

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

C. Walter ⁽¹⁾, C. Schwartz ⁽²⁾, B. Claudot ⁽²⁾, Th. Bouedo ⁽³⁾ et P. Arousseau ⁽³⁾

(1) ENSA-INRA Rennes, Laboratoire de Science du Sol, 35042 Rennes

(2) ISA Lille, 41 rue du Port, 59046 Lille

(3) ENSA Rennes, Laboratoire de Spatialisation Numérique, 35042 Rennes

RÉSUMÉ

Une base de données cantonale a été construite par traitement statistique des résultats analytiques portant sur 297 000 échantillons d'horizons de surface de sols cultivés, prélevés en France entre 1990 et 1994. Plusieurs déterminations agronomiques usuelles (granulométrie, pH, matière organique, calcaire, CEC, cations échangeables, phosphore extractible, oligo-éléments) sont prises en compte. Leur distribution est décrite pour environ 2 000 cantons suffisamment renseignés parmi les 3 511 existants.

Les données sont d'abord décrites conjointement aux niveaux national et cantonal pour comparer leur variabilité à ces deux échelles : référée à la variabilité générale, la variabilité intra-cantonale apparaît plus importante pour les propriétés influencées par l'activité humaine que pour les autres. La représentation cartographique à partir de critères statistiques montre néanmoins des structures spatiales de grande portée, y compris pour les propriétés à forte variabilité locale. Ces structures apparaissent liées, selon les propriétés et les régions, à des variations géologiques et/ou pédologiques, à des gradients climatiques, ou encore aux systèmes de production agricole.

L'approche par enquête, fondée sur la collecte et l'analyse de données existantes, donne ainsi des indications sur la variabilité de propriétés du sol au sein de vastes territoires : elle permet également l'étude de son évolution éventuelle par la comparaison de jeux de données acquis à des dates différentes. Il s'agit donc d'un outil de connaissance sur les sols complémentaire des approches expérimentales ou de cartographie pédologique.

Mots clés

Base de données, analyse spatiale, statistique descriptive, cartographie des sols, gestion des sols, conservation des sols.

SUMMARY

STATISTICAL REVIEW OF THE SOIL TESTS MADE IN FRANCE FROM 1990 TO 1994 : statistical and cartographic descriptions of the cultivated topsoil horizon variability

A database at a canton level has been established in France using the analytical results from 297 000 samples of the upper horizon of cultivated soils, collected from 1990 to 1994. Several determinations (particle size distribution, organic matter, pH, Cation Exchange Capacity, exchangeable cations, available phosphorus and trace elements), analysed for fertilisation purposes, are concerned. The variability within a canton is described for each determination through robust statistical parameters (median, quartiles and deciles). Approximately 2 000 cantons, the best sampled within the 3 511 existing, could be considered.

The data are first statistically described at the national and the canton levels to compare the variability observed within a relatively small area against the overall variability : the variability within a canton, in comparison with the general one, appears higher for properties

influenced by fertilisation than for others. The cartographic representation indicates for all properties the existence of long range spatial structures, even for properties with high local variability. These structures appear correlated to geological or pedological variations, to different climatic zones, or to agricultural production systems changes.

The approach developed in this work, based on the collecting and the analysis of existing data, describes the spatial variability of crucial soil properties over large areas ; indications on their temporal evolution can also be obtained by comparison of datasets from different periods. So, this approach appears to be an interesting assessment tool of the soil cover, complementary to experimental and survey studies.

Key-words

Soil database, spatial analysis, descriptive statistics, soil survey, soil management, soil conservation.

RESUMEN

SÍNTESIS NACIONAL DE LAS ANÁLISIS DE TIERRAS REALIZADAS ENTRE 1990 Y 1994

II - Descripciones estadísticas y cartográficas de la variabilidad de los horizontes de superficie de los suelos cultivados

Un banco de datos cantonales fue construido por tratamiento estadístico de los resultados analíticos que se llevo a cabo sobre 297 000 muestras de horizontes de superficie de suelos cultivados, muestreadas en Francia entre 1990 y 1994. Varias determinaciones agronómicas corrientes (granulometría, pH, materia orgánica, calcario, CIC, cationes intercambiables, fósforo, oligo-elementos) se han tomado en cuenta. Su distribución está descrita por cerca de 2000 cantones suficientemente informados dentro de los 3511 existentes.

Los datos están primeramente descritos conjuntamente al nivel nacional y cantonal para comparar su variabilidad a estas dos escalas : referida a la variabilidad general, la variabilidad intra-cantonal aparece más importante para las propiedades influenciadas por la actividad humanas que para las otras. La representación cartográfica a partir de los criterios estadísticos muestra no obstante estructuras espaciales de gran portada, incluyendo las propiedades a gran variabilidad local. Estas estructuras aparecen ligadas, según las propiedades y las regiones, a variaciones geológicas y/o pedológicas, a gradientes climáticos, o también a sistemas de producción agrícola.

El enfoque por encuesta, fundado sobre la colecta y el análisis de datos existentes, da así indicaciones sobre la variabilidad de las propiedades del suelo en el seno de extensos territorios ; permite igualmente, el estudio de su evolución eventual por la comparación de juegos de datos adquiridos a fechas diferentes. Es entonces, una herramienta de conocimiento sobre los suelos complementaria a enfoques experimentales o cartografía pedológica.

Palabras claves

Banco de datos, análisis espacial, estadística descriptiva, cartografía de suelos, gestión de suelos, conservación de suelos.

Les études cartographiques sur la variabilité spatiale des sols privilégient des propriétés des sols jugées pérennes à l'échelle humaine, comme la morphologie des horizons, la profondeur du sol, la texture. Ce choix est effectué à la fois pour des études cartographiques à grande échelle, par exemple dans le cadre de secteurs de références (Favrot, 1989) ou pour des synthèses à des échelles plus petites, comme l'établissement d'une base de données sol au millionième de l'Europe (King *et al.*, 1995 ; Van Ranst *et al.*, 1995).

Deux types de raisons expliquent ce choix. D'une part, les synthèses cartographiques sont souvent destinées à "durer", car leur réalisation suppose un échantillonnage important et leur mise à jour n'était pas aisée avant le développement des systèmes d'information géographique. D'autre part, la prise en compte de propriétés variables dans le temps, par exemple la teneur en éléments échangeables ou biodisponibles des sols, est difficile dans une analyse spatiale du milieu. En effet, la variabilité d'une parcelle à l'autre ou d'une exploitation à l'autre risque d'être aussi importante que celle observée à des échelles plus petites.

L'obstacle de l'échantillonnage peut être levé dans le cas de propriétés des sols déterminées lors d'analyses agronomiques, car de nombreuses mesures sont disponibles. Des synthèses régionales ont ainsi pu être menées à l'échelle de régions (Leleux *et al.*, 1988 ; Danneels et Schwartz, 1993 ; Vandendriessche *et al.*, 1993) ou de départements (Schvartz *et al.*, 1988 ; Villemin et Florentin, 1988 ; Boiffin et Villemin, 1990 ; CA72, 1991 ; SCPA, 1993 ; Aurousseau *et al.*, 1996) pour diverses propriétés des horizons de surface : pH, carbone organique, phosphore, potassium, etc. Sur la base d'un découpage communal, les auteurs fournissent soit des critères statistiques de position et de dispersion des propriétés étudiées, soit des proportions d'échantillons plus ou moins bien pourvus selon des grilles d'interprétation agronomique. De rares études ont tenté de comparer des jeux de données acquis à des dates différentes (Lauprêtre, 1990 ; Walter *et al.*, 1995) pour mettre en évidence d'éventuelles évolutions temporelles.

La présente étude vise à étendre à l'échelle nationale les travaux concernant la description de la variabilité des horizons de surface déjà menés dans certaines régions. Elle s'appuie sur la banque de données statistiques cantonales établie à partir des analyses de terre réalisées en France entre 1990 et 1994 par des laboratoires agréés (Schvartz *et al.*, 1997).

L'objectif de cet article est de présenter la variabilité de certaines propriétés des horizons de surface des sols cultivés du territoire français, à travers une approche statistique monofactorielle. Pour chaque propriété, on fournira des critères statistiques décrivant la distribution des valeurs aux échelles nationale ou cantonale. Une visualisation cartographique sera proposée pour quelques propriétés.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les étapes de la constitution et les caractéristiques de la base de données statistiques cantonales sont décrites par Schvartz *et al.* (1997). Seuls quelques éléments clés sont rappelés.

L'échantillonnage et les déterminations analytiques

Un fichier confidentiel a été constitué incluant les résultats analytiques de 297 000 échantillons de sols cultivés, prélevés entre 1990 et 1994, et analysés par des laboratoires agréés par le Ministère de l'Agriculture.

Un échantillon est le résultat du mélange physique de plusieurs prélèvements de l'horizon de surface d'une même parcelle, le choix de celle-ci dépendant de l'agriculteur. La stratégie d'échantillonnage n'est donc pas maîtrisée et en particulier les motivations du choix de la parcelle ne sont pas connues.

Les déterminations, effectuées selon des méthodes normalisées (AFNOR, 1996), varient selon les échantillons (*carte 1 et tableau 1*) : le pH, le carbone organique, les potassium et magnésium échangeables, le phosphore extractible sont presque toujours analysés ; le calcaire total et la capacité d'échange cationique sont connus pour environ un échantillon sur deux ; les fractions granulométriques et les oligo-éléments sont renseignés pour environ un échantillon sur trois.

L'approche statistique descriptive

Le choix du découpage

L'information connue la plus précise sur la localisation d'un échantillon est sa commune d'origine. Pour étudier la variabilité spatiale à l'échelle nationale, Schvartz *et al.* (1997) comparent différents découpages (commune, canton, petite région agricole, département) et analysent les effectifs et la variabilité au sein des unités d'agrégation. Le découpage cantonal apparaît le mieux concilier les nécessités conjointes de disposer d'un effectif suffisant au sein des entités de base et de limiter leur variabilité interne.

Le découpage en 3 511 cantons a de ce fait été retenu : 2 150 cantons disposent de plus de 10 mesures pour les déterminations faites quasi systématiquement (pH, C, P, K, Ca, Mg), environ 1 600 cantons pour les déterminations moins bien renseignées (calcaire, granulométrie, oligo-éléments).

Les représentations cartographiques

En raison de l'hétérogénéité du jeu de données, des critères statistiques non paramétriques (déciles, quartiles, médiane) ont été privilégiés : il s'agit de critères robustes, peu sensibles à des valeurs aberrantes et leur interprétation statistique ne nécessite pas de connaître la loi de distribution.

La représentation cartographique d'un critère statistique au niveau d'un canton est effectuée par convention (Schvartz *et*

Tableau 1 : Statistiques générales de différentes propriétés physiques de l'horizon de surface calculées pour l'ensemble des échantillons et pour la stratification cantonale. (LF/LG = rapport limons fins sur limons grossiers ; IB = indice de battance calculé selon la formule $((1,5 LF + 0,75) / (\text{argile} + 10 \text{ mat. orga})) [-0,2 (\text{pH}-7) \text{ si } \text{pH} > 7]$)

Table 1 : Main statistics of several physical properties from the topsoil horizon calculated for all samples and for the cantonal stratification. (LF/LG = ratio between fine and coarse silt ; IB = $((1.5 LF + 0.75LG) / (\text{clay} + 10 \text{ organic mat.})) [-0.2 (\text{pH}-7) \text{ if } \text{pH} > 7]$)

| | Ensemble des échantillons | | | | | Stratification cantonale | | |
|-------------------------------|---------------------------|---------|-----------|-----------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Effectif | Médiane | Quartiles | Déciles | Type de distribution | Médiane des médianes | Interdécile des médianes | Médiane des interdéciles |
| argile (‰) | 122 268 | 185 | 141 - 269 | 107 - 385 | lognormal | 186 | 130 - 355 | 119 |
| limons totaux (‰) | 91 810 | 468 | 332 - 625 | 230 - 731 | bimodal (400 et 700) | 460 | 275 - 707 | 204 |
| Sables totaux (‰) | 78 529 | 290 | 143 - 489 | 74 - 643 | unimodal (100) | 262 | 88 - 562 | 219 |
| LF/LG | 91 810 | 1,1 | 0,6 - 1,6 | 0,5 - 2,3 | lognormal | 1,1 | 0,5 - 2,0 | 0,7 |
| Indice de battance | 102 372 | 1,1 | 0,7 - 1,7 | 0,5 - 2,1 | lognormal | 1,1 | 0,6 - 1,8 | 0,8 |
| pH | 291 971 | 6,5 | 5,9 - 7,7 | 5,5 - 8,1 | bimodal (5,8 et 7,8) | 6,7 | 5,8 - 8,0 | 1,4 |
| Calcaire total (‰) | 182 766 | 1 | 0 - 31 | 0 - 254 | unimodal (0) | 0,2 | 0 - 92 | 15 |
| Matière org. (‰ de Cx1.72) | 274 014 | 26 | 19 - 40 | 14 - 55 | lognormal | 24 | 15 - 45 | 19 |
| CEC (mé/100g) | 147 867 | 11 | 8 - 16 | 6 - 24 | lognormal | 11 | 7 - 20 | 7 |

al., 1997) dès lors que l'on dispose d'au moins dix déterminations (carte 1) : l'effectif médian d'un canton ainsi représenté est de l'ordre de 75 pour les déterminations pH, C, P, K, Ca, Mg et de l'ordre de 40 pour les autres déterminations.

La cartographie de la médiane est utilisée pour indiquer la valeur centrale de la propriété, celle des quartiles inférieur et supérieur met en évidence la dispersion des valeurs au sein d'un canton. Pour le lecteur, une forte ressemblance des cartes des quartiles indique une faible variabilité intracantonale ; au contraire, leur dissemblance souligne une dispersion forte au sein des cantons.

Les risques de biais

Le calcul de critères statistiques pour caractériser au niveau cantonal la variabilité spatiale des horizons de surface des sols cultivés, suppose de façon implicite que toute parcelle d'un canton ait la même probabilité initiale d'être échantillonnée.

La stratégie d'échantillonnage n'étant pas maîtrisée dans notre étude, il existe plusieurs risques de biais par rapport à cette hypothèse de base. En premier lieu, les motivations de l'agriculteur peuvent le conduire à privilégier certains sols. Il s'agit là du risque principal de biais, car il est impossible à évaluer pour une population aussi vaste. Quand on compare les critères statistiques de cantons différents, d'autres sources de

biais peuvent surgir : (i) les analyses proviennent de différents laboratoires ce qui peut induire une certaine incertitude (Pleijzier, 1988) ; (ii) le nombre d'échantillons varie d'une année sur l'autre posant des problèmes d'homogénéité du jeu de données. Ces dernières causes d'incertitude sont limitées par les procédures d'agrément des laboratoires et par l'importance numérique du jeu de données.

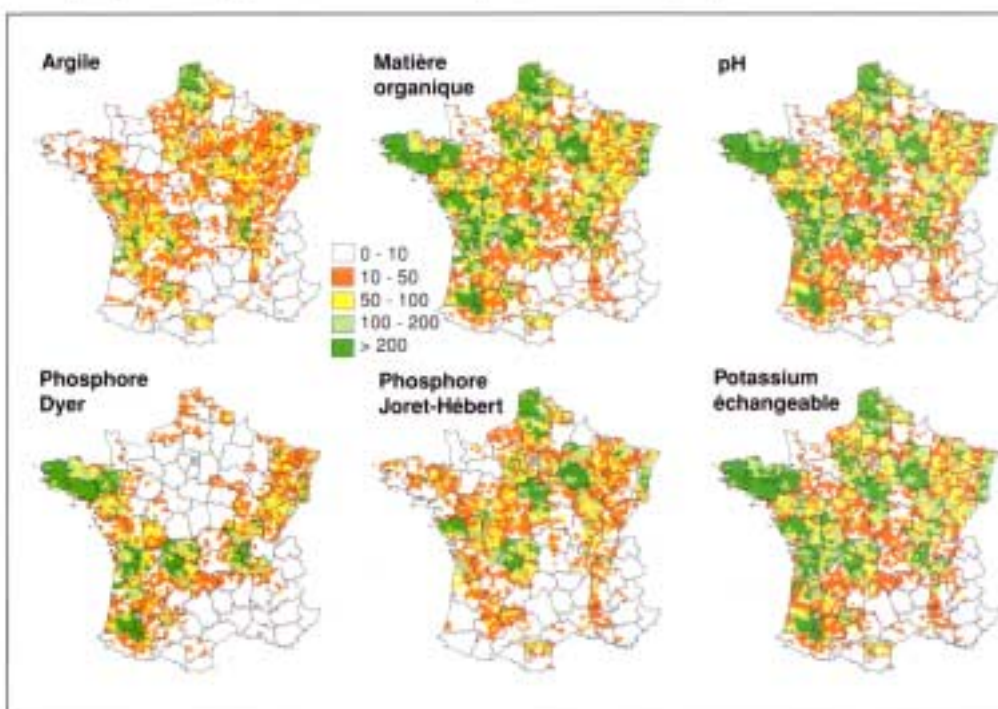
L'ensemble de ces risques conduit à mettre en oeuvre des techniques statistiques robustes et à lire les documents cartographiques ainsi obtenus, en s'aidant des cartes des effectifs et en privilégiant les grandes tendances régionales par rapport aux particularités locales.

RÉSULTATS

Les résultats sont présentés en dissociant de façon classique les propriétés dites "physiques" (granulométrie, pH, matière organique, capacité d'échange cationique) des propriétés "chimiques" (phosphore extractible, potassium, magnésium, oligo-éléments). Cette présentation volontairement très descriptive traite de façon indépendante les différentes déterminations et ne s'attache pas à l'étude de leurs corrélations.

Carte 1 : Cartes cantonales du nombre d'analyses disponibles pour six déterminations (argile, matière organique, pH, phosphore extractible Dyer, phosphore extractible Joret-Hébert, potassium échangeable) de l'horizon de surface.

Map 1 : Maps of the number of analyses available in a canton for six determinations of the topsoil horizon : clay content, organic matter content, pH, Dyer available phosphorus, Joret-Hébert available phosphorus and exchangeable potassium.



Les propriétés physiques

Les statistiques générales

Les statistiques générales de toutes les propriétés considérées sont consignées dans le tableau 7. Pour en faciliter la lecture, la figure 7 fournit une visualisation graphique des critères statistiques retenus.

Le tableau 7 donne en premier lieu les effectifs et les statistiques pour l'ensemble des échantillons. Les ordres de grandeur et la variabilité d'ensemble d'une propriété peuvent ainsi être perçus : à titre d'exemple, la médiane de la teneur en argile des 122 268 échantillons analysés est de 185‰; 50 % de ces échantillons ont des teneurs comprises entre 141 ‰ et 269 ‰ (quartiles) et 80 % entre 107 ‰ et 385 ‰ (déciles), selon une distribution lognormale.

Le tableau 7 fournit ensuite des critères statistiques issus du découpage cantonal pour caractériser les variabilités inter et intra-cantonales.

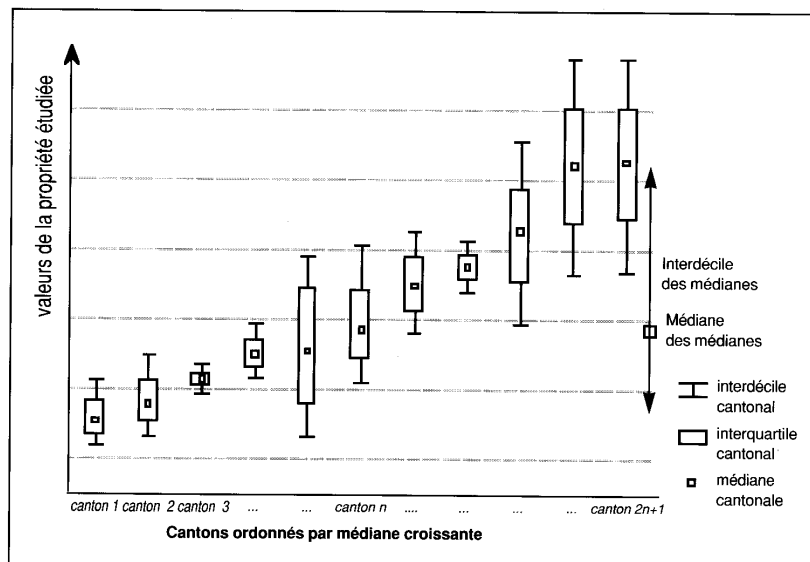
La variabilité inter-cantonale est décrite à travers la médiane des médianes cantonales et l'interdécile des médianes cantonales : par exemple, 50 % des cantons présentent une teneur médiane en argile inférieure à 186 ‰, 80 % d'entre eux ont une médiane de teneur en argile comprise entre 130 ‰ et 355 ‰.

La variabilité intra-cantonale est caractérisée par la médiane des interdéciles : au sein d'un même canton, l'écart médian entre les 10 % d'échantillons les plus argileux et les 10 % les moins argileux est de 119 ‰. Cet écart peut être comparé à l'interdécile de la population générale (385-107 = 278 ‰ pour l'argile).

La médiane de l'interdécile cantonal apparaît beaucoup faible que l'interdécile général pour les fractions granulométriques, le

Figure 1 : Représentation schématique des paramètres statistiques retenus pour décrire la variabilité inter et intra-cantonale d'une propriété de l'horizon de surface. La médiane des interdéciles est obtenue en prenant la valeur médiane, pour tous les cantons, des écarts entre le 9^e et le 1^{er} déciles.

Figure 1 : Schematic representation of statistical parameters retained to describe the variability of a topsoil property within and between cantons.



calcaire total, la CEC, leur rapport étant inférieur à 0,4. Pour la matière organique et le pH, ce rapport est plus élevé, de l'ordre de 0,5 indiquant une variabilité intra-cantonale plus forte pour ces deux propriétés influencées par l'activité humaine.

Les caractéristiques granulométriques

La teneur en argile varie de 40 à 700 ‰ parmi les 122 000 échantillons renseignés, selon une distribution lognormale avec une médiane de 185 ‰ (tableau 1). L'histogramme des médianes cantonales suit une allure similaire avec néanmoins une dispersion moindre et une proportion de teneurs comprises entre 150 et 200 ‰ plus importante ; 40 % des médianes cantonales sont comprises dans cette fourchette.

La carte des médianes cantonales (carte 2) met en évidence trois groupes de régions. Le premier groupe, prépondérant, présente des médianes comprises entre 150 et 200 ‰ ; il concerne le Nord, l'Ouest, le Limousin, le nord-est de Massif Central, le couloir rhodanien, l'Alsace. Dans ce domaine, les quartiles inférieurs sont de l'ordre de 100 à 150 ‰ et les quartiles supérieurs de 200 à 250 ‰. Le second groupe se distingue par des teneurs médianes plus faibles, en deçà de 150 voire 100 ‰ : les Landes, la Sologne, la Vendée. Un troisième groupe est caractérisé par des teneurs médianes élevées (> 250 ‰) ou très élevées (> 400 ‰) : est du Bassin Parisien, Jura, sud de la Beauce, Charentes Maritimes, Deux-Sèvres, Charentes.

La teneur en limons totaux permet de distinguer deux domaines en France : le quart nord comprend des teneurs médianes généralement comprises entre 600 et 800 ‰ ; plus

au sud les médianes sont comprises entre 250 et 600 ‰. La cartographie du rapport entre les limons fins (de 2 à 20 µm) et les limons grossiers (de 20 à 50 µm) précise cette structure (carte 3) et permet une analyse plus fine des fractions limoneuses. Au nord (centre du Bassin Parisien, Nord, nord de la Bretagne), les limons grossiers sont très prépondérants (LF/LG < 0,75). Ailleurs, les limons fins sont mieux représentés (LF/LG > 0,75). Des régions sur socle cristallin comme le Limousin, le Forez et le Morvan se distinguent nettement par des rapports LF/LG élevés (> 2). La cartographie de ce rapport LF/LG semble pouvoir être reliée à la limite d'extension des limons éoliens et/ou à des compositions différentes des fractions limoneuses selon le substrat d'origine du sol.

Une vision synthétique des variations granulométriques est fournie par la cartographie des textures (carte 4) selon le triangle GEPPA simplifié (Baize, 1988). Les deux classes les plus fréquentes sont représentées pour chaque canton et la proportion des échantillons appartenant à la classe modale est donnée. Cette proportion est un indicateur de la variabilité intracantonale de la texture.

Les deux cartes de classes texturales représentent en général des classes proches, mais leur combinaison est instructive. A titre d'exemple, la classe "Limon" constitue la classe modale d'une grande partie du département de Loire Atlantique, représentant de 30 à 60 % des échantillons. Or, l'observation des secondes classes permet de distinguer les "argiles limoneuses" des "sables argileux", selon une limite correspondant à la bordure sud des synclinaux primaires du Massif Armoricaïn.

La carte des textures modales regroupe les grandes structures observées lors de l'analyse isolée des différentes fractions. Cette carte présente de très grandes analogies avec la carte des textures de surface dérivée de la carte pédologique au 1/1 000 000 de France (Jamagne *et al.*, 1995). On retrouve dans les deux documents les grandes tendances suivantes : textures L dans l'Ouest, L ou AL dans le Nord et le Bassin Parisien, AL ou A en bordure est du Bassin Parisien, SA en Limousin ou le Forez. Certaines différences dans l'extension des zones seraient néanmoins intéressantes à étudier.

La cartographie des fractions granulométriques montre donc l'existence de tendances de grande portée qui sont visiblement à relier aux structures géologiques, géomorphologiques (extension des limons éoliens) ou à des processus pédogénétiques.

La matière organique

Environ 275 000 déterminations du carbone organique ont été rassemblées pour la période de 1990 à 1994, permettant de disposer dans une majorité des situations, de plus de cinquante déterminations par canton. La représentation cartographique a été établie en multipliant le carbone organique par un coefficient de 1,72 pour obtenir une représentation usuelle de la matière organique.

Différents domaines peuvent être distingués avec les caractéristiques suivantes (carte 5) :

■ *des médianes faibles avec une dispersion faible* (le centre du Bassin Parisien, l'Aquitaine, la vallée du Rhône, l'Aude, l'Alsace). Les teneurs sont faibles, avec des médianes généralement inférieures à 20 ‰ et la dispersion est également faible : les quartiles inférieurs sont de l'ordre de 15 ‰ et les quartiles supérieurs sont en deçà de 25 ‰.

■ *des médianes moyennes avec une dispersion moyenne* (le pourtour du Bassin Parisien : l'Ille-et-Vilaine, la Loire-Atlantique, la Vendée, les Deux-Sèvres, la Vienne, la Haute-Vienne, Champagne-Ardenne, le Nord-Pas-de-Calais, le Périgord). Les teneurs médianes sont de l'ordre de 25 à 40 ‰ et la dispersion est moyenne : les quartiles inférieurs se situent entre 20 et 30 ‰, les quartiles supérieurs entre 30 et 50 ‰.

■ *des médianes élevées avec une dispersion forte* (le sud du Massif Armoricaire, le nord des Charentes (Marais poitevin, Aunis), le Massif Central, le Charolais, le Jura, les Vosges). Les teneurs médianes sont élevées, de l'ordre de 50 à 70 ‰ et la dispersion souvent importante. Des gradients continus de teneurs sont observés avec les régions voisines à teneurs plus faibles.

Les teneurs en matière organique présentent ainsi des grandes tendances générales à l'échelle de la France. Elles semblent plus complexes à interpréter que celles de la granulométrie : outre des considérations géologiques (limons éoliens, substrat jurassique) ou pédologiques, l'influence des caractéristiques cli-

matiques (Massif Armoricaire, zones montagneuses) et des systèmes de production agricoles doit être ici prise en compte.

Le pH

Le pH eau est la détermination la mieux représentée avec un effectif de 292 000 sur la période étudiée.

Dans l'ensemble de la population, il varie de 4 à 9, selon une distribution bimodale avec un premier mode à 5,8 et un second mode à 8,0 : les sols de pH supérieur à 7 représentent 35 % des échantillons disponibles. L'histogramme des médianes cantonales a une allure bimodale similaire mais avec une étendue réduite, comprise entre 5 et 8,6.

Les cartes présentent des tendances régionales marquées permettant de distinguer trois grands types de domaines (carte 6) :

■ *des pH acides à très acides* (le Massif Armoricaire, le Limousin, l'ouest de l'Aquitaine, le nord du Massif Central, les Vosges). Les pH médians sont plus acides que 6,2, parfois même 5,5 comme en Limousin. Les quartiles inférieurs sont très souvent en deçà à 5,5 et les quartiles supérieurs compris entre 5,8 et 6,2.

■ *des pH proches de la neutralité avec une forte dispersion* (le Bassin Parisien et le Nord, Poitou-Charentes, le Centre Aquitaine). Les pH médians sont généralement compris entre 7 et 8, mais les quartiles inférieurs peuvent être en deçà de 6,2 (ouest du Bassin Parisien). Par ailleurs, les quartiles supérieurs dépassent fréquemment 8.

■ *des pH très basiques* (nord de l'Aube et Marne, nord des Charentes, sud de la Drôme, nord-est du Gers, Aude). Les pH médians, mais également les quartiles inférieurs, sont très souvent au delà de 8. Ces régions sont celles dont les teneurs en calcaire total dans les horizons de surface sont les plus élevées, plus fortes que 100 ‰ (Schvartz *et al.*, 1995).

Les propriétés chimiques

Les statistiques générales

Les statistiques générales de toutes les propriétés considérées sont consignées dans le *tableau 2*.

Comme précédemment, elles permettent de fixer les ordres de grandeur et la variabilité des propriétés.

Le rapport (médiane des interdéciles cantonaux/interdécile général) est supérieur à 0,55 pour les éléments majeurs (P, K, Mg) ; il est inférieur à 0,5 pour les oligo-éléments. La variabilité intra-cantonale apparaît à nouveau plus importante pour les propriétés fortement influencées par les pratiques culturales. Cette variabilité est globalement plus importante que celle notée précédemment pour les propriétés physiques.

Le phosphore extractible exprimé en mg.kg^{-1} de P_2O_5

On dispose de 281 426 déterminations du phosphore extractible, mesurées selon les méthodes Dyer ou Joret-Hébert, le choix de l'une ou l'autre méthode étant fixé de diverses façons selon les laboratoires (présence de calcaire, pH, ...).

Tableau 2 : Statistiques générales de différentes propriétés chimiques de l'horizon de surface calculées pour l'ensemble des échantillons et pour la stratification cantonale.

Table 2 : Main statistics of several chemical properties from the topsoil horizon calculated for all samples and for the cantonal stratification.

| | Ensemble des échantillons | | | | | Stratification cantonale | | |
|---|---------------------------|---------|-----------|-----------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Effectif | Médiane | Quartiles | Déciles | Type de distribution | Médiane des médianes | Interdécile des médianes | Médiane des interdéciles |
| Phosphore extract. Dyer (mg.kg ⁻¹ P ₂ O ₅) | 144 416 | 261 | 149 - 412 | 77 - 591 | lognormal | 215 | 108 - 380 | 287 |
| Phosphore extract. Joret (mg.kg ⁻¹ P ₂ O ₅) | 137 010 | 190 | 110 - 290 | 58 - 430 | lognormal | 164 | 80 - 285 | 219 |
| Potassium échang. (mg.kg ⁻¹ K ₂ O) | 288 749 | 233 | 160 - 330 | 110 - 460 | lognormal | 227 | 150 - 350 | 235 |
| Magnésium échang (mg.kg ⁻¹ MgO) | 286 241 | 132 | 90 - 200 | 65 - 310 | lognormal | 136 | 90 - 255 | 154 |
| Bore soluble (mg.kg ⁻¹) | 71 856 | 0,3 | 0,2 - 0,6 | 0,1 - 1,0 | lognormal | 0,3 | 0,2 - 0,7 | 0,3 |
| Manganèse EDTA (mg.kg ⁻¹) | 90 154 | 16 | 9 - 34 | 6 - 60 | lognormal | 20 | 9 - 49 | 27 |
| Zinc EDTA (mg.kg ⁻¹) | 79 569 | 2,2 | 1,4 - 3,6 | 1,0 - 6,1 | lognormal | 2,2 | 1,3 - 4,2 | 2,6 |
| Cuivre EDTA (mg.kg ⁻¹) | 106 706 | 2,1 | 1,3 - 3,4 | 0,9 - 6,0 | lognormal | 2,0 | 1,2 - 4,7 | 2,1 |

Pour les deux méthodes, les teneurs varient dans la population générale selon une distribution lognormale avec une étendue très grande, de quelques dizaines à quelques milliers de mg.kg⁻¹.

La dispersion des médianes cantonales est beaucoup moins importante : les médianes varient de quelques dizaines à quelques centaines de mg.kg⁻¹. On remarque également que la médiane des médianes cantonales est inférieure à la médiane générale. Les valeurs les plus fortes de la population générale (> 600 mg.kg⁻¹ pour Dyer, > 450 mg.kg⁻¹ pour Joret-Hébert, soit environ 10 % des échantillons) semblent donc correspondre à des parcelles isolées fortement pourvues.

En dépit de la variabilité intracantonale importante illustrée par la forte dissemblance des cartes des quartiles, les cartes présentent néanmoins de grandes tendances régionales.

Pour le phosphore Joret-Hébert (*carte 7*), certaines régions (le Limousin, l'est du Bassin Parisien) présentent des teneurs médianes particulièrement faibles ; les quartiles supérieurs ne dépassent pas 300 mg.kg⁻¹ et les quartiles inférieurs n'atteignent pas 100 mg.kg⁻¹. Le Nord, notamment la zone des Wateringues, la Vendée présentent au contraire des teneurs

élevées avec des médianes dépassant 250 mg.kg⁻¹ et des quartiles supérieurs dépassant souvent 400 mg.kg⁻¹.

Pour le phosphore Dyer (*carte 8*), les teneurs médianes sont le plus fréquemment comprises entre 100 et 300 mg.kg⁻¹. Mais certaines régions (l'ouest de la Bretagne, l'Alsace) ont des valeurs élevées : les médianes sont au delà de 300 mg.kg⁻¹ et les quartiles supérieurs dépassent presque toujours 400 mg.kg⁻¹. Au sein de ces régions, on distingue même des secteurs avec des valeurs particulièrement élevées comme les zones légumières ou les zones d'élevage intensif de Bretagne.

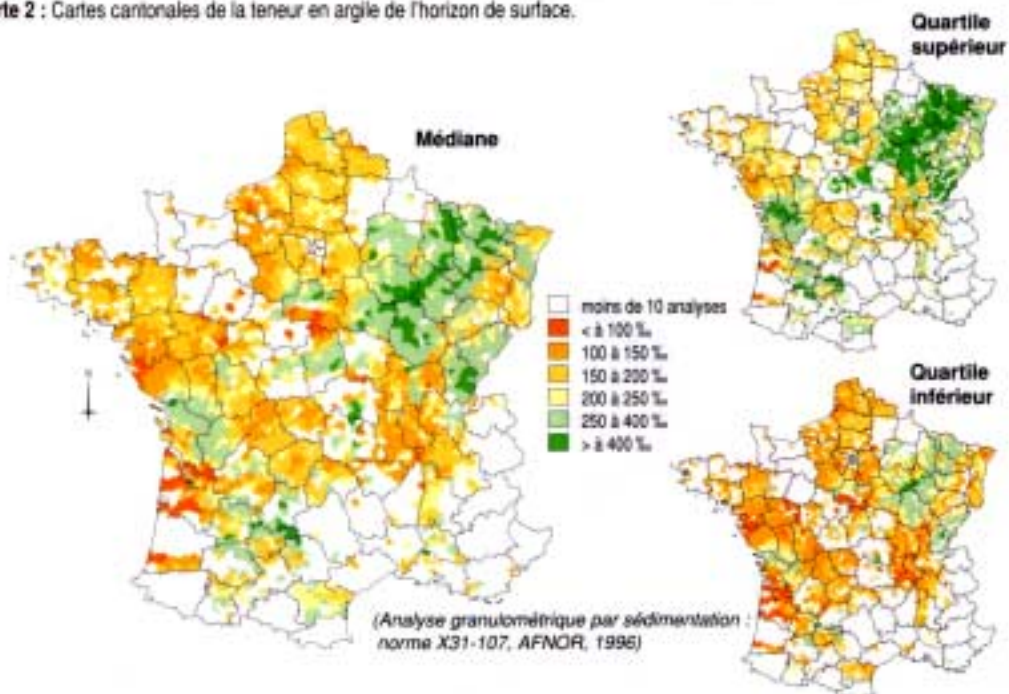
Le potassium échangeable exprimé en mg.kg⁻¹ de K₂O

La population totale (289 000 déterminations) présente une distribution lognormale avec des valeurs comprises entre quelques dizaines et quelques milliers de mg.kg⁻¹ et une médiane de 233 mg.kg⁻¹.

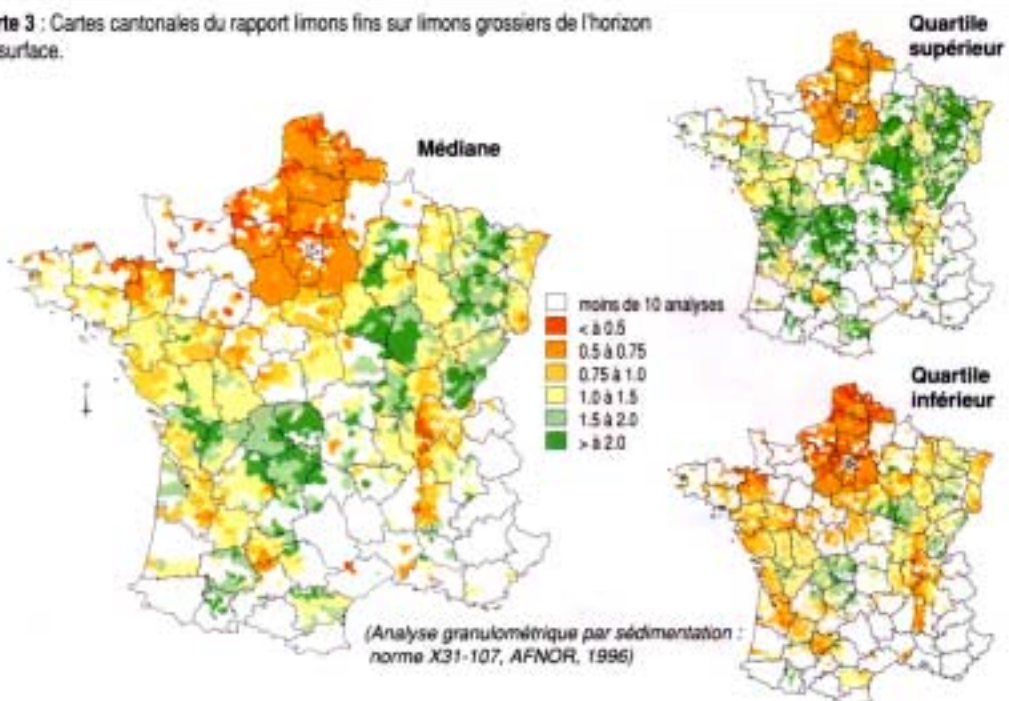
La distribution des médianes cantonales est similaire avec une médiane de 227 mg.kg⁻¹. Contrairement au phosphore, les valeurs maximales des médianes sont également élevées, proches de celles de la population générale.

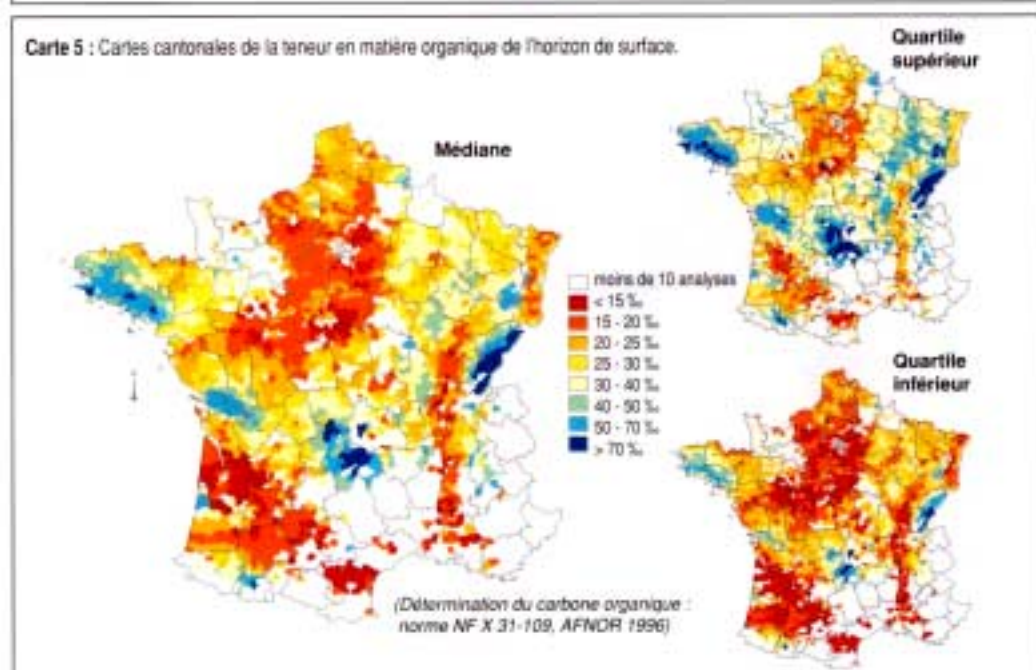
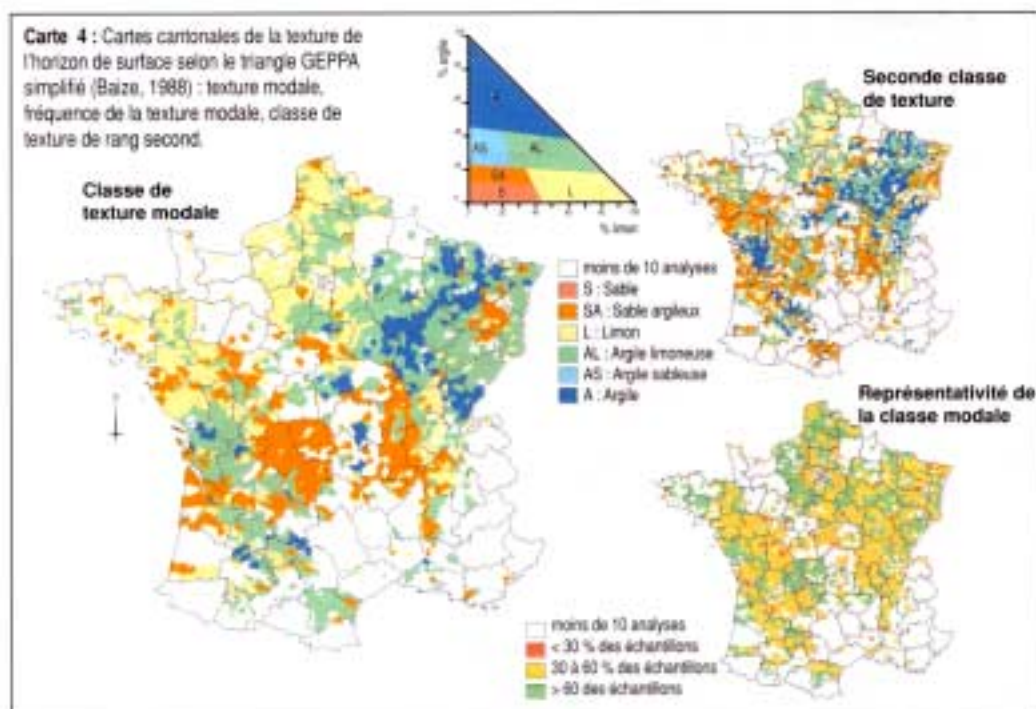
Les cartes (*carte 9*) mettent en évidence une diversité régionale marquée. On distingue :

Carte 2 : Cartes cantonales de la teneur en argile de l'horizon de surface.

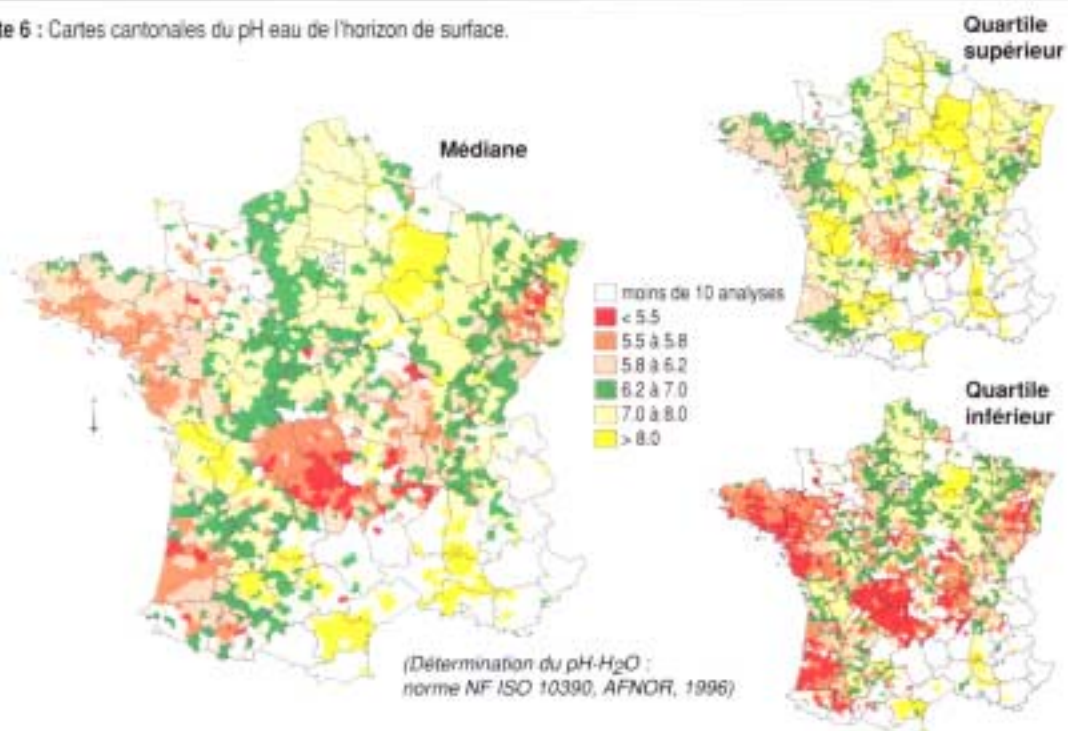


Carte 3 : Cartes cantonales du rapport limons fins sur limons grossiers de l'horizon de surface.

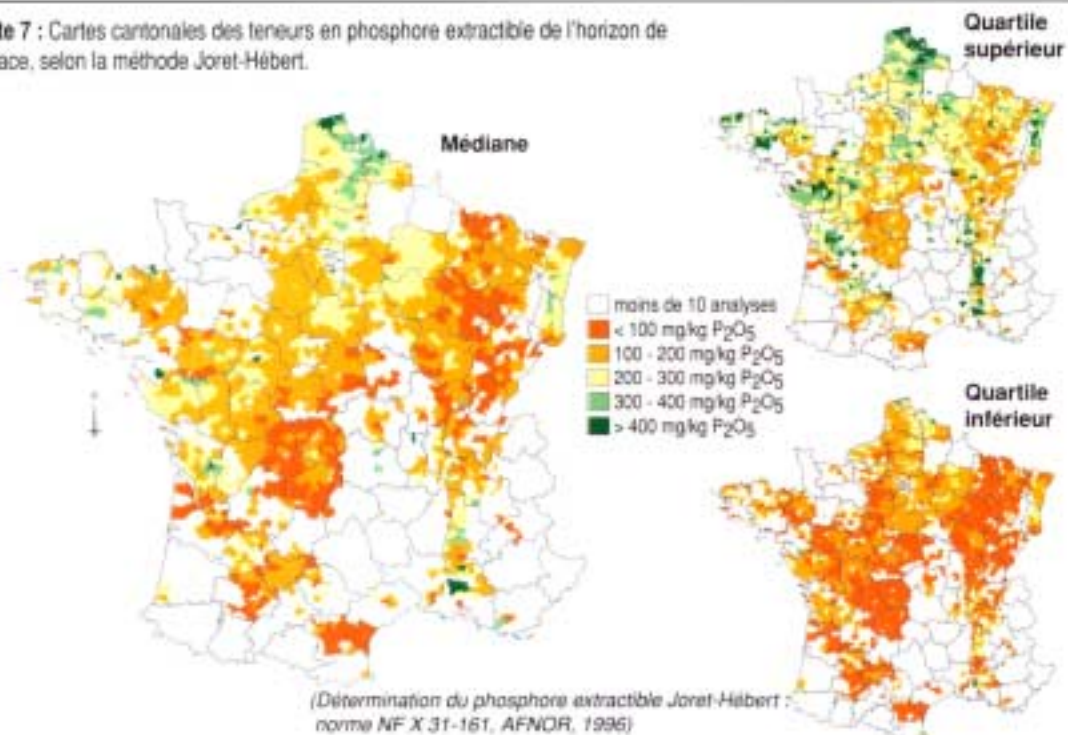


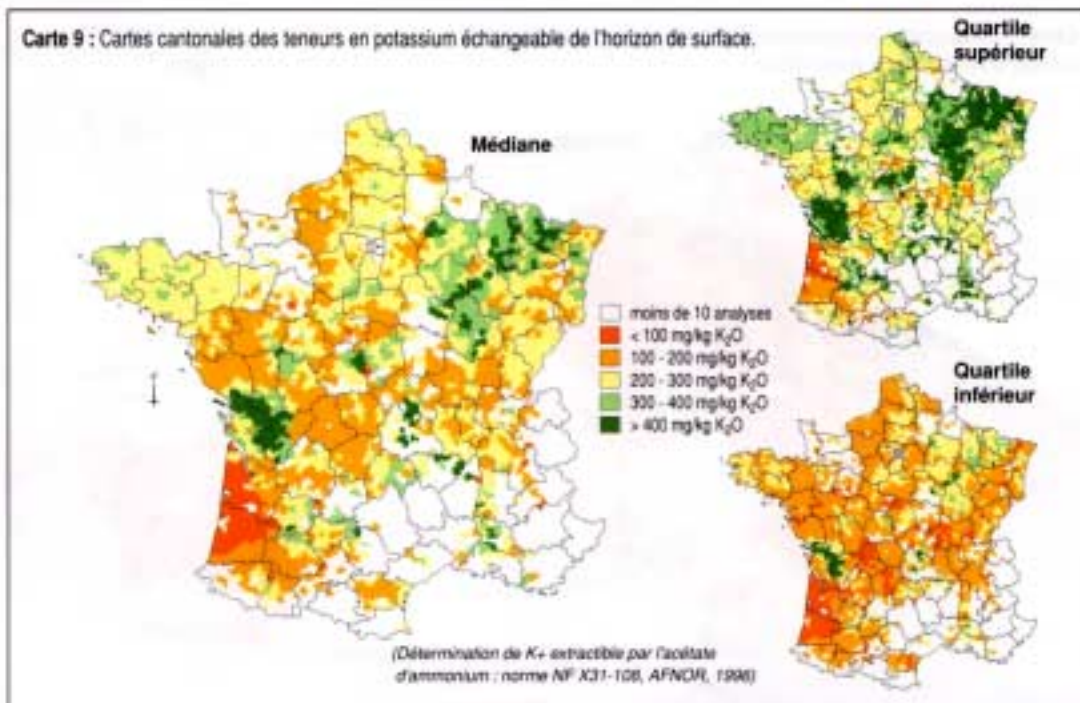
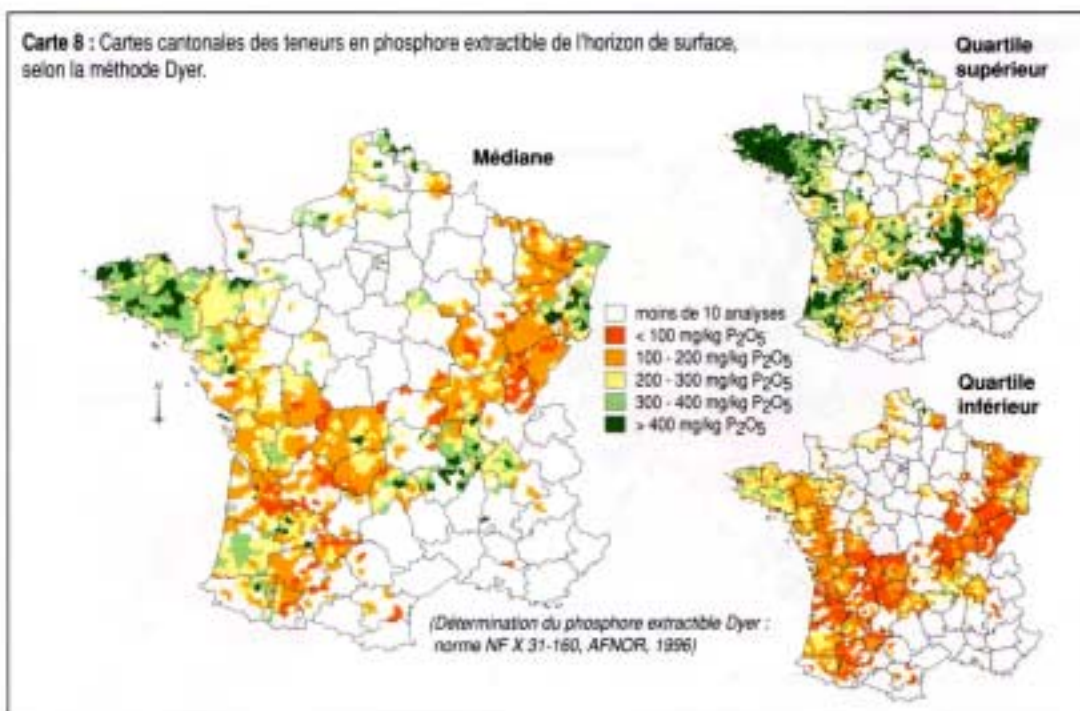


Carte 6 : Cartes cantonales du pH eau de l'horizon de surface.



Carte 7 : Cartes cantonales des teneurs en phosphore extractible de l'horizon de surface, selon la méthode Joret-Hébert.





List of the english titles of maps 2 to 9

Map 2 : Maps of the clay content of the topsoil horizon : median, lower and upper quartiles for the cantons with more than ten samples.

Map 3 : Maps of the ratio between fine et coarse silt of the topsoil horizon: median, lower and upper quartiles for the cantons with more than ten samples.

Map 4 : Maps of the surface texture according to the simplified GEPPA triangle (Baize, 1988): modal class of texture, frequency of the modal class, second class.

Map 5 : Maps of the organic matter content of the topsoil horizon: median, lower and upper quartiles for the cantons with more than ten samples.

Map 6 : Maps of the pH of the topsoil horizon: median, lower and upper quartiles for the cantons with more than ten samples.

Map 7 : Maps of available phosphorus of the topsoil horizon, determined by the Joret-Hébert method (AFNOR, 1996): median, lower et upper quartiles for the cantons with more than ten samples.

Map 8 : Maps of available phosphorus of the topsoil horizon, determined by the Dyer method (AFNOR, 1996): median, lower et upper quartiles for the cantons with more than ten samples.

Map 9 : Maps of exchangeable potassium of the topsoil horizon: median, lower et upper quartiles for the cantons with more than ten samples.

■ des zones à teneurs faibles avec des médianes, voire des quartiles supérieurs plus faibles que 100 mg.kg⁻¹ : en Gironde, dans les Landes ;

■ des zones à teneurs médianes plus élevées, des quartiles supérieurs au delà de 300 mg.kg⁻¹ et des quartiles inférieurs de 150 à 200 mg.kg⁻¹ : en Bretagne, dans le Nord ;

■ des zones à teneurs médianes très élevées, dépassant 400 mg.kg⁻¹ et à dispersion intra-cantonale faible : dans l'est du Bassin Parisien, dans les Charentes.

Interprétation agronomique

Les données brutes n'ayant pas une signification agronomique directe, leur interprétation s'avère nécessaire pour une évaluation agronomique du niveau de richesse des terres. En l'absence de norme commune à tout le territoire national, nous avons appliqué à l'ensemble des échantillons et à titre indicatif, les normes d'interprétation agronomiques de l'INRA de Laon (Rémy et Marin-Lafliche, 1974). Ces normes tiennent compte des taux d'argile et de matière organique pour interpréter les teneurs d'un échantillon en éléments fertilisants.

Le tableau 3 résume les résultats obtenus pour l'ensemble des échantillons et des valeurs modales par canton. S'il apparaît que pour le potassium et le magnésium échangeables, une grande majorité (de l'ordre de 60 %) des échantillons ou des cantons sont rattachés au niveau "satisfaisant", la répartition entre les différents niveaux est plus équilibrée pour le phosphore : seuls 45 % des échantillons ont un niveau en phosphore considéré correct, environ 30 % étant jugés avec un niveau faible et 20 % avec un niveau élevé ; au niveau cantonal, il apparaît que 30 % des cantons présentent encore un niveau modal faible, mais 13 % d'entre eux ont un niveau élevé.

DISCUSSION

Les travaux sur la variabilité spatiale des sols ont largement privilégié ces dernières années les études à grande échelle. En effet, dans de nombreuses situations, la variabilité des sols à

Tableau 3 : Répartition de l'ensemble des échantillons et des cantons (selon leur niveau modal) dans trois niveaux de teneurs selon les normes d'interprétation de l'INRA Laon (Remy et Marin-Lafliche, 1974) : cas du phosphore extractible, du potassium échangeable et du magnésium échangeable.

Table 3 : Distribution of the samples and the cantons in three categories (weak, moderate, high) after application of the interpretation rules from INRA Laon (Remy et Marin-Lafliche, 1974) : case of available phosphorus, exchangeable potassium and magnesium.

| | % des échantillons ayant un niveau | | | % des cantons ayant un niveau modal | | |
|--------------------------------|------------------------------------|--------------|-------|-------------------------------------|--------------|-------|
| | faible | satisfaisant | élevé | faible | satisfaisant | élevé |
| Phosphore assim. Joret ou Dyer | 31 | 47 | 22 | 31 | 56 | 13 |
| Potassium échangeable | 25 | 61 | 14 | 16 | 77 | 8 |
| Magnésium échangeable | 3 | 55 | 42 | 1 | 65 | 34 |

courte distance peut être très importante, nécessitant pour être décrite un échantillonnage important (Legros, 1978 ; Lindeman, 1986 ; Walter, 1990 ; Legros, 1996) ; cela apparaît particulièrement vrai pour des propriétés modifiées par l'homme, comme le pH, la teneur en éléments fertilisants et l'azote.

Par opposition, nous avons cherché, à partir de l'étude de quelque 300 000 échantillons d'horizons de surface, à étudier la variabilité de certaines propriétés du sol au sein d'un territoire très vaste, de l'ordre de 20 millions d'hectares. Malgré les nombreuses données traitées, la résolution est bien évidemment faible, de l'ordre d'une mesure pour 50 à 500 ha selon les régions et les déterminations. De plus, différents risques de biais conduisent à privilégier des approches robustes, que ce soit au moment de la collecte des données ou lors du traitement statistique (Schvartz *et al.*, 1997).

Cette approche par enquête fournit néanmoins des informations sur les sols qui s'avèrent intéressantes à deux niveaux :

■ la variabilité intra-cantonale

Elle est caractérisée par des interquartiles, des interdéciles, des écarts-type dans le cas d'une distribution connue. Cette dispersion s'avère plus ou moins importante selon les propriétés et les régions.

Si on la compare à la variabilité générale, elle est en proportion plus importante pour des propriétés modifiées par l'activité humaine (le pH, la matière organique, les teneurs en éléments fertilisants) que pour des propriétés peu influencées par cette activité (la texture, la CEC, la teneur en calcaire, les oligo-éléments).

■ les grandes tendances régionales observées

Dans toutes les cartes étudiées, même celles qui concernent des éléments minéraux à forte variabilité intra-cantonale, apparaissent de grandes tendances régionales. L'agrégation de données fortement variables au sein d'une base de données dont le découpage relativement grossier repose sur des limites administratives, aurait pu conduire à des cartes en patchwork, peu structurées. L'existence de grandes tendances régionales est donc à noter, car elle traduit le poids de grands facteurs sur les propriétés du sol : (i) la géologie : par exemple, les sols développés sur des formations jurassiques apparaissent très différents pour de nombreuses propriétés ; (ii) le climat : dont le rôle semble important dans les cartes de matière organique ; (iii) les grands types de systèmes de production, perceptibles dans les cartes de teneur en éléments fertilisants, en matière organique. Ces structures étaient déjà connues pour la plupart à travers des approches de cartographie classiques ; il est intéressant de les retrouver par une telle démarche ascendante partant de mesures ponctuelles, qui permet en outre de quantifier leurs caractéristiques.

CONCLUSION

La démarche adoptée dans cette étude, de valorisation des analyses de terre faites par ailleurs, est intéressante : elle consiste, par voie d'enquête et à moindres frais, à compiler de nombreux résultats analytiques datés et localisés, qui permettent d'obtenir une vision globale de l'ensemble d'un territoire et de dégager des tendances. Cette vision est néanmoins insuffisante, car elle ne concerne que certaines propriétés du sol et est sujette à des risques de biais. Elle ne peut donc pas remplacer des approches expérimentales ou de cartographie, mais leur est plutôt complémentaire en fournissant des informations indépendantes qui peuvent servir à valider ces approches.

Une étude plus approfondie du jeu d'étude actuel, si possible enrichi et élargi à un territoire plus vaste, doit être entreprise. Il s'agit par exemple d'étudier les corrélations entre variables. Il faut également confronter de façon quantifiée ces données avec les cartes géologiques, pédologiques ou des systèmes d'exploitation agricole, pour cerner de façon plus fine l'origine des variations mises en évidence dans les cartes statistiques. Ce croisement peut servir à une meilleure connaissance des déterminants de la variabilité spatiale des sols.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié d'un soutien financier de la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation et de la Pêche, et a été réalisée sous l'égide de l'AFES. Les auteurs tiennent à remercier les différents laboratoires d'analyse de terre du GEMAS qui ont contribué à cette étude en fournissant gracieusement leurs résultats analytiques. Nos remerciements s'adressent également aux personnes du Ministère ou de l'AFES qui nous ont soutenus dans cette entreprise : Mmes M. Eimberck, G. Urbano ; MM. M. Jarnagne, M.C. Girard, J.C. Remy, J.Y. Sommier. Les corrections de MM. J. Decroux et L. Florentin nous ont permis d'améliorer une première version de cet article ; nous les en remercions.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR 1996 - Qualité des sols. Méthodes d'analyses. Recueil de normes françaises. 3^e édition, 534 p.
- Arousseau P., Dupont C., Joubert A., Walter C., 1996 - Les sols d'Ille-et-Vilaine. Publication du Conseil Général d'Ille-et-Vilaine, LDAA 35, Ch. d'Agriculture 35, ENSA Rennes, 46 p.
- Baize D., 1988 - Guide des analyses courantes en pédologie. INRA Editions, Paris, 172 p.
- Boiffin J., Vilemin P., 1990 - Evolution de la fertilité des sols de l'Aisne. Synthèse de 15000 analyses de sols. Document Station Agronomique de l'Aisne, SCPA, 12 p.
- Chambre d'agriculture 72, 1991 - Les sols sarthois : richesse, pauvreté, carences. L'Agriculture sarthoise, 9 mars 1991, 12-13.
- Danneels V., Schwartz C., 1993 - Etude méthodologique sur l'exploitation d'une banque de données régionales d'analyses de terre. Application à la région Nord-Pas de Calais. Ministère de l'Agriculture et la Pêche - DERF, 31 p.
- Decroux J., 1990 - Etude sur le statut du phosphore des sols de France. Convention IMPHOS/GEMAS. Document GEMAS, 92 p.
- Favrot J.C., 1989 - Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle : la méthode des secteurs de référence. Science du Sol, 27 (4), 351-368.
- Jamagne M., Hardy R., King D. et Bomand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France. Etude et Gestion des Sols 2,3, 153-172.
- King D., Burill A., Daroussin J., Le Bas C., Tavernier R., Van Ranst E., 1995 - The EU soil geographic database. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA, 71-84.
- Lauprete J.M., 1990 - Etude sur le statut du phosphore dans quelques terres agricoles françaises. Convention IMPHOS/GEMAS. Document ISA Lille, CEEA, LDAA Combourg, Europe Sols, SAS, SICARADO, ENSAIA, 2 tomes, 119 + 92 p.
- Legros J.P., 1978 - Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. II. Précision dans la caractérisation des unités de sols. Ann. Agron. 29(6), 583-601.
- Legros J.P., 1996 - Cartographie des Sols. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Collection Gérer l'Environnement. 321 p.
- Leleux A., Arousseau P. et Roudaut A., 1988 - Synthèse cartographique régionale à partir de données d'analyses de terre. Science du Sol, vol. 26 (1) - 29-40.
- Lindeman , 1986 - Contribution à l'étude statistique des répartitions et à la modélisation de la dynamique de l'azote nitrique dans le sol. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, 310 p.
- Pleijster L.K., 1988 - Variability in soil data. in Bouma J. and Bregt A.K. (Eds) Land qualities in space and time. Proceedings of a symposium organized by the ISSS, 26-28/8/1988, Pudoc Wageningen, 353 p.
- Remy J.C., Marin-Lafleche A., 1974 - L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Annales agronomiques INRA, 25(4), 607-632.
- Schwartz C., Six P., Février D., Grenier G., 1988 - ABC des sols du département du Nord. Document ISA Lille, Chambre Régionale d'Agriculture Nord Pas de Calais, 32 p.
- Schwartz C., Walter C., Claudot B., Arousseau P., Bouedo T., 1995 - Synthèse nationale des analyses de terre. Rapport de fin de contrat. AFES - DERF, 43 p. + 21 cartes.
- Schwartz C., Walter C., Claudot B., Bouedo T., Arousseau P., - 1997 - Synthèse nationale des analyses de terre. I. Constitution d'une banque de données cantonale. Etude et Gestion des Sols, 4, 3, 205-219.
- S.C.P.A., 1993 - Etat de fertilité des Sols de Meurthe-et-Moselle. Synthèse de 3 400 analyses de terre. Fiches IPAS. Publication SCPA, Chambre d'Agriculture de Meurthe-et-Moselle, Coopérative Agricole de Lorraine, 34 p.
- Van Ranst E., Vanmechelen L., Thomasson A.J., Daroussin J., Hollis J.M., Jones R.J.A, Jamagne M. et King D., 1995 - Elaboration of an extended knowledge database to interpret the EC 1 : 1M Soil Map for environmental purposes. In European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring (Eds King, Jones and Thomasson). JRC European Commission. ISPRA, 71-84.
- Vandriessche H., Hendrickx G., Bries J., 1993 - Soil fertility and adjusted fertilizer recommendations for arable land and grassland in Belgium : a review for the period 1989-1991. Bull. Rech. Agron. Gembloux, 28 (2-3), 377-391.
- Vilemin P., Florentin A., 1988 - Quelques caractéristiques potassiques des sols du plateau lorrain sud. Dossiers Agr. d'Aspach, 3, 5-15.
- Walter C., 1990 - Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle. Thèse Univ. Paris VI, ENSA-INRA Rennes, n° SDS 436, 172 p.
- Walter C., Bouedo T., Arousseau 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.