
Une simulation de l'utilisation d'un réseau de surveillance pour le contrôle du carbone séquestré dans les sols

Détecterons-nous des changements ?

D. Arrouays et N. Saby

INRA Infosol, Orléans, F-45160, Olivet France.

RÉSUMÉ

Dans le cadre du protocole de Kyoto, les accords de Bonn et de Marrakech prévoient que certaines activités volontaires permettant un stockage additionnel de carbone organique dans les sols puissent être comptabilisées au titre des articles 3.3 et 3.4 de ce protocole. Cette comptabilisation est assujettie au caractère vérifiable de ce stockage additionnel. Dans cet article, nous analysons la faisabilité d'une vérification statistique de l'effet de changements d'usage ou de pratiques. Nous avons réalisé plusieurs simulations, afin de déterminer si des dispositifs de surveillance du stockage de carbone dans les sols pouvaient permettre un contrôle fiable et vérifiable de ce stockage. Nous nous sommes fondés sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) actuellement mis en place en France (environ 2100 placettes qui seront suivies selon un pas de 5 ans) afin de déterminer, sous différentes hypothèses, si un tel dispositif pouvait détecter des changements significatifs. Nous avons également testé la mise en place de réseaux spécifiques dédiés aux changements des terres «Kyoto».

Dans les différents scénarios 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.

Ceci signifie qu'une densification du réseau ou la mise en place de réseaux spécifiques sera nécessaire si l'on prétend réaliser un contrôle au sol du carbone stocké durant la période d'engagement. Nous pouvons conclure de l'ensemble de ces simulations que la mise en place du réseau systématique tel qu'il est envisagé pourrait permettre d'apporter des preuves comptables et statistiques de la séquestration additionnelle sous un certain nombre de conditions:

- réaliser un suivi des usages et des pratiques. La question centrale est alors liée au coût de mise en place de ce réseau, et à la faisabilité et au coût du contrôle des surfaces soumises à des usages et des pratiques donnés,
- densifier le réseau et/ou mettre en place des suivis spécifiques dédiés à certains usages,
- s'assurer que les changements d'usage suivis aient une pérennité dans le temps compatible avec la durée nécessaire au suivi et avec la période d'engagement.

Mots clés

Sol, Carbone organique, protocole de Kyoto, usages des sols, pratiques agricoles, réseaux de surveillance, vérification

SUMMARY**SIMULATION OF THE USE OF A SOIL MONITORING NETWORK TO VERIFY CARBON SEQUESTRATION IN SOILS.****Will we detect changes ?**

Within the Kyoto protocol, the Bonn and Marrakech accords stipulate that some voluntary activities leading to an additional carbon sequestration in soils could be accounted in articles 3.3 and 3.4. These additional carbon stocks should be verifiable. In this work, we assess the feasibility of a statistical verification of the effects of changes in land uses or practices. We simulate these data in order to assess the reliability of this kind of control. We use the « Réseau de Mesures de la Qualité des Sols » (RMQS) which is currently being settled in France (about 2100 sites with a 5 yr time step), and various hypotheses on changes and their effects on soil carbon. We also test the settling of specific networks for this purpose.

Among the scenarios which were tested, the average duration necessary to detect a significant change ranges from 3 to 15 yrs. In the worst scenario, this duration can reach 10 to 25 yrs. This implies that a densification of the network might be necessary, or that new specific networks will have to be implemented if we aim to have a reliable control during the commitment period. In conclusion, the use of RMQS for this purpose could be feasible under the condition that:

- land use and practices changes are monitored
 - the soil monitoring network is densified and/or new specific networks are implemented
- changes are sustainable for a sufficient long time period to detect their effects

Key-words

Soil, Organic carbon, Kyoto protocol, land use, agricultural practices, monitoring networks, verification

RESUMEN**UNA SIMULACIÓN DEL USO DE UNA RED DE VIGILANCIA PARA EL CONTROL DEL CARBONO SECUESTRADO EN LOS SUELOS. Detectaremos cambios?**

En el cuadro del protocolo de KYOTO, los acuerdos de Bonn y Marrakech prevén que ciertas actividades voluntarias que permiten un almacenaje adicional de carbono orgánico en los suelos pueden ser contabilizados siguiendo los artículos 3.3 y 3.4 de este protocolo. Esta contabilización es sometida al carácter averiguable de este almacenaje adicional. En este artículo, analizamos si una verificación estadística del efecto de cambios de uso o de prácticas es posible. Realizamos varias simulaciones, para determinar si dispositivos de vigilancia del almacenaje del carbono en los suelos podían permitir un control confiable y averiguable de este almacenaje. Nos basamos sobre la red de medidas de la calidad de los suelos (RMQS) actualmente organizada en Francia (aproximadamente 2100 lugares que serán seguidos según un paso de 5 años) para determinar, bajo diferentes hipótesis, si un tal dispositivo podía detectar cambios significativos. Testamos igualmente la organización de redes específicas dedicadas a los cambios de tierras "Kyoto".

En los diferentes escenarios testados, el tiempo medio necesario para la detección de un cambio en la cantidad de carbono varía de 3 a 15 años. En los escenarios los más favorables esta duración llega a 10 a 25 años. Esto significa que una densificación de la red o la organización de redes específicas serán necesarias si se pretende realizar un control del carbono almacenado durante el periodo de obligación. Podemos concluir de estas simulaciones que la organización de la red sistemática tal cual esta prevista podría permitir llevar pruebas contables y estadísticas de la secuestro adicional bajo cierto número de condiciones:

- realizar un seguimiento de los usos y prácticas. La pregunta central está ligada al costo de organización de esta red, y al costo del control de las superficies sometidas a usos y prácticas dados.
- Densificar la red y/o organizar seguimiento específico dedicados a ciertos usos.
- Asegurarse que los cambios de usos seguidos tienen una perennidad en el tiempo compatible con la duración necesaria al seguimiento y con el periodo de obligación.

Palabras claves

Suelo, carbono orgánico, protocolo de Kyoto, usos de suelos, prácticas agrícolas, redes de vigilancia, verificación.

Dans le cadre du protocole de Kyoto, les accords de Bonn et de Marrakech prévoient que certaines activités volontaires permettant un stockage additionnel de carbone organique dans les sols puissent être comptabilisées au titre des articles 3.3 et 3.4 de ce protocole. Cette comptabilisation est assujettie au caractère vérifiable de ce stockage additionnel. De toute évidence, il est impossible, pour des raisons de coût et de logistique, de réaliser un suivi *in situ* de toutes les parcelles afin d'en mesurer le stockage de carbone. Plusieurs méthodes de vérification sont utilisables parmi lesquelles sont évoquées l'utilisation d'essais de longue durée accessibles pour une vérification externe, de modèles compartimentaux de la dynamique du carbone, de mesures de flux à diverses échelles, et de réseaux de mesures.

Compte tenu du faible nombre d'essais de longue durée, le problème principal de leur utilisation à des fins de vérification est la définition de leur domaine d'applicabilité spatial et temporel. Au plan spatial, les essais peuvent en effet donner des résultats divergents en fonction des conditions pédo-climatiques. Au plan temporel, peu d'essais ont un recul suffisant pour extrapoler des tendances sur de longues durées. Le danger est alors grand d'extrapoler des dynamiques de pas de temps court sur des durées abusivement longues. Un autre problème temporel est l'extrapolation au temps présent de dynamiques passées. Sur le long terme, des dynamiques décrites sur des essais ayant 50 ans, se sont produites sous des climats et avec des techniques et des niveaux de rendements différents de ceux d'aujourd'hui. En tout état de cause, s'ils sont particulièrement utiles pour la recherche sur les mécanismes de stockage/déstockage du carbone dans le sol, les essais de longue durée ne sont pas suffisamment nombreux en France et dans le monde pour rendre compte de la diversité des situations agro-pédo-climatiques.

L'utilisation de modèles s'avère une solution séduisante, dans la mesure où la plupart des modèles disponibles prennent explicitement en compte une part de variabilité de la dynamique liée à des facteurs ayant une variabilité spatiale (par exemple, variables climatiques, teneur en argile...). Ceci permet en théorie, et si l'on est capable de spatialiser ces paramètres, de rendre mieux compte de la variabilité spatiale des évolutions (Lee *et al.*, 1993). La structure des modèles et le nombre de paramètres en jeu étant complexe, le risque est cependant grand de perdre en transparence dans les estimations. Parmi les limites rencontrées par l'utilisation des modèles, outre l'accessibilité aux données d'entrée, on peut citer le problème de la calibration de l'état initial, de l'estimation des flux entrants, ainsi que le fait que relativement peu de modèles prennent actuellement en compte de façon explicite les effets de gestion et de travail du sol, et les interactions entre le travail du sol et la texture.

Les mesures de flux sont également évoquées dans le rapport du GIEC (IPCC, 2001) comme outil possible de vérification. Leur intérêt principal pour la vérification est leur indépendance vis-à-vis des mesures de stocks. Cependant, outre le fait que les dispositifs sont chers (environ 50000 euros par mât de mesure équipé), et encore relativement limités dans leur extension spatiale, le rapport note que ces mesures ne sont pas encore suffisamment précises pour être utilisées en routine pour la vérification des bilans de CO₂.

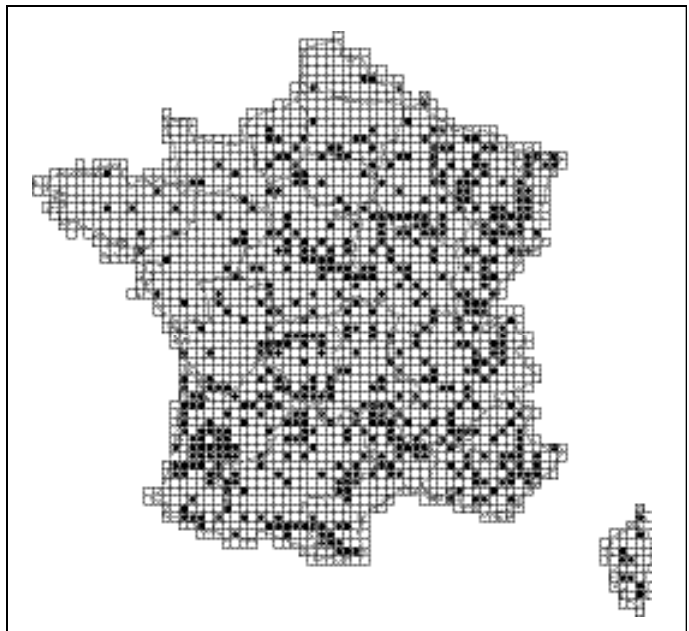
Des contrôles répétés au sol des stocks de carbone (monitoring) dans des sites nombreux pourraient offrir une garantie suffisante. Les résultats de ce monitoring pourraient être utilisés à des fins statistiques, afin d'évaluer des stockages moyens sur le territoire, ou bien pour valider ou recalibrer des modèles globaux permettant une meilleure appréhension spatiale des évolutions. Dans cet article, nous analysons la faisabilité d'une vérification statistique de l'effet de changements d'usage ou de pratiques en France.

MÉTHODE

Nous avons réalisé plusieurs simulations, afin de déterminer si des dispositifs de surveillance du stockage de carbone dans les sols pouvaient permettre un contrôle fiable et vérifiable de ce stockage. Nous nous sommes fondés sur le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (Arrouays *et al.* 2002; Jolivet *et al.*, 2002) actuellement mis en place en France (environ 2100 parcelles qui seront suivies selon un pas de 5 ans) afin de déterminer, sous différentes hypothèses, si un tel dispositif pouvait détecter des changements

Figure 1 - Réseau de mesures de la qualité des sols. Maille de 16x16 km. Les points noirs figurent le réseau européen de suivi des dommages forestiers.

Figure 1 - The French Soil Quality Monitoring Network. 16x16 km grid. Black spots are forested sites.



significatifs. Nous avons également testé la mise en place de réseaux spécifiques dédiés aux changements des terres «Kyoto».

Le Réseau de mesures de la qualité des sols est fondé sur une maille qui prévoit un emplacement théorique d'un site aux nœuds d'une grille dont le pas est 16x16 km (figure 1). Comme le réseau n'est pas encore physiquement installé sur la majeure partie du territoire, nous avons procédé par simulation.

Simulation du réseau de surveillance

Emplacement du site de surveillance

L'expérience de mise en place concrète du réseau de surveillance montre qu'il est quasiment impossible de positionner le site à l'emplacement exact prévu par la grille théorique. Cette impossibilité tient à deux raisons principales: les emplacements théoriques sont parfois localisés sur des lieux ne permettant pas leur qualification (aires bétonnées ou trop artificialisées, jardins...); il n'est pas toujours facile d'obtenir l'accord de l'exploitant pour la mise en place du site et pour répondre au questionnaire concernant l'historique du site et les pratiques agricoles. Compte tenu de ces contraintes, une **tolérance de 1 km** autour du point théorique a été mise en place pour la sélection du site (Jolivet *et al.* 2002). Nous avons simulé cette tolérance d'implantation du réseau en générant au sein de chaque maille un point placé au hasard dans un rayon de 1 km autour du point dit théorique.

Détermination du stock de carbone

Dans un premier temps, le travail consiste à obtenir en tout point du territoire français une valeur probable du stock de carbone contenu dans les sols afin de l'affecter aux sites du réseau de sur-

veillance. Arrouays *et al.* (2001) ont calculé des statistiques sur les stocks de carbone. Ces statistiques fournissent la moyenne, la médiane et le coefficient de variation du stock de carbone associés à une combinaison donnée de type de sol et d'occupation du sol (« Sol x occupation»). La valeur du stock de carbone pour une combinaison donnée suit une loi de type «log normal» (figure 2).

La carte d'occupation du sol CORINE (CEC, 1993) et la base de données géographiques des sols de France au 1/1 000000 (King *et al.*, 1999) ont été croisées afin de disposer en tout point du territoire d'une valeur de combinaison «Sol x occupation». Cette information a été ensuite croisée avec le réseau de surveillance, afin d'affecter à chaque site une valeur de la combinaison « Sol x occupation ». Enfin, une valeur de stock de carbone a été affectée à chaque site du réseau, grâce à un tirage aléatoire dans la distribution « log normal » de la combinaison « Sol x occupation » concernée.

Contrôle de la stabilité des valeurs moyennes fournies par le réseau simulé

Nous avons mesuré la stabilité du réseau simulé en procédant en deux temps. D'une part, nous avons généré 100 réseaux en faisant varier l'emplacement des sites aléatoirement dans un rayon de 1 km autour des points théoriques. D'autre part, en utilisant le réseau théorique, nous avons effectué 500 répétitions du tirage des stocks de carbone dans les différentes lois.

Dans les deux cas, la moyenne du stock de carbone sur l'ensemble du réseau est calculée à chaque répétition (100 fois dans le premier cas, 500 fois dans le second). Les distributions de ces moyennes des 2 populations sont ensuite représentées sous forme d'histogrammes afin de vérifier leur stabilité.

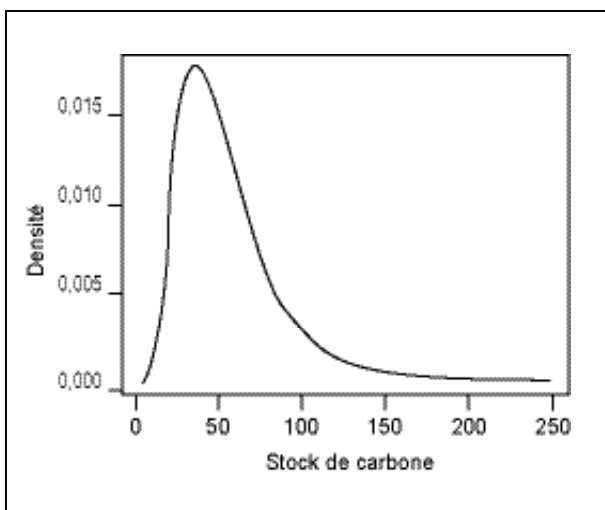
Evaluation de la variabilité opératoire analytique intra-placette

A partir d'essais préalables de répétitions intra-placette (Germaneau, 2002), nous avons retenu l'hypothèse selon laquelle la variabilité opératoire sur une placette se traduit par une erreur égale à $\pm 5\%$ de la valeur moyenne. Signalons que cette variabilité relativement faible ne peut être obtenue qu'en utilisant une forte densité d'échantillonnage. Une autre variabilité du même ordre de grandeur, issue de la variabilité de l'évolution du site, a été simulée.

Ainsi, à chaque fois que le stock de carbone est simulé au niveau d'un site, on effectue après la simulation d'une valeur théorique un nouveau tirage aléatoire dans la distribution normale de moyenne égale à la valeur simulée précédemment, et d'écart-type égale à 10% de cette moyenne. De cette manière, nous simulons une erreur à la mesure à chaque date.

Figure 2 - Exemple de loi de distribution du stock de carbone associé à la combinaison « Cambisol x terres arables ».

Figure 2 - Example of distribution of carbon stocks associated with the combination «Cambisol x Arable lands».



Détection des variations de stock à l'aide du réseau de surveillance

Etudier les variations de stock à l'aide du réseau de surveillance consiste à comparer les valeurs de stock mesurées en chaque site à une date t par rapport à celles mesurées à une date t_0 .

D'un point de vue statistique, ces populations de sites (à la date t et à la date t_0) sont considérées comme dépendantes et sont dites appariées. Ainsi, toute variation de stock de carbone au niveau du territoire français peut être détectée par le réseau de surveillance si les moyennes des différences de stocks d sur les populations sont significativement différentes au risque α . En d'autres termes, la méthode revient à mettre en œuvre un test bilatéral de comparaison de la moyenne des différences de stock à la valeur théorique 0. Ce test consiste à calculer une quantité z_0 qui dépend des moyennes et des variances de l'échantillon constitué des différences de stocks. Dans notre cas, la formule de z_0 s'écrit :

$$z_0 = \frac{m_d}{\sqrt{\frac{1}{n} s_d^2}}$$

Où m_d et s_d^2 sont les moyennes et variances observées de la différence de stock entre les deux échantillons t et t_0 .

Une hypothèse du test est la normalité de la population des différences (et non des deux populations d'origine).

D'autre part, selon que la taille de l'échantillon est supérieure ou inférieure à 30, la quantité z_0 est comparée soit à la loi normale centrée réduite, soit à la loi de Student à $(n-1)$ degrés de liberté. Ainsi, on conclut que la moyenne des différences est significativement différente de la valeur théorique 0 si la quantité z_0 est supérieure ou égale à la valeur de la loi pour le seuil de signification retenu. Nous avons choisi de retenir les seuils de signification à 5 % et 10 %. Dans notre étude, nous avons effectué 30 répétitions de mise en place du test.

HYPOTHÈSES DE TRAVAIL

Cette partie décrit les différents scénarios retenus dans la modélisation des variations des stocks de carbone liés à des changements d'usage ou de pratique des sols. Le choix de ces différents scénarios résulte d'une expertise collective de l'INRA sur le potentiel de stockage de carbone dans les sols prenant en compte la faisabilité des changements d'usage ou de pratiques au niveau national (INRA, 2002). Dans un souci de simplification, seuls les sites de surveillance se situant au niveau des points théoriques seront retenus pour les simulations.

Le travail a pour objectif de savoir si le réseau de surveillance est capable de détecter les variations de stock de carbone et, si oui, de savoir au bout de combien de temps la variation peut être significativement détectée.

Le semis direct

Dans un premier temps, nous avons étudié une évolution de pratique culturale correspondant au passage à un travail réduit du sol: le « semis direct ». Dans ces conditions, le stockage de carbone ne dépasse pas 12 tonnes par ha et suit une loi du type exponentielle (INRA, 2002)(figure3).

La simulation consiste à faire l'hypothèse que le changement de pratique s'effectue sur une certaine surface des terres arables. L'une des hypothèses que nous avons retenues est la mise en œuvre de cette pratique sur 20 % des terres arables: ce choix est guidé par le fait que seulement 70% des terres arables sont aptes à la mise en œuvre de cette technique (Saby *et al*, 2001), et que plusieurs contraintes techniques et économiques rendent l'extension de cette pratique difficile (INRA, 2002). Nous avons toutefois également testé des hypothèses plus fortes. Nous avons considéré que le changement de pratique s'effectue en une année. Pour le mettre en œuvre au niveau du réseau de surveillance, nous avons tiré au hasard à hauteur de 20% parmi les sites ayant une occupation de type « terres arables ». Ces sites sont affectés d'un stockage de carbone correspondant à la loi décrite ci-dessus, et modulé par une variabilité aléatoire de $\pm 10\%$ autour de cette loi. Le fait de supposer qu'une modification portant sur 20% des terres arables se retrouvera sur 20% des points du réseau situés en terre arable est une approximation.

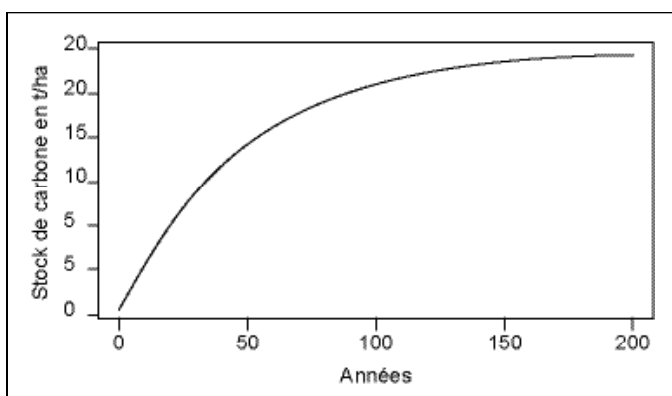
Plusieurs scénarios sont envisageables pour mettre en œuvre le test de détection de la variation.

Réseau « terre arable » sans suivi des pratiques

L'absence de suivi des pratiques culturales au niveau des sites de surveillance ne permet pas de savoir quels sites ont vu les pratiques culturales évoluer en « semis direct ». Cette hypothèse conduit à mettre en place le test de détection de la variation sur l'ensemble de la population des sites déterminés comme ayant une occupation de type « terres arables ».

Figure 3 - Loi de stockage de C lors d'une réduction du travail du sol.

Figure 3 - Kinetics of carbon accumulation in the case of direct drilling replacing conventional tillage.



Réseau « semis direct » avec suivi des pratiques

En disposant de suivis des pratiques culturales, il est possible de discerner, au sein de la population des sites déterminés comme ayant une occupation de type « terres arables », ceux ayant subi le changement de pratique. Le test de détection de la variation est alors effectué sur cette sous-population.

Réseau « semis direct » spécifique

La mise en place d'un réseau spécifique consiste à multiplier les sites de mesures dans les lieux d'intérêt. Dans notre cas, mettre en place un tel type de réseau consiste à multiplier les sites de mesures dans les zones de terres arables qui ont subi le changement de pratique.

L'intérêt de sa mise en place réside dans la possibilité de détecter de façon plus précoce des variations de stocks de carbone. Nous avons donc étudié la relation qui existe entre le nombre de sites mis en place et le nombre d'années nécessaire à une détection de la variation de stock.

Augmentation de la surface en semis direct

En dernier lieu, nous avons étudié l'influence sur la détection de la variation d'une augmentation de la surface de changement de pratique. Dans cette partie, nous avons tenu compte de l'aptitude des sols au semis direct, qui a été estimée à 70 % des terres arables (Saby *et al.*, 2001). Comme pour le réseau spécifique, on observe en fonction de la surface en « semis direct » le temps nécessaire à la détection de la variation.

Reboisement des terres arables

Dans un deuxième temps, nous avons étudié une évolution d'usage correspondant au passage des terres arables en forêt. Dans ces conditions, la séquestration de carbone ne dépasse pas 30 tonnes par ha et suit aussi une loi du type exponentielle (INRA, 2002) (*figure4*).

La simulation consiste à faire l'hypothèse que l'augmentation de la surface en forêt s'effectue au rythme de 30000 ha par an pendant 20 ans. Le choix de cette surface est fondé sur les projections du Plan National de Lutte Contre le Changement Climatique (PNLCCC, 2000). Ces surfaces sont alors affectées d'un stockage de carbone correspondant à la loi décrite ci-dessus.

Le réseau RMQS

Le reboisement de 30000 ha par an se traduit au niveau du réseau de surveillance par le changement d'occupation de 1 site par an. Sachant que la période de reboisement est simulée sur 20 ans, 20 sites sont au plus concernés. Le test de détection de la variation s'applique à des populations s'accroissant de 1 individu par an, tandis que les sites déjà reboisés continuent de stocker le carbone.

croissant de 1 individu par an, tandis que les sites déjà reboisés continuent de stocker le carbone.

Le réseau spécifique

Le réseau spécifique correspond à la mise en place de 10 nouveaux sites par an au niveau des nouvelles forêts. Le test de détection de la variation s'applique alors à des populations s'accroissant de 10 individus par an, tandis que les sites déjà reboisés continuent de stocker le carbone.

Prairies permanentes sur les terres arables

Enfin, nous avons étudié une évolution de pratique culturelle correspondant à un passage des terres labourables en prairies permanentes. Dans ces conditions, la séquestration de carbone ne dépasse pas 25 tonnes par ha et suit une loi du type exponentielle (INRA, 2002) (*figure5*). Plusieurs scénarios sont envisageables pour mettre en œuvre le test de détection de la variation.

Le réseau RMQS : 20 % des terres arables en 1 an

La simulation consiste à faire dans un premier temps l'hypothèse que le changement de pratique s'effectue, en une année, sur 20 % de la surface des terres arables. Cette hypothèse peut être considérée comme extrême (INRA, 2002). La mise en œuvre au niveau du réseau de surveillance consiste alors à tirer au hasard, à hauteur de 20%, parmi les sites ayant une occupation de type « terres arables ». Ces sites sont affectés d'un stockage de carbone correspondant à la loi décrite ci-dessus. Ce changement d'occupation étant facile à détecter avec les images satellites, la simulation ne prend donc en compte que les points ayant changé d'usage.

Le réseau RMQS : 10000 ha par an pendant 20 ans

Dans un deuxième temps, nous avons testé une hypothèse plus réaliste, qui consiste à simuler le changement d'usage au rythme de 10000 ha par an pendant 20 ans. Cette hypothèse plus réaliste pourrait correspondre

Figure 4 - Loi de stockage de carbone lors d'un changement d'occupation du sol correspondant à un reboisement

Figure 4 - Kinetics of carbon accumulation in the case of an afforestation

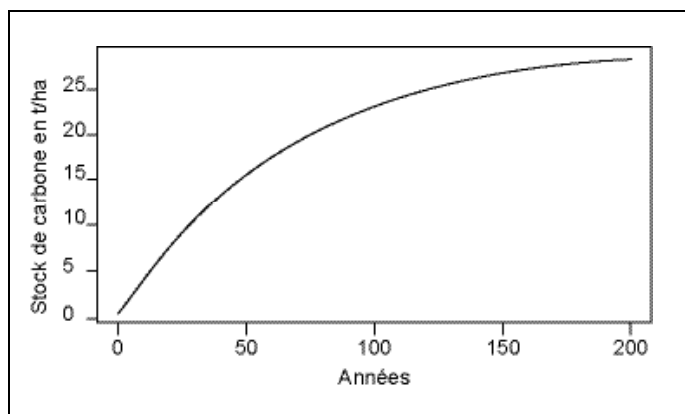


Figure 5 - Loi de stockage de C lors d'un passage à la prairie permanente.

Figure 5 - Kinetic of carbon accumulation in the case of a conversion of arable lands to grasslands.

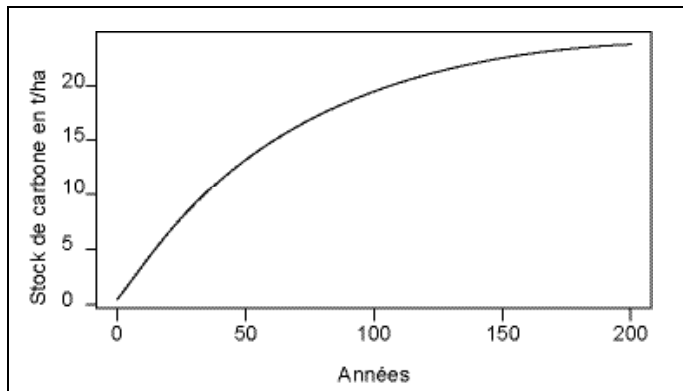


Figure 6 - Stabilité pour les 100 réseaux géographiquement simulés.

Figure 6 - Stability for 100 geographically simulated networks.

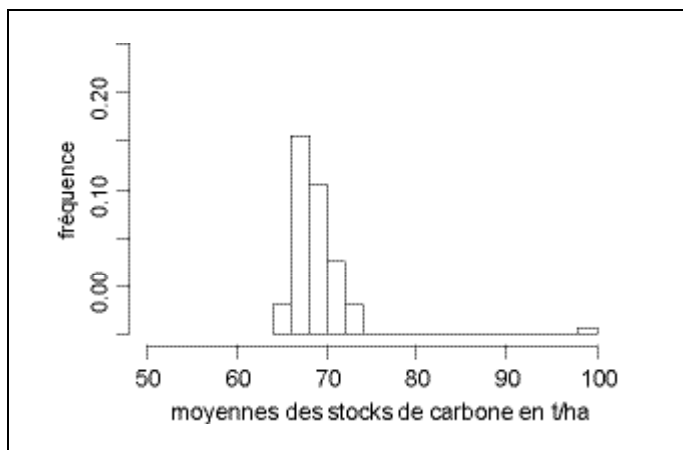
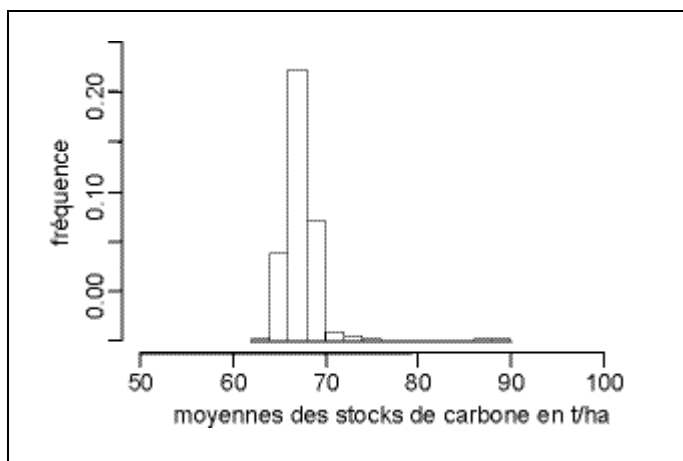


Figure 7 - Stabilité pour les 500 répétitions de simulation.

Figure 7 - Stability for 500 repetitions of simulations.



à une transformation progressive de terres actuellement en maïs ensilage vers des prairies permanentes, soit à un changement des régimes alimentaires des animaux (INRA, 2002). De la même façon que précédemment, la simulation ne prend donc en compte que des points ayant changé d'usage.

Le réseau spécifique

Le réseau spécifique correspond à la mise en place de 10 nouveaux sites par an au niveau des nouvelles prairies. Dans ce contexte, le test de détection de la variation s'applique à des populations s'accroissant de 10 individus par an, tandis que les sites ayant déjà changé d'occupation continuent de stocker le carbone.

RÉSULTATS

Stabilité des réseaux

Quelle que soit la configuration du réseau, ce dernier apparaît relativement stable (figures 6 et 7). Les valeurs moyennes de stocks sont peu étalées, à l'exception de quelques « outliers » aux valeurs très fortes. Cette apparente stabilité statistique ne doit pas cacher une évidence sous-jacente à la variabilité observée: toute modification géographique de l'emplacement des points du réseau est susceptible de provoquer une différence significative des stocks moyens. En d'autres termes, 2000 points régulièrement répartis sur le territoire français peuvent donner des estimations différentes pour peu que leur implantation locale diffère légèrement. Il convient donc de se garder de réaliser des statistiques d'évolutions temporelles si l'on n'est pas certain que l'emplacement des sites est resté identique.

Autrement dit, une approche comptable qui calculerait des bilans de stocks nationaux sur la base d'un échantillonnage indépendant lors de deux dates successives donnerait des résultats qui ne seraient pas pertinents.

Semis direct

La figure 8a représente les limites de seuil statistique de détection et, en regard, l'évolution des valeurs de \bar{z} au cours du temps. De toute évidence, pour une hypothèse de 20% des terres arables converties en semis direct, et avec un réseau « aveugle » (sans connaissance des pratiques sur les sites), une détection significative ne peut avoir lieu avant une dizaine d'années de suivi. Les simulations les plus défavorables (décile inférieur) prédisent une détection significative au bout de 25 ans de suivi.

Si l'on connaît les placettes où le semis direct est adopté, la situation s'améliore nettement, sans toutefois per-

mettre une distinction statistiquement significative avant 5 ans en moyenne (ce qui correspond au pas de temps retenu pour le suivi du RMQS), et 10 ans pour les simulations les plus défavorables (figure 8b). Les limitations de détection proviennent du trop faible nombre de sites et de leur variabilité locale.

La mise en place d'un réseau spécifique permet une détection précoce des changements, à la condition que le nombre de placettes de suivi soit supérieur à 50 (figures 9a et 9b).

Si l'on augmente la surface convertie au semis direct, les résultats issus du réseau systématique permettent une détection plus précoce (figures 9c et 9d).

Reboisement des terres arables

Dans le cas du reboisement de terres arables (hypothèse 3000 hectares par an), le réseau systématique permet une détection statistique de l'augmentation des stocks au bout d'un peu plus de 15 ans en moyenne, et de 20 ans pour les simulations les plus défavorables (figure 8c).

Si l'on met en place un réseau spécifique (10 nouvelles placettes installées chaque année sur des terres afforestées), la limite temporelle de détection devient tout à fait acceptable (environ 7 ans, et un peu moins de 10 ans pour les simulations les plus défavorables, figure 8d). Elle reste cependant encore trop longue pour être compatible avec la durée de la période d'engagement.

Prairies

Avec l'hypothèse très forte de changement rapide de 20% des terres arables en prairies, le temps nécessaire à la détection statistique par le réseau systématique s'élève à 3 ans (figure 8e). Cette durée atteint 5 ans dans les cas les plus défavorables.

Dans le cas de l'hypothèse plus réaliste de conversion de 10000 ha de terres arables en prairies par an durant 20 ans, la détection n'a lieu qu'au bout de 18 ans (figure 8f). Cette durée atteint plus de 25 ans dans les cas défavorables.

Si l'on met en place un réseau spécifique (10 nouvelles placettes installées chaque année sur des terres arables reconverties en prairies), la limite temporelle de détection devient tout à fait acceptable (environ 7 ans, et un peu moins de 10 ans pour les simulations les plus défavorables, figure 8g). A noter qu'elle est toutefois encore trop longue pour être applicable dans la durée de la période d'engagement.

CONCLUSION

Dans les différents scénarios 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.

Ceci signifie qu'une densification du réseau ou la mise en place de réseaux spécifiques sera nécessaire si l'on prétend réaliser un

contrôle au sol du carbone stocké durant la période d'engagement. Nous pouvons conclure de l'ensemble de ces simulations que la mise en place du réseau systématique tel qu'il est envisagé pourrait permettre d'apporter des preuves comptables et statistiques de la séquestration additionnelle sous un certain nombre de conditions:

- réaliser un suivi des usages et des pratiques. La question centrale est alors liée au coût de mise en place de ce réseau, et à la faisabilité et au coût du contrôle des surfaces soumises à des usages et des pratiques donnés,
- densifier le réseau et/ou mettre en place des suivis spécifiques dédiés à certains usages,
- s'assurer que les changements d'usage suivis aient une pérennité dans le temps compatible avec la durée nécessaire au suivi et avec la période d'engagement.

Ce dernier point est particulièrement important et soulève un point majeur en ce qui concerne les changements d'usage ou de pratique. En effet, si les changements sont rapides et nombreux, le nombre de sites qu'il faudrait théoriquement suivre pour contrôler la cinétique de stockage deviendra très rapidement prohibitif.

L'ensemble de ces considérations sur le contrôle des stocks de C du sol et sur la vérifiabilité de ce contrôle montre l'étendue des progrès qui restent à réaliser si l'on prétend faire un bilan fiable et vérifiable du stockage dans les sols durant la période d'engagement:

- développer un suivi des pratiques au travers de procédures d'inventaire, d'enquêtes, ou d'engagements contractuels;
- développer un réseau de surveillance systématique (ou spécifiquement dédié à certains changements), afin de disposer de bilans statistiques et d'outils de validation des prédictions fournies par les modèles;

De toute évidence, l'investissement à réaliser est très important, et l'on peut craindre que le coût engendré par une vérification complète dépasse dans beaucoup de cas les gains escomptés en séquestration. Dans une récente étude, Pretty et Ball (2001) montrent que les prix pratiqués sur les quelques marchés de carbone existant actuellement sont largement inférieurs aux coûts des externalités (95\$ la tonne en Europe), et le plus souvent compris entre 2,5 et 5 \$ la tonne.

Au-delà de ce problème de coût, d'autres contraintes sont prévisibles en ce qui concerne la comptabilisation et la vérification du stockage du carbone dans les sols.

Le problème récurrent de la « base-line » – par rapport à quoi compare-t-on? – se posera inévitablement. Une solution pourrait être de mettre en place des sites témoins ne faisant pas l'objet de mesures spécifiques, mais conduits de façon identique à la situation antérieure. Ceci reviendrait toutefois à augmenter encore le nombre de sites nécessaire et les coûts afférents.

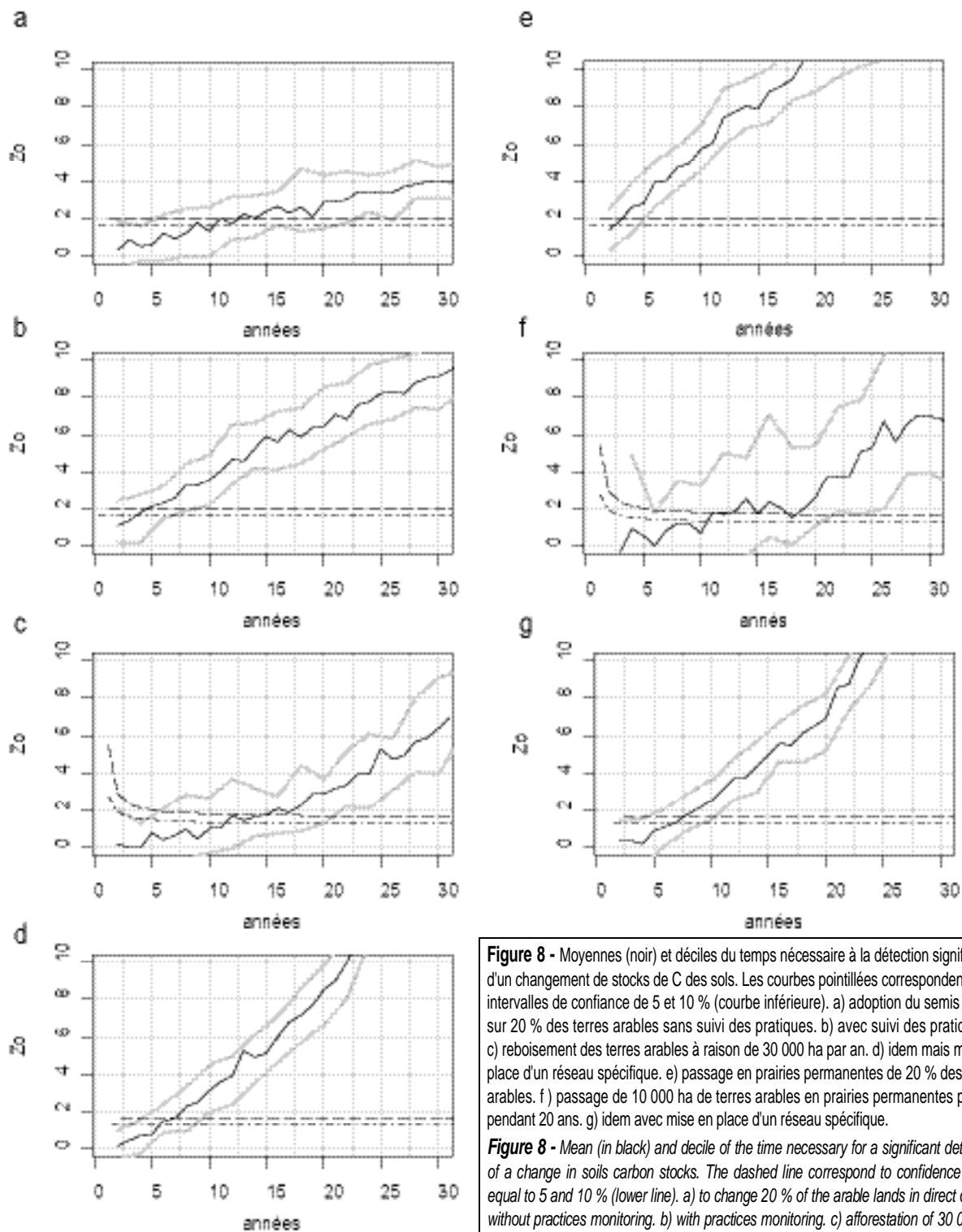
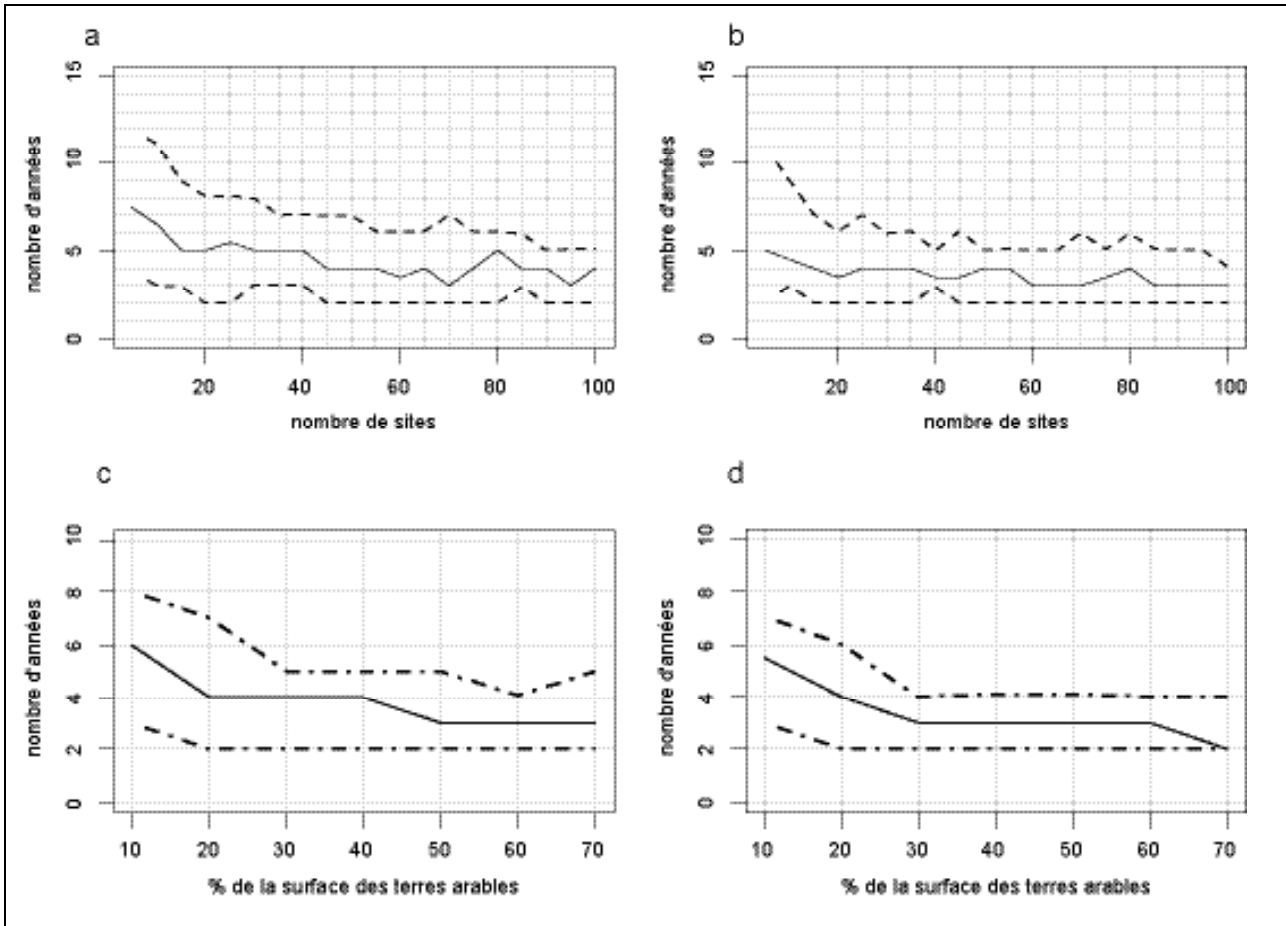


Figure 8 - Moyennes (noir) et déciles du temps nécessaire à la détection significative d'un changement de stocks de C des sols. Les courbes pointillées correspondent à des intervalles de confiance de 5 et 10 % (courbe inférieure). a) adoption du semis direct sur 20 % des terres arables sans suivi des pratiques. b) avec suivi des pratiques. c) reboisement des terres arables à raison de 30 000 ha par an. d) idem mais mise en place d'un réseau spécifique. e) passage en prairies permanentes de 20 % des terres arables. f) passage de 10 000 ha de terres arables en prairies permanentes par an pendant 20 ans. g) idem avec mise en place d'un réseau spécifique.

Figure 8 - Mean (in black) and decile of the time necessary for a significant detection of a change in soils carbon stocks. The dashed line correspond to confidence levels equal to 5 and 10 % (lower line). a) to change 20 % of the arable lands in direct drilling without practices monitoring. b) with practices monitoring. c) afforestation of 30 000 ha of arable lands per year. d) the same but with an implementation of a specific monitoring network. e) conversion of 20 % of arable lands into permanent grasslands. f) conversion of 10 000 ha of arable lands into permanent grasslands per year during 20 years. g) the same but with an implementation of a specific monitoring network.

Figure 9 - Médianes et déciles du nombre d'années nécessaires pour parvenir à une détection significative d'une séquestration additionnelle, a) en fonction du nombre de sites dans le cas de la conversion au semis direct au risque de 5 %. b) en fonction du nombre de sites dans le cas de la conversion au semis direct au risque de 10 %. c) en fonction de la surface convertie au semis direct au risque de 5 %. d) en fonction de la surface convertie au semis direct au risque de 10 %.

Figure 9 - Medians and deciles of the number of years necessary for a significant detection of additional carbon storage. a) according to the number of sites during a direct drilling conversion with a 5 % confidence level. b) according to the number of sites during a direct drilling conversion with a 10 % confidence level. c) according to the area whose practice changed into direct drilling with a 5 % confidence level. d) according to the area whose practice changed into direct drilling with a 10 % confidence level.



REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié de financements de la part du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable dans le cadre d'une commande d'expertise collective à l'INRA sur le stockage de carbone dans les sols agricoles. Nous remercions vivement l'ensemble des co-auteurs et la coordination éditoriale de cette expertise qui ont assuré dans ce cadre une première critique attentive et constructive de ce travail. Le réseau RMQS est une opération financée par le GIS Sol (MEDD, MAAPAR, IFEN, ADEME, INRA). La base CORINE LAND COVER a été mise à disposition d'Infosol par l'IFEN. La base « carbone » a bénéficié de financements de la MIES pour sa

constitution. Nous remercions également Erwin Ulrich et Luca Montanarella pour leurs remarques très constructives lors de la relecture d'une première version de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- Arrouays D., Deslais W. *et al.*, 2001 - « The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France. » *Soil Use and Management* 17(1): 7-11.
- Arrouays D., Jolivet C. *et al.* 2002 - Une initiative nouvelle en France: la mise en place d'un réseau multi-institutionnel de mesures de la qualité des sols. *C. R. Acad. Fr.* (sous presse).
- CEC 1993 - CORINE land cover. Bruxelles: 144 pp.

- Germaneau C. 2002 - Exploitation des données de l'Observatoire de la Qualité des Sols. Conséquences pour le réseau de mesures de la qualité des sols. Rapport INRA Infosol, 35p.
- King D., Jamagne M. *et al.*, 1999 - «Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. Etat d'avancement et exemples d'utilisation. » *Etude et Gestion des Sols* 6(4): 215-228.
- INRA, 2002 -Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France? Arrouays, D. Balesdent, J. Germon, J.C. Jayet, P.A. Soussana, J.F. et Stengel, P. (Eds). Rapport d'expertise scientifique collective réalisée par l'INRA à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable sur le stockage de carbone dans les sols agricoles, 332 p.
- IPCC, 2001 - Land Use Land Use Change and Forestry IPCC Special Report. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK.
- Jolivet C., Boulonne L. *et al.*, 2002 - Cahier des charges pour la mise en place du réseau de mesures de la qualité des sols. INRA Infosol, 39 p.
- Lee J., PhillipsD., *et al.*, 1993 - «The effect of trends in tillage practices on erosion and carbon content of soils in the US corn belt.» *Water Air and Soil Pollution* 70: 389-401.
- PNLCCC, 2000 - Programme national de lutte contre le changement climatique 2000-2010. Paris, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre: 215 pp.
- Pretty J. et Bal A., 2001 - Agricultural influences on carbon emissions and sequestration: a review of evidence and the emerging trading options. University of Essex, UK, Centre for Environment and Society, Department of Biological Sciences.
- Saby N., Le Bas C., *et al.*, 2001 - Constitution et thématisation de la base de données des sols des bassins de production I.T.C.F. Orléans, Unité INFOSOL de l'INRA: 24 pp.

