

# Analyse de représentativité de différentes configurations d'un réseau de sites de surveillance des sols

D. Arrouays<sup>(1)</sup>, J. Thorette<sup>(2)</sup>, J. Daroussin<sup>(3)</sup> et D. King<sup>(3)</sup>

- (1) INRA, Infosol, 45160 Ardon, France  
(2) IFEN, 18 rue des Huguenots, 45000 Orléans, France  
(3) NRA, Science du Sol, 45160 Ardon, France

## RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est de tester différentes configurations d'implantation d'un réseau de surveillance des sols de type systématique. Nous montrons brièvement l'état d'avancement des réseaux de surveillance des sols en France. Nous présentons ensuite les principales stratégies retenues en Europe, en fonction des objectifs poursuivis. Pour définir la densité minimale acceptable d'un réseau systématique, nous générons des grilles de taille croissante (4, 8, 16, 32 km) que nous croisons avec la base de données géographiques des sols de France au 1:1 000 000 ainsi qu'avec la couverture CORINE Land-Cover, d'occupation des sols. Nous calculons la statistique nationale des surfaces couvertes par les différentes combinaisons Sol/Occupation et nous la comparons avec la même statistique obtenue sur les points des différents réseaux. Nous montrons que la représentativité statistique se dégrade lorsque l'on passe à des mailles supérieures à 16 x 16 km. De plus, lorsque l'on augmente la taille des cellules, on note une forte hétérogénéité dans leur couverture régionale. Au plan de la représentativité locale, les résultats indiquent également la maille 16x16 comme la densité minimale acceptable.

## Mots clés

Sol, Surveillance, Réseaux, Représentativité

## SUMMARY

### REPRESENTATIVENESS OF SOIL MONITORING NETWORKS AS A FUNCTION OF THEIR SAMPLING DENSITY

Various grid-sampling densities were tested in order to settle a soil monitoring network for soils in France. A brief review of the state of the art of soil monitoring in France is presented (figure 1). Then the main sampling strategies that are applied in Europe for such purposes are discussed. In order to define the minimal density required for a systematic grid-based network, grids of 4, 8, 16, and 32 km are generated (figures 2 and 3). These grids are then overlaid with the soil geographical database of France and the CORINE Land-Cover database. We calculated national statistics for the different soil Land-use combinations in France, and we compared them with

the statistics for the grid points (Fig. 4 and 5). Representativeness showed a marked decrease for grid cells greater than 16 x 16 km. Moreover, plotting the unrepresented areas lead to discrepancies between regions (figure 6). The 16 to 16 km pattern also appeared to be the minimal acceptable sampling density from a local representativeness point of view (figures 7 and 8).

**Key-words**

Soil, Monitoring, Networks, Representativeness

**RESUMEN****ANÁLISIS DE LA REPRESENTATIVIDAD DE DIFERENTES CONFIGURACIONES DE UNA RED DE SITIOS DE VIGILANCIA DE SUELOS**

El objetivo de este trabajo es probar diferentes configuraciones de localización de una red de vigilancia de suelos de tipo sistemático. Mostramos brevemente el estado de avance de las redes de vigilancia de los suelos en Francia. Presentamos en seguida las principales estrategias retenidas en Europa, en función de los objetivos perseguidos. Para definir la densidad mínima aceptable de una red sistemática, creamos rejillas de tamaño creciente (4, 8, 16, 32 Km) que cruzamos con la base de datos geográficos de suelos de Francia al 1:1 000 000 así que con la cubierta CORINE land cover, de uso del suelo. Calculamos la estadística nacional de las superficies cubiertas por las diferentes combinaciones suelo/uso y comparamos con la misma estadística obtenida sobre los puntos de las diferentes redes. Mostramos que la representatividad estadística se degrada cuando las mallas superan 16 Km x16 Km. Además cuando se aumenta el tamaño de las células, se nota una fuerte heterogeneidad en su cubierta regional. Al plano de la representatividad local, los resultados indican igualmente la malla 16x16 como la densidad mínima aceptable.

**Palabras claves**

Suelo, vigilancia, redes, representatividad.

Par leur fonction de lieu de stockage, de transport et d'échange d'éléments, les sols sont susceptibles d'influer sur la qualité des eaux et de l'air, la quantité et la qualité des productions végétales, et sur l'ensemble des êtres vivants impliqués dans les cycles biologiques et les chaînes alimentaires. Les sols évoluent constamment sous l'effet des grands facteurs de la pédogenèse et de la morphogenèse, mais aussi sous l'effet de facteurs anthropiques (aménagement, usage des sols, apports externes localisés, retombées atmosphériques...). Certaines de ces évolutions sont irréversibles, ou souvent, le temps nécessaire au retour à un état antérieur jugé favorable est très largement supérieur à la durée sur laquelle peut s'effectuer la dégradation. Ces derniers points justifient la nécessité d'une détection précoce de ces évolutions grâce au développement de programmes de surveillance de la qualité des sols.

L'observatoire de la qualité des sols (OQS), mis en place en France à partir de 1986, avait pour objectif le développement d'un tel programme, principalement en milieu agricole (Martin *et al.*, 1998). Force a été de constater que malgré des avancées significatives, l'objectif n'a pas été pleinement atteint, à cause d'un manque de soutien institutionnel (Martin *et al.*, 1999), mais aussi sans doute par manque de clarté - ou par trop grande diversité - dans les objectifs qui lui étaient assignés. L'OQS ne disposait en 1998 que de 11 sites installés (*figure 1*). La situation est nettement meilleure en milieu forestier [102 sites de suivi pour le réseau RENECOFOR (Réseau National de suivi à long terme des Ecosystèmes Forestiers, Ponette *et al.*, 1997)].

Il existe également 540 placettes d'observation pour le réseau " Santé des forêts " (Badeau et Landmann 1996; Nageleisen 1998), mais ce dernier réseau n'a pas réalisé de deuxième campagne de mesures, et de ce fait ne peut pas encore être considéré comme un réseau de surveillance des sols.

Dans les autres pays du monde, ces programmes de surveillance, lorsqu'ils existent, s'appuient sur des réseaux de sites de mesures et d'observations, dont la conception, l'état d'avancement, la densité et la stratégie de mise en place sont extrêmement variables selon les lieux et les objectifs. Dans le cadre des travaux du Centre Thématique sur les Sols de l'Agence Européenne de l'Environnement, nous avons réalisé une revue des principales stratégies retenues en Europe (Armstrong-Brown *et al.*, 1998; Arrouays *et al.*, 1998). Cette revue met en lumière le retard considérable de la France par rapport à ses

voisins du Nord et de l'Est (par exemple, plus de 6000 sites en Angleterre et plus de 2000 en Autriche).

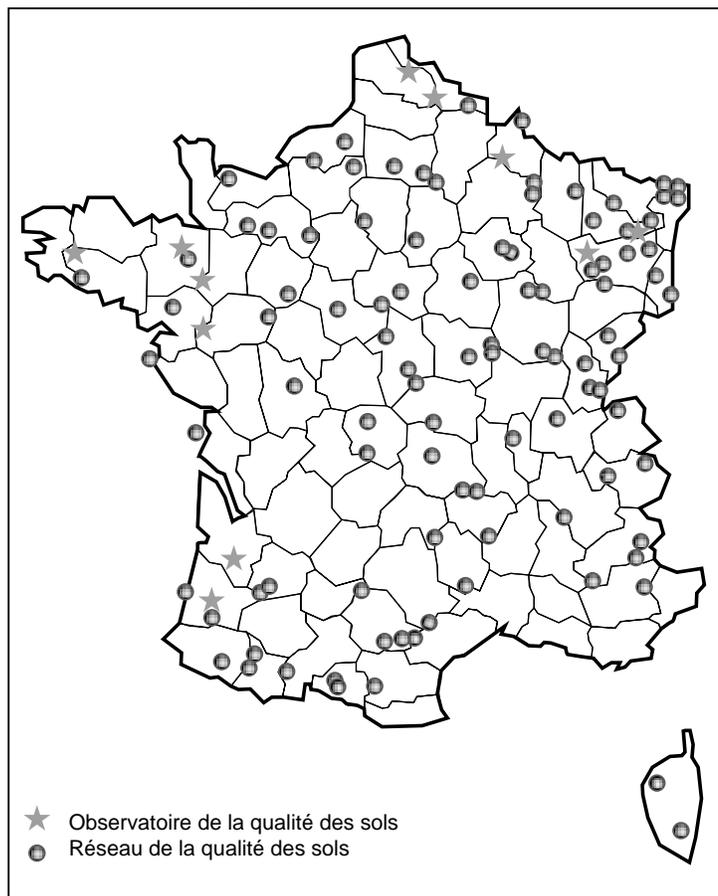
Les objectifs cités par les gestionnaires de l'ensemble des réseaux consultés (environ 40 réponses) peuvent être variés :

- détermination des caractères et des propriétés actuelles des sols et/ou vision cartographique ou statistique des sols du territoire ;
- détection des évolutions à court ou à long terme ;
- analyse de leur sensibilité à la dégradation et prédiction des évolutions futures ;
- développement et validation de modèles ;
- acquisition de références pour l'harmonisation et la calibration ;
- information sur les tendances pour le développement de politiques de protection.

Certains réseaux privilégient la recherche et la modélisation des processus en jeu dans les évolutions, alors que d'autres recherchent une vision " photographique " instantanée des états des sols de leur territoire, à des fins de bilan national, de cartographie, et d'alerte. Selon ces objectifs, les réseaux diffèrent sensiblement en densité et en stratégie d'implantation : le Royaume-

**Figure 1** - Sites de surveillance des sols en France

**Figure 1** - Soil monitoring sites in France



Uni dispose ainsi de deux réseaux emboîtés [Environmental Change Network (ECN) pour la partie recherche et National Soil Inventory (NSI) pour l'aspect inventaire cartographique instantané].

En France, plusieurs sites ateliers orientés sur la compréhension et la modélisation des processus sont d'ores et déjà en place et suivis par des équipes de recherche, ou en cours d'installation dans le cadre de divers programmes nationaux (par exemple les programmes "gestion durable des sols", "gestion des impacts des changements climatiques..."). Il "suffirait" de leur assurer une certaine pérennité et de leur adjoindre un suivi régulier et harmonisé d'un certain nombre de paramètres pour obtenir un dispositif comparable à l'ECN. Par contre, les autres objectifs (photographie, bilan, alerte) ne peuvent être atteints qu'en mettant en place un dispositif nouveau, fondé sur un plus grand nombre de sites.

**L'objectif de notre travail est de tester différentes configurations d'implantation d'un tel réseau de sites de surveillance des sols qui devrait remplir les fonctions suivantes :**

- **Fonction d'alerte (détecter précocement des évolutions peu perceptibles),**
- **Fonction de bilan national (avoir une vision statistique globale de l'évolution de caractères du sol),**
- **Fonction cartographique (permettre une photographie instantanée de la qualité des sols, détecter des gradients),**
- **Fonction de validation de prédictions géographiques établies à partir de modèles d'évolution calibrés sur les sites de recherche appliqués sur des bases de données géoréférencées issues de programmes d'inventaire (par exemple, base au 1:1 000 000 des sols de France, base DONESOL du programme IGCS).**

Nous présentons brièvement les principales stratégies d'implantation retenues en Europe et nous justifions le choix d'un réseau de type "systématique". Puis nous simulons différentes densités de réseaux installés selon cette stratégie afin de réaliser un test de leur représentativité, et de retenir la densité minimale permettant d'atteindre les objectifs cités plus haut.

## DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE SÉLECTION DES SITES

Les réseaux de surveillance des sols peuvent être construits selon différentes stratégies de sélection des sites (Arrouays *et al.*, 1998).

### Etablissement d'un grille systématique avec implantation des sites aux noeuds de cette grille.

Cette méthode est celle retenue par un grand nombre de

réseaux de fortes densités (Autriche, Royaume Uni, Danemark, Suisse, réseau international ICP Forests, et en France le réseau "Santé des forêts") (figure 2).

Les avantages de cette méthode sont les suivants :

- couverture géographique "exhaustive" du territoire,
- possibilité de sorties cartographiques,
- échantillonnage systématique et non biaisé *a priori*,
- possibilité d'analyse géographique de changements (nouveaux gradients, changements d'occupation),
- simplicité de mise en place.

En revanche, de par son caractère systématique, et si la maille choisie est trop grande, cette méthode ne peut pas représenter certaines situations couvrant de faibles surfaces, mais pouvant avoir un poids important en terme de bilan ou de conséquences environnementales. La conséquence principale est que ce type de réseau doit être relativement dense et donc d'un coût élevé.

### Sélection sur les critères de représentativité.

Cette méthode est retenue par quelques réseaux de faibles densités (Allemagne, ICP Integrated Monitoring, et en France le réseau RENECOFOR et le réseau OQS). Les principaux critères de représentativité appliqués sont le type de sol, l'occupation du sol, et un certain nombre d'indicateurs de pression sur le sol (épandages, distance à des émissions, à des zones urbaines...).

Cette méthode présente les avantages suivants :

- réduction du nombre de sites (et donc du coût) par rapport à une approche systématique,
- caractérisation de situations supposées *a priori* représentatives,
- possibilité de caractériser des situations très locales mais ayant un poids économique ou environnemental significatif.

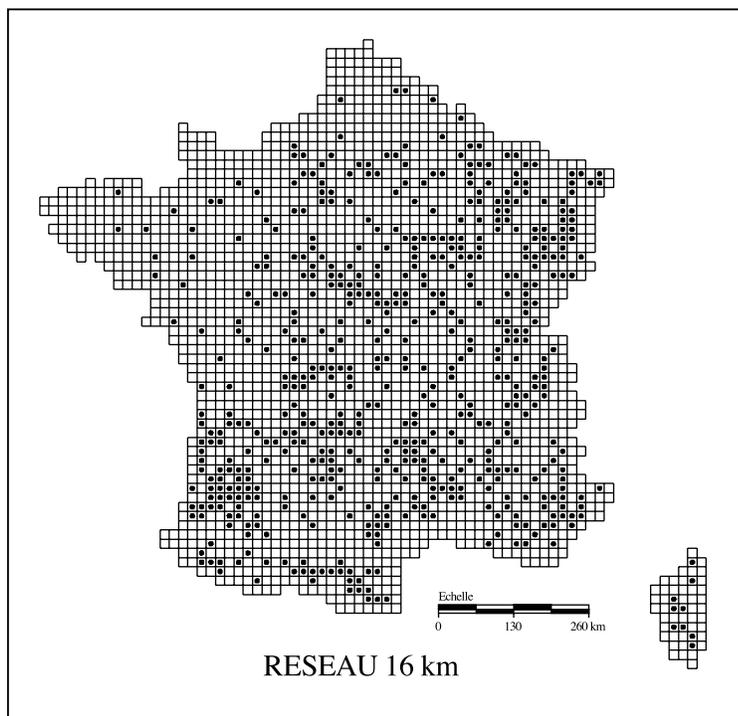
En revanche les inconvénients de cette méthode sont nombreux :

- couverture géographique non exhaustive,
- sorties cartographiques limitées,
- échantillonnage biaisé *a priori*,
- impossibilité d'analyser des gradients,
- subjectivité dans le choix des sites et difficultés de mise en place,
- risque de non pérennité des sites, ou de perte de leur représentativité, si les occupations ou les pressions (par exemple les occupations du sol, les systèmes de culture, les retombées atmosphériques) subissent des changements géographiques.

Le caractère "biaisé" de l'échantillonnage a déjà été démontré en ce qui concerne le réseau RENECOFOR. Badeau (1998) a montré que les sols du réseau RENECOFOR sont significativement plus acides que ceux du réseau systématique "Santé des Forêts". Si ce biais systématique est connu, il est possible d'en tenir compte pour produire des statistiques générales. Par

**Figure 2** - Aspect du réseau 16x16 km et localisation des points du réseau " Santé des forêts "

**Figure 2** - 16 X 16 km grid, and location of forested sites



contre, la principale critique faite à cette méthode est le choix des sites fondé sur des critères de représentativité qui ne sont pas stables, et qui risquent donc d'être inopérants pour détecter des évolutions futures.

### Sélection sur des critères de maîtrise du site

Cette méthode est appliquée par des réseaux de très faible densité, généralement orientés sur la recherche, et sur la caractérisation de processus particuliers (par exemple, ECN au Royaume-Uni, réseau international UN/ECE ICP Integrated Monitoring, Fermes de Référence au Canada). On désire obtenir un contrôle total des événements affectant le site, et une garantie de sa pérennité. Les sites sont équipés en moyens lourds et permettent des expérimentations in situ. Ils sont généralement installés dans des domaines publics d'accès plus ou moins protégés (domaines d'Instituts de Recherche, terrains militaires). Une telle approche convient pour des sites de recherche lourdement équipés, mais ne peut prétendre représenter le territoire.

De cette brève revue, ressortent les points suivants :

- La sélection sur des critères (ii) et (iii) combinés est pertinente si l'on désire installer des sites " lourds " thématiques orientés sur la caractérisation de processus particuliers. Certains sites de ce type existent déjà, par exemple dans des domaines INRA ou ITCF, ou sont en cours d'installation dans le cadre de divers programmes de recherches. Il sont des supports indispensables à la compréhension et à la modélisation des processus, mais ils ne permettent pas de remplir les objectifs assignés plus haut.

- La sélection (i) de type grille systématique est la seule qui permette d'atteindre les objectifs, tout en offrant la garantie de ne pas être biaisée *a priori*. Elle présente cependant un inconvénient majeur : son coût. Pour optimiser la mise en place d'un tel réseau, il convient donc de déterminer la densité minimale acceptable et d'en chiffrer le coût. Bien que les critères de représentativité ne soient pas pertinents à eux seuls pour configurer le réseau, il n'en demeure pas moins que, pour répondre à ses objectifs, le réseau doit être représentatif des sols et des principales occupations et pressions actuelles. Nous testons cette représentativité dans la partie suivante.

## ANALYSE DE REPRÉSENTATIVITE DE DIFFÉRENTES DENSITÉS DE RÉSEAUX DE TYPE GRILLE

Nous fondons notre analyse sur des multiples ou des sous-multiples de la grille " Santé des Forêts " (Badeau et Landmann, 1996) calée sur une maille de 16x16 km (*figures 2 et 3*). La principale raison est d'ordre économique : il revient moins cher de partir d'un réseau existant et de l'étendre que d'en bâtir un entièrement nouveau. Nous analysons la représentativité de ces réseaux par rapport à la répartition nationale et régionale des sols et des occupations.

### Données utilisées

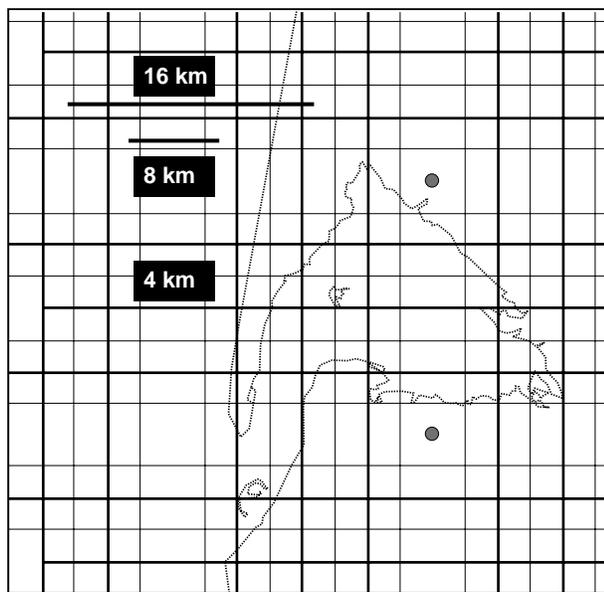
Les données géographiques et sémantiques utilisées sont les suivantes :

- la base de données géographique des sols (BD-SOLS) de France au 1 : 1 000 000 (King *et al.*, 1999),
- la base Corine Land Cover (BD-CORINE, Ifen),
- le modèle numérique de terrain de la France au pas de 250 m (IGN),
- des couvertures de points régulièrement répartis selon des mailles 8x8, 16x16 et 32x32 km et calées sur les points du réseau Santé des Forêts,
- un découpage du territoire en cellules de maille identique et centrées sur la couverture de points (*figure 3*).

Les postes de la classification Corine Land Cover ont été regroupés en 13 grands postes d'utilisation :

**Figure 3** - Trois grilles d'échantillonnage (8, 16 et 32 km) et leurs centroïdes

**Figure 3** - Three sampling grids and their centroids



1. Zones urbaines et artificialisées, plans d'eau,
2. Terres arables,
3. Rizières,
4. Vignobles et vergers,
5. Prairies,
6. Zones agricoles hétérogènes,
7. Forêts de feuillus,
8. Forêts de conifères,
9. Forêts mélangées,
10. Pelouses et pâturages naturels,
11. Landes et arbustes,
12. Zones incendiées,
13. Zones humides.

Les postes de la légende FAO de la base géographique des sols de France ont été réunis sur la base du deuxième niveau de classification FAO (1988), soit pour le territoire métropolitain, 44 sous-groupes de sol.

Nous avons ensuite créé un masque des zones urbaines et artificialisées et des plans d'eau. Les compléments de ces deux couvertures ont été croisés géographiquement, ainsi qu'avec la couverture de points de mesure. Si l'on exclut le poste urbain (1), nous avons ainsi en théorie:  $44 \times 12 = 528$  combinaisons possibles des couples (SOL, OCCUPATION); dans la pratique certaines combinaisons n'existent pas, si bien que le nombre de combinaisons issues du croisement géographique est de 426.

## Indicateurs de représentativité

### Représentativité statistique et géographique nationale

Les questions auxquelles nous voulons répondre sont les suivantes: la proportion des différentes combinaisons types de sol/occupation observées dans les réseaux est-elle représentative de celle du territoire français? Existe-t-il des occurrences qui ne sont pas représentées dans les réseaux? Quelles surfaces couvrent-elles et comment sont elles réparties géographiquement? Quelle est la différence de coût théorique engendrée par une diminution de la taille de la maille?

Pour répondre à ces questions nous avons croisé l'ensemble des couvertures géographiques citées plus haut. Nous produisons ici la courbe de fréquence des surfaces du territoire couvertes par différentes combinaisons (caractérisées par leur sol dominant et leur occupation et classées par surface décroissante). Parallèlement nous calculons les mêmes statistiques sur les pourcentages de points au sein des réseaux. La comparaison de la répartition statistique des combinaisons au sein des réseaux permet une analyse globale de leur représentativité statistique nationale actuelle. Elle met également en évidence les situations sous-représentées où une densification pourrait être envisagée.

La comparaison de la statistique nationale avec celles issues des réseaux (*figure 4*) montre une nette dégradation de la représentativité lorsque l'on passe à la maille 32 km. D'une part les proportions relatives des différentes occurrences ne sont plus cohérentes avec les proportions nationales, d'autre part le nombre et les surfaces des situations non représentées (lorsque les courbes atteignent l'ordonnée 0) sont nettement plus importants.

Avec le réseau 16 x 16 km, l'ensemble des occurrences non représentées couvre une surface totale de moins de 2,5 % du territoire (*figure 5*). L'occurrence la plus étendue non représentée dans un réseau couvre une surface de l'ordre de 2 % (32 km), de 1 % (16 km) ou de 0,2 % (8 km) du territoire.

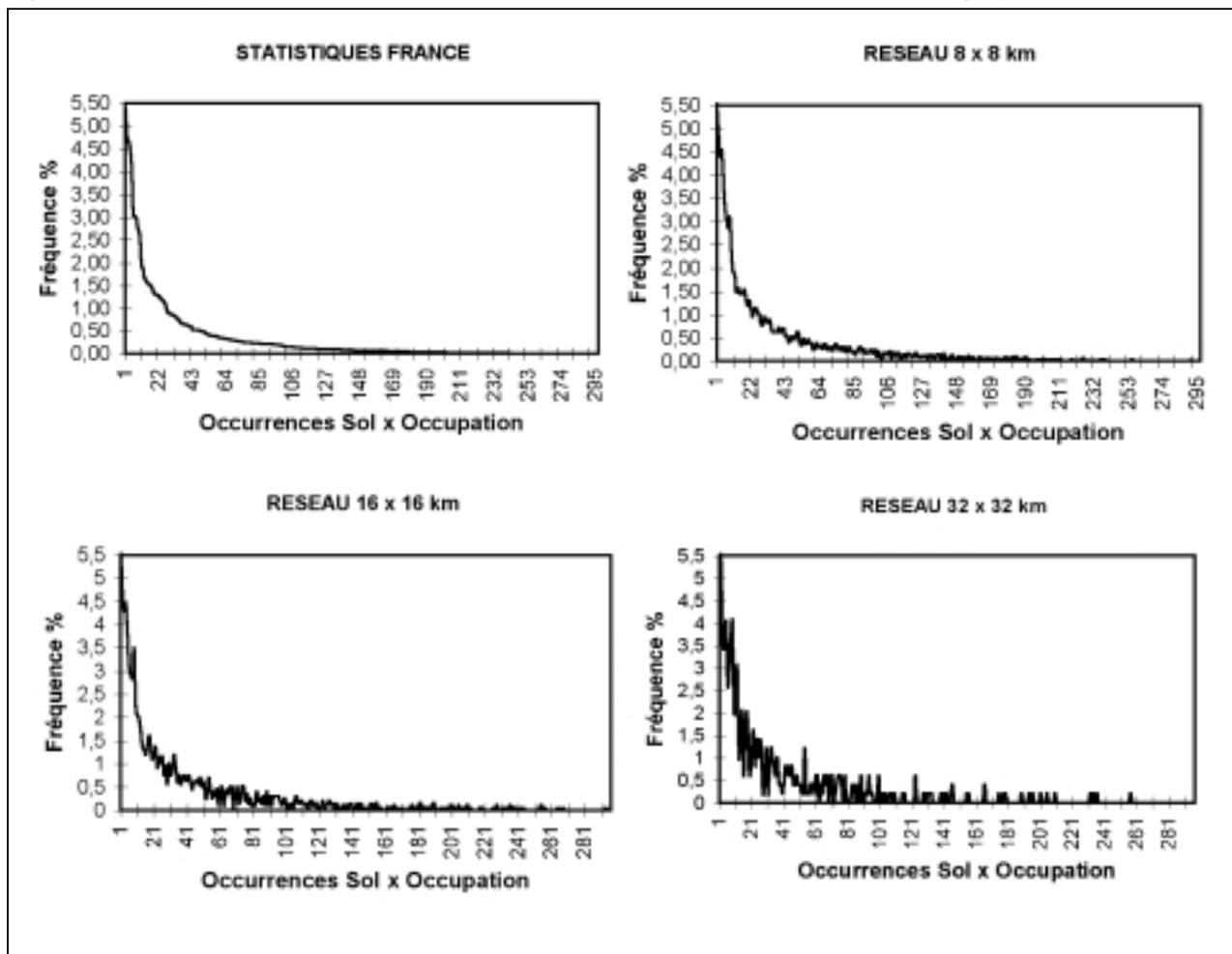
### Représentativité géographique nationale

La projection cartographique des surfaces non représentées illustre leur répartition et met également en évidence les situations sous-représentées où une densification pourrait être envisagée (*figure 6*).

Avec le réseau 32 x 32 km, bon nombre de situations locales ayant un poids environnemental ou économique important échappent à l'échantillonnage: la quasi-totalité des vignobles du bordelais, le cordon dunaire atlantique, les sables du Marsan, les marais côtiers, les vignobles sur Lithosols du Languedoc-Roussillon, les sables de la région de Compiègne et de Soissons, et de très nombreuses surfaces dans le Midi, les Alpes, le Massif Central, la Corse et la Bretagne. De plus, on constate que certaines régions de programme voient une grande partie de leur surface échapper à la surveillance. La répartition des "trous" est très hétérogène sur le territoire.

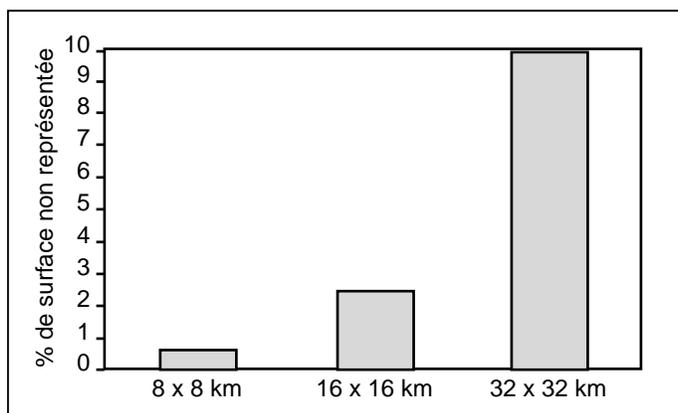
**Figure 4** - Courbes de fréquence classées des surfaces couvertes par les différentes occurrences sol/occupation pour le territoire national, et pourcentage des points au sein des réseaux

**Figure 4** - Sorted frequencies of soil/land-use combination areas. National statistics and statistics for the grid points



**Figure 5** - Pourcentage surfacique des combinaisons non représentées dans les réseaux

**Figure 5** - Percentage of unrepresented areas in the grids



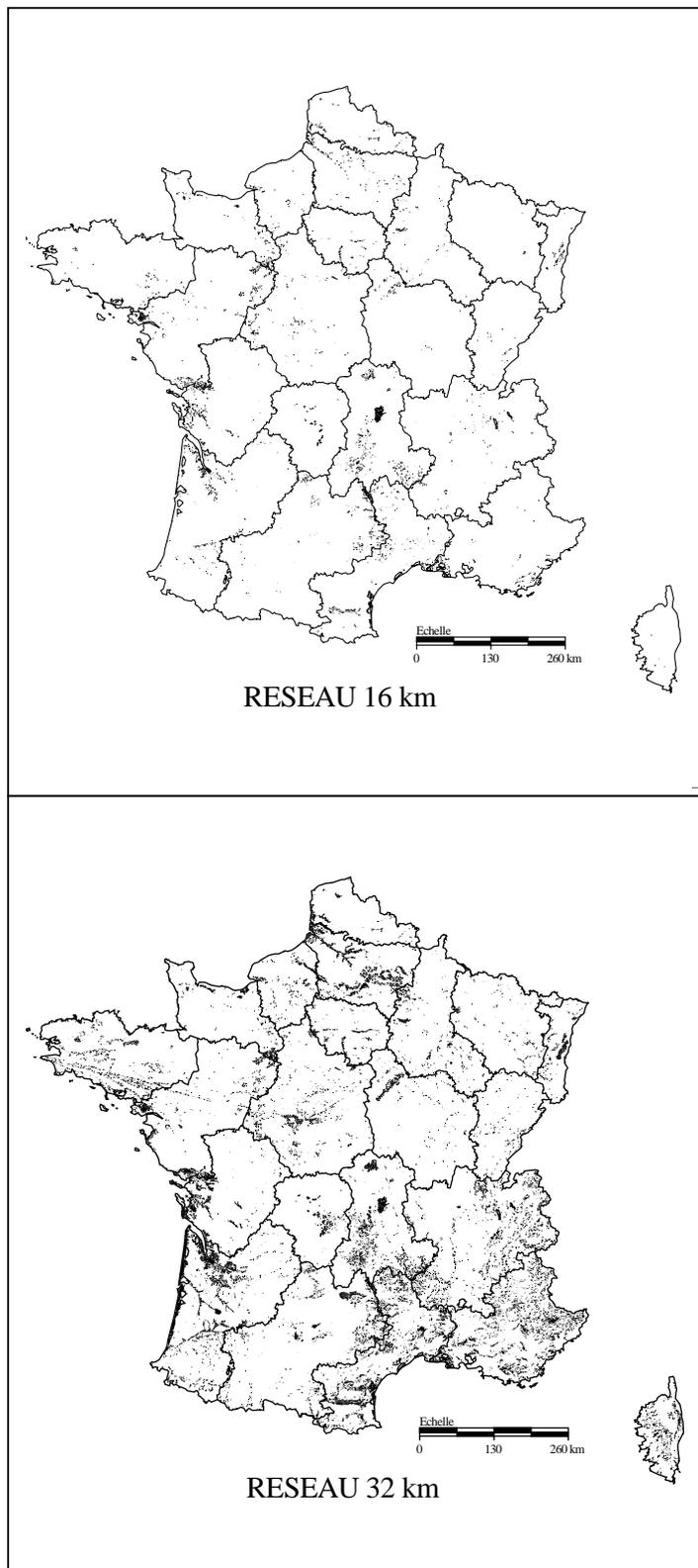
Avec le réseau 16 x 16 km, les situations locales non représentées sont moins nombreuses : on peut noter cependant la Limagne, les marais de l'ouest, les sols de graves du Bordelais, le delta du Rhône. Ces quelques situations ne remettent toutefois pas en cause la représentativité globale du réseau.

**Représentativité pédologique " locale "**

*Le sol présent au nœud d'un réseau est-il représentatif de la maille dont il est le centroïde ?*

Les réseaux, de par leurs mailles régulières, se prêtent particulièrement à une vision cartographique du territoire. Afin de vérifier la pertinence de ces sorties de type cartographique il convient d'analyser dans quelle proportion les nœuds du réseau caractérisent les situations de la maille

**Figure 6 - Zones non représentées par les réseaux.**  
**Figure 6 - Unrepresented areas in the networks.**



dont ils sont centroïdes. Pour répondre à cela nous devrions calculer, au sein de chaque cellule, le pourcentage de la combinaison sol/occupation à laquelle le centroïde appartient. Dans une première étape, nous avons simplifié notre approche en nous limitant à l'analyse de la représentativité vis-à-vis du type de sol dominant de la cellule: nous avons calculé la proportion de chaque cellule couverte par son type de sol dominant. Pour ce faire nous avons extrait sur chaque cellule les surfaces couvertes par les unités cartographiques, ainsi que les pourcentages des unités typologiques au sein des unités cartographiques. Nous avons ainsi pu calculer le pourcentage de la cellule couverte par le type de sol dominant. Nous avons considéré en première approximation que la probabilité qu'a le centroïde de la cellule d'être localisé sur cette situation était égale au rapport entre la surface couverte par le type de sol dominant et la surface de la cellule. Nous produisons ici la répartition statistique de ces probabilités pour les réseaux 16 x 16 et 32 x 32 km.

Pour le réseau 16 x 16, plus de la moitié des probabilités sont supérieures à 50 %. En revanche, l'histogramme de distribution pour le réseau 32 x 32 est nettement décalé vers les valeurs basses (figure 7). Ceci indique que la représentativité locale des points du réseau 32 x 32 est considérablement dégradée, compromettant fortement la qualité de l'information cartographique dérivable de ce réseau.

Dans le cas du réseau 16 x 16, une cartographie de cette probabilité permettrait de mettre en évidence les cellules les plus hétérogènes où il pourrait être souhaitable de diversifier le réseau.

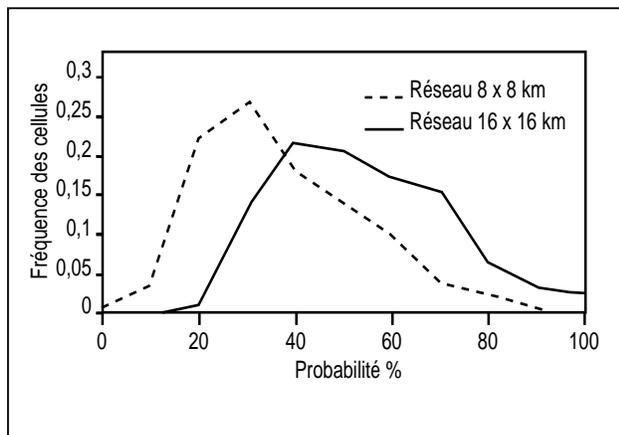
### Aire de représentativité des sites

De quelle surface les sites sont-ils représentatifs ? Les sites permettent-ils de caractériser convenablement la petite région dans laquelle ils sont situés ? Cette dernière question est relative aux possibilités d'utilisation régionale des observations récoltées sur un site.

Au sein de surfaces déterminées (les petites régions agricoles INSEE), nous avons calculé le pourcentage de surface correspondant à des combinaisons sol/occupation effectivement caractérisées par les centroïdes des grilles. Ce travail permet une représentation visuelle de l'exhaustivité de caractérisation des différentes situations au sein des petites régions naturelles (figure 8). On constate qu'avec la maille de 32x32 km un grand nombre de petites régions agricoles offrent des combinaisons sol x occupation qui échappent totalement à une caractérisation par le réseau. Ces situations sont beaucoup moins nombreuses pour le réseau 16 x 16 km mais subsistent néanmoins localement, ce qui pourrait justifier d'implanter des sites complémentaires pour une valorisation locale de la qualité des sols.

**Figure 7** - Probabilité que le centroïde soit localisé sur le sol dominant de la cellule

**Figure 7** - Probability for the centroid to be located on the dominant soil of the cell



**Figure 8** - Taux de caractérisation (en surface) des petites régions agricoles françaises par les réseaux

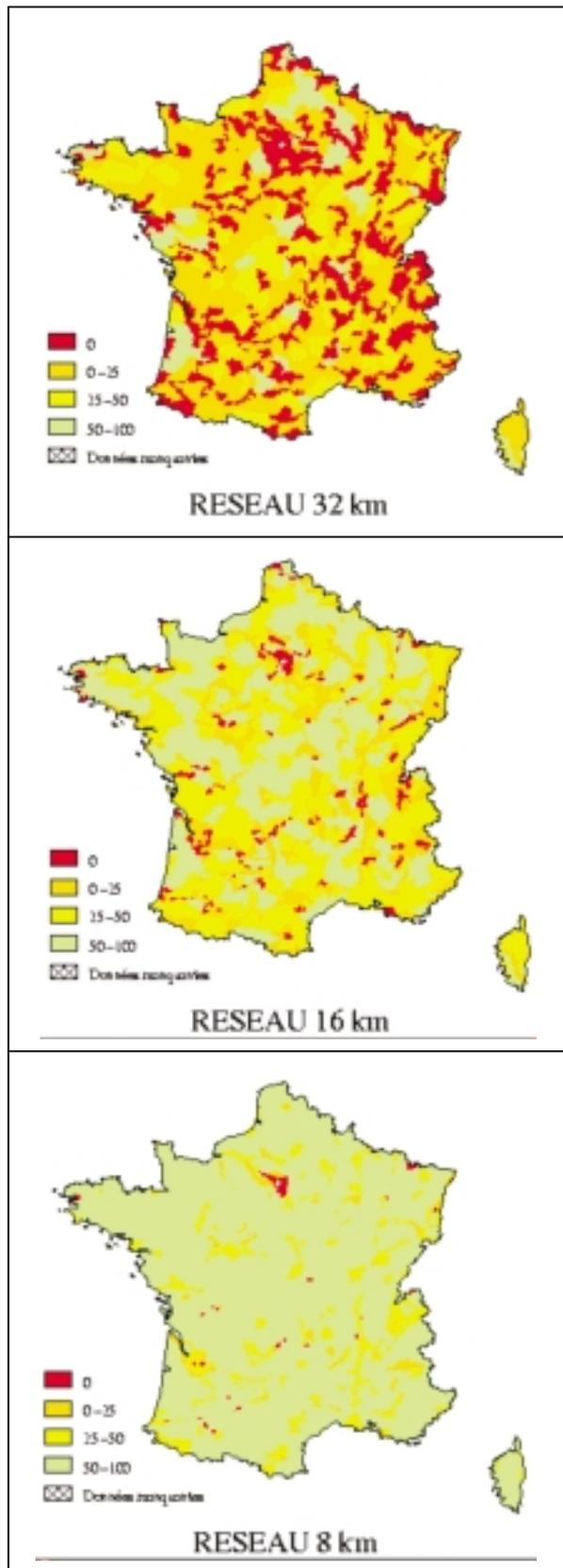
**Figure 8** - Percentage of area of the french small agricultural regions covered by the networks.

### Coût d'implantation des réseaux

Pour obtenir une information sur la maille optimale en terme de coût, nous avons considéré en première approximation que le coût était proportionnel au nombre de sites à implanter. En représentant le nombre de points du réseau en fonction de la maille retenue (figure 9) on constate une courbure très forte au voisinage des valeurs équivalent à la maille 16x16 km.

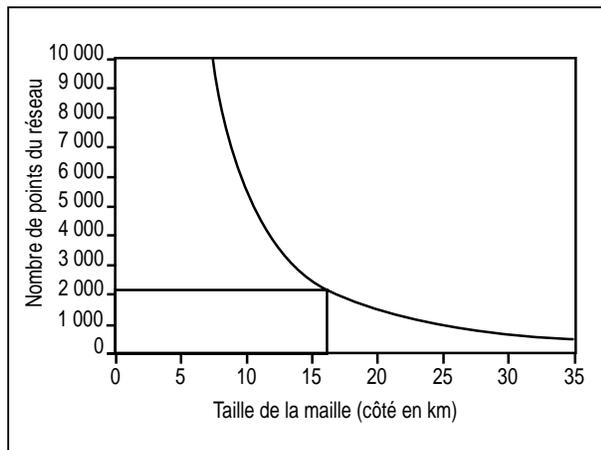
### DISCUSSION

La plupart des indicateurs de représentativité convergent vers la maille 16 x 16 km comme la densité minimale permettant d'atteindre nos objectifs. Elle présente de plus l'avantage de pouvoir s'appuyer sur un réseau déjà existant en forêt. Il faut souligner que cette pré-étude est fondée sur des croisements de données qui présentent une imprécision notable. La base de données géographique des sols de France est fortement imprécise, tant dans ses contours que dans la définition des contenus des plages cartographiques. La base CORINE land-cover présente également des imprécisions principalement liées aux procédures d'interprétation des images satellitales qui sont à son origine. Ainsi une identification réelle des sols et des occupations aux centroïdes des réseaux donnerait probablement des résultats différents de ceux de notre travail. Pour la mise en place d'un tel



**Figure 9** - Nombre de points des réseaux en fonction de la taille de la maille

**Figure 9** - Number of points in networks vs grid cell size



réseau, il conviendrait donc d'approfondir cette approche et d'identifier les occurrences au voisinage des centroïdes. Nous serions alors probablement amenés à définir un rayon de tolérance autour de ce centroïde pour définir le site, ne serait-ce que pour éviter les sites dénués d'intérêt pour notre objectif (points sur les routes, dans l'eau, etc.). Il n'en reste pas moins que cette étude montre une forte dégradation de la représentativité lorsque l'on passe à des mailles supérieures à 16 km. Ce canevas apparaît donc comme le patron minimal, si l'on veut couvrir géographiquement et thématiquement les différentes situations du territoire.

Il reste qu'une densification locale du réseau pourrait s'avérer nécessaire afin (1) de caractériser certaines situations locales ayant un poids environnemental ou agronomique important, (2) de permettre une meilleure caractérisation des mailles les plus hétérogènes, (3) de couvrir l'ensemble des petites régions agricoles du territoire.

La défense d'une stratégie de couverture systématique du territoire peut paraître surprenante en regard des connaissances que nous possédons sur la répartition des sols du territoire. Pour schématiser, une toute autre stratégie aurait pu consister en une stratification préalable de l'échantillonnage sur la base des différentes combinaisons sol x occupation du territoire. Cette approche eût été parfaitement justifiée si nous avions voulu caractériser des paramètres pédologiques relativement stables comme par exemple la granulométrie ou la minéralogie des argiles. Dans ce cas, une telle stratification aurait permis un gain considérable en terme " d'efficacité " (Boulaine, 1980). De fait, la véritable question du choix de la stratégie d'échantillonnage et de savoir si l'on connaît ou non les déterminants des évolutions futures. Or nous ne connaissons pas *a priori* tous les détermi-

nants qui pourront, sur quelques décennies, modifier les caractères des sols et quand bien même nous les connaîtrions, nous ne pouvons pas prévoir où ils agiront. En résumé, la stratégie d'échantillonnage pour la surveillance relève d'une démarche différente de celle adoptée pour la cartographie d'inventaire. En outre, les deux approches doivent être développées de façon complémentaire.

Bien entendu, la base de données géographique des sols de France (King *et al.*, 1999) reste une base indispensable s'il s'agit :

1. de réaliser des cartographies de paramètres pérennes
2. de fournir un outil de spatialisation, lorsque les propriétés pérennes des sols sont les déterminants d'un comportement spécifique.

Nous pensons qu'une stratification sur la base d'unités typologiques de sols sera évidemment nécessaire pour les restitutions cartographiques et l'interprétation des données du réseau de surveillance. La stratégie de surveillance doit être systématique, puis analyser *a posteriori* si les différentes stratifications possibles de l'espace sont ou non pertinentes vis à vis des évolutions constatées. Ces stratifications pourront être selon les cas, les sols, les occupations, les pressions locales, la pollution diffuse – ou localisée – etc. Très certainement elles seront une combinaison de ces pressions externes – que nous ne pouvons pas prévoir sur 20 ou 30 ans – et des caractéristiques " pérennes " des sols qui leurs confèrent une certaine " résilience " ou plus simplement, certains comportements vis à vis des pressions externes. Ceci justifie la réalisation de deux programmes qui doivent s'enrichir mutuellement :

- un programme d'inventaire et de cartographie,
- un programme de surveillance.

Les deux doivent être complémentaires mais doivent - pour l'être - obéir à une stratégie d'échantillonnage différente, tout en garantissant un échange possible entre ces deux sources d'information.

## CONCLUSION

Tous les indicateurs de représentativité convergent vers la maille 16 x 16 km comme la densité minimale permettant d'atteindre nos objectifs. Elle présente de plus l'avantage de pouvoir s'appuyer sur un réseau déjà existant en forêt. L'analyse de l'évolution des coûts probables en fonction de la taille de la maille fournit des estimations qui confortent ce choix. Ce travail préalable a permis de raisonner le choix d'une stratégie d'échantillonnage adaptée aux objectifs. D'ores et déjà, la proposition de mise en place de ce réseau a été acceptée par les partenaires d'un groupement d'intérêt scientifique " Sol " en cours de constitution. Ce réseau dotera la France d'un tableau de bord de l'évolution de ses sols et l'extension de la démarche à l'ensemble de l'Europe est en discussion.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé en partie par des fonds du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Nous remercions vivement G. Landmann et V. Badeau pour la fourniture de données sur le réseau " Santé des Forêts ". Nous sommes également reconnaissants envers P. Stengel et E. van Ranst pour leurs critiques très constructives d'une première version de cet article.

## BIBLIOGRAPHIE

- Armstrong-Brown S., Loveland P., Holman I., Arrouays D., Eckelmann W., Vogel H. et Coulter B., 1998 - A soil monitoring network for Europe: Content, coverage and users. 16 th World Congress of Soil Science. Montpellier.
- Arrouays D., Vogel H., Eckelmann W., Armstrong-Brown S., Loveland P. et Coulter B., 1998 - Soil monitoring networks in Europe. 16 th World Congress of Soil Science. Montpellier.
- Badeau V., 1998 - Pourquoi les sols du réseau intensif RENECOFOR sont-ils nettement plus acides que ceux du réseau de surveillance systématique (16 x 16 km) ? Les Cahiers du DSF 1-1998. (La Santé des forêts [France] en 1997), Min. Agri., Pêche, DERS, Paris, pp. 81-83
- Badeau N., Landmann G., 1996 - Les sols forestiers français : premiers résultats de l'inventaire écologique du réseau européen. Les Cahiers du DSF 1-1996. (La Santé des forêts [France] en 1995), Min. Agri., Pêche, Alim., DERS, Paris, pp. 50-53
- Boulaine J., 1980 - Pédologie appliquée. Masson, Paris. 220 p.
- FAO, 1988 - FAO-Unesco soil map of the world. Revised legend; FAO, Rome, 79 p.
- King D., Stengel P. et Jamagne M., 1999 - Soil mapping and soil monitoring: state of progress and use in France. In; Soil Ressources of Europe. P. Bullock, RJA Jones et L. Montanarella (eds) European Soil Bureau, research report n° 6, EUR 18991 EN. pp. 63-73.
- Martin S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielski H., Gaultier J.P., Lavelle P., Legros J.P., Leprêtre A. et Sterckeman T., 1998 - The French national soil quality observatory. 16 th World Congress of Soil Science, Montpellier, France.
- Martin S., Baize D., Bonneau M., Chaussod R., Ciesielski H., Gaultier J.P., Lavelle P., Legros J.P., Leprêtre A. et Sterckeman T., 1999 - Le suivi de la qualité des sols en France, la contribution de l'observatoire de la qualité des sols. Etude et gestion des Sols, 6 (3) : pp. 215-230.
- Nageleisen L.-M., 1998 - Les résultats 1997 du réseau européen de suivi des dommages forestiers. Les Cahiers du DSF 1-1998. (La Santé des forêts [France] en 1997), Min. Agri., Pêche, DERS, Paris, pp. 65-74
- Ponette Q., Ulrich E., Brêthes A., Bonneau M. et Lannier M., 1997 - RENECOFOR - Chimie des sols dans les 102 peuplements du réseau. Ed. ONF, Dépt Rech. Tech., 427 p.

