du sol

Source : adapté de R.L. Desjardins dans « *La santé de l'air que nous respirons, vers une agriculture durable au Canada* », Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale de la recherche, 1998.



#### 4.3.1. Changement d'utilisation des sols

Le changement de pratiques est un des risques majeurs d'augmentation d'émission de GES de la bio-lithosphère. Les travaux de l'INRA<sup>11</sup> montrent une très grande variabilité entre pratiques et des impacts par pratique. Retenons cependant quelques grands principes<sup>12</sup> :

- **Le déstockage consécutif à un changement de pratique** (retournement de prairie) est d'à peu près 1 t C/ha/an, alors que le stockage de carbone des sols est en moyenne de 0,5 t C/ha/an durant les 20 premières années (conversion de prairies temporaires en permanentes...)<sup>13</sup>.
- Les grandes données retenues par le GIEC 2000 pour **la conversion de terres vierges** en terres agricoles sont un déstockage de 30 t C/ha.
- **Dans les prairies**, le stockage se fait exclusivement dans le sol, lentement (on parle 1t C/ha/an, la durée va de 20 à 100 ans), mais en très grande quantité au final (de l'ordre de 70 t C/ha).
- **Les grandes cultures** sont une source de stockage net faible ou forte de carbone selon le système de culture, l'état initial du sol et l'historique de la parcelle (arrière-effet prairie notamment) ; le carbone du sol se constitue lentement mais se vide rapidement. Plusieurs études montrent que les sols agricoles perdent jusqu'à 50 % de leur contenu en carbone dans les décennies qui suivent leur mise en culture.
- **Une forêt** est un puits de carbone seulement pendant sa période de croissance, avec cependant une forte variation interannuelle (sécheresse, canicule...) ; le stockage dans le sol se fait lentement (sur une durée d'1 siècle).

<sup>10</sup> « La Séquestration du carbone par les sols agricoles », Frédéric LOGE - Direction de la recherche parlementaire du Canada – 2001

<sup>11</sup> « Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? » Expertise scientifique collective – rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du ministère de l'Ecologie et du Développement durable – octobre 2002

<sup>12</sup> « Stockage de carbone dans les écosystèmes continentaux » présentation de Vincent ALLARD, INRA Clermont-Ferrand

<sup>13</sup> ARROUAYS et al. 2002

### 4.3.2. Les pratiques agricoles

Plusieurs d'entre elles interviennent sur l'évolution de la matière organique :

**Le labour** : il a pour effet d'accélérer la décomposition de la matière organique particulière en fragmentant les macro-agrégats. Aussi, le travail simplifié du sol, ou non-labour, favorise-t-il le stockage du carbone dans les sols, de l'ordre de 0,1 t C/ha/an. En fait, l'efficacité du travail minimum sur le stockage du carbone, plus complexe qu'il n'y paraît, est controversée : il favorise aussi les émissions d'un autre GES, le N<sub>2</sub>O, par le sol (SIX et al., 2004). Le non-labour serait négatif dans les cinq premières années, et deviendrait positif sur le long terme (20 ans) la vitesse de stockage de carbone se stabilisant et l'émission de N<sub>2</sub>O diminuant. Ce serait encore plus marqué en conditions humides. Là encore, les cycles de carbone et d'azote sont liés. La maîtrise de la fertilisation azotée en parallèle est essentielle<sup>14</sup>. Mais il est difficile de se passer de labour sur une longue durée car il permet à la fois d'aérer la terre en la restructurant, de faciliter la pénétration de l'eau et des racines, et de lutter contre les adventices. Dans la pratique, il y a alternance non-labour/labour pour diverses raisons de conduite culturale (enherbement difficile à maîtriser). Le déstockage par labour étant plus rapide que le stockage par non-labour, le bénéfice des pratiques de non-labour semble très réduit. L'impact des techniques sans labour sur le taux de minéralisation du carbone de l'humus apparaît très variable dans la littérature. Néanmoins, on admet encore aujourd'hui que la réduction de la profondeur et de la fréquence du labour tend à limiter ce taux. Cependant, des recherches en cours pourraient conduire à modifier cette perception.

**Le travail du sol profond** : Au-delà des 20-30 cm de profondeur de labour, le carbone stocké est stable sauf si l'activité des micro-organismes est stimulée par un apport d'énergie (travail du sol profond, sous-solage, plantes résistantes à la sécheresse à racines profondes) et l'effet priming (voir définition). Cela peut stimuler la perte de carbone ancien<sup>15</sup>.

**La jachère** : pratiquée de 1993 à 2006 dans le contexte de la Politique Agricole Commune pour limiter la production agricole, elle consiste à ne pas cultiver un sol. Il en résulte un déstockage de carbone lorsque le sol est insuffisamment couvert par de la végétation. La jachère peut être pratiquée en laissant le sol en l'état avec un travail préalable ou non et laisser ainsi s'implanter plus ou moins les repousses spontanées des cultures antérieures et les mauvaises herbes. On parle alors de **jachère nue** lorsque la jachère reste très faiblement couverte durant l'année, de **jachère à couvert spontané** lorsque des pratiques culturales auront permis les repousses couvrant le sol dès l'automne. Elle peut aussi se pratiquer en semant un engrais vert qui aura l'avantage supplémentaire de limiter l'enherbement indésirable pour la culture de l'année suivante ; c'est la jachère avec couverture semée, parfois appelée **jachère agronomique**.

**La couverture des sols** en interculture (engrais verts ou CIPAN<sup>16</sup>), ou en inter-rang (viticulture), ou en jachère avec couverture semée, entretient le stock de matière organique par la biomasse végétale aérienne et souterraine produite. Elle limite aussi le lessivage des éléments fins et légers du sol surtout dans les pentes (vigne).

**L'apport d'amendement organique** (produits et déchets organiques agricoles, urbains ou industriels, enfouissement des pailles) contribue à maintenir les stocks de carbone organique des sols cultivés en entretenant les différents compartiments de matière organique du sol (plus ou moins décomposée, plus ou moins humifiée). **Les effluents d'élevage** sont un gisement important de carbone. La pratique de méthanisation peut modifier cet apport de carbone dans le sol. L'incorporation dans les sols de déchets organiques urbains, boues, déchets verts peut favoriser le stockage du carbone dans les sols, comparativement à l'incinération. La qualité doit cependant être

<sup>14</sup> Travaux rapportés par J.-F. SOUSSANA et P. CELLIER dans « Agriculture et effet de serre » lors du colloque Agriculture biologique et changement climatique, Clermont-Ferrand - avril 2008

<sup>15</sup> FONTAINE et al. 2007 – « Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply »

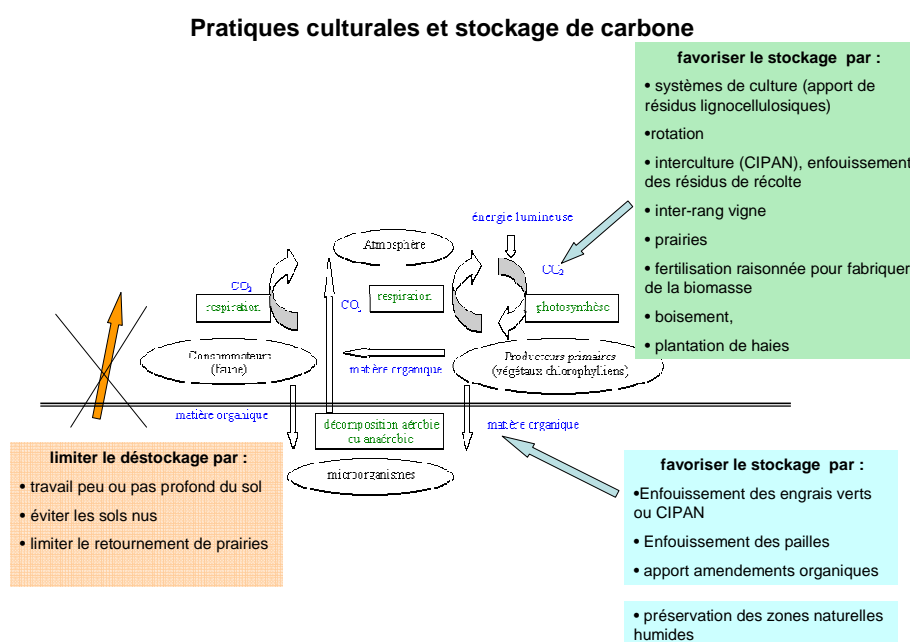
<sup>16</sup> CIPAN : Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrate. Elles sont conseillées et pratiquées dans la rotation avant une culture de printemps. Leur rôle est essentiellement de capter l'azote mobile du sol pour limiter les pertes par lessivage hivernal. Elles restituent progressivement cet azote sous forme d'engrais vert, après retournement.

conforme à la réglementation vis-à-vis des éléments indésirables tels que les éléments traces métalliques, les composés traces organiques et les pathogènes, et être exempte d'éléments inertes (plastique, verre).

**L'allongement de la durée des prairies** (temporaires à permanentes) : Quelques pratiques favorables ont été identifiées, conduisant à un stockage de carbone organique de 0,1 à 0,5 t C/ha/an, pendant les 20 premières années<sup>17</sup> : conversion des prairies temporaires en permanentes, allongement de la durée des prairies temporaires, intensification modérée des prairies permanentes.

**L'installation de haies** contribue à favoriser un stockage de carbone additionnel dans la végétation. Les quantités stockées varient en fonction des caractéristiques de la haie (largeur, hauteur, densité...). Plantée et travers des pentes, les haies contribuent également à la lutte contre l'érosion et à la rétention des éléments fins du sol.

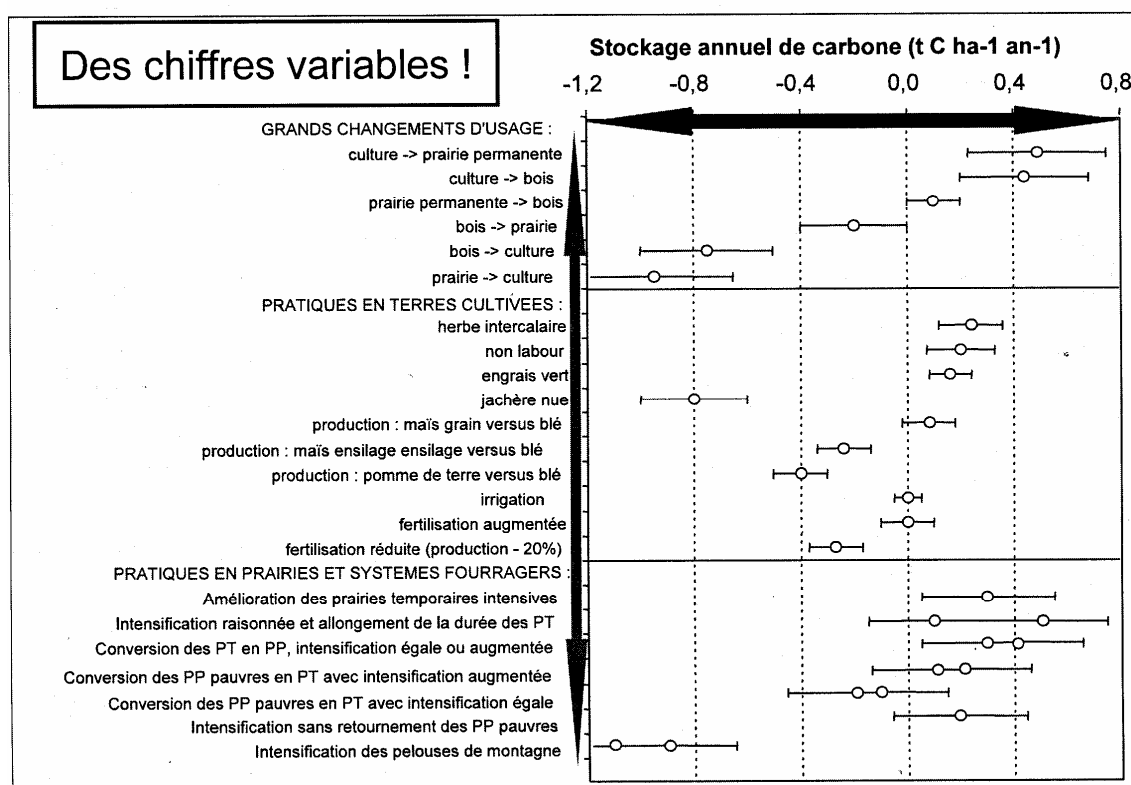
### 4.3.3. Tableaux récapitulatifs



Le récapitulatif de ces pratiques met en évidence l'objectif essentiel : maintenir ou améliorer la teneur en matière organique des sols. Ces pratiques sont à analyser plus largement en fonction de leurs autres effets sur l'environnement et bien sûr de leur compatibilité avec l'économie et l'organisation des exploitations agricoles. Elles s'inscrivent dans une notion d'agriculture durable.

<sup>17</sup> SOUSSANA et al, 2004

Une grille de coefficients avec leur fourchette a été établie par l'INRA d'Orléans :



### Données moyennes actuellement admises<sup>18</sup>

Vitesse de stockage (+) et de déstockage(-) par mode de gestion des sols		
<b>Changement d'occupation des sols</b>		
Mise en culture (retournement de prairies, défrichage)	- 1 t C/ha/an	sur 20 ans
Mise en prairie ou en forêt de cultures	+ 0,5 t C/ha/an	sur 20 ans
<b>Pratiques culturales</b>		
Enfouissement des pailles	+ 0,15 t C/ha/an	sur 20 ans
Engrais verts, CIPAN	+ 0,15 t C/ha/an	
Enherbement inter-rangs des vignes et vergers	+ 0,40 t C/ha/an	
Implantation de haies	+ 0,10 t C/ha/an	
Travail sans labour	+ 0,10 t C/ha/an	
Jachère nue	- 0,60 t C/ha/an	
<b>Amendements organiques</b>		
Effluents d'élevage	0,48 t C/m <sup>3</sup> de MS*	
Boues d'épuration urbaines	0,35 t C/m <sup>3</sup> de MS	
Composts déchets verts	0,26 t C/m <sup>3</sup> de MS	

\*MS : Matière Sèche

Ces coefficients reflètent l'état des connaissances nationales actuellement publiées. Certains, actuellement en cours de révision grâce à de nouvelles recherches, seront corrigés prochainement. En effet, il serait bon de dissocier les coefficients concernant l'enherbement en vigne et en verger qui doivent avoir des bilans assez différents ; de vérifier la valeur correspondant à l'enfouissement des pailles et celle relative à l'enfouissement d'engrais verts ; de nuancer, dans la mesure du possible, les valeurs associées aux différentes formes d'amendements organiques.

<sup>18</sup> « Le Stock de carbone dans les sols agricoles diminue », IFEN n°121 – novembre 2007

## **PARTIE 2 : ESTIMATION DES STOCKS DE CARBONE EN BOURGOGNE**

---

On peut évaluer l'importance des puits carbone de 2 façons :

- **De façon exhaustive** en prenant en compte tous les réservoirs, y compris les sols profonds, les milieux aquatiques, etc. Mais alors, pourquoi ne pas intégrer les roches ? Ces calculs ont l'avantage de chercher l'exhaustivité et de maximiser les données de stockage, mais offrent peu de lisibilité sur les actions à entreprendre pour préserver chaque réservoir. De plus, l'échelle régionale paraît peu pertinente et les imprécisions se multiplient.
- **De façon ciblée** en ne retenant que les réservoirs soumis à variations climatiques ou anthropiques dans le court ou moyen terme. Là, l'insuffisance de données et des connaissances entachent les estimations d'une forte marge d'erreur. Cela suppose aussi de préciser le type de variations retenues : année de référence, pas de temps, type de réservoir. Cependant, ce travail permet de cibler ce qui fragilise le stockage et donc de mieux préciser les pistes d'actions.

C'est ce 2<sup>e</sup> type de calcul qui est pratiqué en France malgré l'insatisfaction de la précision. Cela fournit un instrument d'évaluation pour mesurer les effets de la politique française en matière de stabilisation des émissions de GES sur la période 2008-2012 par rapport à 1990 (atteinte ou non des objectifs dans le cadre des accords de Kyoto).

La Bourgogne est concernée par 2 réservoirs, les végétaux et les sols. Nous tenterons d'estimer :

- le stock de carbone potentiellement présent dans les réservoirs sols et forêt ;
- les flux de carbone annuels tels qu'ils ont été identifiés par l'INRA, accroissement annuel de la forêt, évolution du carbone des sols suite à un changement d'occupation des terres ou à des changements de pratiques.

### **1. ESTIMATION DU STOCK DE CARBONE**

#### **1.1. Le réservoir « bois et forêt »**

L'essentiel de la production végétale de la biosphère est un stockage temporaire qui est consommé dans une filière : les prairies dans les filières animales (bovins, ovins...), les cultures dans les filières alimentaires ou énergétiques, le bois dans la filière bois énergie ou bois d'œuvre. Une autre partie est « en attente », notamment dans les arbres, haies, herbages naturels hors pâtures. Ils peuvent disparaître brutalement à la suite de pratiques préjudiciables (déboisement, arrachages de haies...) ou accidentellement (feux de forêt). C'est celle-ci que nous cherchons à estimer, à savoir principalement les bois et forêts.

#### **CALCULS : ESTIMATION du STOCKAGE de CARBONE de la FORET BOURGUIGNONNE (2006)**

Sources : données statistiques de l'IFN et de la DRAF (base 2006)

Éléments de méthodologie :

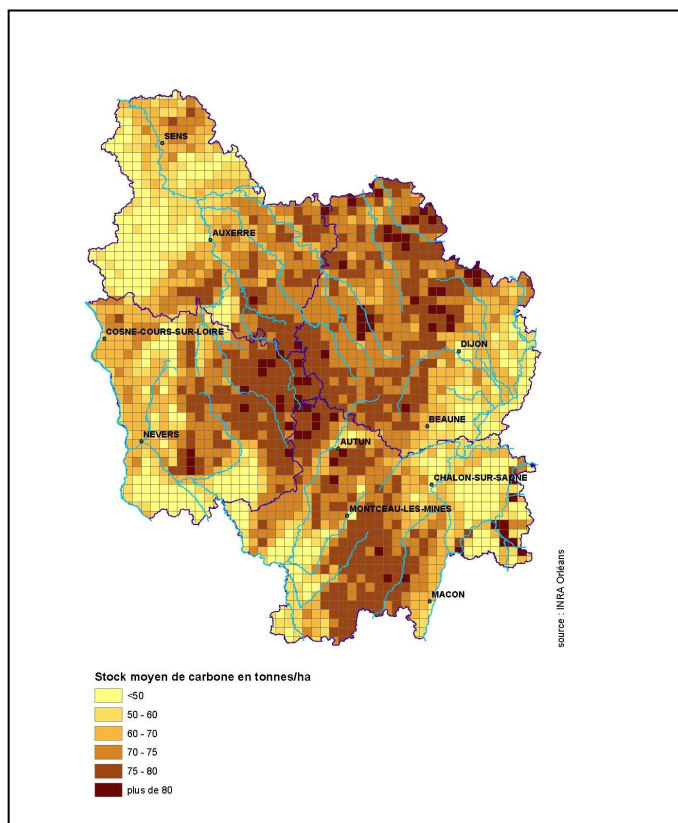
- Les volumes de bois sur pied estimés par l'IFN sont les bois et branches supérieurs à 4 cm de diamètre. Pour estimer la masse « branches + racines », on utilise une moyenne, 39 % de la masse de bois récoltée. En fait, les feuillus ont un taux plus élevé que les résineux.
- 1 m<sup>3</sup> de biomasse forestière équivaut environ à 0,5 tonne de matière sèche qui contient 45 % de carbone. Donc, chaque m<sup>3</sup> de bois fournit 0,5 x 0,45 = 0,225 t de carbone/m<sup>3</sup> de bois brut.
- Les volumes des peupleraies ne sont pas pris en compte (les peupleraies représentent 1,3 % de l'ensemble des surfaces boisées).
- Les volumes de haies ne sont pas connus, même si les surfaces le sont (TERUTI-LUCAS).



	volumes (m <sup>3</sup> )	coefficient	t C/an (pour 2006)
volumes de bois sur pied, données hors peupleraies	156 932 493	0,225	35 309 811
volumes de branches et racines correspondantes	61 203 672	0,225	13 770 826
<b>total</b>			<b>49 080 637</b>
surface et volumes non comptabilisés			
peupleraies	12 550 ha		
haies et bosquets	41 987 ha		
herbacés non pâturés	non estimé		

## 1.2. Le réservoir « sols »

Le réservoir des 30 premiers centimètres des sols correspond classiquement à la profondeur de labour. C'est la partie la plus sujette aux transformations et aux échanges avec l'air. Le cycle du carbone y est le plus instable et des phénomènes de stockage-déstockage de CO<sub>2</sub> sont en jeu selon les pratiques culturales, l'affectation des sols, etc. L'INRA d'Orléans avait effectué des travaux pour le ministère de l'Ecologie en 2002 avec l'outil « Infosol », cartographie des sols et base de données d'analyses de sols, pour estimer le carbone stocké dans les sols en fonction de leur occupation (carte 1). Une actualisation pourrait être envisagée à partir de la Base Sol nouvellement disponible sur la Bourgogne et une expertise de pédologues (voir proposition annexe).



## **CALCULS : ESTIMATION du STOCK de CARBONE dans les SOLS BOURGUIGNONS (2006)**

Sources : mémento AGRESTE 2006 DRAF

Eléments de méthodologie :

- Les grandes classes d'occupation des sols observées en 2006 sont affectées d'un coefficient moyen de stockage de carbone. Des données plus fines font actuellement l'objet de recherches. Ainsi, pour le bocage, des mesures effectuées en Bretagne donnent un stock total en carbone organique du sol de 84 tonnes par 100 m<sup>3</sup>, avec une densité de 50 m de haies par hectare. Pour les forêts, interviennent le type de boisement (feuillus ou résineux), ainsi que la densité, facteurs influençant la qualité et le volume de la litière de matière organique.
- Ce coefficient t C/ha est la médiane calculée par l'INRA sur la Bourgogne en 2002, à partir de la base d'analyses de sol (1 678 données en Bourgogne) dans les 30 premiers centimètres de sol. Les différences par type de sol ne sont pas utilisées dans ce calcul.

<sup>a</sup> : Coefficient médian de la teneur des sols par type de couverture

	coefficient (t C/ha) <sup>a</sup>	surface 2006 (ha)	approximation (Mt)
terres arables	63	1 014 681	63,9
vignes et vergers	51	32 844	1,7
prairies (STH)	70	796 700	55,8
forêts et bois	71	994 550	70,6
autres occupations agricoles	56	16 475	0,9
autre territoires	56	319 976	17,9
<b>total estimé 2006</b>		<b>3 175 226</b>	<b>210,8</b>
<i>INRA 2002</i>		<i>3 072 820</i>	<i>203</i>

### LIMITES et PRECAUTIONS :

L'extrapolation des teneurs de carbone des sols à l'ensemble du territoire bourguignon s'accompagne forcément d'une incertitude élevée sur :

- Les coefficients sur l'occupation des sols : ils ont été estimés par l'INRA à partir de 1 678 données d'analyses de terre. Les incertitudes sont fortes et estimées à 138 % (OREB 2005), du fait de la variation des types de sol, de l'historique parcellaire, des pratiques culturales opérées à la parcelle, des impacts climatiques.
- Les surfaces d'occupation des sols : des différences d'estimation des surfaces sont constatées entre les données issues de Teruti-Lucas (DRAF) et de Corine-Cover-Lander (photo satellite utilisée pour connaître l'occupation du sol, utilisée par l'INRA d'Orléans), d'où une différence en estimation globale. La photo satellite sous-estime la surface du sol de 3 % (absence des dénivelés).

### **1.3. Les stocks de carbone régionaux : résultats**

En 2006, le carbone stocké dans les réservoirs sols et forêts est estimé à :

Stockage de carbone de la forêt (partie végétale) = 49,1 Mt C  
 Stockage de carbone des sols = 210,8 Mt C

}  
 260 Mt C  
 = **953 Mt CO<sub>2</sub>**

## **2. ESTIMATION DES FLUX DE CARBONE ANNUELS**

Les flux sont estimés à partir des variations de stock sur 10 ou 20 ans. Avec cette notion, on cherche à rendre compte de la dynamique de stockage et de l'impact des changements annuels ou pluriannuels effectués sur les « réservoirs ».

### **2.1. Les flux du réservoir « forêt »**

La contribution des végétaux à l'accroissement net (ou diminution nette) du puits de carbone est essentiellement le fait de l'augmentation de croissance de la forêt, bois et branches. Le bois qui est récolté « sort » du réservoir « forêt ». La méthode de calcul actuellement utilisée estime que le bois non brûlé, à savoir le bois d'œuvre (poutres, meubles...) ne participe pas au déstockage de carbone, et donc ne contribue pas au flux de carbone du réservoir forêt. En fait, il est intégré dans une autre filière, un autre « réservoir ». Par souci d'homogénéité méthodologique, nous ferons les estimations selon la méthode retenue en 2002 malgré ce biais discutable.

## **CALCULS : ESTIMATION de la CONTRIBUTION ANNUELLE de la FORET BOURGUIGNONNE au PUIT de CARBONE (2006)**

Sources : Données IFN 2006 (de 1999 à 2004) - DRAF « Production de bois et sciages en 2006 » - n°94, juin 2008

### Eléments de méthodologie :

La méthode retenue par l'OREB dans son bilan 2002 est celle développée par Rhône Alpes (RAEE). Elle est reprise ici :

- De l'accroissement annuel de bois est déduit l'ensemble de la récolte.
- Mais toute la récolte ne participe pas au déstockage de carbone. On estime que le bois d'œuvre contribue au stockage de carbone sur le long terme. Or le rendement du bois d'œuvre est de 60 %. Pour effectuer cette correction, on rajoute les 60 % de la récolte pour le bois d'œuvre qui n'affectent pas le bilan.
- Les données statistiques comptabilisent les bois et branches de plus de 4 cm de diamètre. L'accroissement en bois n'inclut pas l'accroissement des petites branches et racines. En moyenne la masse « branches + racines » représente 39 % de la masse de bois.
- 1 m<sup>3</sup> de biomasse forestière équivaut environ à 0,5 tonne de matière sèche qui contient 45 % de carbone. Donc, chaque m<sup>3</sup> de bois brut fournit 0,5 x 0,45 = 0,225 t de carbone.

<b>Estimation de la contribution annuelle de la forêt bourguignonne au puits carbone (2006)</b>		
	Volumes annuels 2006	Equivalent carbone***
Accroissement annuel bois	6 277 536 m <sup>3</sup>	
- Récolte bois 2006	- 2 184 364 m <sup>3</sup>	
+ 60 % des volumes de récolte pour bois d'œuvre (60 % de 1 118 081 m <sup>3</sup> )	+ 670 849 m <sup>3</sup>	
Accroissement net de bois	= 4 764 020 m <sup>3</sup>	
+ la biomasse branche et racine correspondant à l'accroissement annuel (39 % de 6 277 536 m <sup>3</sup> )	+ 2 448 239 m <sup>3</sup>	
Accroissement net de biomasse forestière	= 7 212 259 m <sup>3</sup>	<b>= 1 622 758 t C/an = 5,95 Mt CO<sub>2</sub></b>

### LIMITES et PRECAUTIONS :

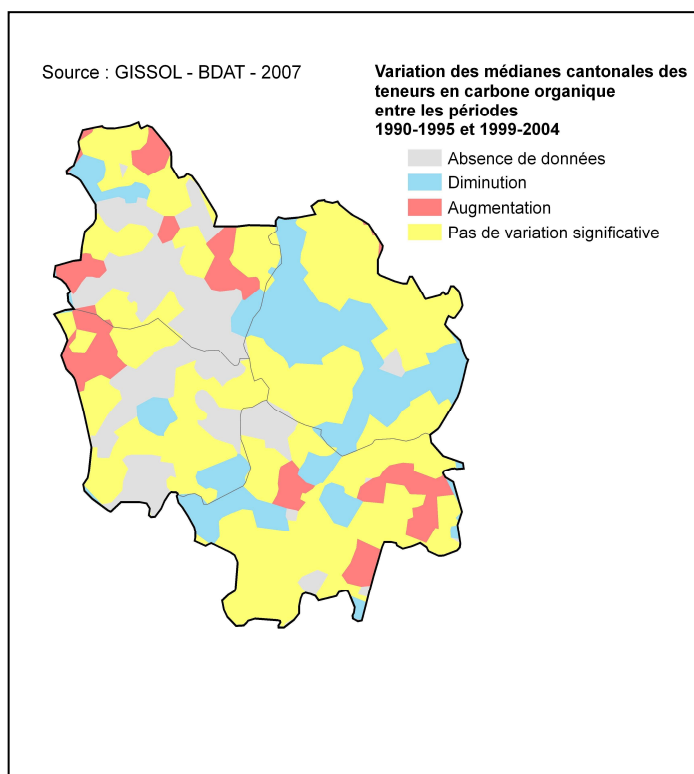
- Ce calcul ne tient pas compte des fortes variations annuelles de croissance de la forêt.
- La part de branches et racines dans l'accroissement est estimée très globalement (moyenne française) alors que le taux est plus élevé en feuillus qu'en résineux.
- La croissance en peupleraie n'est pas calculée : les surfaces sont connues et représentent 1,3 % de l'ensemble des surfaces boisées. La tempête 1999 a eu un impact fort sur ces plantations, ce qui ne rend pas cohérent une évaluation comparée à 1990.
- L'accroissement de la biomasse des haies n'est pas estimé et supposé négligeable.

## 2.2. Les flux liés au changement d'occupation des sols

### 2.2.1. Variations mesurées

Une analyse récente<sup>19</sup> des variations de teneur en carbone dans les sols a été effectuée par l'INRA d'Orléans, cette fois à l'échelle cantonale, entre les deux périodes 1990-1995 et 1999-2004<sup>20</sup>.

Quelques cantons bourguignons montrent une diminution du stock de carbone, souvent en zone de polyculture élevage, certains autres une augmentation. Ces observations sont difficiles à interpréter. Une analyse de l'évolution des cultures et des boisements sur ces périodes, à l'échelle cantonale, apporterait sans doute des éclairages. Les données mobilisables seraient les Recensements Agricoles de 1988 (proche de la 1<sup>re</sup> série de mesures) et 2000 (pour la 2<sup>e</sup> série).



### 2.2.2. Evaluation théorique

Retournement de prairies et déboisement sont les principaux changements d'occupation des terres qui influent sur le stockage de carbone dans les sols. Il est possible de tenter une estimation assez grossière à l'échelle de la région à partir de l'évolution annuelle de ces surfaces.

La période d'évaluation du protocole de Kyoto a été marquée par l'obligation de mise en jachère (réforme de la PAC 1992), très majoritairement annuelle (ou rotationnelle). Or une jachère nue provoque un déstockage de carbone important : 0,6 t C/ha/an en moyenne. Toutes les jachères pratiquées non pas été nues : en dehors des jachères énergétiques (comptabilisées comme une culture), 3 conduites ont été pratiquées : nue, avec couvert spontané ou semée avec un engrais vert.

<sup>19</sup> « Le stock de carbone dans les sols agricoles diminue » le 4 pages de l'IFEN – n°121 – Novembre 2007

<sup>20</sup> 1990 est l'année de référence actée dans le protocole de Kyoto pour la maîtrise des émissions de GES.

## **CALCULS : IMPACT du CHANGEMENT d'AFFECTATION des TERRES sur le STOCKAGE de CARBONE dans les SOLS**

Sources : AGRESTE statistiques agricoles annuelles, enquêtes structures des exploitations agricoles 1993-1995-1997 (DRAF)

Eléments de méthodologie :

### **a) Impact de l'évolution des surfaces de prairies permanentes et des bois :**

On peut considérer soit l'évolution entre 1990 et 2007 (tableau a1), soit plus précisément l'évolution annuelle (tableau a2). Dans ce dernier cas :

- les variations annuelles (ou  $\Delta$ ) de ces surfaces sont prises en compte : prairies permanentes ou STH (surfaces toujours en herbe) des exploitations agricoles et hors exploitations agricoles et bois.
- du fait de la dissymétrie entre stockage et déstockage, les évolutions annuelles des surfaces sont affectées d'un coefficient différent selon que l'évolution est positive ou négative :
  - une évolution négative de surface de prairie ou de bois est supposée correspondre à une mise en culture : déstockage théorique moyen = -1 t C/ha/an
  - une évolution positive de surface de prairie ou de bois est supposée faire suite à une culture : stockage théorique moyen = +0,5 t C/ha/an

#### **a1- Impact de l'évolution moyenne entre 1990 et 2007 des surfaces de prairies permanentes et des bois sur le stockage de carbone des sols**

période 1990-2007			évolution entre 1990 et 2007		
	1990	2007	ha	t C/ha/an	t C
STH	839 293	796 700	-42 593,0	1,0	-42 593,0
bois	995 616	994 550	-1 066,0	1,0	-1 066,0
flux de carbone sur la période (17 ans) :			<b>-43 659,0 t C</b>		
flux moyen annuel de carbone :			<b>-2 568,2 t C/an</b>		
			<b>-9 416,6 t CO<sub>2</sub>/an</b>		

#### **a2- Impact de l'évolution annuelle des surfaces de prairies permanentes et des bois sur le stockage de carbone des sols**

période 1990 - 2007	somme $\Delta$ négatifs			somme $\Delta$ positifs		
	ha	t C/ha/an	t C	ha	t C/ha/an	t C
STH	37 971,0	-1,0	-37 971,0	11 789,0	0,5	5 894,5
STH hors Exploitation	18 023,0	-1,0	-18 023,0	353,0	0,5	176,5
bois	10 900,0	-1,0	-10 900,0	9 834,0	0,5	4 917,0
			<b>-66 894,0</b>			<b>10 988,0</b>
flux de carbone sur la période (17 ans) :			<b>-55 906,0 t C</b>			
flux moyen annuel de carbone :			<b>-3 288,6 t C/an</b>			
			<b>-12 056 t CO<sub>2</sub>/an</b>			

Prendre en compte la variation d'une année à l'autre du changement d'affectation des sols rend davantage compte des pertes par retournement des prairies et du moindre stockage pendant l'implantation d'une prairie permanente ou d'un boisement de terre. Nous retiendrons l'estimation a2.

### **b) Impact de l'effet annuel des jachères :**

- Les enquêtes structures 1993-1995-1997 de la DRAF permettent d'apprécier le % relatif des différents couverts. Nous estimerons que les pratiques de jachère ont peu évolué entre 1997 et 2007.

Eléments de calculs :

**Impact des mises en jachères sur le stockage de carbone des sols bourguignons**  
(sources : Agreste Bourgogne - SAA)

année	surfaces en jachères (ha)	% des surfaces en jachère nue	% couvert spontané	% couverture semée (engrais vert)	t C /an
1993	132 167	60%	15%	25%	- 46 589
1994	136 474	60%	15%	25%	- 48 107
1995	110 421	5%	70%	25%	- 14 631
1996	80 905	5%	70%	25%	- 10 720
1997	52 505	5%	75%	25%	- 7 482
1998	48 188	5%	75%	25%	- 6 867
1999	63 522	5%	75%	25%	- 9 052
2000	66 972	5%	75%	25%	- 9 544
2001	73 949	5%	75%	25%	- 10 538
2002	68 129	5%	75%	25%	- 9 708
2003	74 955	5%	75%	25%	- 10 681
2004	62 225	5%	75%	25%	- 8 867
2005	70 191	5%	75%	25%	- 10 002
2006	74 947	5%	75%	25%	- 10 680
coefficient (t C/ha)		-60%	-20%	15%	
<b>total sur la période (14 ans)</b>			<b>- 213 467</b>	<b>t C</b>	
<b>flux moyen annuel</b>			<b>- 15 248</b>	<b>t C/an</b>	
			<b>- 55 909</b>	<b>t CO2/an</b>	
si 100% des jachères sont nues			- 669 330	t C	
			- 47 809	t C/an	
si 100% jachères sont des engrais verts			167 333	t C	
			11 952	t C/an	

De façon schématique on peut estimer l'impact d'une mesure réglementaire :

- Si toutes ces jachères non industrielles avaient été nues, la perte annuelle moyenne de carbone aurait été de 47 800 t C/an, soit - 0,175 Mt CO<sub>2</sub>/an ;
- à l'inverse, si elles avaient toutes eu un engrais vert, le stockage théorique annuel aurait été de + 12 000 t C/an, soit + 0,044 Mt CO<sub>2</sub>/an.

### 2.3. Les flux dus aux pratiques culturales

L'enquête des pratiques agricoles 2006 (source statistiques agricoles annuelles – Agreste Bourgogne) permet d'estimer le pourcentage des cultures implantées derrière un engrais vert : ce sont 3 % des orges de printemps, soit **1 300 ha**, les autres cultures de printemps ne représentant pas une surface suffisamment importante pour donner des résultats significatifs. Ce résultat est négligeable.

### 2.4. Les flux dus aux amendements organiques

Les flux résultant des effluents d'élevage peuvent être comptabilisés à partir de la variation d'inventaire des animaux : l'effectif bovin a progressé de 3 % entre 1990 et 2006 ne compensant pas tout à fait l'évolution des ovins et caprins (ramené en UGB). La faiblesse de l'évolution ne justifie pas d'estimer la variation de carbone apporté par les effluents d'élevage.

### Estimation du stockage de carbone par les amendements organiques urbains (enquête « déchets » Alterre – Bourgogne 2008)

	1996	2006	évolution quantitative	teneur moyenne de carbone par tonne de matière brute	teneur totale de carbone (tonnes)
déchets ménagers ou assimilés compostés (tonnes de matière sèche)	42 622	221 794	179 172	0,35	62 710
quantité de boues de station d'épuration épandues (tonnes de matière sèche)	17 584	17 067	- 517	0,35	- 181
<b>FLUX TOTAL de stockage de carbone sur la période (10 ans)</b>	<b>62 529 t C</b>				
<b>FLUX annuel moyen</b>	<b>6 253 t C/an</b>				
	<b>22 928 t CO<sub>2</sub>/an</b>				

#### LIMITES et PRECAUTIONS :

Les coefficients affectés sont des moyennes. Etant donnée la forte évolution des déchets ménagers compostés, il serait intéressant de conduire une analyse plus fine : types de déchets, fourchette de coefficients par type, devenir du compost...

La variation de stock de carbone organique associé aux effluents d'élevage est évoquée, mais non calculées, et le stock à un moment donné n'est pas évalué. Cette information serait intéressante à collecter notamment pour affiner le bilan des émissions nettes de l'élevage.

## 2.5. Les flux des autres puits biosphériques

Il s'agirait de végétations qui ne seraient pas destinées à la consommation (animale, humaine ou énergétique). On ne peut que les citer sans aucune estimation : l'enherbement des villes, les toits végétalisés, les bandes enherbées le long des rivières (application de la PAC 2006)...

## 3. RECAPITULATIF DES ESTIMATIONS

BOURGOGNE	estimations base 2002	estimations base 2006
<b>le stock en place</b>		
sols	694 Mt CO <sub>2</sub>	773 Mt CO <sub>2</sub>
forêt	non estimé	180 Mt CO <sub>2</sub>
autre hors filières	non estimé	non estimé
<b>les flux annuels</b>		
changement affectation sols	-0,049 Mt CO <sub>2</sub> (comparaison 1982 et 2002)	-0,068 Mt CO <sub>2</sub>
pratiques culturales	estimation de tendances	non estimé
amendements organiques	non estimé	0,023 Mt CO <sub>2</sub>
forêt	3,9 Mt CO <sub>2</sub>	5,95 Mt CO <sub>2</sub>

Par rapport au bilan effectué en 2005 (sur les bases statistiques de 2002) les estimations montrent une progression essentiellement due à l'augmentation de la surface et de la croissance des bois et forêts. Mais ces estimations sont faites à un instant t (2006) avec des coefficients moyens, sans tenir compte des facteurs impactant le stockage de carbone. L'effet climatique annuel n'est pas pris en compte.

Les émissions de GES en Bourgogne étaient estimées en 2002 à **16 Mt CO<sub>2</sub>** par an dont **4,63 Mt CO<sub>2</sub>** pour le secteur agricole.

estimation des émissions de GES pour le secteur agricole (OREB - 2005)			
en tonnes équivalent CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	total
déjections animales	665 064	66 307	731 370
fermentation entérique	1 724 169	0	1 724 169
pâturages	0	240 125	240 125
sols agricoles	0	885 929	885 929
fixation symbiotique et résidus de cultures		220 990	220 990
dépôts atmosphériques	0	129 851	129 851
lessivage des nitrates	0	695 550	695 550
<b>total agriculture</b>	<b>2 389 233</b>	<b>2 238 753</b>	<b>4 627 985</b>

On s'aperçoit que l'accroissement annuel forestier à lui-seul compense les émissions du secteur agricole. Pour aller plus loin dans les bilans agricole et forestier des émissions et stockage de carbone, une approche par système d'exploitation s'impose et nécessite une analyse spécifique. Le réseau ROSACE<sup>21</sup> peut y contribuer. Ce travail est particulièrement pertinent pour l'élevage, secteur fortement émetteur de GES (fermentations entériques, déjections animales...) mais qui présente aussi une bonne capacité de stockage de CO<sub>2</sub> par l'intermédiaire des prairies. L'Institut de l'élevage estime qu'à l'échelle nationale, le stockage annuel de carbone par les prairies compense à 46 % les émissions de GES par les herbivores.<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Réseau d'Observation des Systèmes Agricoles Céréales et Elevage (ROSACE) : ce réseau, conduit par les chambres d'agriculture, a pour objet de suivre le fonctionnement technico-économique des principaux types d'exploitations agricoles.

<sup>22</sup> « Les Ruminants et le réchauffement climatique : le stockage de carbone sous les prairies, une compensation aux émissions de gaz à effet de serre », Sylvie HACALA, Jacques LUCBERT, André LEGALL – Institut de l'élevage – février 2008



## CONCLUSIONS

---

Ces estimations montrent que le puits bio-lithosphérique de carbone est important en dépit de son instabilité : près d'un milliard de tonnes de CO<sub>2</sub> serait stocké pour 80 % dans l'horizon superficiel des sols et 20 % dans la couverture boisée de la Bourgogne. Ce puits est fragile : une année caniculaire et sèche comme 2003 l'a transformé en source et fait perdre l'équivalent de quelques années de stockage de carbone.

La forêt apparaît comme un « poumon » vert important : la fonction de stockage de carbone de sa croissance annuelle équivaut à neutraliser 1/3 des émissions de GES régionales.

Des pratiques culturales et forestières inadaptées peuvent altérer ces réservoirs naturels. Il est difficile d'estimer la contribution des bonnes pratiques. Toutes doivent concourir à maintenir le taux de matière organique des sols. Même si le stockage de carbone dans les sols ne constitue pas une solution durable de réduction de CO<sub>2</sub> atmosphérique, il s'accompagne d'effets agronomiques et environnementaux bénéfiques : limitation de l'érosion, amélioration de la rétention en eau dans les sols, biodiversité plus élevée...

Pour mieux gérer le bilan d'émission et de stockage de GES par l'agriculture, quelques outils ont été mis au point et sont utilisables à l'échelle de l'exploitation agricole :

- Le **modèle Planète**<sup>23</sup> permet d'établir un bilan des GES à l'échelle des exploitations agricoles en chiffrant les consommations d'équivalent fioul dans la chaîne de production. Ce type de diagnostic met en évidence les différences entre pratiques agricoles et permet d'identifier des marges de progrès à l'échelle individuelle. Il ne comprend pas d'estimation de potentiel de stockage carbone dans le sol et les végétaux.
- Le **modèle AMG**, développé par l'INRA de Laon<sup>24</sup> et mis en œuvre dans un outil de simulation par Agro-Transfert Ressources et Territoires (Picardie), permet d'établir le bilan humique, à long terme, à la parcelle, et de tester ainsi l'effet des pratiques agricoles. La réalisation de simulations avec des données locales et sur des systèmes d'exploitation agricole régionaux pourrait mettre en évidence les marges de progrès.

Moyennant une expertise pour agréger les données et estimations, ces outils peuvent aider aux diagnostics territoriaux et « à l'identification » de pistes de bonnes pratiques agronomiques.

---

<sup>23</sup> Modèle mis au point par J.-L. BOCHU (SOLAGRO), B. RISOU (ENESAD) et J. MOUSSET (ADEME)

<sup>24</sup> **A. Andriulo, B. Mary et J. Guérif, 1999**, « Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas », *Agronomie* – 19 – pp 365-377 ; **R. Wylleman, B. Mary, J.-M. Machet, J. Guérif et M. Degrendel, 2001**, « Evolution des stocks de matière organique dans les sols de grande culture : analyse et modélisation », *Perspectives Agricoles*, n°270 - juillet-août 2001 – pp 8-14. ; **K. Saffih-Hdadi et B. Mary, 2007**, « Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon » - en ligne sur le site *Soil Biology and Biochemistry*

## ANNEXE

---

### ***Proposition d'étude pour approfondissement : estimation spatialisée du stockage de carbone***

Il serait possible de réactualiser et d'affiner le bilan cartographique du stockage théorique dans les sols de Bourgogne qui avait été réalisé en 2002 par l'INRA d'Orléans. La Base Sol nouvellement disponible en Bourgogne y contribuerait :

- Etant données les fortes approximations faites sur les coefficients utilisés, une échelle fine ne s'impose pas. L'échelle du millionième est pertinente.
- Cela suppose un travail sur les données de la base sol de l'IGCS pour agréger certains sols représentés actuellement par la carte au 1/250 000<sup>e</sup> (travail spécialisé de pédologue).
- Ensuite, un travail de cartographie avec un SIG pourra être effectué : superposition de la carte des sols ainsi réduite avec la carte d'occupation des sols (photo satellite numérisée).
- Il faudrait également vérifier et/ou réactualiser les coefficients à affecter (t C/ha par type de sol et par culture) pour comprendre les approximations effectuées et les plages d'incertitude.
- Pour finir, un traitement cartographique croisera l'ensemble des données : coefficient de teneur théorique de carbone / type de sol / type d'occupation des sols.



**Alterre Bourgogne** a pour mission de mobiliser les acteurs régionaux afin que les enjeux liés à l'environnement et au développement soutenable soient placés au cœur des politiques et des actions des territoires bourguignons. L'agence s'y emploie par le biais d'actions d'information et de sensibilisation, d'accompagnement en faveur de porteurs de projets et de valorisation de bonnes pratiques. Le partenariat étant son mode de fonctionnement privilégié.

Prix : 3,96 €
---------------