

Suivi des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible dans les sols agricoles de trois régions françaises

Blandine Lemercier, Christian Walter, Christian Schvartz, Nicolas Saby, Dominique Arrouays, Stéphane Follain

▶ **To cite this version:**

Blandine Lemercier, Christian Walter, Christian Schvartz, Nicolas Saby, Dominique Arrouays, et al.. 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. Étude et Gestion des Sols, 2006, 13 (3), pp.165-180. hal-01924381

HAL Id: hal-01924381
https://hal.science/hal-01924381

Submitted on 14 Jan 2019

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

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

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

B. Lemercier(1), C. Walter(1), C. Schvartz(2) , N. Saby(3), D. Arrouays(3) et S. Follain(2)

(1) UMR INRA / Agrocampus Rennes Sol, Agronomie et Spatialisation - 65 rue de Saint-Brieuc, CS 84215, 35042 Rennes

(2) ISA, Laboratoire Sols et Environnement - 48 boulevard Vauban, 59046 Lille Cedex

(3) INRA CR d'Orléans, Unité INFOSOL - Avenue de la Pomme de Pin, BP 20619 Ardon, 45166 Olivet Cedex 2

RÉSUMÉ

La Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) regroupe les résultats d'analyses effectuées sur l'ensemble du territoire national par des laboratoires agréés par le Ministère de l'agriculture, à la demande d'agriculteurs. Les analyses disponibles et validées sont réparties en deux ensembles, selon leur date de réalisation : de 1990 à 1994 et de 1995 à 1999. Une base de données similaire a été constituée en Bretagne à partir d'analyses de terre réalisées entre 1980 et 1985. Ces bases de données constituent une source d'information importante sur la variabilité des caractéristiques des horizons de surface des sols cultivés.

Les enjeux agronomiques et environnementaux autour du carbone organique et du phosphore extractible sont majeurs, mais l'évolution de leurs teneurs dans les sols aux niveaux national ou régional est très peu documentée. L'objectif de ce travail était d'étudier la possibilité de déceler et quantifier des variations temporelles des teneurs en ces deux éléments à partir de la BDAT, dans des contextes pédoclimatiques variés. Cette étude a été menée sur les régions Bretagne, Limousin et Nord-Pas-de-Calais. Des traitements statistiques sur les données brutes et sur les données agrégées au niveau cantonal, complétés par des représentations cartographiques, ont permis de mettre en évidence des évolutions significatives des teneurs en carbone organique en Bretagne (diminution), et en phosphore extractible en Bretagne (augmentation) et en Nord-Pas-de-Calais (diminution).

Cependant, les biais statistiques inhérents à la stratégie d'échantillonnage adoptée sont importants et des précautions doivent être prises pour interpréter les résultats d'évolution des caractéristiques chimiques des sols. La mise en place d'une procédure de rééchantillonnage et les effectifs d'analyses très élevés limitent ces biais.

Puisqu'elle est une source d'information relativement peu coûteuse et simple à mobiliser, la BDAT est un outil clé du dispositif national de connaissance et de surveillance des sols, et le seul actuellement opérationnel pour le suivi des caractéristiques chimiques des horizons de surface des sols agricoles à petite échelle. A terme, le géoréférencement précis des prélèvements de terre permettra de relier les données de la BDAT à d'autres sources d'information sur les sols et leur occupation. La BDAT est complémentaire des autres programmes du GIS Sol (cartographie exhaustive des sols à différentes échelles) et de démarches expérimentales dans lesquels les sols sont décrits précisément et dans leur ensemble.

Mots clés

Base de données d'analyses de terre, carbone organique, phosphore extractible, Bretagne, Limousin, Nord-Pas-de-Calais, variabilité temporelle

Reçu : mai 2006 ; Accepté : août 2006

SUMMARY

ORGANIC CARBON AND EXTRACTABLE PHOSPHORUS CONTENTS MONITORING IN CULTIVATED SOILS OF THREE FRENCH REGIONS

Analysis from the National Soil Testing Database

Soil tests data from the whole France carried out at farmers' request by commercial laboratories approved by the French Ministry of Agriculture are gathered in the national soil testing database (BDAT). Two clusters of available and validated data were created according to the date of analyses: from 1990 to 1994 and from 1995 to 1999. A similar database was constituted in Brittany from soil tests carried out between 1980 and 1985. These databases constitute an important source of information on topsoil parameters variability of cultivated soils. Agronomic and environmental concerns about organic carbon and extractable phosphorus are very important, but the evolution of their contents in soils is poorly documented at a national or regional levels. This work aims to test the feasibility of highlighting and quantifying temporal variations of these two elements contents using the national soil testing database, for different pedoclimatical contexts. This study was conducted on Brittany, Limousin and Nord-Pas-de-Calais regions. With statistical treatments on raw data and data previously aggregated at cantonal level, completed by graphical representations, it was possible to show significant trends in organic carbon contents evolution in Brittany (decrease) and extractable phosphorus contents in Brittany (increase) and in Nord-Pas-de-Calais (decrease).

Nevertheless, statistical biases due to the sampling strategy are important and we must be careful when interpreting the apparent evolution of soil chemical properties. These biases are limited by the application of a resampling procedure and the high density of samples per cantons.

Being relatively low costly and easy to mobilize, the national soil testing database is a key tool of the national plan of action for soil knowledge and monitoring led by the Gis Sol. At the present time, this database is the unique operational tool for chemical properties monitoring of cultivated topsoil at small scale. In the future, the precise georeferencing of soil samples will enable to link the database with other sources of information of interest on soil and land use. This database is complementary of the others GIS Sol programs and experimental approaches where soils are described precisely and as a whole.

Key-words

Soil testing database, organic carbon, extractable phosphorus, Bretagne, Limousin, Nord-Pas-de-Calais, temporal variability

RESUMEN

SEGUIDO DE LOS CONTENIDOS EN CARBONO ORGÁNICO Y EN FÓSFORO EXTRACTABLE EN LOS SUELOS AGRÍCOLAS DE TRES REGIONES DE FRANCIA. Análisis a partir del banco de datos de los análisis de tierra.

El banco de datos de los análisis de tierra (BDAT) agrupa los resultados de análisis hechos sobre todo el territorio nacional por laboratorios aprobados por el ministerio de agricultura, a la demanda de agricultores. Los análisis disponibles y validados son repartidos en dos conjuntos, según su fecha de realización: de 1990 a 1994 y de 1995 a 1999. Se constituyo un banco de datos similar en Bretaña a partir de los análisis de tierra realizados entre 1980 y 1985. Estos bancos de datos constituyen una fuente de información importante sobre la variabilidad de las propiedades de los horizontes de superficie de los suelos cultivados. Las puestas agronómicas y ambientales acerca del carbono orgánico y del fósforo extractable son mayores, pero la evolución de sus contenidos en los suelos es muy poco documentada. El objetivo de este trabajo era de estudiar la posibilidad de detectar y cuantificar variaciones temporales de los contenidos en estos dos elementos, en contextos pedo-climáticos variados, a partir de la BDAT. Se desarrolló este estudio en las regiones de Bretaña, Limousin y Norte-Pas-de-Calais. Tratamientos estadísticos sobre los datos brutos y sobre los datos agregados al nivel cantonal, completados por representaciones cartográficas, permitieron poner en evidencia evoluciones significativas de los contenidos en carbono orgánico en Bretaña (aumento) y en Norte-Pas-de-Calais (disminución).

Sin embargo, las derivas estadísticas inherentes a la estrategia de muestreo adoptada son importentes y precauciones deben ser tomadas para interpretar los resultados de la evolución de las propiedades químicas de los suelos. El uso de un procedimiento de nuevo muestreo y el número de análisis muy elevados limita estas derivas, pero márgenes de progreso importantes son esperadas de la geo-referencia precisa de las muestras de suelos.

Puesto que es una fuente de información relativamente poco costosa y simple a movilizar, el BDAT es una herramienta llave del dispositivo nacional de conocimiento y de vigilancia de los suelos, y el solo actualmente operacional para el seguimiento de las propiedades químicas de los horizontes de superficie de los suelos agrícolas a pequeña escala. El BDAT es complementario de los otros programas del GIS sol y de los enfoques experimentales en los cuales los suelos son descritos de manera precisa y en su conjunto.

Palabras clave

Banco de datos de análisis de tierra, carbono orgánico, fósforo extractable, Bretaña, limousin, Norte-Pas-de-Calais, variabilidad temporal.

Le carbone organique et le phosphore extractible sont deux éléments autour desquels les enjeux agronomiques et environnementaux sont majeurs.

La matière organique des sols joue des rôles essentiels, tant physiques (structure du sol) que chimiques (nutrition minérale des plantes) et biologiques (activité biologique du sol) (Balesdent, 1996). Elle constitue un paramètre incontournable à prendre en compte dans l'évaluation de la qualité des sols. Les matières organiques du sol peuvent être considérées comme un capital à entretenir et améliorer, dans le cadre d'une gestion durable des agro-systèmes (Roussel *et al.*, 2001). La prise de conscience de l'impact des émissions de gaz à effet de serre, et notamment du dioxyde de carbone sur le réchauffement climatique global, a relancé l'intérêt pour la matière organique des sols en tant que puits potentiels de carbone (Lugo et Brown, 1993 ; Arrouays *et al.*, 2002).

Le phosphore est un élément indispensable, et une faible teneur en phosphore biodisponible dans le sol entraine des risques de carence préjudiciables à la croissance des cultures. Cependant le phosphore est reconnu comme étant le facteur limitant de la croissance algale, et par conséquent de l'eutrophisation des cours d'eau (Barroin, 2003). Le transfert de phosphore vers le réseau hydrographique est principalement le fait des phénomènes de ruissellement (de surface ou hypodermique) et d'érosion. Cet élément étant relativement peu mobile dans le sol, les risques de transfert par lixiviation sont moindres, mais pourraient devenir importants pour les sols à teneur très élevée, suite à la migration du phosphore en profondeur (Morel *et al.*, 2004). Afin de limiter les risques de pollution des eaux superficielles et l'enrichissement des sols, la quantité de phosphore épandu sur les sols agricoles devrait faire l'objet de réglementations dans un avenir proche.

L'évolution des sols et notamment de leurs caractéristiques chimiques a été très importante ces 40 dernières années (Coppenet *et al.*, 1993), or elle est paradoxalement très peu documentée (Cheverry, 1994). La Base de Données des Analyses de Terre (BDAT) est un programme du GIS Sol. Créé en 2001, le GIS Sol a pour objectif de développer, coordonner et harmoniser les différentes actions qui concourent à une meilleure connaissance et à une meilleure gestion des sols français. La BDAT regroupe des analyses réalisées à la demande des agriculteurs par des laboratoires agréés par le Ministère en charge de l'agriculture. Ces analyses, voulues individuellement dans le but de contrôler l'état des terres cultivées et de gérer la fertilisation des parcelles agricoles, sont valorisées collectivement par la constitution d'une source d'information spatialisée sur les horizons de surface des sols cultivés (Schvartz *et al.*, 1997; Walter *et al.*, 1997; Saby *et al.*, 2004). Ainsi, depuis une vingtaine d'années, des bases de données d'analyses de terre sont constituées et exploitées en France, aux échelles nationale et régionale (Leleux *et al.*, 1988 ; Walter *et al.*, 1997).

Des synthèses statistiques spatiales à petite échelle ont été réalisées à partir de la BDAT et ont déjà mis en évidence de grandes structures spatiales (Walter *et al.*, 1997; Saby *et al.*, 2004) pour l'ensemble des paramètres renseignés, dont le carbone organique et le phosphore extractible.

Ainsi, l'analyse de la variabilité spatiale des teneurs en carbone organique au niveau national a permis de distinguer clairement de grands domaines qui se différencient également par la granulométrie et la minéralogie des éléments minéraux des sols, et leur climat : de fortes teneurs sont associées aux climats froids (Jura) et/ou aux sols allophaniques (Massif central). De plus, quelques grands types d'usage des sols marquent la carte de distribution spatiale des teneurs en carbone organique : les teneurs sont faibles dans les zones de grandes cultures intensives du Bassin parisien et dans les zones de viticulture et arboriculture (Bordelais, Languedoc-Roussillon, Sillon rhodanien), alors qu'elles sont plus élevées en zones bocagères ou à dominante prairiale (Massif armoricain). Concernant la distribution spatiale des teneurs en phosphore extractible, la variabilité interrégionale correspond largement à des différences de systèmes de production (élevage plus ou moins intensif) ou à des aspects historiques du développement agricole et des pratiques de fertilisation spécifiques de certaines régions (Saby *et al.*, 2004).

La mise en évidence de variations temporelles des caractéristiques des sols à partir de la BDAT est envisageable, en faisant l'hypothèse d'une distribution aléatoire des échantillons au sein des entités géographiques et d'une indépendance de l'échantillonnage entre les deux périodes (Walter *et al.*, 1995). Cependant, à l'échelle nationale, l'analyse de ces évolutions temporelles est rendue difficile par la variabilité locale et la diversité des systèmes de production. De ce fait, le niveau régional semble plus adapté à la détection de telles évolutions et à l'estimation de leur significativité par des moyens statistiques.

Les objectifs de ce travail sont : (i) de tester la possibilité de mettre en évidence des évolutions temporelles significatives à l'échelle décennale des teneurs en carbone organique et phosphore extractible dans les sols agricoles à partir de la BDAT et (ii) d'analyser d'éventuelles dynamiques d'évolution, différentes en fonction des conditions pédoclimatiques et des systèmes de production agricole (étude au niveau régional). Pour cela, trois régions ont été étudiées : la Bretagne, le Nord-Pas-de-Calais et le Limousin.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Méthodes d'analyse du carbone organique et du phosphore extractible

L'utilisation par les laboratoires fournisseurs de données de méthodes d'analyses normalisées a facilité le regroupement des analyses en une base de données unique. Avant leur intégration dans la base, les analyses subissent une procédure de validation en trois étapes : (i) validation informatique et harmonisation des

unités, (ii) validation analytique (méthodes, horizon de surface de sols cultivés…) et (iii) validation géographique (localisation).

Cette étude a été menée sur les résultats d'analyse du carbone organique obtenus par dosage spectrométrique après oxydation dans un milieu sulfochromique (norme NF ISO 14235, Afnor, 1999).

Concernant le phosphore, trois méthodes sont utilisées en routine en France et renseignées dans la BDAT. Deux d'entre elles sont représentées dans cette étude :

– la méthode Dyer : le phosphore est extrait par solubilisation dans une solution d'acide citrique monohydraté à 20 $g.l^{-1}$. Cette méthode ne s'applique pas à des sols contenant plus de 20 $g.kg^{-1}$ de calcaire total (norme NF X31-160, Afnor, 1999) ;

– la méthode Joret-Hébert : le phosphore est extrait par solubilisation dans une solution d'oxalate d'ammonium à 0,1 $mol.l^{-1}$ (norme NF X31-161, Afnor, 1999). Cette méthode est appliquée dans une large gamme de pH des sols.

Les extractifs utilisés étant différents, les résultats obtenus pas ces deux méthodes ne sont pas directement comparables entre eux.

Echelles spatiale et temporelle de l'étude

L'évolution des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible a été étudiée dans trois régions françaises : la Bretagne, le Limousin et le Nord-Pas-de-Calais. Ces régions ont été sélectionnées sur la base de critères statistiques (effectifs suffisants aux différentes périodes pour que les résultats soient significatifs), et de critères liés aux paramètres étudiés (gradients marqués des teneurs en carbone organique en Limousin et en Bretagne, et fortes teneurs en phosphore extractible en Nord-Pas-de-Calais et en Bretagne). Le phosphore extractible est estimé par la méthode Joret-Hébert en Nord-Pas-de-Calais, la méthode Dyer en Bretagne et les deux méthodes sont employées en Limousin, dans des proportions similaires.

Les analyses stockées dans la BDAT couvrent pour l'instant deux périodes complètes de 5 ans, de 1990 à 1994 et de 1995 à 1999. Pour la Bretagne, une base de données régionale des résultats d'analyses de terre effectuées entre 1980 et 1985 a été constituée selon une méthodologie similaire à celle de la BDAT (Leleux *et al*., 1988). Elle complémente la base nationale en procurant un recul dans le temps plus important.

Analyse des données

Description statistique des données

Le géoréférencement des données contenues dans la BDAT est peu précis puisque seule la commune d'origine des échantillons de terre est connue. Cependant les informations ne peuvent être restituées à l'échelle communale, pour des raisons de confidentialité. Ainsi, des traitements statistiques ont été effectués sur les données brutes d'une part, et sur les données agrégées au niveau cantonal d'autre part. Comme le montrent Schvartz *et al.* (1997), ce niveau d'agrégation apparaît adapté pour l'étude de la variabilité spatiale des résultats à l'échelle nationale. En effet, ce découpage cantonal permet de disposer d'un nombre d'analyses satisfaisant par entité géographique tout en limitant la variabilité des paramètres étudiés.

Pour décrire les données, des critères statistiques non paramétriques ont été privilégiés en raison de l'hétérogénéité du jeu de données. Ces critères (médiane et quartiles) sont peu sensibles à la variabilité induite par les valeurs extrêmes.

Comparaison temporelle des distributions de fréquence cumulée

L'évolution temporelle d'une caractéristique chimique du sol à l'échelle d'une région a été appréhendée par l'établissement, pour chacune des périodes d'étude, d'histogrammes de fréquence cumulée.

La comparaison de tels diagrammes n'a de sens que si la probabilité d'échantillonnage d'une surface élémentaire est constante au sein de la région pour une période donnée et si elle est du même ordre entre périodes. L'utilisation des données brutes de la base de données présente de très grands risques de biais dans une telle optique de comparaison temporelle : (i) le nombre d'analyses disponibles par canton est très variable pour une même période et la résolution d'échantillonnage exprimée en nombre d'analyses par unité de surface agricole utile (SAU), s'étend ainsi dans une gamme comprise entre 1 pour 400 ha à 1 pour 20 ha ; (ii) cette résolution d'échantillonnage peut différer d'une période à l'autre, par exemple tel département d'une région peut être fortement représenté lors d'une période donnée et beaucoup moins la période suivante. La comparaison des fréquences cumulées établies sur les données brutes risque donc d'être fortement faussée par ces variations de résolution spatiale et temporelle.

Une procédure de rééchantillonnage de la base de données a été mise en œuvre pour éviter ces risques de biais. L'objectif de cette procédure est de constituer une nouvelle base de données pour laquelle le nombre d'analyses disponibles par unité de SAU est constant pour tous les cantons d'une région et toutes les périodes considérées. Pour ce faire, au sein d'une région et pour une période donnée, on procède au tirage aléatoire d'un nombre fixe d'analyses : 8000 en Bretagne, 4000 en Limousin et 3000 en Nord-Pas-de-Calais. Ces valeurs correspondent à environ 80 % des données disponibles pour la période la moins bien pourvue en données. Ainsi, après l'application de la procédure de rééchantillonnage, les résolutions sont de 1 analyse pour 2,2 ha de SAU en Bretagne et en Limousin et 1 pour 2,8 ha en Nord-Pas-de-Calais.

La probabilité de tirage p_i d'une analyse quelconque d'un canton i issue de la base de données brute est estimée par :

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

Tableau 1 - Statistiques descriptives par période des résultats analytiques par région et pour la France entière. Les résultats sont présentés pour l'ensemble des échantillons et après agrégation des données au niveau cantonal.

Table 1*- Main statistics per period of analytical results per region and for whole France and. Results are presented for all samples and after aggregation of data at cantonal level*

Ensemble des échantillons					Agrégation cantonale			
	Période	**Effectif**	**Médiane**	**Quartile**	**Médiane des effectifs**	**Médiane des médianes**	**Quartile des médianes**	**Nombre de cantons disposant de plus de 10 analyses pour toutes les périodes**
Carbone organique (‰)								
Bretagne	80-85	20238	22	17-29	57	23	18-29	125 (62 %)
	90-94	54268	23	17-30	220	20	16-27	
	95-99	67202	23	17-30	304	20	16-27	
Nord-Pas-de-Calais	90-94	22743	13	12-17	88	14	13-16	96 (60 %)
	95-99	4740	13	11-16	20	13	12-15	
Limousin	90-94	13335	19	15-26	114	19	16-24	79 (75 %)
	95-99	11673	19	15-26	85	19	17-26	
France	90-94	280121	15	11-23	34	15	11-20	2887 (71 %)
	95-99	379147	16	11-22	46	15	12-20	
Phosphore Joret-Hébert (mg P_2O_5.kg^{-1})								
Nord-Pas-de-Calais	90-94	18105	276	200-375	71	305	256-361	108 (68 %)
	95-99	8588	280	208-374	34	283	230-328	
Limousin	90-94	12312	86	50-142	97	91	75-107	69 (65 %)
	95-99	7573	92	51-155	56	96	75-127	
France	90-94	133175	187	105-287	16	160	105-240	2342 (58 %)
	95-99	187324	179	108-270	22	166	116-234	
Phosphore Dyer (mg P_2O_5.kg^{-1})								
Bretagne	80-85	75280	292	184-440	322	295	244-366	165 (82 %)
	90-94	49837	356	239-506	190	329	267-394	
	95-99	57592	386	257-552	260	356	276-438	
Limousin	90-94	13224	160	84-274	116	160	136-200	75 (71 %)
	95-99	10673	164	86-283	75	171	144-216	
France	90-94	140972	260	147-410	14	211	140-300	1911 (47 %)
	95-99	181010	268	154-420	19	222	155-317	

où : SAU_i est la SAU du canton *i*

n_i est le nombre total d'analyses disponibles au sein de ce canton

SAU_T est la SAU de l'ensemble des cantons échantillonnés.

Cette méthode permet de tenir compte de la variabilité de superficie des terres agricoles entre cantons et de la densité d'échantillonnage plus ou moins élevée ; elle fait l'hypothèse forte d'un choix aléatoire des échantillons analysés au sein de la SAU du canton.

Cette procédure de rééchantillonnage est répétée 30 fois, et l'histogramme final de fréquence cumulée est obtenu en considérant la moyenne des fréquences cumulées issues des 30 réalisations.

Représentations cartographiques

La cartographie de la médiane cantonale indique la valeur centrale de la caractéristique pédologique considérée et la cartographie des effectifs est utilisée comme critère de précision de l'information.

Pour la période 1980-1985, deux laboratoires du Finistère et des Côtes-d'Armor ont fourni une estimation de la teneur en matière organique calculée presque exclusivement à partir de la teneur en azote total. Afin de proposer une cartographie exhaustive des teneurs en carbone organique en Bretagne pour la période 1980-1985, toutes les données permettant d'accéder à la teneur en matière organique (azote total et carbone organique) ont été utilisées. Une procédure de régression linéaire a permis, en fixant au départ le coefficient multiplicateur de 1,72 pour passer du carbone organique à la matière organique, d'aboutir à un coefficient de 16/1,72 soit 9,3 (r^2 = 0,62) pour passer de l'azote total au carbone organique. Ce résultat a été obtenu à partir de cantons disposant à la fois d'analyses de carbone organique et d'azote total, puis appliqué aux données des deux laboratoires des Côtes-d'Armor et du Finistère. Par contre, seules les teneurs en carbone organique mesurées ont été exploitées dans les analyses statistiques, garantissant ainsi la robustesse des calculs.

Significativité statistique des évolutions

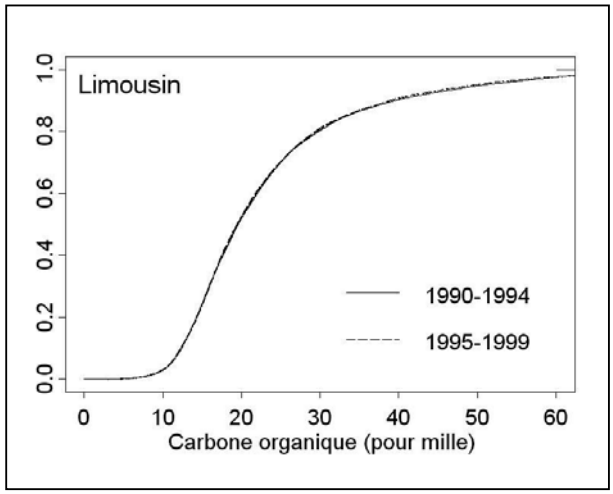
Les évolutions mises en évidence par les représentations cartographiques et graphiques ont été validées et quantifiées par des tests statistiques. Deux méthodes ont été utilisées : la régression linéaire (coefficient directeur de la droite de régression passant par l'origine des teneurs cantonales à deux périodes), et la comparaison des médianes entre les périodes grâce au test de Wilcoxon (Conover, 1980). Il s'agit d'un test non paramétrique (s'affranchissant d'hypothèses sur la distribution des variables) basé sur la somme des rangs, pour lequel nous testons l'hypothèse nulle « les médianes cantonales aux deux dates ne sont pas différentes » au seuil de significativité p = 0,05.

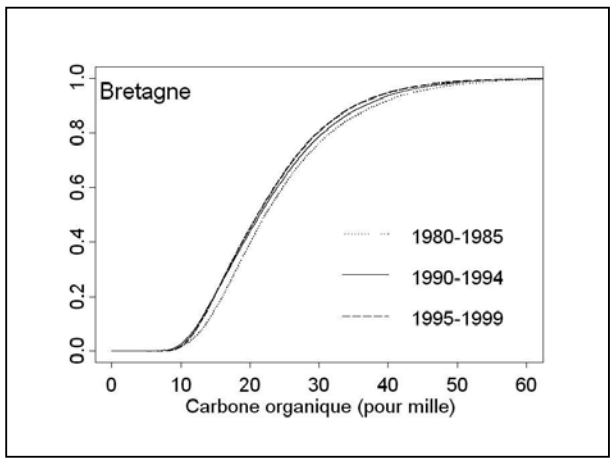
RÉSULTATS

Les statistiques générales des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible sont présentées dans le *tableau 1*. Elles ont été calculées d'une part pour l'ensemble des échantillons (afin de donner des ordres de grandeur d'ensemble des caractéristiques chimiques et de leur variabilité) et d'autre part sur la base de la stratification cantonale (afin de caractériser la variabilité intercantonale).

Figure 1 - Histogramme moyen de fréquence cumulée des teneurs en carbone organique pour les différentes périodes étudiées en Limousin et en Bretagne, après application de la procédure de rééchantillonnage des données visant une résolution d'échantillonnage uniforme au sein de la région et entre périodes.

Figure 1 - *Mean cumulative distributions of organic carbon content for the studied periods in Limousin and in Brittany, after application of a resampling procedure to ensure uniform sampling resolution.*





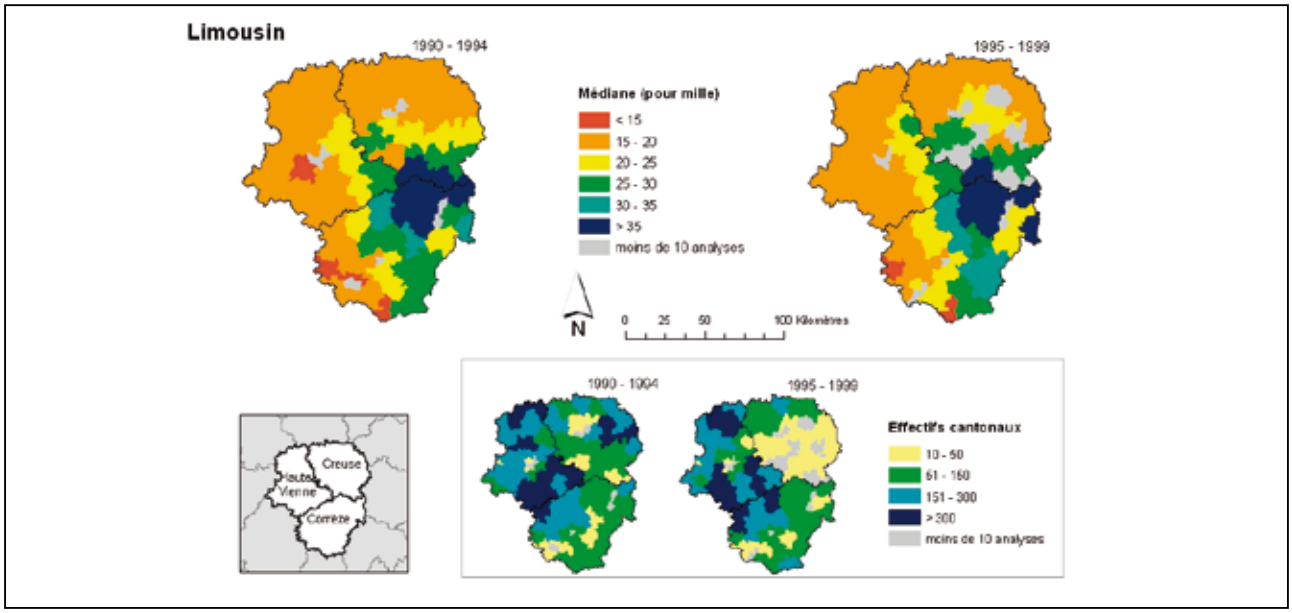
Evolution des teneurs en carbone organique

Description des évolutions

En ce qui concerne le carbone organique, le *tableau 1* montre que les valeurs médianes et les quartiles sont plus élevés en Bretagne et dans une moindre mesure en Limousin que pour l'ensemble du pays. En Nord-Pas-de-Calais, au contraire, les teneurs en carbone organique sont globalement inférieures aux teneurs françaises. D'autre part, cette région présente la variabilité

Planche 1 - Cartes cantonales des teneurs médianes en carbone organique de l'horizon de surface et des effectifs cantonaux pour les périodes 1990-1994 et 1995-1999 en Limousin et 1980-1985, 1990-1994 et 1995-1999 en Bretagne.

Planche 1 - *Maps of median topsoil organic carbon content and number of samples for the different periods for Limousin and Brittanyn.*



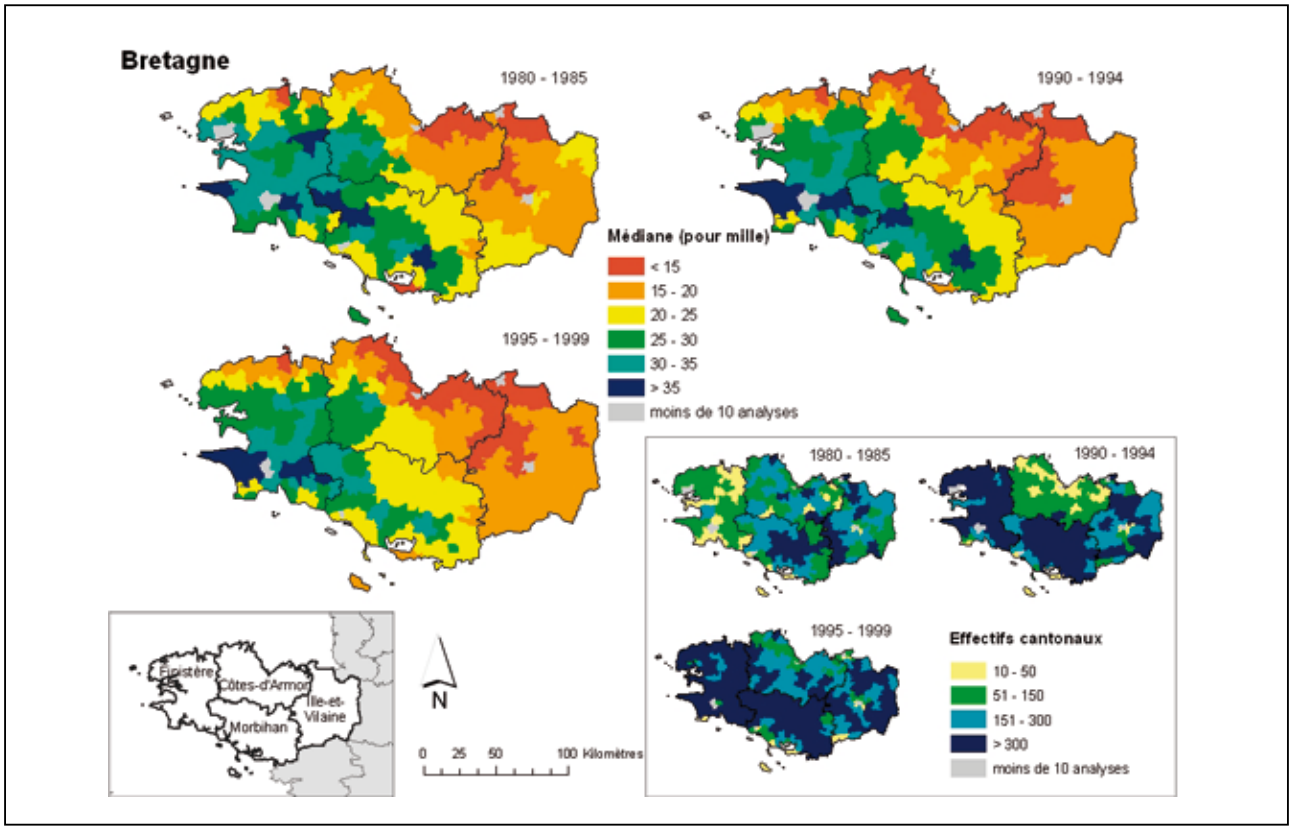
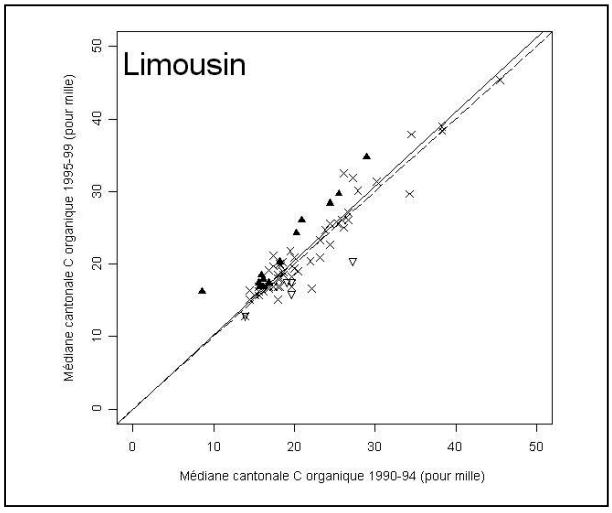
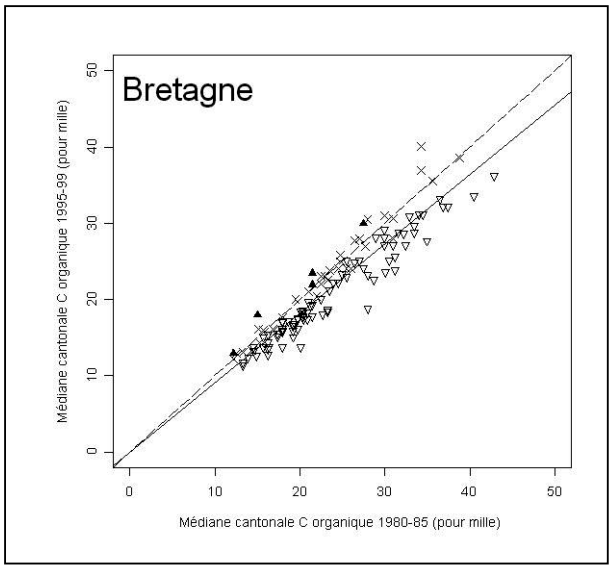


Figure 2 - Comparaison des teneurs cantonales médianes en carbone organique entre 1990-1994 et 1995-1999 en Limousin et entre 1980-1985 et 1995-1999 en Bretagne et significativité des évolutions estimée par le test de Wilcoxon (p = 0,05). Traits discontinus : droites x = y ; traits continus : droites de régression (voir les coefficients directeurs dans le tableau 2) ; triangles vers le bas : diminution significative ; triangles vers le haut : augmentation significative ; croix : évolution non significative.

Figure 2 - *Comparison of cantonal organic carbon medians between 1990-1994 and 1995-1999 in Limousin and between 1980-1985 and 1995-1999 in Brittany and evolutions significance estimated by Wilcoxon test (p = 0,05). Broken lines : x = y ; continuous lines : regression straight lines (see director coefficients in table 2) ; triangles downwards : significant decrease ; triangles upwards : significant increase ; crosses : non significant evolution.*





la plus faible avec des intervalles interquartiles réduits : 5‰ pour les échantillons pris dans leur ensemble et 3‰ pour les données agrégées. La comparaison des périodes indique une tendance à la diminution des teneurs en carbone organique déjà faibles en nord-Pas-de-Calais, mais le faible effectif d'échantillons pour la période 1995-1999 (4740 échantillons) limite la pertinence de la comparaison.

En Limousin, l'ensemble des descripteurs statistiques montre que les teneurs en carbone organique sont très stables.

Pour la Bretagne, les statistiques d'ensemble et les statistiques cantonales peuvent apparaître contradictoires : la médiane et le quartile supérieur de l'ensemble des échantillons pour la période 1980-1985 sont inférieurs à ceux des périodes suivantes alors que dans le cas des statistiques cantonales, ils sont supérieurs *(tableau 1)*. La stratégie d'échantillonnage explique ces résultats. En effet, peu d'analyses du carbone organique réalisées entre 1980 et 1985 sont disponibles pour les départements des Côtes-d'Armor et du Finistère pour les raisons évoquées précédemment, ce qui conduit à la sous-représentation des secteurs les plus riches en carbone organique pour la première période. A l'inverse, pour les périodes suivantes, les départements les plus riches (Finistère et Morbihan) ont une densité d'échantillonnage très élevée. Ce type de constat souligne l'importance d'une procédure de correction préalable à toute comparaison temporelle des données brutes (non agrégées au niveau cantonal).

La stabilité des teneurs en carbone organique en Limousin est confirmée par la *figure 1* : les distributions cumulées des deux périodes sont pratiquement confondues. Par contre, dans le cas de la Bretagne, les trois périodes s'individualisent nettement *(figure 1)*. La courbe de distribution cumulée de la période 1980-1985 est décalée par rapport aux deux autres vers les valeurs plus fortes, indiquant une diminution sur toute la gamme des teneurs. La comparaison des périodes 1990-1994 et 1995-1999 indique que la diminution des teneurs en carbone organique se poursuit mais plus de façon généralisée. En effet, fréquences des teneurs les plus faibles sont identiques pour les deux périodes. Par contre, dans le haut de la gamme des teneurs, celles-ci sont moins élevées d'1‰ environ en 1995-1999 qu'en 1990-1994.

La Bretagne et le Limousin présentent des gradients de teneurs en carbone organique des sols similaires *(planche 1)*, orienté ouest/est dans le Limousin et nord-est/sud-ouest en Bretagne. Dans le Limousin, les teneurs sont supérieures à 25‰ dans le tiers sud-est de la région et autour de 15 à 20‰ dans le reste de la région. D'autre part, les structures spatiales sont très stables dans le temps et une évolution s'observe essentiellement à l'est de la Corrèze où les teneurs ont tendance à augmenter. Dans la Creuse, la densité d'échantillonnage étant faible en 1995-1999, il est difficile de tirer des conclusions quant à l'évolution des teneurs en carbone organique. En Bretagne, l'analyse des cartes montre une tendance à la diminution des teneurs. Cette évolution est plus marquée et semble généralisée entre les périodes 1980-1985 et 1990-1994. Entre 1990-1994 et 1995-1999, les teneurs en carbone

Tableau 2 - Nombre de cantons en Limousin et en Bretagne présentant une évolution significative de la médiane des teneurs en carbone organique et régression linéaire des médianes cantonales entre deux périodes.

***Table 2**- Number of cantons in Limousin and Brittany with statistical significant evolution of median organic carbon content and linear regression of cantonal medians between two periods.*

	Nombre de cantons			Régression linéaire	
	Comparés	**Augmentation significative***	**Diminution significative***	**Coefficient directeur**	**r^2**
Limousin 1990-94/1995-99	79	14 (18 %)	5 (6 %)	1,02	0,91
Bretagne 1980-85/1995-99	125	5 (4 %)	85 (68 %)	0,91	0,89
Bretagne 1990-94/1995-99	173	41 (24 %)	52 (30 %)	0,98	0,95

** test de Wilcoxon, p = 0,05*

Tableau 3 - Nombre de cantons en Bretagne et en Nord-Pas-de-Calais présentant une évolution significative de la médiane des teneurs en phosphore extractible et régression linéaire des médianes cantonales entre deux périodes.

***Table 3** - Number of cantons in Brittany and in Nord-Pas-de-Calais with statistical significant evolution of median extractable phosphorus content and linear regression of cantonal medians between two periods.*

	Nombre de cantons			Régression linéaire	
	Comparés	**Augmentation significative***	**Diminution significative***	**Coefficient directeur**	**r^2**
Bretagne 1980-85/1995-99	169	106 (63 %)	10 (6 %)	1,17	0,60
Bretagne 1990-94/1995-99	169	71 (42 %)	12 (7 %)	1,08	0,81
Nord-Pas-de-Calais 1990-94/1995-99	108	5 (5 %)	33 (31 %)	0,90	0,68

** test de Wilcoxon, p = 0,05*

organique diminuent essentiellement dans les cantons du Morbihan où les teneurs sont élevées.

Significativité statistique des tendances observées

La significativité des tendances d'évolution du carbone organique est étudiée pour les régions Limousin et Bretagne.

En Limousin, les teneurs médianes en carbone organique ont évolué significativement dans 24 % des cantons comparés, principalement dans le sens d'une augmentation *(figure 2 et tableau 2)*. Le coefficient directeur de la droite de régression entre les médianes cantonales aux deux périodes est très légèrement supérieur à 1.

En Bretagne, plus des deux tiers des cantons disposant d'au moins 10 échantillons à chaque période ont vu leur teneur médiane en carbone organique diminuer entre 1980-1985 et 1995-1999 *(figure 2 et tableau 2)*. Entre 1990-1994 et 1995-1999, l'évolution des teneurs médianes est significative dans 54 % des cantons, contre seulement 24 % dans le Limousin pour la même période. Ceux dont la teneur médiane a diminué significativement sont plus nombreux, mais les teneurs médianes de 41 cantons de Bretagne ont augmenté de façon significative. Ces augmentations sont de l'ordre de 5‰ au maximum (données non présentées).

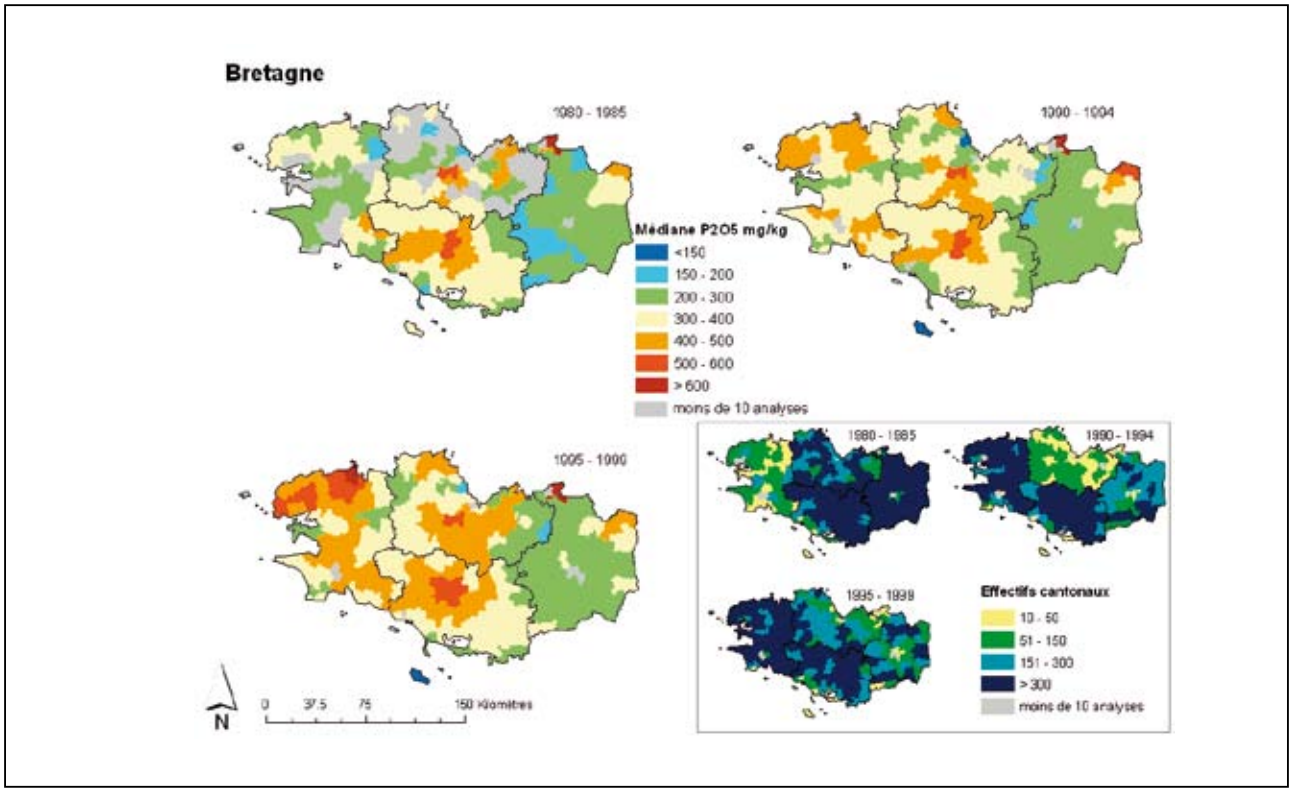
Evolution des teneurs en phosphore

Description des évolutions

D'après le *tableau 1*, les teneurs en phosphore extractible dans le Nord-Pas-de-Calais et en Bretagne sont beaucoup plus élevées que celles de l'ensemble de la France. La médiane des

Planche 2 - Cartes cantonales des teneurs médianes en phosphore extractible de l'horizon de surface et des effectifs cantonaux pour les périodes 1980-1985, 1990-1994 et 1995-1999 en Bretagne et 1990-1994 et 1995-1999 en Nord-Pas-de-Calais

Planche 2 - *Maps of median topsoil extractable phosphorus content and number of samples for the different periods for Brittany and Nord-Pas-de-Calais*



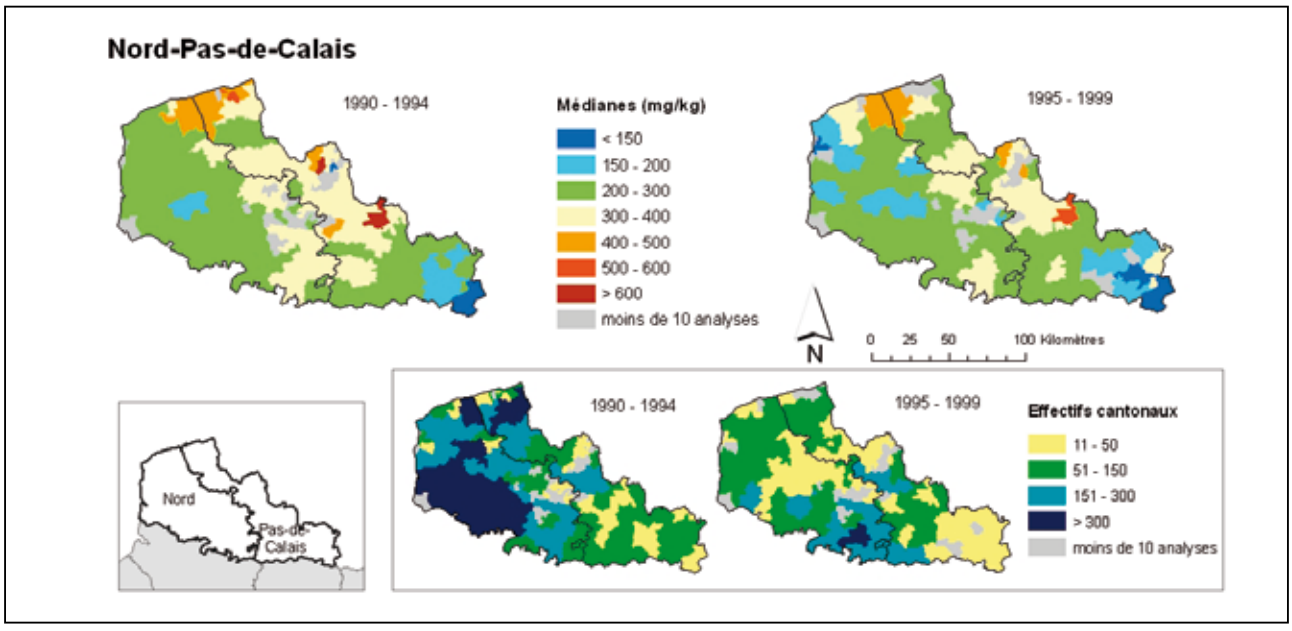
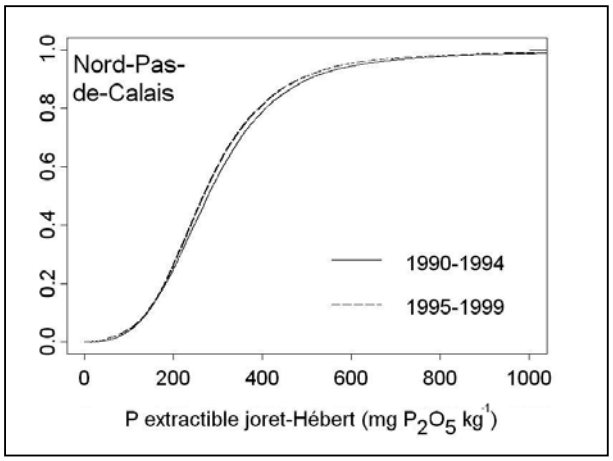
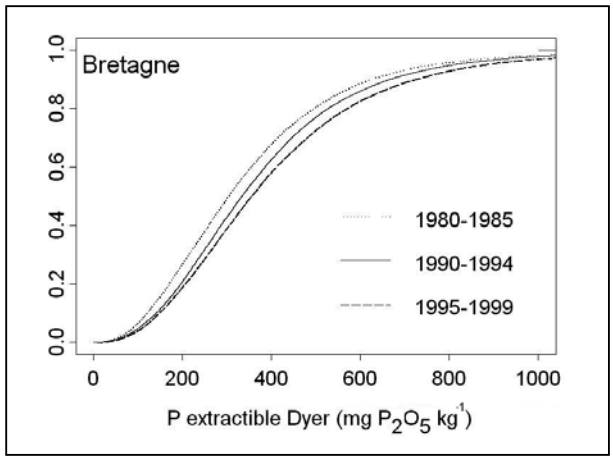


Figure 3 - Histogramme moyen de fréquence cumulée des teneurs en phosphore extractible pour les différentes périodes étudiées en Bretagne et en Nord-Pas-de-Calais, après application de la procédure de rééchantillonnage des données visant une résolution d'échantillonnage uniforme au sein de la région et entre périodes.

Figure 3 - *Mean cumulative distributions of extractable phosphorus content for the studied periods in Brittany and in Nord-Pas-de-Calais, after application of a resampling procedure to ensure uniform sampling resolution.*





médianes cantonales des teneurs analysées par la méthode Joret-Hébert a diminué de 22 mg P_2O_5.kg^{-1} entre les deux périodes en Nord-Pas-de-Calais alors que la médiane des médianes cantonales des teneurs analysées par la méthode Dyer a augmenté de 27 mg P_2O_5.kg^{-1} dans le même laps de temps en Bretagne. Dans cette région, l'augmentation atteint 61 mg P_2O_5.kg^{-1} entre 1980-1985 et 1995-1999. Au cours des deux dernières périodes, le quartile supérieur des médianes cantonales a augmenté de 44 mg P_2O_5.kg^{-1} en Bretagne. De même que pour le carbone organique en Bretagne, les statistiques d'ensemble et les statistiques cantonales peuvent apparaître contradictoires en Nord-pas-de-Calais : la médiane et le quartile inférieur de l'ensemble des échantillons pour la période 1995-1999 sont supérieurs à ceux de la période précédente alors que dans le cas des statistiques cantonales, ils sont inférieurs *(tableau 1)*. De la même façon que pour le carbone organique en Bretagne, ces résultats s'expliquent par la répartition des échantillons et leurs effectifs qui diffèrent entre les deux périodes.

Au contraire du Nord-Pas-de-Calais et de la Bretagne, les sols du Limousin ont des teneurs en phosphore extractible très en-deçà des teneurs nationales.

Pour la Bretagne, les courbes de distributions cumulées se décalent vers les valeurs les plus élevées au cours du temps *(figure 3)*, ce qui confirme l'augmentation importante des teneurs en phosphore Dyer. Les courbes des périodes 1980-1985 et 1990-1994 sont parallèles, mettant en évidence un enrichissement généralisé. Entre 1990-1994 et 1995-1999, la fréquence des teneurs élevées augmente plus que celle des teneurs faibles. Cela indique qu'entre ces deux périodes, les teneurs en phosphore Dyer ont plus augmenté dans les sols les plus riches.

Dans le Nord-Pas-de-Calais, les courbes de distributions cumulées montrent une diminution des teneurs en phosphore Joret-Hébert *(figure 3)*. Pour les deux périodes, la même proportion d'échantillons (environ 20 %) a des teneurs en phosphore inférieures à 200 mg P_2O_5.kg^{-1} alors que la fréquence des échantillons aux teneurs élevées diminue. La diminution des teneurs en phosphore extractible en Nord-Pas-de-Calais ne concerne donc pas les sols les moins bien pourvus.

En Bretagne, les teneurs les plus élevées en phosphore extractible (Dyer) se rencontrent dans les départements de l'ouest, alors que les cantons du département d'Ille-et-Vilaine ont des teneurs majoritairement comprises entre 200 et 300 mg P_2O_5.kg^{-1} *(planche 2)*. Dans ce département, les teneurs en phosphore sont très stables après avoir augmenté légèrement entre 1980-1985 et 1990-1994. Dans le reste de la région, l'augmentation des teneurs est très nette. Elle a lieu essentiellement entre les périodes 1990-1994 et 1995-1999 dans le Morbihan, alors que toutes les périodes sont concernées dans le Finistère et les Côtes-d'Armor.

Concernant la région Nord-Pas-de-Calais, les cantons dont les teneurs médianes en phosphore extractible (Joret-Hébert) sont les plus élevées se trouvent essentiellement dans les deux tiers nord du département du Nord et dans la bordure est du Pas-de-Calais *(planche 2)*. Entre les deux périodes, les teneurs en phosphore diminuent de façon diffuse sur l'ensemble du territoire régional. Toutefois, beaucoup plus de résultats analytiques étaient disponibles en 1990-1994, *(tableau 1 et planche 2)*, ce qui nuance la pertinence de la seule analyse cartographique.

Significativité statistique des tendances observées

La significativité des tendances d'évolution du phosphore extractible est étudiée pour les régions Bretagne et Nord-Pas-de-Calais.

En Bretagne, les teneurs en phosphore Dyer ont augmenté significativement dans 63 % et 42 % des cantons comparés entre les périodes 1980-1985 et 1995-1999, et 1990-1994 et 1995-1999 respectivement *(tableau 3)*. Quelques cantons ont vu leurs teneurs médianes diminuer mais la *figure 4* montre que cette diminution est limitée, hormis pour un canton qui peut être considéré comme aberrant. Les données sont assez dispersées, surtout vers les teneurs fortes, avec un coefficient de corrélation linéaire de 0,60.

En Nord-Pas-de-Calais, la teneur médiane en phosphore a évolué significativement pour 36 % des cantons étudiés, dont 31 % sont en diminution *(tableau 3),* parfois très forte *(figure 4)*. Les cantons dont la médiane a augmenté significativement ont tous des médianes inférieures à 300 mg $P_2O_5.kg^{-1}$.

DISCUSSION

Mise en évidence de variations temporelles des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible

La comparaison des cartes des teneurs médianes cantonales en carbone organique et en phosphore extractible à partir de données issues de périodes différentes met d'emblée en évidence la conservation au cours du temps de structures spatiales de grande portée. Les jeux de données étant *a priori* indépendants, cette observation confirme la robustesse de la méthodologie de collecte, de validation et de traitement des données de la BDAT.

Des évolutions temporelles ont pu être décelées et quantifiées. Concernant le carbone organique, les résultats montrent que les teneurs ont diminué de façon généralisée entre 1980-1985 et 1990-1994 en Bretagne *(figure 1 et planche 1),* confirmant les résultats de Walter *et al.* (1995). La baisse des teneurs affecte essentiellement les valeurs les plus fortes entre 1990-1994 et 1995-1999. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Bellamy *et al.* (2005) qui font le constat d'une corrélation positive significative entre le taux de variation et la teneur initiale en carbone organique dans les sols d'Angleterre et du Pays-de-Galle. Il est néanmoins intéressant de constater que les teneurs médianes ont augmenté de façon significative dans un quart des cantons de Bretagne entre 1990-1994 et 1995-1999 *(tableau 2)*. Les teneurs en carbone organique ont très peu évolué entre les deux périodes dans le Limousin, où l'élevage est plus extensif, et vont plutôt dans le sens d'une augmentation.

En ce qui concerne le phosphore extractible, les teneurs ont augmenté très nettement en Bretagne *(figure 3 et planche 2)*, confirmant les observations du Conseil Scientifique Régional de l'Environnement Bretagne (2003). Toute la gamme de teneurs en phosphore Dyer était affectée dans les mêmes proportions entre 1980-1985 et 1990-1994, puis l'enrichissement s'est poursuivi essentiellement dans les secteurs du Finistère, du Morbihan et des Côtes-d'Armor où les teneurs étaient déjà élevées. Le développement de l'élevage hors-sol et des cultures légumières serait en grande partie à l'origine de l'accroissement des teneurs en phosphore. A l'inverse, les teneurs ont diminué de façon générale en Nord-Pas-de-Calais, mais les médianes cantonales de certains cantons, dont la teneur en phosphore Joret-Hébert était inférieure à 300 mg $P_2O_5.kg^{-1}$, ont augmenté. Dans cette région, la valorisation agricole des scories Thomas, co-produit de l'industrie sidérurgique, a conduit à l'enrichissement des sols en phosphore. La forte diminution de la principale source locale de phosphore qui a accompagné le déclin de cette industrie, l'évolution du raisonnement de la fertilisation et les contraintes économiques liées au coût des intrants expliqueraient la réduction de la sur-fertilisation des sols agricoles.

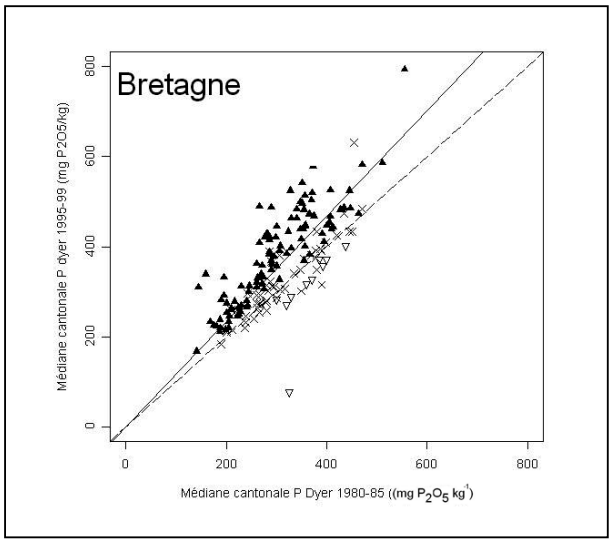
La région Nord-Pas-de-Calais a été étudiée notamment pour les teneurs élevées en phosphore extractible de ses sols agricoles, et la région Bretagne pour ses teneurs également élevées en phosphore extractible, mais aussi en carbone organique. Les évolutions de ces éléments dans ces deux régions étaient assez marquées, sans pour autant avoir été évaluées statistiquement ni quantifiées jusqu'à maintenant. Dans le cas de régions ou de paramètres pour lesquels les tendances sont moins affirmées, des évolutions pourraient-elle être démontrées ? Les variations temporelles statistiquement significatives de caractéristiques des sols sont beaucoup plus délicates à mettre en évidence que les variations spatiales et seules les évolutions nettes sont clairement mises en évidence. Les données de trois périodes sont disponibles en Bretagne, et les résultats montrent que la significativité des évolutions est améliorée quand des périodes non contigües sont comparées. La collecte et l'intégration de nouvelles données à la BDAT est continue et pérenne, ce qui permettra d'augmenter encore le recul pour les régions où des données sont disponibles, mais aussi d'améliorer la couverture du territoire et la densité d'échantillonnage. Les tendances observées pourront alors être confirmées ou infirmées.

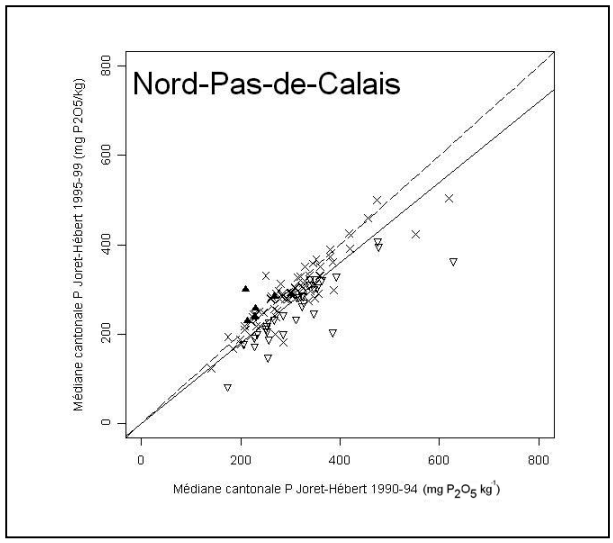
Précautions pour l'interprétation des résultats

La BDAT a été construite selon une méthodologie qui s'apparente plus à une démarche d'enquête que de prospection pédologique organisée (Saby *et al*., 2004). Des précautions doivent être prises lors de l'interprétation des résultats. En effet, l'échantillonnage est non maîtrisé et il dépend essentiellement des motivations des agriculteurs pour choisir les parcelles à échantillonner, les paramètres à analyser et la fréquence du recours à l'analyse. Des aspects techniques (les analyses constituent-elle un moyen de

Figure 4 - Comparaison des teneurs cantonales médianes en phosphore extractible entre 1980-1985 et 1995-1999 en Bretagne et entre 1990-1994 et 1995-1999 en Nord-Pas-de-Calais et significativité des évolutions estimée par le test de Wilcoxon (p = 0,05). Les coefficients directeurs sont présentés dans le tableau 3. Légende : voir figure 2

Figure 4 - *Comparison of cantonal extractable phosphorus medians between 1980-1985 and 1995-1999 in Brittany and between 1990-1994 and 1995-1999 in Nord-Pas-de-Calais and evolutions significance estimated by Wilcoxon test (p = 0,05). The director coefficients are presented in table 3. Legend : see figure 2*





raisonner *a priori* la fertilisation des terres ou de faire le diagnostic d'un problème ?) mais aussi stratégiques (impact de la politique commerciale des laboratoires ou de l'influence de conseillers agricoles de secteur) entrent en ligne de compte dans ces choix. De plus, le fait que seule la commune d'origine des échantillons de terre analysés est connue et l'agrégation au niveau cantonal des résultats ne permettent pas de garantir une distribution spatiale homogène des analyses. La stratégie d'échantillonnage et la localisation peu précise des échantillons introduisent des biais statistiques qu'il est difficile d'estimer. Cependant, la procédure de rééchantillonnage mise en œuvre pour établir les histogrammes de fréquence cumulée et le très grand nombre d'analyses disponibles permettent de limiter ces biais, sans toutefois s'en affranchir complètement.

Le géoréférencement précis des prélèvements de terre constitue une perspective intéressante de traitement des données de la BDAT. Les laboratoires fournissent de plus en plus fréquemment des données localisées précisément, ce qui permettra de vérifier les hypothèses de base de l'analyse temporelle que sont l'indépendance des jeux de données comparés et la répartition spatiale aléatoire des échantillons (afin de ne pas échantillonner des zones trop limitées et de représenter les différents contextes pédologiques des cantons). Dans un futur proche, ces données géoréférencées avec précision permettront de faire le lien entre la BDAT et des données existant par ailleurs sur les sols (cartographies régionales, voire nationale à l'échelle du 1/250 000^{e}), l'occupation du sol ou les systèmes de production. Être en mesure de mettre en regard le type pédologique et les données de la BDAT permettrait d'aller beaucoup plus loin dans l'interprétation des résultats. Notamment, l'interprétation d'une certaine valeur d'une caractéristique chimique diffèrera selon le type de sol dont est issu l'échantillon de terre.

Prise en compte des facteurs explicatifs des teneurs observées et de leurs évolutions

Les facteurs qui peuvent influencer la formation et l'évolution des sols sont naturels et anthropiques : le climat, la géologie, la géomorphologie, l'occupation du sol et les pratiques agricoles sont les principaux. Ils expliquent en grande partie les structures spatiales de large portée mises en évidence grâce à la BDAT. A l'échelle de la période couverte par la BDAT, l'évolution des teneurs en éléments est essentiellement influencée par les facteurs humains (voire climatiques), mais l'intensité des effets anthropiques peut être modulée par les facteurs naturels. Par exemple, le retournement massif des prairies aurait-il les mêmes conséquences sur les teneurs en carbone organique des sols dans les régions soumises à un climat océanique que dans celles soumises à un climat continental ?

Les données de la BDAT sont agrégées au niveau cantonal, or d'autres sources d'information d'intérêt comme le Recensement Général Agricole (RGA) le sont également. Des croisements de données sont donc possibles entre ces sources d'information indépendantes et permettraient de valider les hypothèses concernant l'impact des pratiques agricoles sur les évolutions observées. Des

travaux sont entrepris dans ce sens sur la région Bretagne : une corrélation est recherchée entre les bilans de phosphore calculés à l'échelle du canton à partir des données des trois derniers RGA et l'évolution des teneurs en phosphore extractible à partir des données de la BDAT. Cette démarche pourrait également être appliquée à la région Nord-Pas-de-Calais.

Par ailleurs, l'étude de corrélation entre différents paramètres issus de la BDAT pourrait apporter des éléments complémentaires pour la compréhension de la variation des caractéristiques des sols dans le temps. Il serait notamment intéressant de comparer les dynamiques d'évolution des teneurs en carbone organique dans les sols les plus acides et les moins acides d'une région.

L'un des enjeux du suivi des teneurs en éléments fertilisants des sols est d'acquérir des informations à long terme (plusieurs décennies), voire d'être en mesure de détecter de façon objective les effets de changements de pratiques agricoles. Les biais statistiques inhérents à la méthode d'échantillonnage adoptée sont trop importants pour permettre une réponse à partir de la seule BDAT, mais les résultats issus de cette base de données peuvent être couplés à d'autres sources d'information, suggérer des pistes de recherche, orienter des démarches expérimentales, et apporter des éléments de validation des résultats.

CONCLUSION

De par la quantité très importante de données validées et datées qui la constituent, la BDAT est un outil clé du dispositif national de connaissance et de surveillance des sols, et permet d'évaluer l'impact des activités humaines sur cette ressource. Cette étude a permis de montrer qu'il est possible, à partir de la BDAT, de mettre en évidence et de quantifier des trajectoires d'évolution des teneurs en carbone organique et en phosphore extractible différenciées selon les régions. Cependant, la BDAT ne fournit qu'une vision partielle de la couverture pédologique car seules des caractéristiques chimiques sont considérées en plus de la granulométrie et seuls les échantillons d'horizons de surface de sols agricoles sont pris en compte. De ce fait, la BDAT est très complémentaire du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (Arrouays *et al*., 2003 ; Jolivet *et al*., ce numéro) qui permettra d'estimer de façon non biaisée les évolutions temporelles des propriétés pédologiques par le suivi d'environ 2000 sites en France. Grâce à la robustesse conférée par ses effectifs d'analyses très importants, la BDAT permettra de confirmer des tendances d'évolution que le RMQS aura permis de déceler. A court terme, la BDAT reste le seul outil opérationnel pour le suivi des caractéristiques chimiques des sols à l'échelle nationale. A plus longue échéance, les perspectives de croisement des données de la BDAT avec d'autres sources d'information spatiales comme les types pédologiques, l'occupation du sol et les systèmes de production agricole permettront d'accroître encore l'intérêt et les possibilités de traitements d'une telle base de données.

REMERCIEMENTS

Le programme BDAT est financé par le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol qui regroupe le MAP, le MEDD, l'ADEME, l'IFEN, l'INRA et l'IRD. Nous remercions l'ensemble des laboratoires qui ont bien voulu participer à ce programme en fournissant les données : AGREN, CANA, IDAC, LARCA 72, CESAR, LDAR-SAA, LDA 11, LDA 21, LDA 22, LDA 23, LACO, AGRILABO, COOPAGRI 29, LARA ES, LDA 32, LCA, LDA 35, LDA 37, LDA 41, CERAAF, TERRENA, IDAC, LDA 45, LANO, CAMA, CAM, LVD, LDA 56, INRA, CACG, SADEF, LDA 71, LDA 82, CA 87-EDE 87. Nous remercions également Pascal Denoroy et Jean-Luc Julien pour avoir relu la première version de cet article et émis des critiques constructives.

BIBLIOGRAPHIE

Afnor, 1999 — Qualité des sols, volume 1, Afnor Ed., 565 pages.

Arrouays D., Balesdent J., Germon J.C., Jayet P.A., Soussana J.F., Stengel P., 2002 - Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols français ? Editions INRA, Paris 334 p.

Arrouays, D., Jolivet Cl., Boulonne L., Bodineau G., Ratié C., Saby N., et Grolleau E., 2003 - Le réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) de France. Etude et Gestion des Sols, vol. 10 (4) : pp. 241-252.

Balesdent J., 1996 - Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. Etude et Gestion des Sols, vol. 3 (4) : pp. 245-260, N° spécial.

Barroin G., 2003 - Gestion des risques. Santé et environnement : le cas des nitrates. Phosphore, azote et prolifération des végétaux aquatiques. Le Courrier de l'environnement n°48, Editions INRA.

Bellamy P.H., Loveland P.J., Bradley R.I., Lark R.M., Kirk G.J.D., 2005 - Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. Nature, vol 437 (8) : pp. 245-248.

Cheverry C., 1994 - La dégradation chimique des sols en Bretagne. Etude et gestion des sols, 1 : pp. 7-21.

Conover W. J., 1980 - Practical Nonparametric Statistics, 2nd ed. Wiley, New York.

Coppenet M., Golven J., Simon J.C., Le Corre L, Le Roy M., 1993 - Evolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif : exemple du Finistère. Agronomie, 13 : pp. 77-83.

Conseil Scientifique Régional de l'Environnement Bretagne, 2003 - Gestion des sols et apports de déchets organiques en Bretagne, 53 pages + annexes.

Jolivet C., Arrouays D., Boulonne L., Ratié C. et Saby N., 2006 - Etat d'avancement et premiers résultats - Étude et Gestion des Sols, Volume 13, 3, - pp. 149 à 164

Leleux A., Aurousseau P. et Roudaut A., 1988 - Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. Science du Sol, n°26(1) : pp. 29-39.

Lugo A.E., Brown S., 1993 - Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. Plant and Soil 149 : pp. 27-41.

Morel C., Cachot C., Martinez J., Peu P., Elsass F, Robert M., Fardeau J.-C., 2004

- Evolution sur 12 ans de la solubilité, mobilité et lixiviation du phosphate dans un sol ayant massivement reçu du lisier ? Etude et Gestion des Sols, vol. 44 (4) : pp. 403-418.

Roussel O., Bourmeau E. et Walter C., 2001 - Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. Etude et Gestion des Sols, vol. 8 (1) : pp. 65-81.

Saby N, Schvartz C., Walter C., Arrouays D., Lemercier B., Roland N., Squividant H., 2004 - Base de Données des Analyses de Terre : Procédure de collecte et résultats de la campagne 1995-2000. Etude et Gestion des Sols, vol 11 (3) : pp. 235-254.

Schvartz C., Walter C., Claudot B., Bouédo Th., Aurousseau 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, vol. 4 (3) : pp. 191-204.

Walter C., Bouedo T., Aurousseau P., 1995 - Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. Rapport final. Conseil Régional de Bretagne - Agence Loire-Bretagne, 31 p.

Walter C., Schvartz C., Claudot B., Bouedo T. et Aurousseau P., 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre réalisées entre 1990 et 1994 II. Descriptions statistique et cartographique de la variabilité des horizons de surface des sols cultivés. Etude et Gestion des Sols, vol. 4 (3) : pp. 205-219.