

# Evolution des teneurs en carbone organique dans l'horizon de surface des sols cultivés en Alsace

## Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre

C. Swiderski<sup>(1)\*</sup>, N.P.A. Saby<sup>(1)</sup>, J.P. Party<sup>(2)</sup>, J. Sauter<sup>(3)</sup>, R. Köller<sup>(3)</sup>, P. Vandijk<sup>(4)</sup>,  
B. Lemerrier<sup>(5)(6)(7)</sup>, et D. Arrouays<sup>(1)</sup>

1) INRA, US1106 InfoSol, F-45075 Orléans, France

2) Sol Conseil Strasbourg

3) ARAA Strasbourg

4) Chambre d'Agriculture du Bas-Rhin

5) AGROCAMPUS OUEST, UMR1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35000 Rennes, France

6) INRA, UMR1069, Sol Agro et hydrosystème Spatialisation, F-35000 Rennes, France

7) Université européenne de Bretagne, France

\*: Auteur correspondant: Chloe.Swiderski@orleans.inra.fr

### RÉSUMÉ

La Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) regroupe les résultats d'analyses d'horizons de surface des sols de parcelles agricoles effectuées à la demande des agriculteurs sur l'ensemble du territoire national par les laboratoires agréés par le Ministère en charge de l'agriculture. Les données sont identifiées par le lieu et la date de prélèvement. La base de données permet de suivre la variabilité des caractéristiques de l'horizon de surface des sols cultivés et leur évolution au cours du temps.

Les enjeux agronomiques et environnementaux concernant la matière organique sont majeurs, mais l'évolution de sa teneur dans les sols à l'échelle nationale ou régionale reste encore peu renseignée. L'objectif de ce travail est de mettre en évidence et de quantifier les évolutions temporelles des teneurs en carbone organique dans les sols à partir des 47794 données disponibles dans la BDAT, à l'échelle de la région Alsace, sur une période s'étalant de 1990 à 2009. Des synthèses cartographiques et des statistiques menées sur les données brutes et les données agrégées au niveau cantonal ont permis de mettre en évidence une évolution significative des teneurs en carbone organique pour 28 % des cantons (dont 18,5 % en diminution). Une procédure de ré-échantillonnage a été mise en place afin de réduire le biais inhérent à la méthode de collecte des analyses.

La BDAT est une source d'informations peu coûteuse et facilement mobilisable. La poursuite de la collecte permettra d'avoir plus de recul et de confirmer ou d'infirmer les tendances d'ores et déjà observées. Une piste d'amélioration consisterait en un géoréférencement plus précis des échantillons prélevés afin de pouvoir relier plus aisément les données de la BDAT avec d'autres données du dispositif du Gis Sol (RMQS, BDETM) ou des données sur les facteurs de la pédogenèse.

### Mots clés

Sol, Base de Données des Analyses de Terre, carbone organique, Alsace, cartographie, surveillance, test de Wilcoxon.

## SUMMARY

### IMPACTS OF LAND-USE CHANGES ON SOIL ORGANIC MATTER, MICROBIAL COMMUNITIES AND C AND N FLUXES

The national soil testing data base (BDAT) is gathering all the results of soil tests made at farmers' request by commercial laboratories approved by the French Ministry of Agriculture. Data are defined by their location and the year of sampling. This database constitutes an important source of information on agricultural topsoil parameters variability and their temporal evolution. Organic carbon in agricultural soils represents a main issue regarding agriculture and environment. Soil organic carbon changes are weakly documented at national or regional scale. The aim of this study is to assess and to quantify changes in carbon contents in agricultural soils of Alsace and identify some elements that might explain observed variations.

Maps and statistical treatments on raw data and aggregated data at cantonal level highlight significant decrease in organic carbon contents. In order to limit biases linked to uncontrolled sampling strategy, we applied a resampling scheme before producing results.

The national soil testing database is quite cheap and easy to mobilize. It's a key tool for inventory and monitoring of agricultural topsoil parameters. Thanks to these data, we can monitor the temporal evolution of soil chemical properties. Moreover, keeping gathering data will enable to confirm or refute trends already observed. In the future, the precise georeferencing of soil samples will enable to link the database with other sources of information from Gis Sol programs (like RMQS or BDETM) or other data on pedogenesis drivers.

#### Key-words

Soil testing database, organic carbon, Alsace, cartography, monitoring, Wilcoxon test

## RESUMEN

### EVOLUCIÓN DE LOS CONTENIDOS EN CARBONO ORGÁNICO EN EL HORIZONTE DE SUPERFICIE DE LOS SUELOS CULTIVADOS DE ALSACIA: Análisis a partir de la Base de Datos de los Análisis de Tierra

La Base de Datos de los Análisis de Tierra (BDAT) agrupa los resultados de análisis de las parcelas agrícolas efectuados a la demanda de los agricultores sobre la totalidad del territorio nacional por los laboratorios autorizados por el ministerio en carga de la agricultura. Los datos están identificados por el lugar y la fecha de muestreo. La base de datos permite seguir la variabilidad de las características del horizonte de superficie de los suelos cultivados y su evolución en el curso del tiempo.

Las cuestiones agronómicas y ambientales que conciernen la materia orgánica están mayores, pero la evolución de su contenido en los suelos a escala nacional o regional queda todavía poco informada. El objetivo de este trabajo es poner en evidencia y cuantificar las evoluciones temporales de los contenidos en carbono orgánico en los suelos a partir de los datos disponibles en la BDAT, a escala regional, por un periodo que va de 1990 a 2009. Este estudio fue realizado en Alsacia, región donde las informaciones sobre los factores potenciales de evolución del carbono orgánico están relativamente numerosas por una larga ventana de tiempo. Síntesis cartográficas y estadísticas conducidas sobre datos brutos y datos agregados al nivel cantonal permitieron poner en evidencia una evolución significativa de los contenidos en carbono orgánico para 28 % de los cantones (cuyo 18,5 % en disminución). Un procedimiento de re-muestreo fue usado para reducir el error inherente a la colecta de análisis.

La BDAT es una fuente de informaciones de gran envergadura poco costosa y fácilmente movilizada que permite un seguimiento y una vigilancia de los horizontes de superficie de los suelos cultivados. La continuación de la colecta permitirá tener más perspectivas e infirmar o confirmar las tendencias ya observadas. Una pista de mejoramiento consistiría en un geo referenciamiento más preciso de las muestras afín de poder relacionar más fácilmente los datos de la BDAT con otros dispositivos del Gis Sol (RMQS, BDETM) o de datos de uso del suelo.

#### Palabras clave

suelo, Base de Dato de los Análisis de Tierra, carbono orgánico, Alsacia, cartografía, evolución temporal.

Le carbone organique du sol (CO) représente un enjeu majeur tant dans le domaine agronomique qu'environnemental (Bernoux *et al.*, 2011). La matière organique joue un rôle essentiel pour la structure du sol et sa stabilité (Chenu *et al.*, 2011), la rétention en eau, la nutrition minérale des plantes et l'activité biologique des micro-organismes du sol (Attard *et al.*, 2011). Elle constitue un élément clé pour la gestion durable des écosystèmes. De plus, elle constitue un puits potentiel de carbone à considérer lorsque sont abordées les problématiques de changement climatique et de limitation ou d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

La Base de Données des Analyses de Terres (BDAT, <http://bdat.gissol.fr>) regroupe les analyses de terre réalisées à la demande des agriculteurs par les laboratoires agréés par le Ministère en charge de l'agriculture. Ces analyses concernent les horizons superficiels des sols de parcelles agricoles (Saby *et al.*, 2004). Ce sont principalement des parcelles de terre arable mais on trouve aussi quelques parcelles affectées à d'autres usages tels que les prairies, les vignes ou les vergers. Actuellement, 1938600 analyses sont enregistrées dans la BDAT, et la mutualisation de ces données permet de disposer d'une source d'information spatialisée (le niveau de détail étant la commune) pertinente pour le suivi spatio-temporel des caractéristiques des sols agricoles depuis une vingtaine d'années.

L'analyse spatiale de ces données permet généralement de distinguer de grands domaines dont l'organisation se différencie par les usages du sol et les facteurs naturels (tels que le climat, les matériaux parentaux, la texture...). En revanche, les évolutions temporelles présentent des variations beaucoup moins importantes et les facteurs explicatifs sont souvent plus difficiles à distinguer. Aussi, de façon à limiter les biais liés aux variabilités locales et à la diversité des systèmes de production, le suivi des teneurs en CO des sols est analysé à l'échelle régionale plutôt que nationale: certaines régions ont déjà été étudiées comme la Bretagne ou le Limousin (Lemerrier *et al.*, 2006) ou encore la Franche-Comté (Saby *et al.*, 2008).

Les objectifs de ce travail ont été de rechercher s'il existait des évolutions temporelles des teneurs en carbone organique dans les sols à l'échelle de la région de l'Alsace, de les quantifier et enfin d'en estimer les facteurs explicatifs.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Méthode d'analyse du carbone organique

Le regroupement des analyses des laboratoires dans une base de données se justifie par l'utilisation de méthodes normalisées communes à tous les laboratoires. Ici, pour le CO, les teneurs sont obtenues par dosage spectrométrique après oxydation dans un milieu sulfochromique (méthode Anne norme AFNOR X 31-109). Bien que la méthode dite de « combustion

sèche » soit de plus en plus fréquemment utilisée, nous n'avons pas retenu ces analyses dans la mesure où l'on sait que cette méthode donne des résultats sensiblement différents et supérieurs à ceux de la première (Jolivet *et al.*, 1998) et qu'elle est très peu représentée dans les périodes les plus anciennes (avant 2005).

Après réception des résultats des analyses des laboratoires, l'intégration dans la base suit une procédure de validation en trois étapes: d'abord la validation informatique et l'harmonisation des unités, puis la validation analytique (méthodes, vérification que les teneurs observées correspondent à celles attendues pour un horizon de surface de sols agricoles...), enfin la validation géographique (localisation spatiale).

### Pas de temps et région étudiée

Les résultats disponibles dans la BDAT s'étalent de 1990 à 2009. L'exploitation de la BDAT est effectuée en regroupant les années en périodes de 5 ans. À ce jour, 4 périodes sont disponibles: 1990-1994, 1995-1999, 2000-2004 et 2005-2009. La période 2005-2009 n'est pas complète pour toutes les régions. Le choix de la région étudiée a privilégié une zone géographique déjà complète: l'Alsace.

L'Alsace présente une superficie de 8280 km<sup>2</sup> et se compose de plusieurs ensembles naturels contrastés (*planche I*):

- **la plaine d'Alsace** qui couvre la moitié de la superficie régionale. Cet ensemble concentre l'essentiel de la population et de l'activité économique, en particulier agricole, de la région;
- **le piémont des Vosges**, très favorable à la culture de la vigne, aux arbres fruitiers, et à l'élevage;
- **le Massif Vosgien**, couvert en grande partie de forêts, mais qui dans sa partie sud abrite une agriculture orientée vers l'élevage et la mise en valeur des surfaces en herbe;
- **l'Alsace Bossue**, qui présente des paysages marqués par l'importance des prairies valorisées par l'élevage, des cultures de céréales et des forêts;
- **le Sundgau**, qui est une région de polyculture-élevage.

L'agriculture et la forêt sont très présentes sur le territoire puisqu'elles représentent respectivement 40 % (Surface Agricole Utile = 335 700 ha) et 38 % du territoire. La prédominance de la forêt dans certains cantons explique l'hétérogénéité des effectifs d'analyse sur l'ensemble de la zone.

### Analyse des données

Les résultats d'analyse de la BDAT se répartissent parmi les 67 cantons que compte l'Alsace. Par période, on compte respectivement 10841, 11485, 11096 et 11634 analyses dont la répartition géographique reste relativement stable dans le temps.

### Description statistique

Chaque analyse est localisée par la commune de la parcelle où l'échantillon a été prélevé ou par la commune où se situe

le siège de l'exploitation agricole (code Insee). Cependant, la petite taille de cette entité géographique n'est pas adaptée pour l'exploitation des résultats. En effet, le nombre de déterminations regroupées par commune et par période est souvent trop faible pour une bonne interprétation statistique des résultats. De plus, pour des raisons de secret statistique, l'INRA et le Gis Sol s'engagent auprès des laboratoires à ne pas diffuser les résultats à l'échelle communale. Aussi, l'unité d'agrégation choisie de restitution des résultats est le canton: la variabilité intra-strate est minimisée et la résolution cartographique reste relativement fine (Schvartz et al., 1997) pour une représentation à l'échelle nationale ou régionale.

Afin d'analyser les résultats, des descripteurs statistiques non paramétriques ont été privilégiés. Ces variables (médianes, quartiles) sont robustes et peu sensibles aux valeurs extrêmes qui peuvent être présentes dans ce jeu de données. Les traitements statistiques ont été effectués sur les données brutes (élémentaires) et sur les données agrégées par canton (tableau 1).

### Représentation cartographique

La cartographie des médianes cantonales des teneurs en carbone organique est effectuée pour chaque période temporelle afin d'obtenir une première estimation des évolutions (planche II). Ces cartes sont associées à la représentation des effectifs des échantillons par canton afin d'apprécier la robustesse de la médiane calculée sur l'échantillon.

### Comparaison temporelle des teneurs en carbone organique

L'analyse de l'évolution temporelle s'appuie sur la méthodologie développée par Lemerrier et al (2006) sur le phosphore et le CO en Bretagne et mise en œuvre par Saby et al. (2008) sur le CO en Franche-Comté. Elle consiste à appliquer des techniques de ré-échantillonnage dites *Monte-Carlo* sur les données brutes, préalablement à la mise en œuvre des analyses statistiques. En effet, l'application de tests statistiques nécessite que l'échantillonnage de chaque canton soit comparable dans le temps. L'utilisation directe des données brutes engendrerait en effet un risque de biais élevé et difficile à estimer, lié à une importante variabilité spatiale et temporelle des informations.

L'objectif est donc de simuler un échantillonnage dans lequel le nombre d'analyses par unité de surface agricole utile (SAU) est constant pour chaque canton et pour toutes les périodes. On procède au tirage aléatoire de 80 % des données disponibles au sein de la période la moins bien pourvue. On effectue ainsi une répétition de 1000 tirages avec remise.

La probabilité de tirer une analyse d'un canton  $i$  dans la base de données brute est estimée par:

$$p_i = \frac{SAU_i}{n_i SAU_T}$$

où  $SAU_i$  est la SAU du canton  $i$ ,

**Tableau 1** - Statistiques descriptives par période des teneurs en CO (en g/kg) mesurées en Alsace et sur l'ensemble de la France. Présentation des données brutes et des données agrégées par cantons.

**Table 1** - Descriptive statistics per time period of organic carbon content (g/kg) for Alsace Region and for the whole France. Results are presented for all samples and after aggregation of data at the cantonal level.

	Ensemble des échantillons				Agrégation cantonale			Nombre de cantons disposant de plus de 10 analyses pour toutes les périodes
	Période	Effectif	Médiane	Quartiles	Médiane des effectifs	Médiane des médianes cantonales	Quartiles des médianes cantonales	
Alsace	90-94	10 841	12,1	9,8-15,8	115	13,1	11,5-15,5	66 (100%)
	95-99	11 430	12	10-17	135	13	11,8-15	
	00-04	10 921	12	10-15,7	153	12,4	10,9-14,2	
	05-09	11 311	12	10-15,1	123	12,2	11-14,1	
France	90-94	280 133	15,1	11-22	35	14,5	11-19,4	3370 (90%)
	95-99	496 652	14,5	10,5-20,9	135	13	11,3-19,7	
	00-04	575 487	13,9	10-19,8	78	14,3	10,9-19,1	
	05-09*	283 812	15,1	11-21,5	22	14	11-18,6	

\* collecte et expertise des données en cours au niveau national

$n_i$  le nombre total d'analyses disponibles au sein du canton  $i$ ,  $SAU_T$  la SAU totale de tous les cantons échantillonnés.

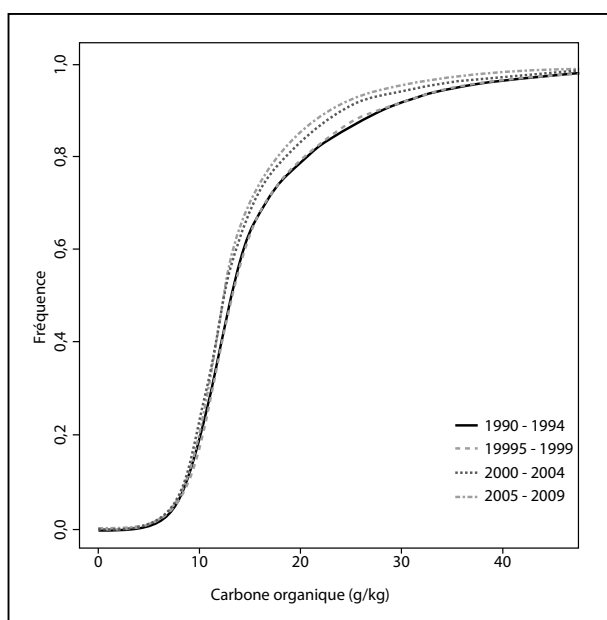
Avec cette méthode de simulation, on tient compte de la variabilité de la superficie des terres agricoles entre les cantons et de la variabilité de la densité d'échantillonnage. Ainsi, pour chaque canton et chaque période, on dispose à l'issue de ce tirage des descripteurs suivants: la médiane, les quartiles et la variance des teneurs en CO.

Dans un premier temps, l'évolution temporelle des caractéristiques chimiques du sol peut être appréhendée par l'observation des histogrammes de fréquence cumulée calculés sur la totalité de la zone d'étude. L'histogramme correspond ainsi à la moyenne des fréquences cumulées issues des 1000 répétitions (figure 1).

Dans un deuxième temps, les évolutions mises en évidence sont testées statistiquement à l'échelle du canton. Le test employé est le test de Wilcoxon. Ce test, non paramétrique, est basé sur la somme des rangs et permet de tester l'hypothèse  $H_0$ : « Les médianes cantonales aux deux dates ne sont pas différentes ». Nous avons retenu dans notre étude le seuil de significativité de 5 %. À chaque tirage, le test est appliqué au niveau du canton et la probabilité associée est calculée. En fin de simulation, on compte, pour chaque canton, le nombre de fois où le test s'est révélé significatif.

**Figure 1** - Courbe de fréquence cumulée des teneurs en carbone organique pour les différentes périodes en Alsace après procédure de ré-échantillonnage.

**Figure 1** - Cumulative frequency distribution of organic carbon content for the different periods in Alsace after application of the resampling procedure.



## Recherche de facteurs d'influence

Les teneurs en CO du sol ont été croisées avec différents paramètres potentiellement explicatifs des teneurs en CO et de leur évolution.

La dynamique du carbone dans le sol est fonction de deux paramètres majeurs: les flux entrants (c'est-à-dire les productions primaires nettes déduites des exportations et les apports externes éventuels) et les vitesses de minéralisation.

Certaines pratiques agricoles comme le déboisement, les retournements de prairie, le travail du sol fréquent sont susceptibles de provoquer la diminution du stock de carbone dans les sols. Il semblerait également que le stock initial de carbone organique joue sur la cinétique de l'évolution (Bellamy *et al.*, 2005).

Les facteurs explicatifs ont été choisis au sein de la BDAT, de la base Corine Land Cover (CLC 1990, 2000 et 2006, site internet du Corine Land Cover), du Registre Général Agricole (RGA 1979, 1988, 2000 et 2010) et du modèle d'évaluation spatiale de l'aléa érosion des sols de l'ARAA (méthode MESALES développée par l'INRA). Nous avons sélectionné les paramètres suivants: les surfaces en prairie permanente et en vignes, la charge en Unité Gros Bétail par hectare (exprimée en équivalent azote/ha), le taux d'argile (médiane cantonale), les teneurs en CO initiales (médiane cantonale pour la période 1990-1994) ainsi que l'indice de sensibilité à l'érosion (rapport annuel du risque d'érosion intégré par canton, MESALES).

La structure des tables du RGA et de CLC permet d'avoir une vision de l'évolution des occupations du sol et des effectifs d'élevage sur des fenêtres de temps compatibles avec les périodes d'observation des teneurs en CO de la BDAT. Ainsi on compare l'évolution du CO du sol avec l'évolution des pratiques agricoles en exprimant les données par des différences observées entre deux dates fixées par canton. Pour les données du RGA, on calcule le delta des surfaces en vigne et en prairie entre 1979 et 2000. L'évolution de la charge en UGB est calculée entre 1979 et 2010. Parallèlement, l'évolution des teneurs médianes cantonales en argile entre les périodes 1995-99 et 2005-09 est observée afin de s'assurer de l'absence de biais lié à l'échantillonnage. Dans un premier temps, une Analyse en Composantes Principales (ACP) permet de comparer l'impact de chaque facteur. Pour les facteurs jugés déterminants après l'ACP, une régression linéaire est effectuée.

## RÉSULTATS

### Description des évolutions des teneurs en carbone organique observées

Les statistiques générales des teneurs en carbone organique sont présentées dans le *tableau 1*. Elles sont

calculées sur l'ensemble des données brutes, pour visualiser la tendance générale, et également sur les données agrégées par cantons, pour observer la variabilité inter-cantonale. Les teneurs régionales de l'Alsace sont comparées avec les teneurs sur la France entière.

On constate dans un premier temps que les teneurs en Alsace sont légèrement plus faibles que celles observées sur l'ensemble du territoire, et ce, quelle que soit la période considérée. Les statistiques cantonales ramenées au niveau régional (médiane des médianes cantonales) permettent d'observer une diminution du carbone organique entre 1990 et 2009 qui est masquée si on calcule les médianes sur l'ensemble des données brutes. On note également que les quartiles supérieurs tendent à diminuer plus que les quartiles inférieurs.

La *figure 1* confirme cette diminution des teneurs dans le temps. En effet, les courbes de fréquence cumulée des périodes les plus récentes se décalent vers les valeurs faibles. Les périodes 1995-1999 et 2000-2004 s'individualisent nettement, témoignant d'une évolution irrégulière dans le temps et surtout très marquée entre 1995-99 et 2000-04. On note également que les courbes s'individualisent au niveau du plateau. Cela signifie que les sols les plus riches sont les plus affectés par la diminution. Ceci s'observe également lors de l'examen de l'évolution des quartiles supérieurs (*tableau 1*).

Les teneurs fortes en carbone organique se localisent dans les montagnes Vosgiennes à l'Ouest et en Alsace Bossue au Nord-Ouest avec des teneurs dépassant parfois 20%. Cette zone est principalement occupée par de la forêt, l'élevage et les prairies. La zone centrale enregistre les teneurs plus faibles qui varient entre 10 et 14%, cette zone est principalement exploitée en grande culture et en vigne et les analyses y sont plus fréquentes et plus nombreuses. La diminution des taux de matière organique dans les sols alsaciens semble réelle même si des précautions sont à prendre quant à la représentativité des secteurs peu prélevés (*planche II*).

## Significativité des tendances observées

Quelles que soient les périodes comparées deux à deux, on constate que les évolutions significatives sont le plus souvent dans le sens de la diminution (de 3 à 36 % des cantons). Le coefficient directeur de la droite de régression pour les médianes cantonales des deux périodes comparées est légèrement inférieur à 1 (*tableau 2*).

Les périodes 1990-1994 et 1995-1999 n'ont pas pu être comparées. En effet, le ré-échantillonnage nécessite d'avoir au moins 10 échantillons par commune aux deux périodes. Dans ce cas, il y avait soit absence d'intersection entre les communes analysées sur les deux périodes, soit un échantillon de taille trop faible.

La diminution la plus importante et la plus significative s'observe entre les périodes 1995-1999 et 2000-2004. Dix-neuf cantons sur 53 présentent une diminution significative et le coefficient directeur est de 0,94. Cette tendance ralentit de façon très prononcée entre 2000-04 et 2005-09 puisque seuls 5 cantons enregistrent des variations significatives. De plus, cette variation tend en majorité dans le sens d'une augmentation des teneurs en CO.

La *figure 2* représente graphiquement les résultats du test de Wilcoxon présentés dans le *tableau 2*. Les évolutions entre 1995 et 2004 étant les plus marquées, les droites de régression linéaire tracées pour l'ensemble des points (en vert) et uniquement les points enregistrant une diminution significative (p-value supérieure à 5 %, en noir) sont quasiment confondues. Les diminutions significatives s'observent principalement dans la gamme des teneurs comprises entre 10 et 15 g/kg. Pour la comparaison entre 1995 et 2009, la gamme s'élargit jusqu'à 20 g/kg. Les différences observées sont relativement faibles et oscillent entre -3 et 3 g/kg.

Les résultats du test de Wilcoxon sur les données ré-échantillonnées sont représentés de manière synthétique et spatialisée sur la *planche III*. Le test de Wilcoxon n'est pas

**Tableau 2** - Tableau de synthèse des résultats du test de Wilcoxon: présentation des évolutions significatives de la médiane des teneurs en carbone organique et régression linéaire des médianes cantonales entre les périodes (prises deux à deux) après une procédure de ré-échantillonnage des données.

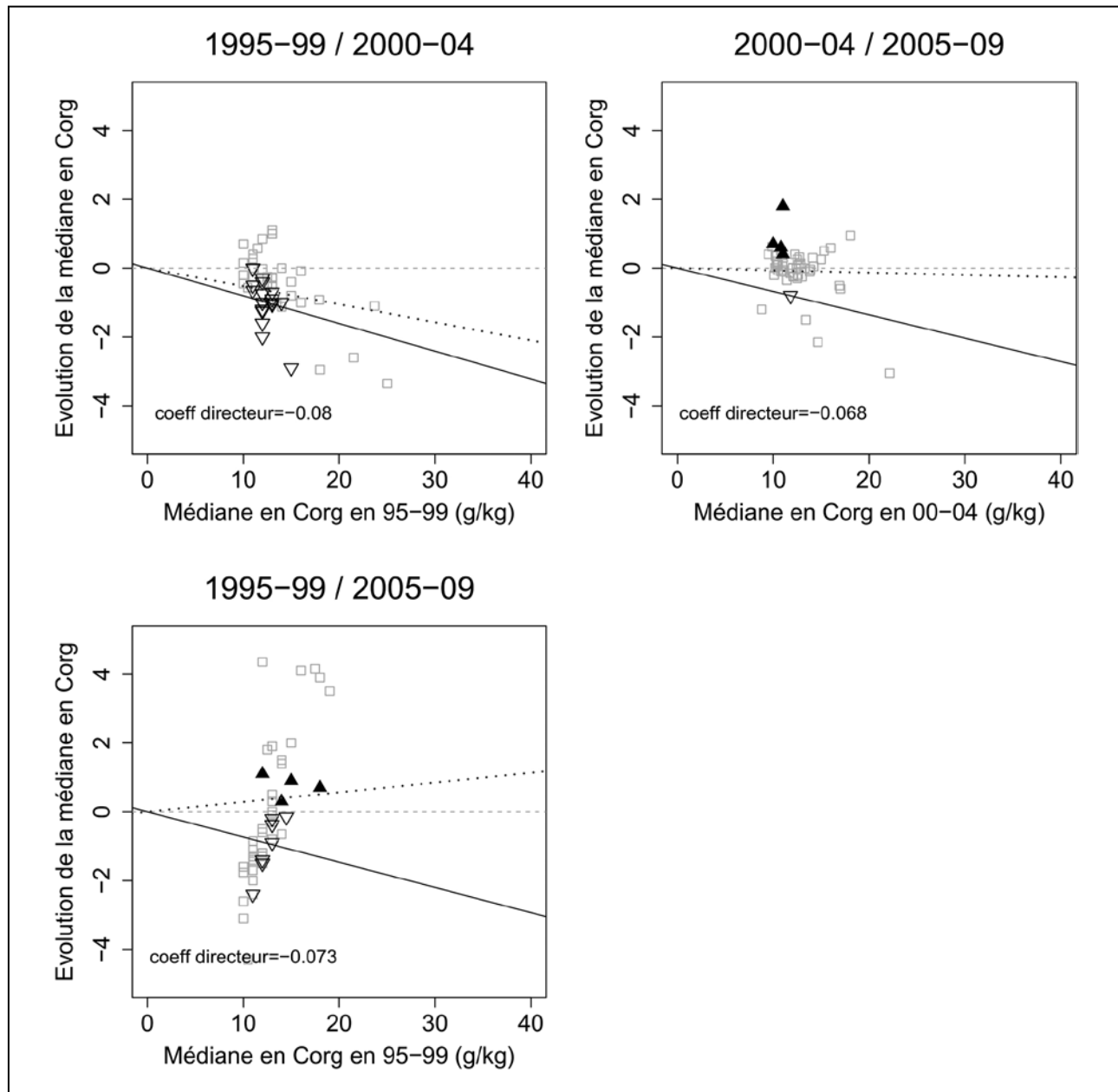
**Table 2** - Summary results of Wilcoxon tests: Statistical significant evolution of median organic carbon content and linear regression of cantonal medians between two periods after the application of the resampling procedure.

Période	Nombre de cantons		Régression linéaire		
	Comparés	Augmentation significative *	Diminution significative *	Coefficient directeur	R <sup>2</sup>
1995-99/2000-04	53	0	19 (35,8%)	0,78	0,95
2000-04/2005-09	53	3 (5,6%)	2(3,8%)	0,88	0,94
1995-99/2005-09	54	5 (9,3%)	10 (18,5%)	0,80	0,83

\* : Test de Wilcoxon, p =0.05

**Figure 2** - Description et significativité des évolutions des teneurs médianes cantonales en carbone organique des sols en Alsace (test de Wilcoxon à  $p = 0,05$ ). Comparaison de la teneur à une période initiale avec la différence observée avec les médianes de la période suivante. Trait discontinu: droite  $y = 0$  ; trait continu noir: droite de régression sur les cantons enregistrant une diminution significative; pointillés gris : droite de régression sur l'ensemble des cantons;  $\nabla$ : diminution significative;  $\blacktriangle$ : augmentation significative;  $\square$ : évolution non significative.

**Figure 2** - Description of the organic carbon content trends and their significance (Wilcoxon test at 5 % level). Comparison of cantonal medians of organic carbon content for the first period and the observed difference with a second period. Broken lines:  $x=0$  ; black continuous line: regression line for cantons with a significant decrease; grey dotted line: regression straight line for all of the cantons;  $\nabla$ : significant decrease;  $\blacktriangle$ : significant increase;  $\square$ : non significant differences.



significatif pour la majorité des cantons (39 sur 66) puisque les p-values sont supérieures à 5 %.

Par conséquent, il est impossible de conclure à une quelconque évolution dans ces cantons. En revanche, les évolutions avérées (cantons en vert sur la première carte) concernent principalement une diminution des teneurs en carbone (deuxième carte de la planche).

## Recherche d'éléments explicatifs et de facteurs d'évolution

Dans un premier temps, une ACP (Analyse en Composante Principale) est réalisée sur l'ensemble des facteurs explicatifs présumés:

- Des facteurs liés à l'évolution des pratiques agricoles:
  - *l'évolution des surfaces toujours en herbe entre 1979 et 2000*: on peut supposer que si ces surfaces diminuent alors les teneurs en CO pourraient diminuer également.
  - *l'évolution des surfaces en vigne entre 1979 et 2000*: au contraire une diminution des surfaces cultivées en vigne pourrait provoquer l'augmentation des teneurs en CO.
  - *l'évolution de la charge en UGB* (exprimé en équivalent azote/ha) *entre 1979 et 2010*: ici le recul de l'élevage (traduit par la diminution des charges en UGB) aurait comme conséquence la diminution des teneurs en CO.

Le *tableau 3* décrit l'évolution de ces différentes variables au cours du temps pour les cantons alsaciens.

La diminution de la charge en UGB par hectare touche 61 cantons sur 63 et est chiffrée à 1573 équivalent azote par hectare en moyenne. Les surfaces toujours en herbe ont diminué de 8 hectares en moyenne entre 1979 et 2000. Enfin la part de la SAU cultivée en vigne a un petit peu augmenté (1,5 ha en moyenne entre 1979 et 2000).

- Des facteurs liés au sol:
  - *l'indice lié au risque de l'aléa érosion* (% de la surface sensible pondérée par la classe de sensibilité (de 1 à 5)), étude menée par l'ARAA en 2007.

**Tableau 3** - Synthèse des tendances d'évolution des pratiques agricoles en Alsace entre 1979 et 2000 (2010 pour les UGB).

**Table 3** - Overview of trends in the agricultural practices between 1979 and 2000 (and between 1979 and 2010 regarding livestock).

Evolution de:	Nombre de cantons avec une évolution négative	Moyenne	Médiane
UGB (equ N/ha)	61/ 63	- 1 573	- 1 207
STH (ha)	52 / 63	- 8,1	- 7,8
Vignes (ha)	5 / 63	+ 1,5	0

- *les teneurs médianes en CO à la première période* (1990-94) dites teneurs initiales,
- *les teneurs médianes en argile* (calculée sur l'ensemble des 4 périodes).

Dans un second temps, les facteurs d'évolution mis en évidence par l'ACP sont ensuite traités de façon plus approfondie.

## Résultats de l'Analyse en Composantes Principales

L'ACP, représentée en *figure 3*, met en évidence deux facteurs explicatifs de la diminution des teneurs en CO des sols. La qualité de la représentation reste convenable même si les deux axes factoriels (composantes principales 1 et 2) n'expliquent que 54 % de l'inertie.

La teneur en carbone à l'état initial « t0 » est corrélée négativement à la variable représentant l'évolution des teneurs en carbone entre la période 2 et la période 4 (teneurs en 2005-09 moins teneurs en 1995-99) puisqu'elle est opposée sur le cercle. Ainsi, l'ACP confirme que plus la teneur initiale en CO du sol est élevée, plus les sols sont touchés par une diminution importante.

La variable relative aux teneurs en argile semble corrélée avec les variations des teneurs en CO.

Les autres variables ne semblent pas expliquer la variabilité des teneurs en CO. En effet, les axes des variables relatives à la sensibilité à l'érosion, aux surfaces en prairie et en vigne, ainsi qu'à la charge en UGB par hectare sont orthogonaux à l'axe relatif à la variation des teneurs en CO.

Des tests statistiques sont effectués pour compléter les informations données par l'ACP.

## Facteurs non-corrélés: la prairie, la vigne, la charge en UGB et la sensibilité à l'érosion

Une ANOVA (ANalysis Of Variance) permet de confirmer les résultats de l'ACP (*tableau 4*) concernant les variables relatives à l'évolution des pratiques agricoles et à la sensibilité des sols à l'érosion. Les p-values de ces variables sont supérieures à 0,17. Aussi l'effet de l'évolution des pratiques agricoles sur l'évolution des teneurs en CO n'est pas mis en évidence de façon significative à travers les données de la BDAT en Alsace. Par ailleurs, l'étude de sensibilité potentielle à l'érosion des sols ne permet pas non plus de dégager des tendances. Concernant les teneurs en argile des sols, même si l'ACP semblait mettre en évidence une corrélation positive avec l'évolution des teneurs en CO, la p-value de l'ANOVA rejette cette hypothèse à plus de 15 %. Ainsi, seules les teneurs initiales en CO sont définies statistiquement comme variable explication des évolutions des teneurs en CO dans les sols.





**Tableau 4** - Résultat de l'ANOVA menée sur l'ensemble des variables explicatives supposées.

**Table 4** - ANOVA results for the different parameters considered.

Variables explicatives	Df	F-value	p-value
CO initial	1	26,41	3,62.10 <sup>-6</sup>
indice érosion	1	0,05	0,82
argile	1	1,89	0,17
variation surfaces en herbes	1	0,01	0,91
variation surfaces en vigne	1	0,20	0,65
évolution des UGBs	1	0,54	0,46
résidus	54		

## Effet des conditions initiales: la teneur en CO des sols à T<sub>0</sub>

Les résultats précédents ont permis de mettre en évidence l'effet des teneurs initiales en CO sur la dynamique de son évolution. On compare alors l'écart des médianes cantonales mesurées pour la période 2005-09 et la période 1995-99 avec la teneur initiale en identifiant les cantons pour lesquels le test de Wilcoxon a mis en lumière une évolution significative (*figure 4*).

Globalement, que ce soit pour les cantons significatifs pour le test de Wilcoxon ou pour l'ensemble des cantons alsaciens, la chute des teneurs en CO est liée à l'état initial, le coefficient de corrélation est de -0,67 (p-value = 8,1.10<sup>-9</sup>). Néanmoins, les cantons significatifs affichent une diminution moyenne plus atténuée, le coefficient de la droite pour cette sous-population est plus faible que celui de la population globale (-0,23 contre -0,42).

## DISCUSSION

### Mise en évidence de variations temporelles des teneurs en CO des sols agricoles

Les cartes des teneurs médianes cantonales en CO des sols sur les quatre périodes montrent une constance dans la distribution de leurs grandes structures spatiales. Cette observation confirme la robustesse et la pertinence des données.

Les évolutions temporelles des teneurs en CO ont été quantifiées. La diminution des teneurs affecte principalement les valeurs fortes. La teneur initiale en CO joue donc un rôle sur la cinétique de l'évolution, comme l'avaient montré Bellamy et al.

(2005) pour les sols d'Angleterre et du Pays de Galles, Lemerrier et al., (2006) pour les sols Bretons et Saby et al., (2008) en Franche-Comté. 28 % des cantons enregistrent une évolution significative entre 1995-99 et 2005-09. Concernant les indices qui témoignent de l'évolution des pratiques ou de l'intensité de l'activité agricole, ou encore de la sensibilité des sols à l'érosion, aucune corrélation n'a pu être démontrée.

Un résultat pourrait paraître surprenant au premier abord: les cantons témoignant des différences significatives montrent une pente générale de décroissance plus faible que l'ensemble du jeu de données. Cela est sans doute lié au fait que l'on observe très peu d'évolutions significatives positives (2 cantons entre la période 1995-99 et 2005-09 et 4 cantons entre 2000-04 et 2005-09) et aussi au fait que certains cantons non significatifs montrent des baisses apparentes très fortes. Mais de fait, ces baisses paraissent démesurées et peu réalistes, et sont probablement liées à des biais relatifs à des différences dans les échantillonnages entre périodes.

La poursuite de la collecte des données dans la BDAT permettra d'acquérir plus de recul et de confirmer ou d'infirmer les tendances observées.

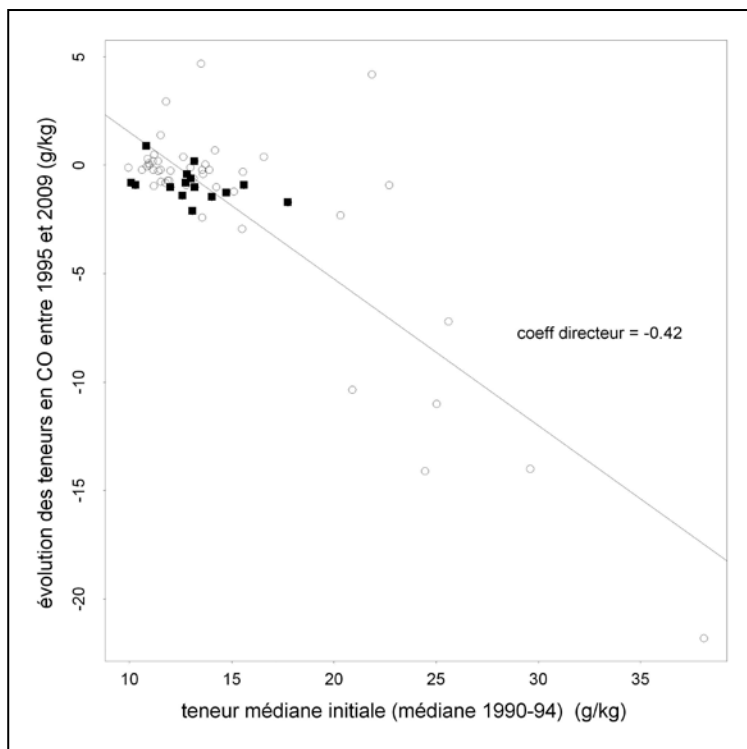
### Précautions dans l'interprétation des résultats

La stratégie d'échantillonnage de la BDAT n'est pas maîtrisée et c'est pourquoi certaines précautions doivent être prises dans l'interprétation des résultats. Les données recueillies dépendent en effet des motivations et des besoins des agriculteurs: choix de la parcelle, des paramètres analysés et de la fréquence à laquelle ils ont recours à des analyses. Ces choix sont orientés par des motivations techniques (raisonnement de la dose de fertilisation, diagnostic d'un problème agronomique sur la parcelle). L'analyse de terre servant principalement d'outil de gestion de fertilisation à l'agriculteur, les parcelles allouées aux productions végétales à hauts rendements sont probablement plus représentées que celles en prairies (Schvartz et al., 1997). De plus, le nombre et la localisation des échantillons pouvant varier d'une année à l'autre, l'intégration à l'échelle cantonale ne permet pas de garantir une répartition spatiale homogène des données. Néanmoins, la méthode de ré-échantillonnage préliminaire des données avant traitement des résultats permet de limiter ce biais sans s'en affranchir totalement.

D'autres biais peuvent survenir du fait que les analyses proviennent de différents laboratoires. En effet, certains laboratoires ont diminué ou augmenté leur activité sur la région entre deux périodes d'analyses par exemple. De plus, malgré des procédures normalisées, certaines dérives ne peuvent pas être exclues.

**Figure 4** - Représentation de l'écart entre les médianes cantonales des teneurs en CO du sol entre 2005-09 et 1995-99 avec les médianes cantonales 1990-94 (T0). Trait noir: droite de régression pour tous les cantons. ■ : cantons qui enregistrent une évolution significative d'après le test de Wilcoxon. ○ : autres cantons alsaciens.

**Figure 4** - Comparison of the difference between cantonal medians of organic carbon contents between 2005-2009 and 1995-1999 and initial cantonal medians (1990-1994 as T0) Black line: regression straight line for all of the cantons. ■ : cantons with a significant evolution. ○ : other cantons.



## Limites et perspectives

L'évolution des teneurs en matière organique des sols à l'échelle d'une région est le fruit d'interactions complexes entre de nombreux facteurs (climatiques, agronomiques, pédologiques...). L'analyse uni-factorielle est insuffisante pour comprendre cette évolution. La confrontation des données de la BDAT avec des informations concernant l'occupation du sol ou les pratiques agricoles est encore difficile car les niveaux d'intégration des différentes sources de données ne sont pas homogènes tant au niveau spatial que temporel. D'une part, compte tenu de la procédure d'échantillonnage des données de la BDAT, les proportions de parcelles sondées ne respectent pas les proportions de distribution des occupations observées dans Corine Land Cover. D'autre part, les fréquences et les dates d'observations des différentes bases de données ne concordent pas exactement, tout comme leur support spatial (pas de temps, échelle). Par ailleurs, certaines évolutions de pratiques peuvent avoir des répercussions sur les teneurs en CO qui se compensent,

nuançant ou annulant ainsi leurs effets. Par exemple, on suppose que la diminution des surfaces en herbe s'accompagne d'une diminution de la matière organique. Or, si les terres retournées sont cultivées avec de non-labour et/ou avec restitution des résidus de culture, alors l'impact de cette reconversion est atténué voire compensé.

Des améliorations pourraient être effectuées au sein même de la BDAT, comme recenser de manière systématique l'occupation du sol, voire l'historique des successions culturales, de la parcelle échantillonnée. Un géoréférencement précis des échantillons permettrait de vérifier les hypothèses d'indépendance des jeux de données (répartition spatiale aléatoire des échantillons) pour les analyses temporelles. Il permettrait également de faire le lien entre la BDAT et d'autres données spatialisées (occupation du sol, cartes de sol, etc.) et ainsi d'offrir des possibilités de traitements et d'interprétation des résultats plus poussées. Ces perspectives sont déjà envisagées avec l'approche ABC'Terre. Ce projet, qui verra le jour en 2013, combinera les données de la BDAT avec des approches de modélisations et d'analyse des systèmes de culture afin de traiter la problématique carbone et gaz à effet de serre de manière spatialisée à l'échelle d'un territoire.

## CONCLUSION

De par le nombre et la qualité des données qu'elle contient, la BDAT représente un outil puissant de la surveillance de la qualité des sols en France.

Cette étude a montré que la diminution des teneurs en CO dans l'horizon de surface des sols cultivés en Alsace est statistiquement avérée pour un nombre relativement restreint de cantons. Au court de la dernière période, cette diminution semble s'atténuer, ce qui est bon signe pour la préservation de la ressource sol et de ses fonctions.

À court terme, la BDAT est un outil opérationnel pour suivre les caractéristiques physico-chimiques des sols à l'échelle du territoire national. À plus long terme, elle offre de nombreuses perspectives. Le croisement avec d'autres sources d'informations spatiales, comme l'occupation du sol, les systèmes de production ou les bases de données du programme IGCS, permettra d'accroître les possibilités de traitements et également de confirmer les tendances observées à travers d'autres dispositifs de surveillance mis en place par le Gis Sol tel que le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols.

## REMERCIEMENTS

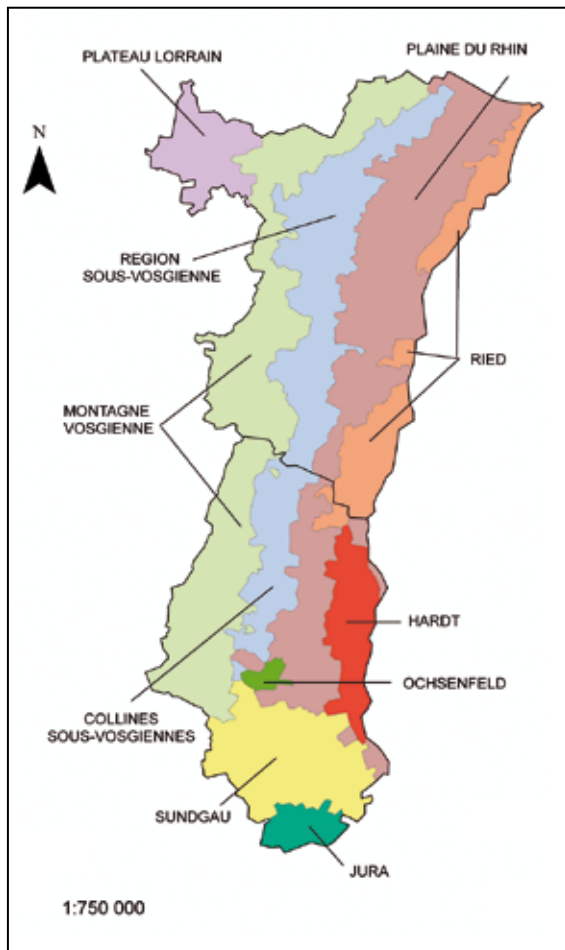
Le programme BDAT est financé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (Ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie, ADEME, IGN, IRD, INRA). Nous remercions l'ensemble des laboratoires qui ont bien voulu participer au programme: CESAR, LDAR-SAA, LDA11, LACO, LDA23, CAPINOV-COPAGRI, Europe Sols, LCA, ISAE, LDA37, LDAO41, Galys SA, TERRENA, IDAC, France Analyses, LANO, CAMA, CAM, LVD, LDA 56, AGREN, CACG, SADEF, LDA71, LDA82, CA87-EDE87, IDEA, France Analyse

## BIBLIOGRAPHIE

- Afnor, 1999 - Qualité des sols, volume I, Afnor ed., 565 pages.
- Attard, E., Le Roux, X., Laurent, F., Chabbi, A., Nicolardot, B., and Recous, S. 2011 - Impacts de changements d'occupation et de gestion des sols sur la dynamique des matières organiques, les communautés microbiennes et les flux de carbone et d'azote: *Etude et Gestion des Sols*, 18(3), 147-160.
- Balesdent, J. 1996 - Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France: *Etude et Gestion des Sols*, 3(4 : numéro spécial), 245-260.
- Bellamy, Pat H., Loveland, P.J., Bradley, R.I., Lark, R. Murray, and Kirk, Guy J. D. 2005 - Carbon losses from all soils across England and Wales 1978|2003. *Nature*, 437(7056), 245-248.
- Bernoux, M., Chenu, C., Blanchart, E., Eglin, T., Bispo, A., Bardy, M., King, D. 2011 - Le programme GESSOL 2: Impact des pratiques agricoles sur les matières organiques et les fonctions des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 18(3), 137-145.
- Chenu, C., Abiven, S., Annabi, M., Barray, S., Bertrand, M., Bureau, F., Cosentino, D., Darboux, F., Duval, O., Fourrié, L., Francou, C., Houot, F., Jolivet, C., Laval, K., Le Bissonnais, Y., Lemée, L., Menasseri, S., Petraud, J.P., Verbèqne B. 2011 - Mise au point d'outils de prévision de l'évolution de la stabilité de la structure de sols sous l'effet de la gestion organique des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 18(3), 161-174.
- Cheverry, C., 1994, La dégradation chimique des sols en Bretagne. *Etude et Gestion des Sols*, 1(1), 7-21.
- Jolivet, C., Arrouays, D., Boulonne, L., Ratié, C., and Saby, N. 2006 - Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols en France (RMQS) Etats d'avancement et premiers résultats: *Etude et Gestion des Sols*, 13(3), 148-164.
- Lark, R.M., Bellamy, P.H, and Kirk, G.J.D. 2006 - Baseline values and change in the soil, and implications for monitoring: *European Journal of Soil Science*, 57, 916-921.
- Leleux, A., Arousseau, P., and Roudaut, A. 1988 - Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre: *Science du sol*, 26(1), 29-40.
- Lemercier, B., Gaudin, L., Walter, C., Arousseau, P., Arrouays, D., Schwartz, C., Saby, N.P.A., Follain, S., and Abrassart, J. 2008 - Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database: *Soil Use and Management*, 24(2), 131-138.
- Lemercier, B., Walter, C., Schwartz, C., Saby, N., Arrouays, D., and Follain, S. 2006 - Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises Analyse à partir de la Base de Données des Analyses de Terre: *Etude et Gestion des Sols*, 13(3), 165-180.
- Orton, T.G., Saby, N., Arrouays, D., Walter, C., Lemercier, B., Schwartz, C., and Lark, R.M. 2012 - Spatial prediction of soil organic carbon from data on large and variable spatial supports.: *Environmetrics*, 23, 129-161.
- Roussel, O., Bourmeau, E., and Walter, C. 2001 - Évaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques: *Etude et Gestion des Sols*, 8(1), 65-81.
- Saby, N., Arrouays, D., Antoni, V., Lemercier, B., Follain, S., Walter, C., and Schwartz, C. 2008 - Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990-2004: *Soil Use and Management*, 24, 254-262.
- Saby, N., Schwartz, C., Walter, C., Arrouays, D., Lemercier, B., and Roland, N. 2004 - Base de données des analyses de terre: Procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000: *Etude et Gestion des Sols*, 11(3), 235-253.
- Schwartz, C., Walter, C., Claudot, B., Bouedo, T., and Arousseau, P. 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 I Constitution d'une banque de données cantonale: *Etude et Gestion des Sols*, 4(3), 191-204.
- Walter, C., Bouedo, T., and Auro, P. 1995 - Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995: Rapport final de la convention d'étude entre le Conseil Régional de Bretagne et l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 23 p.
- Walter, C., Schwartz, C., Claudot, B., Bouedo, T., and Arousseau, P. 1997 - Synthèse nationales des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994. II. Description statistique et cartographie de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés: *Etude et Gestion des Sols*, 4(3), 2005-2020.

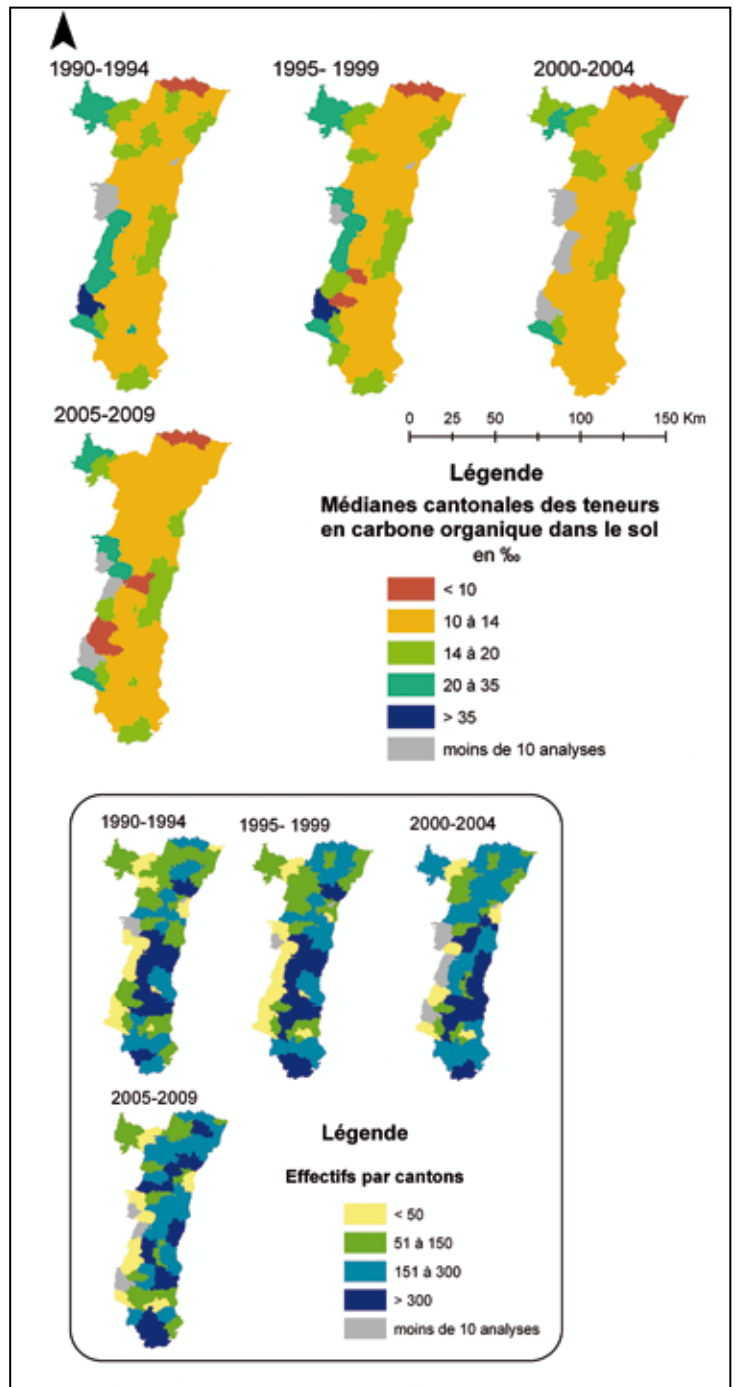
**Planche I** - Les grands ensemble naturels d'Alsace (Source: DRAAF Alsace).

**Plate I** - Natural areas of Alsace (Source: DRAAF Alsace).



**Planche II** - Cartes cantonales des teneurs médianes en carbone organique de l'horizon de surface et des effectifs cantonaux sur quatre périodes de 1990 à 2009 en Alsace.

**Plate II** - Maps of cantonal median of topsoil organic carbon content and number of samples for four periods from 1990 to 2009 in Alsace.



**Planche III** - Carte de synthèse des résultats du test de Wilcoxon avec ré-échantillonnage sur l'évolution des médianes cantonales des teneurs en carbone organique entre 1995 à 2009 en Alsace.

**Plate III** - Map of the Wilcoxon test results after the resampling procedure: Cantonal medians of the difference in organic carbon contents between 1995 and 2009 in Alsace.

