

Analyse de la représentativité des cartes pédologiques au 1/100 000 pour la connaissance des sols du territoire français

D. King et N. Saby

INRA – Science du Sol Orléans,
Domaine de Limère 45166 Olivet Cedex France

RÉSUMÉ

Dans de nombreux pays, les programmes d'inventaire systématique des sols restent inachevés. C'est le cas du programme « Connaissance Pédologique de la France » (CPF) à l'échelle du 1/100 000 lancé en 1968 par le Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France. Depuis cette date, 24 cartes ont été publiées et 15 cartes sont en voie d'achèvement, soit environ 15 % de la France.

L'objectif de cet article est d'analyser la représentativité de ces cartes par rapport à l'ensemble du territoire français métropolitain. La méthode consiste à utiliser des couvertures d'information disponibles à l'échelle nationale : base de données des sols de France incluse dans celle d'Europe, carte géologique de France, base de données d'occupation du sol, etc. On examine tout d'abord si les valeurs prises par les variables de ces couvertures à l'échelle de la France sont également présentes au sein des zones délimitées par les cartes 1/100 000. On calcule les fréquences de distribution de ces valeurs selon leur pourcentage de surface au sein des cartes 1/100 000 et sur l'ensemble du territoire. On compare les deux populations à l'aide de tests de χ^2 et par l'analyse des histogrammes. Enfin, on détermine les unités cartographiques à l'échelle nationale absentes et/ou très éloignées des zones étudiées au 1/100 000.

Les résultats montrent que les 24 cartes publiées du programme CPF constituent un échantillon assez bien représentatif du territoire. En effet, presque tous les types de sols de la classification FAO-UE reconnus à l'échelle nationale sont présents dans la zone cartographiée au 1/100 000 et les proportions des surfaces sont globalement respectées. L'utilisation des autres couches d'information (géologie, occupation du sol...) confirme ces résultats. Par contre, on constate que toutes les Unités Cartographiques de Sols (constituées par la combinaison d'Unités Typologiques de sols) ne sont pas recoupées par les cartes 1/100 000 et que certaines d'entre elles sont très éloignées géographiquement de ces cartes. On considère ainsi que 43 % de la surface française est insuffisamment représentée. L'introduction des 15 cartes en cours permet de ramener ce nombre à la valeur de 25 %.

Cette analyse de représentativité d'un programme de cartographie permet d'orienter des travaux ultérieurs : achèvement des cartes en cours, ouverture de nouveaux secteurs dans les zones insuffisamment connues, capitalisation des connaissances acquises, développement de méthodes de généralisation spatiale... La méthode proposée n'est pas spécifique du programme CPF et peut s'appliquer à d'autres disciplines et d'autres territoires.

Mots clés

Sols, cartes, inventaire, représentativité, France.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE REPRESENTATIVENESS OF THE 1:100,000 SOIL MAPS FOR THE KNOWLEDGE OF SOILS OVER THE FRENCH TERRITORY

In many countries, programmes of soil survey covering the whole territory remain incomplete like in France for the "Programme of Knowledge of French Soils" concerning soil mapping at 1:100,000 scale. This programme was launched in 1968 by the Soil Survey Staff of France. It results in the publication of 24 maps and 15 maps remain in preparation, representing only 15% of the French territory.

This publication analyses the representative nature of these maps with regard to the whole metropolitan territory of France. Geographic data coverages available at national scale are used: Soil Geographical Data Base of France at 1:1,000,000 scale, geological map of France at 1:1,000,000 scale, CORINE land cover data base of France, etc. First of all, values taken by the variables describing these geographic coverages are listed for the areas delimited by the 1:100,000-scale soil maps and for the whole French territory. Frequencies according to their percentage of area for the 1:100,000-scale soil maps and for the whole territory are calculated for each value. The two populations are compared using χ^2 tests and histogram analysis. Finally, soil mapping units not included in the area delimited by the 1:100,000-scale soil maps or far from these maps are listed.

Results show that the 24 published soil maps at scale 1:100,000 are a fairly representative sample of French soils compared with the Soil Geographical Data Base of France at 1:1,000,000 scale. Most soil types described with the FAO-UE classification and identified at the national level are present on the area delimited by the 1:100,000-scale soil maps with nearly similar surface ratio. The other information layers used, i.e. geology and land use, confirmed these results. On the contrary, soil mapping units (constituted by a combination of soil typological units) are not all present in the area covered by these 1:100,000-scale soil maps and some of them are geographically very far from this surveyed area. Considering these results, 43% of the French territory is insufficiently represented. If the 15 soil maps at scale 1:100,000 in preparation are also considered, then only 15% of the French territory is insufficiently represented.

This analysis of the representativeness of a programme of soil survey can be used to guide future works: completion of ongoing soil mapping, new soil surveys in insufficiently known areas, saving of acquired knowledge, development of spatial up-scaling methods, etc. The proposed method is not specific to the "Programme of Knowledge of French Soils" and can be applied to other disciplines and other countries.

Key-words

Soils, maps, inventory, representativeness, France.

RESUMEN

ANÁLISIS DE LA REPRESENTATIVIDAD DE LOS MAPAS PEDOLÓGICOS DE FRANCIA AL 1/100 000 PARA EL CONOCIMIENTO DE LOS SUELOS DEL TERRITORIO

En numerosos países, los programas de inventario sistemático de suelos quedan incompletos. Es el caso del programa "Conocimiento pedológico de Francia" (CPF) a escala de 1/100 000 iniciado en 1968 por el servicio de Estudio de Suelos y del mapa Pedológico de Francia. Desde esta fecha, 24 mapas fueron publicados y 15 por terminar, o sea 15% de Francia.

El objetivo es analizar la representatividad de estos mapas para la totalidad del territorio francés metropolitano. El método consiste en usar diferentes estratos de información disponibles al nivel nacional: banco de datos de suelos de Francia incluido en lo de Europa, mapa geológico de Francia, banco de datos de uso del suelo, etc. Se examina primeramente si los valores de las variables de estas cubiertas al nivel de Francia son igualmente presentes en las zonas delimitadas por los mapas al 1/100 000. Se calcula las frecuencias de distribución de estos valores según su porcentaje de superficie en los mapas 1/100 000 y en la totalidad del territorio. Se compara las dos poblaciones con ayuda de test χ^2 y por análisis de los histogramas. En fin se determina las unidades cartográficas ausentes a escala nacional y/o muy diferentes de las zonas estudiadas al 1/100 000.

Los resultados muestran que los 24 mapas publicadas del programa CPF constituyen una muestra bastante bien representativa del territorio. En efecto, casi todos los tipos de suelos de la clasificación FAO-UE reconocidos a escala nacional son presentes en la zona cartografiada al 1/100 000 y las proporciones de superficies son globalmente respetadas. El uso de las otras capas de información (geología, uso del suelo...) confirma estos resultados. Al contrario, se constata que todas las unidades cartográficas de suelos (constituidas por la combinación de unidades tipológicas de suelos) no son representadas en los mapas 1/100 000 y que ciertas de ellas son muy lejanas geográficamente de estos mapas. Se considera así que 43% de la superficie francesa es insuficientemente representada. La introducción de los 15 mapas en curso permite de disminuir este valor a 25%.

Este análisis de representatividad de un programa de cartografía permite orientar trabajos ulteriores: terminación de los mapas en curso, abertura de nuevos sectores en las zonas insuficiente conocidas, capitalización de los conocimientos adquiridos, desarrollo de métodos

de generalización espacial... El método propuesto no es específico del programa CPF y puede aplicarse a otras disciplinas y otros territorios.

Palabras claves

Suelos, mapas, inventario, representatividad, Francia.

La plupart des pays dans le monde ont développé des programmes de cartographie des sols après la seconde guerre mondiale afin de répondre aux besoins de la production agricole. C'est le cas en particulier en Europe où le succès des programmes de la politique agricole de la CEE a été remarquable. À partir des années 80, les objectifs de production étant atteints (voire même dépassés), la demande en programmes de cartographie a décliné. Parmi les 15 pays de l'Union Européenne, seuls la Belgique et les Pays Bas ont aujourd'hui achevé la réalisation de la totalité de leur territoire (Dudal et Deckers, 1999). Avec l'émergence des problèmes environnementaux, de nouveaux besoins sont apparus avec une exigence encore plus grande sur la qualité des informations. Une prise de conscience du caractère fini et fragile des ressources naturelles relance la question de l'inventaire de ces ressources en vue de leur gestion patrimoniale à long terme (Jamagne, 1999).

Les programmes de cartographie des sols réalisés dans le passé représentent un capital qu'il serait regrettable de négliger à un moment où les besoins d'information se font croissants (Bornand, 1997, King *et al.*, 1998-2). De nombreux pays ont ainsi lancé des programmes de numérisation des données publiées ou archivées dans le but de faciliter leur accès pour des sollicitations diverses (Jamagne *et al.*, 1995). Toutefois, la plupart des inventaires restant inachevés, la question se pose à propos de la représentativité des zones déjà cartographiées. En effet, peu de pays accepteront dans le futur des programmes détaillés d'inventaire systématique. De plus, le renouvellement continu des questions posées par la société nécessite un choix ciblé de zones représentatives que l'on puisse analyser en détail (Favrot, 1989). Si ces zones préalablement cartographiées sont représentatives de grandes régions pédologiques « homogènes », il faut alors organiser les données et les connaissances acquises, et prévoir des outils de généralisation spatiale (Lagacherie *et al.*, 2000). Si, *a contrario*, ces zones ne couvrent pas la diversité des situations existantes, il faut envisager des compléments et définir des priorités pour les régions insuffisamment connues.

L'objectif de cet article est de proposer une méthode d'analyse de la représentativité d'un jeu de cartes publiées à une échelle donnée (1/100 000) par rapport à la connaissance exhaustive d'un pays à une échelle plus petite (1/1 000 000, notée 1/1M). Le programme « Connaissance Pédologique de la France » (CPF) est choisi et ainsi examiné au regard d'un ensemble de couches d'informations comprenant le sol lui-même ainsi que les principaux facteurs de forma-

tion des sols (géologie, climat, relief, occupation des sols). Il ne s'agit pas d'analyser en détail le contenu des cartes 1/100 000 du programme CPF mais simplement de quantifier le degré de représentativité des cartes réalisées par rapport à la connaissance générale actuelle des sols et de leurs facteurs de formation sur l'ensemble du territoire national.

Tout d'abord, une présentation du programme CPF permettra de juger de la nature des travaux réalisés et de leur état d'avancement. Ensuite, les différents outils statistiques et cartographiques seront détaillés ainsi que les couvertures exhaustives nationales qui permettront de juger de la représentativité de ce programme. Enfin, les résultats seront présentés et discutés dans le cadre du programme CPF mais également dans celui plus général de l'application de cette méthode à d'autres cas.

PRÉSENTATION DU PROGRAMME « CONNAISSANCE PÉDOLOGIQUE DE LA FRANCE » (CPF) À L'ÉCHELLE DU 1/100 000

Le programme CPF compte 25 cartes publiées⁽¹⁾ au 1/100 000 selon le découpage IGN (environ 5 millions d'ha) et 15 cartes en cours (environ 3 millions d'ha) (*figure 1*). Ce programme a été lancé lors de la création du Service d'Etude des Sols et de la Carte Pédologique de France (SESCPF) en 1968 (Jamagne *et al.*, 1995). En fait, de nombreux travaux de levés avaient déjà commencé au préalable dans le cadre de programmes de recherches ou d'études régionales (20 cartes sur 25 annoncent l'utilisation de levés réalisés avant 1968). La dernière carte a été publiée en 2000 mais il faut noter une décroissance régulière des levés malgré un rythme constant de publication (en moyenne une par an).

En s'intéressant plus particulièrement aux 25 cartes publiées (INRA, 1969-2000), on comptabilise plus de 4 000 pages de notice (*tableau 1*) incluant environ 1 000 références bibliographiques ainsi que 132 toposéquences. Dans les notices, il est annoncé en moyenne une observation (en général, un sondage à la tarière) pour 40 ha et plus

⁽¹⁾ Les coupures IGN de Perpignan et d'Argeles font l'objet d'une seule publication mais elles sont comptabilisées dans cette étude comme deux cartes 1/100 000.

Figure 1 - Etat d'avancement du programme « Connaissance Pédologique de la France » (CPF) à la date du 1^{er} juillet 2000.

Figure 1 - State of progress of the program « Pedological knowledge of France » (CPF) at the date of 1st July 2000.

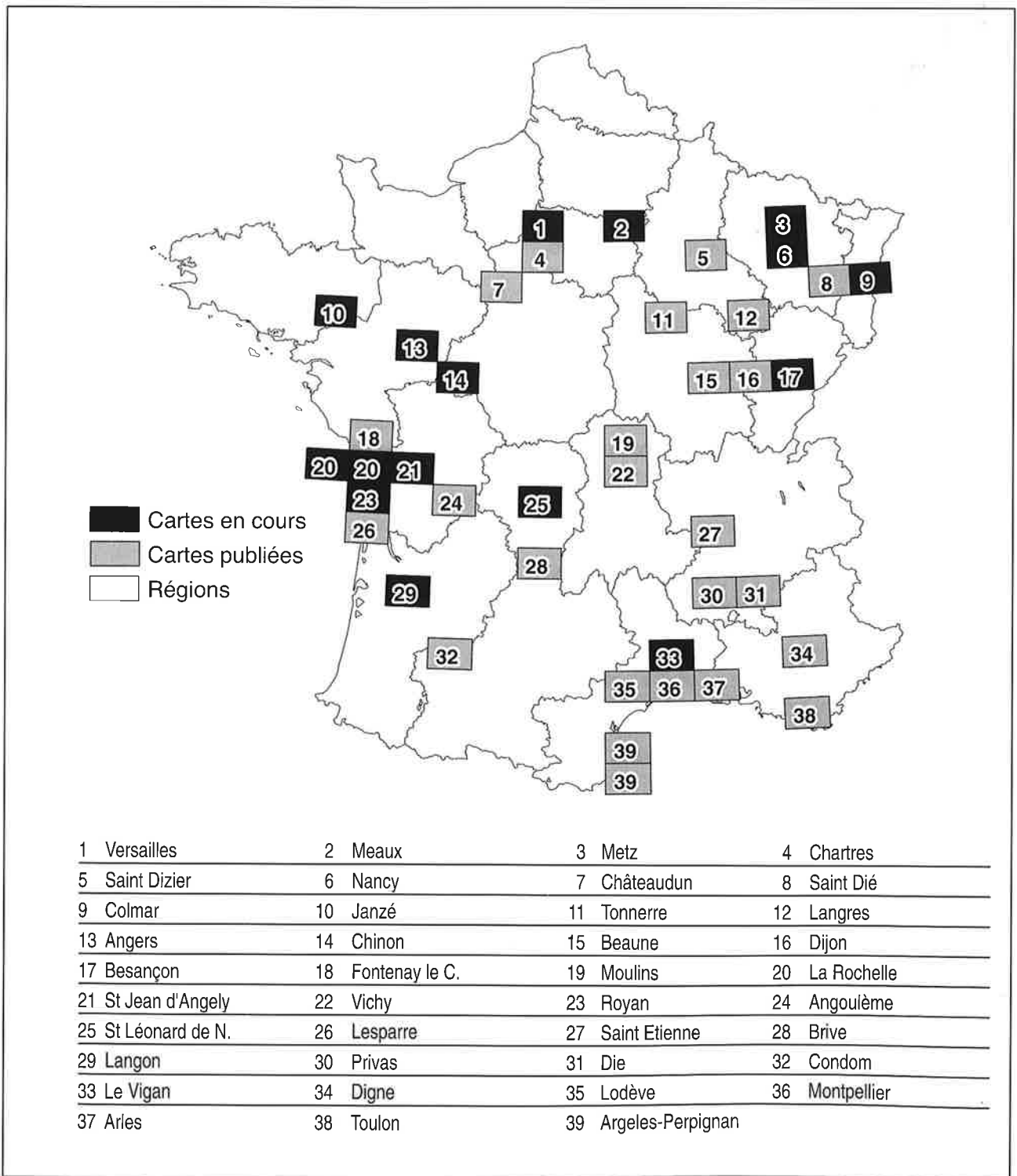


Tableau 1 - Liste des cartes 1/100 000 publiées dans le cadre du programme « Connaissance Pédologique de la France » (CPF), triées par date de publication.**Table 1** - List of the 1:100,000 published soil maps in the framework of the program "Pedological knowledge of France" (CPF), sorted by publication date.

n° fig. 1	Cartes (nom IGN)	Publication (carte)	Début des levés	Fin des levés	Pages Notice	Réf. biblio	Profils D ⁽¹⁾	Profils A ⁽²⁾	Auteurs	UCS ⁽³⁾	UTS ⁽⁴⁾
22	Vichy	1969	1965	1967	129	50	17	92	Favrot	62	79
39	Argeles-Perpignan ⁽⁵⁾	1970	1960	1968	92	26	32	76	Servant	59	74
38	Toulon	1973	1965	1969	103	20	49	245	Portier	65	76
32	Condom	1973	1961	1969	117	16	13	256	Seguy	22	25
19	Moulins	1974	1965	1969	144	50	14	80	Favrot	65	84
24	Angoulême	1974	1966	1970	143	64	17	123	Callot	82	110
16	Dijon	1975	1967	1971	188	37	45	94	Chrétien	73	83
28	Brive	1976	1965	1972	122	25	19	63	Bonfils	50	65
30	Privas	1976	1964	1972	232	113	28	154	Bornand, Legros, Moinereau	84	140
8	Saint Dié	1978	1965	1970	142	44	35	90	Favre, Gury, Hetier, Le Tacon	60	94
26	Lesparre	1979	1969	1971	195	80	40	164	Wilbert	69	77
11	Tonnerre	1980	1968	1976	195	68	32	149	Baize	60	79
7	Châteaudun	1980	1966	1972	220	35	11	52	Isambert	87	96
4	Chartres	1982	1965	1976	192	31	36	255	Crahet	72	105
5	Saint Dizier	1982	1968	1973	175	49	45	272	Dutil	84	106
36	Montpellier	1983	1958	1975	139	64	9	158	Arnal	87	111
27	Saint Etienne	1985	1968	1976	⁽⁶⁾				Bornand, Legros	80	103
12	Langres	1986	1965	1975	118	24	46	93	Benoit-Janin	37	49
35	Lodève	1988	1977	1982	186	84	12	43	Bonfils	170	340
17	Fontenay	1989	1970	1977	169	49	31	129	Ducloux	77	86
31	Die	1991	1977	1982	⁽⁶⁾				Barthes	58	128
37	Arles	1994	1957	1983	232	123	38	335	Bouteyre, Duclos	101	121
15	Beaune	1996	1967	1988	224	59	70	328	Chrétien	92	118
34	Digne	2000	1978	1993	264	81	12	52	Bornand, Fléché, Guyon	142	198

(1) Profils D : nombre de profils décrits et analysés dans le corps du texte de la notice (y compris les profils synthétiques)

(2) Profils A : nombre de profils analysés et placés en annexe des notices

(3) Nombre d'Unités Cartographiques de Sols (UCS/100) présentes dans la légende de la carte 1/100 000

(4) Nombre d'Unités Typologiques de Sol (UTS/100) présentes dans la légende de la carte 1/100 000

(5) Argeles et Perpignan comptent pour 2 cartes IGN bien qu'elles soient regroupées en une seule publication dans ce tableau

(6) Notice non encore publiée

de 300 profils par cartes. Cela correspond respectivement à un total d'environ 120 000 observations et 7 000 profils réalisés. Au sein des notices, on compte 650 profils décrits et 3 300 profils analysés placés en annexe (tableau 1). Au-delà de ce bilan quantitatif, on note que le programme CPF a accompagné de nombreux travaux de recherche étant à l'origine de connaissances fondamentales dans

le domaine des lois de distribution des sols. Toutes ces connaissances ne sont pas nécessairement mentionnées dans les notices des cartes et des renvois sont indiqués vers d'autres publications scientifiques, notamment des thèses⁽²⁾, (par exemple, Baize, 1983; Bornand, 1978; Callot, 1976; Chrétien, 1986; Ducloux, 1978; Gury, 1990; Legros, 1982, etc.).

⁽²⁾ Pour obtenir une information exhaustive, on pourra se reporter à l'inventaire des thèses de Science du Sol (Falipou, 1987), à l'article de Jamagne et al. (1995) ou au rapport Bornand (1997).

27 auteurs et co-auteurs (tableau 1), environ 130 collaborateurs ainsi que 10 dessinateurs sont cités dans les publications comme ayant participé à ce programme. Une dizaine d'organismes ont contribué aux travaux, principalement des organismes de recherche avec en tête, plusieurs centres INRA, les écoles agronomiques, le CNRS et l'Université mais également une participation très forte des Chambres d'Agriculture et de plusieurs sociétés d'économie mixte: la compagnie du Bas-Rhône-Languedoc -BRL-, la Société d'Aménagement des Friches de l'Est -SAFE-, la Société du Canal de Provence -SCP- et la Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne -CACG-. Une majorité des régions administratives françaises (14 sur 22) possède au moins une carte publiée. Toutefois, on note une quasi-absence de documents publiés ou en cours pour 5 régions (principalement les régions du nord et de l'ouest de la France).

Ces différents chiffres permettent de mieux situer le programme CPF. Celui-ci couvre un faible pourcentage du territoire (9 % pour les cartes publiées, 15 % pour le total des cartes publiées et en cours). Il rassemble cependant de façon standardisée un nombre très important d'informations sur la nature et l'organisation spatiale des sols. Ainsi, malgré la très grande diversité des secteurs étudiés et le nombre élevé de collaborateurs d'origine scientifique diverse, on remarque une très bonne standardisation des documents. De même, malgré un étalement des travaux sur plus de 30 années, un lecteur retrouvera la même forme de présentation des informations tant au niveau de la légende (CPCS constamment utilisée) que des données de base (par exemple, tableaux des analyses de sols en annexes) ou des synthèses rédigées dans les notices. Seules deux évolutions majeures sont à noter: (1) le nombre d'Unités Cartographiques de Sols 1/100 000 (UCS/100) augmente au cours des années, en parallèle avec un accroissement du nombre de pages des notices (le nombre d'Unités Typologiques de Sols 1/100 000 (UTS/100) augmente également mais reste proportionnel au nombre d'UCS/100, $r = 0,92$ pour 25 cartes publiées); (2) par ailleurs, on note un souci croissant de la présentation pour rendre les documents accessibles aux utilisateurs (par exemple, organisation de la légende par grands types de paysages géomorphologiques en ce qui concerne les dernières cartes publiées).

Sur la base de cette brève présentation, on confirme que le programme CPF appartient bien, à l'échelle internationale, à la famille des programmes nationaux d'inventaire des ressources en sols (Bullock, 1999). Comme dans beaucoup d'autres pays, au moins pour ceux de l'Europe de l'Ouest, le programme CPF couvre une faible surface du territoire. Il a ainsi perdu son caractère systématique voulu initialement. Par contre, il rassemble de façon harmonisée une grande quantité d'informations. Au cours du temps, la diminution des moyens affectés a impliqué une diminution des levés et a conduit de façon inéluctable à réduire considérablement les objectifs de ce programme. La question de la représentativité des cartes levées et en cours apparaît ainsi comme un point essentiel pour connaître l'intérêt d'un usage futur des données acquises. Il faut alors estimer le domaine possible de généralisation que l'on peut accorder aux cartes

réalisées et examiner l'éventualité, voire la nécessité d'établir des cartographies complémentaires.

MÉTHODES: ANALYSE DE LA REPRÉSENTATIVITÉ D'UNE ZONE PAR RAPPORT À UN TERRITOIRE PLUS LARGE

L'analyse de la représentativité d'un « échantillon » par rapport à « l'ensemble d'une population » dont il est extrait, est classiquement traitée en statistique par un test de Khi-deux (χ^2) (Lancaster, 1969; Jerrold, 1999). En cartographie des sols, de nombreux auteurs ont ainsi recherché le degré de représentativité d'un petit secteur étudié en détail par rapport à un territoire plus large environnant (Favrot, 1989; Bourennane, 1997; King *et al.*, 1998-1; Thomas *et al.*, 1999; Lagacherie et Voltz, 2000). On s'intéresse notamment à l'aire minimum représentative de façon à optimiser les méthodes de cartographie (Blöschl et Sivapalan, 1995).

« L'ensemble de la population » correspond au territoire national (limité ici à la France métropolitaine). Dans le cadre strict de cette étude de représentativité, il n'était pas envisageable d'opérer de nouvelles acquisitions de terrain. Les données utilisées sont des couches d'information disponibles sur l'ensemble du territoire dans des bases de données nationales ou internationales. Il s'agit de: (1) la base de données des sols de France au 1/1M (INRA, 1998), (2) la carte géologique de France au 1/1M (BRGM, 1996), (3) la base de données météorologique Aurhely (Benichou et Le Breton, 1987), (4) la base de données européenne Corine Land Cover (CEC, 1993) et (5) le Modèle Numérique d'Altitude mondial (Hutchinson, 1989; DMA, 1992). Ces données sont brièvement présentées dans la suite du texte avec le choix des variables sélectionnées pour cette étude. Ces différentes couvertures peuvent être utilisées indépendamment les unes des autres ou combinées entre elles. Par souci de simplification, nous nous sommes limités à une approche par couche indépendante.

Un « échantillon » est une portion (d'un seul tenant ou non) du territoire national, extrait à partir des bases nationales à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Pour ce qui concerne notre étude, nous avons choisi d'analyser la représentativité de deux « échantillons ». Le premier est constitué de l'ensemble des « cartes 1/100 000 publiées » entre 1968 et 2000 (figure 1). Le deuxième échantillon comprend les mêmes cartes publiées auxquelles on adjoint les cartes en cours de réalisation. Ce deuxième échantillon de 40 cartes est nommé « cartes 1/100 000 levées ». On présentera principalement les résultats pour le premier échantillon « cartes 1/100 000 publiées », le second échantillon étant analysé pour évaluer l'intérêt d'opérer l'achèvement des cartes en cours afin de disposer d'une meilleure représentativité.

L'analyse de représentativité est réalisée de deux façons complémentaires. La première consiste à comparer, pour une variable

sélectionnée, les fréquences de distribution de cette variable entre l'échantillon (les secteurs cartographiés au 1/100 000) et la population (le territoire national au 1/1M). Pour ce faire, la couverture des limites des cadres des cartes 1/100 000 est calée et surimposée à chacune des couvertures nationales 1/1M citées ci-dessus (*planche 1*). L'information issue de ces couvertures et incluse au sein de ces cadres est extraite afin de réaliser les comparaisons. Pour une variable sélectionnée, on calcule la fréquence de distribution des surfaces des valeurs (ou modalités) prises par cette variable (*figure 2*). Un calcul similaire est effectué pour cette même variable sur l'ensemble du territoire français. A partir de ces deux fréquences de distribution, différentes opérations sont possibles: (1) examen des modalités présentes sur le territoire mais jamais présentes au sein des cartes 1/100 000, (2) comparaison visuelle des fréquences de distribution afin d'identifier, par exemple, les types de sol les plus étudiés de ceux sous-échantillonnés, enfin (3) réalisation de tests de χ^2 entre les fréquences de distribution de l'échantillon et de la population totale.

Dans cette première façon de procéder, l'échantillon constitué par les cartes 1/100 000 est considéré comme un échantillon statistique classique sans prendre en compte l'organisation spatiale de la répartition des cartes au sein du territoire national. Afin de mieux cerner les régions insuffisamment (ou trop) échantillonnées, on réalise des cartes montrant le nombre de fois où une unité cartographique au 1/1M (UCM) est présente au sein d'une carte 1/100 000. Cela permet notamment d'identifier très rapidement les régions non étudiées par les travaux du programme CPF. Pour une UCM. présente dans plusieurs cartes 1/100 000, on calcule la distance géographique entre cette UCM. et la carte la plus proche où elle est présente. On calcule également la distance géographique entre cette UCM. et la carte où elle est la plus représentée (donc a priori, la mieux connue). Ces calculs de distance sont réalisés en maillant le territoire national avec une maille carrée de 1 km de côté et en affectant l'UCM. dominante à chaque pixel (*figure 3*). Cette méthode permet de visualiser rapidement la « zone d'influence » de chaque carte 1/100 000 où une extrapolation des connaissances de cette carte serait envisageable.

Nous disposons de deux échantillons (25 cartes publiées et 40 cartes levées), de cinq couvertures nationales et d'au moins six méthodes de traitement des données. Cela fait 60 types de résultats sous forme de tableaux, de tests statistiques, d'histogrammes de fréquence et de cartes! Afin de limiter la profusion des résultats, nous présentons tout d'abord des tableaux généraux utilisant l'ensemble des couches d'informations disponibles au 1/1M (par exemple, présence/absence des variables, calcul des χ^2). Par contre, pour les fréquences de distribution et les cartes de distance, nous limitons la présentation aux résultats utilisant la base de données des sols de France au 1/1M.

PRÉSENTATION DES COUVERTURES EXHAUSTIVES SERVANT À L'ANALYSE DE REPRÉSENTATIVITÉ

La base de données des sols de France

Cette base de données est une extraction de la base de données des sols d'Europe à l'échelle du 1/1 000 000 (1/1M). Celle-ci est issue de la digitalisation de la carte des sols d'Europe au 1/1M (CEC, 1985; King *et al.*, 1994), à laquelle ont été ajoutés des modifications et des compléments d'information (Jamagne *et al.*, 1994). La base est constituée d'Unités Typologiques de Sols (UTS) définies à l'aide de caractéristiques telles que le nom du sol en légende FAO modifiée UE (FAO, 1974; FAO, 1989; CEC, 1985), le nom du matériau parental UE (liste du Bureau Européen des Sols), la texture, la classe de pente, la profondeur racinaire, etc. À cette échelle, les UTS ne sont pas représentables graphiquement. Elles sont regroupées en Unités Cartographiques de Sols (UCS) qui constituent l'équivalent des associations de sols de la carte publiée en 1985. Le pourcentage de surface des UTS au sein des UCS est indiqué dans la base et il est utilisé pour estimer les fréquences de distribution des variables sur l'ensemble du territoire.

Dans cette étude, seules les variables « Nom du sol FAO-UE » et « matériau parental UE » sont utilisées. Les modalités de ces variables prennent des valeurs alphanumériques codées selon l'organisation hiérarchique des classifications utilisées. Par exemple, le code « Bdg » indique qu'il s'agit de la classe des Cambisols, de la sous-classe des distric Cambisols et que le sol possède des caractères d'oxydo-réduction (gleyic). Ce type de codage permet d'accéder au niveau souhaité de précision cartographique. La variable « Nom du sol FAO-UE » possède trois niveaux et la variable « matériau parental UE » en possède deux.

La carte géologique de France

Les données géologiques utilisées sont extraites de la sixième édition de la carte géologique de France publiée à l'échelle du 1/1M (BRGM, 1996). Parmi les différentes variables présentes dans la base de donnée issue de cette carte, les étages stratigraphiques ont été privilégiés. Afin de simplifier l'étude, ils ont été regroupés en 14 classes représentant des surfaces importantes du territoire français. Des regroupements selon la lithologie auraient été préférables mais celle-ci est très variable à cette échelle et, de plus, nous ne disposons pas d'information sur les formations superficielles.

La base de données météorologiques Aurhely

À partir des données issues des relevés ponctuels des stations météorologiques, Météo-France a développé une méthode d'interpolation (Aurhely) qui utilise l'environnement topographique de ces stations. La base de données résultante est constituée d'une couverture SIG maillée au pas de 5 km, chaque maille contenant une valeur estimée des précipitations moyennes calculées sur 30

Figure 2 - Exemple de la comparaison des fréquences de distribution des surfaces des différents types de sols entre le territoire français et les échantillons constitués respectivement par les cartes publiées (en gris) et les cartes levées (= cartes publiées + cartes en cours, en noir).

Figure 2 - Example of data distribution of the surface of soil types showing the comparison between the whole French territory and samples constituted by the published maps (grey) and surveyed maps (black = published maps + maps in progress).

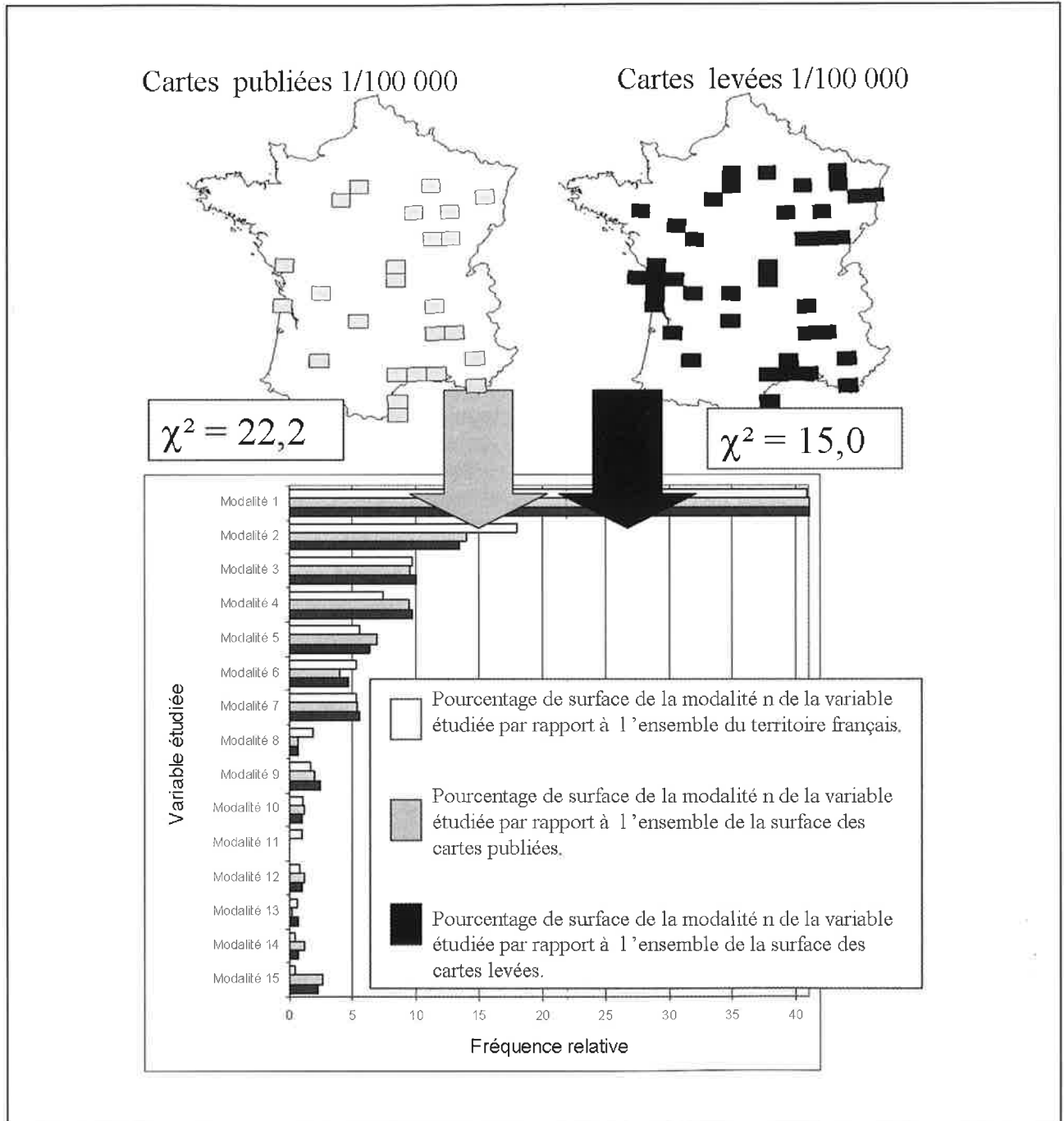
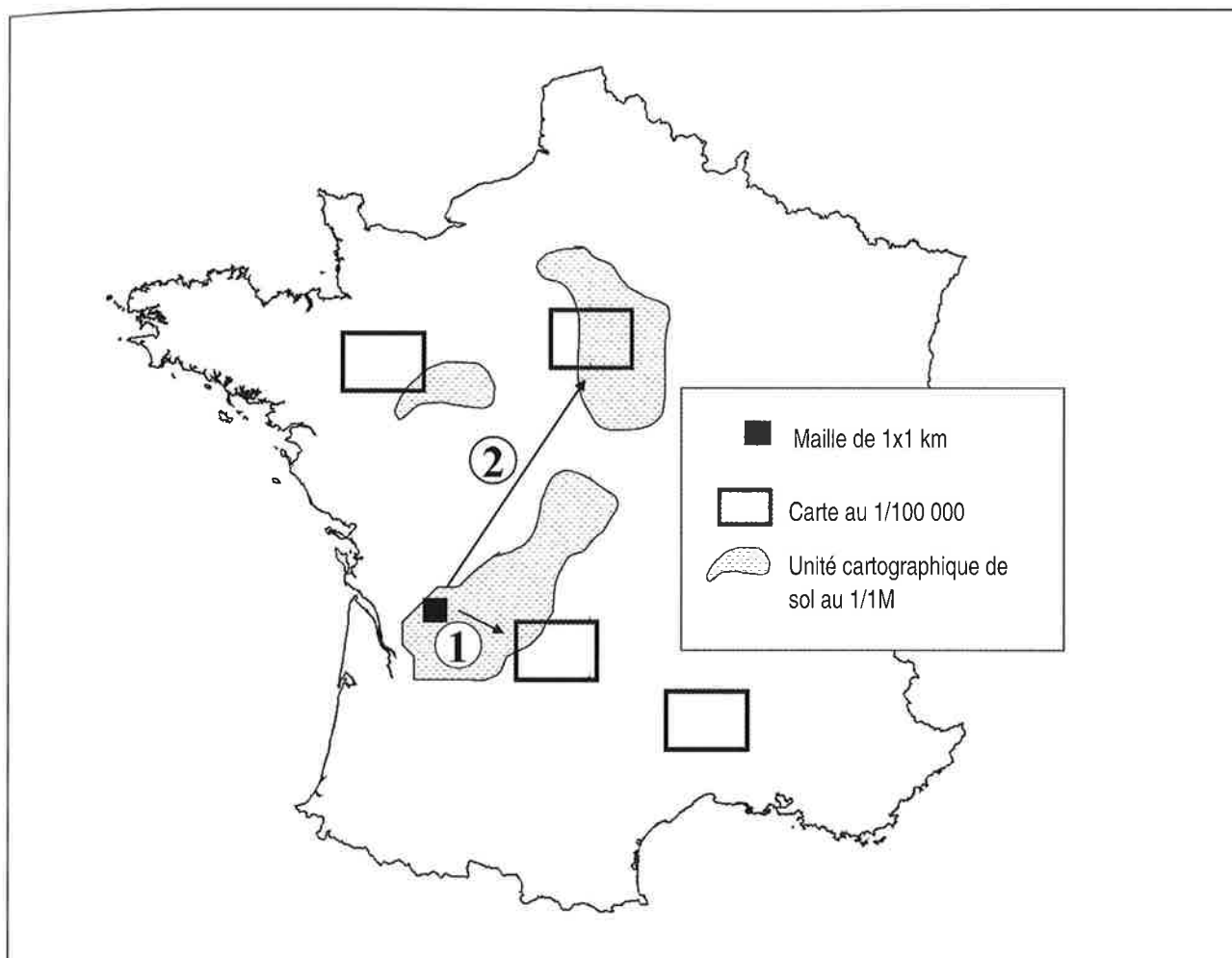


Figure 3 - Méthode de calcul de la distance entre :

- 1 - chaque maille 1x1 km du territoire et la carte la plus proche contenant l'unité cartographique dominante de cette maille,
- 2 - chaque maille 1x1 km du territoire et la carte où l'unité cartographique dominante est la plus présente.

Figure 3 - Geographical distance calculation between :

- 1 - each cell 1x1 km and the nearest map which contains the dominant soil mapping unit of this cell
- 2 - each cell 1x1 km and the map where the dominant soil mapping unit of this cell is most represented.



années. Afin d'établir des comparaisons similaires aux variables sols et géologiques, ces valeurs ont été recodées sous formes de 5 classes correspondant aux quintiles, chacune des classes représentant ainsi un cinquième de la surface du territoire français.

La base de données d'occupation du sol Corine Land Cover

Entre 1985 et 1992, l'Union Européenne a établi un relevé de l'occupation du sol à l'aide de photographies aériennes et d'images satellitaires. Le résultat est une base de données dénommée Land Cover et cartographiée à l'échelle du 1/100 000 (CEC, 1993). Les types d'occupation du sol sont codés selon trois niveaux hiérarchiques. La car-

tographie de ces trois niveaux est extrêmement précise. Pour la présente étude, les différences paysagères ont été regroupées en 13 classes selon les critères utilisés par le modèle aléa de l'érosion en France (Le Bissonnais *et al.*, 2000).

Le Modèle Numérique d'Altitude mondial

Le Modèle Numérique d'Altitude (MNA) est extrait de la base de données mondiale à la maille de 1x1 km (DMA, 1992; Hutchinson, 1989). L'inclinaison de la pente a été estimée à partir de ce MNA à l'aide du module GRID d'Arc/Info. Les valeurs obtenues ont été reclassées en sept classes à partir de valeurs seuils proches de celles indiquées dans la base de données des sols d'Europe.

RÉSULTATS

Recherche des modalités non rencontrées dans les cartes 1/100 000 pour des variables sélectionnées dans les couvertures nationales

Un examen préliminaire simple pour vérifier la représentativité d'un petit secteur pris comme échantillon est de contrôler si celui-ci recoupe toutes les valeurs prises par les variables sur l'ensemble du territoire. Pour toutes les couvertures, on constate que la quasi totalité des modalités sont présentes dans les 25 cartes 1/100 000 publiées (tableau 2, partie supérieure). Compte tenu de

la distribution géographique de ces cartes, il est assez logique que toutes les classes de sols, de pentes, de précipitations, d'étages géologiques et même d'occupations du sol soient présentes.

Il s'agit de savoir si ce résultat est dû à la définition assez large des classes qui ont été retenues, et si l'utilisation d'un nombre plus grand de classes aboutit au même résultat. Aussi, à partir de la base de données des sols de France au 1/1M, on s'est intéressé à l'effet de l'augmentation de la précision des variables « Nom du sol FAO-UE » et « Matériau Parental UE » sur le nombre de modalités absentes des cartes 1/100 000 (tableau 2, partie inférieure). Pour les niveaux de précision les plus faibles (niveaux 1), le nombre de modalité est égal ou voisin de zéro. Si l'on descend vers des classes plus détaillées (niveaux 2 puis 3), on trouve quelques modalités absentes restant toutefois en quantité extrêmement faible.

Tableau 2 - Nombre de modalités absentes des cartes 1/100 000 publiées du programme CPF et pourcentage de surface qu'elles représentent sur l'ensemble du territoire national français.

Table 2 - Number of modalities missing in the 1:100,000 published soil maps and percentage of surface on the whole French territory.

Couvertures (1)	Variables (1)	Nbre de modalités absentes de CPF	% surface en France
Géologie France 1/1M	Etage géologique regroupé	0	0,00
Relief MNA	Pente (7 classes)	0	0,00
Climat Aurhely	Précipitations (5 classes)	0	0,00
Occupation du sol	Classes Corine Land Cover	0	0,00
Sols Base France 1/1M	Nom du sol FAO-UE - niveau 1	2	0,05
Sols Base France 1/1M	Nom du sol FAO-UE - niveau 2	13	0,68
Sols Base France 1/1M	Nom du sol FAO-UE - niveau 3	25	1,50
Sols Base France 1/1M	Matériau Parental UE - niveau 1	0	0,00
Sols Base France 1/1M	Matériau Parental UE - niveau 2	3	0,97

(1) Les couvertures et les variables sont décrites dans le paragraphe « présentation des couvertures exhaustives »

Tableau 3 - Valeurs du Khi-Deux entre les fréquences de distribution sur le territoire français et les fréquences de distribution respectivement pour l'ensemble des cartes publiées 1/100 000 et l'ensemble des cartes 1/100 000 levées.

Table 3 - χ^2 values comparing the frequency distributions between the whole French territory and respectively the set of 1:100,000 published soil maps and the set of 1:100,000 surveyed soil maps.

Couvertures	Variables	ddl	χ^2			
			Cartes publiées	Cartes levées	Seuil 0,05	Seuil 0,95
Géologie France	Etage géologique regroupé	13	16,9	12,7	22,4	5,9
Relief MNA	Pente (7 classes)	6	2,5	2,5	12,6	1,6
Climat Aurhely	Précipitations (5 classes)	4	5,9	5,4	9,5	0,7
Occupation du sol	Classes Corine Land Cover	12	8,9	5,5	21,0	5,2
Sols Base France	Nom du sol FAO-UE - niv. 1	18	22,2	15,0	28,9	9,4
Sols Base France	Nom du sol FAO-UE - niv. 2	65	36,6	26,5	84,8	47,4
Sols Base France	Nom du sol FAO-UE - niv. 3	94	46,6	32,0	117,6	72,6
Sols Base France	Matériau Parental UE - niv. 1	8	8,8	9,2	15,5	2,7
Sols Base France	Matériau Parental UE - niv. 2	34	28,3	22,7	48,6	21,6

Pour chaque variable, le calcul du pourcentage de surface de l'ensemble des modalités absentes sur le territoire français n'excède pas 1,5 %.

Ce premier examen montre qu'à un niveau peu détaillé, les variables décrivant le milieu physique à l'échelle de l'ensemble du territoire français, sont bien représentées au sein des 25 cartes publiées 1/100 000. En particulier, les principaux types de sol sont recouverts par ces cartes si l'on se réfère à la légende FAO. Ce résultat est cohérent puisque la localisation des cartes a été souvent guidée par des objectifs de recherche. Ceux-ci ont visé, entre autres, l'identification de nouveaux types de sol afin d'élargir les connaissances en pédologie et cartographie des sols.

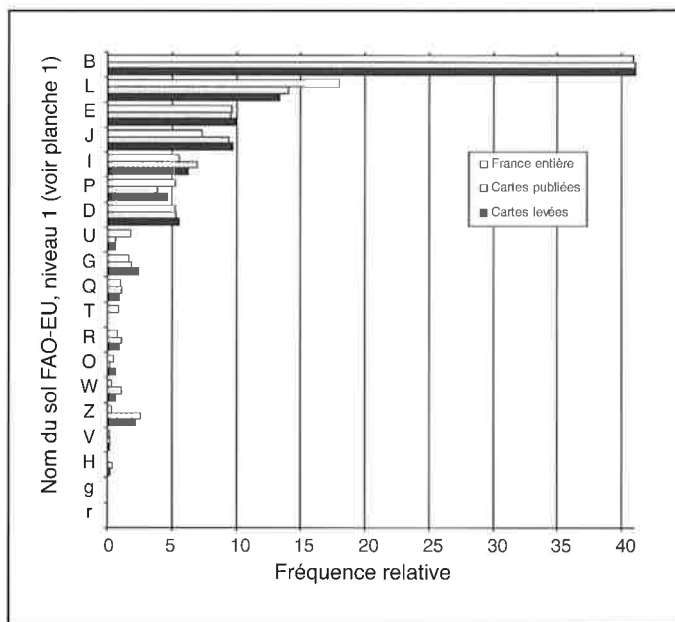
Comparaison des fréquences de distribution à l'aide du test de χ^2

Les principales modalités des couvertures examinées étant présentes au sein des cartes 1/100 000, il faut vérifier si les fréquences de distribution de ces classes sont les mêmes entre le territoire français et l'échantillon représenté par les cartes publiées 1/100 000. Les valeurs du χ^2 calculées sont toujours plus petites que les valeurs critiques de χ^2 au seuil de signification de 0,05 (tableau 3). On en conclut que l'on ne peut pas rejeter l'hypothèse selon laquelle les cartes 1/100 000 sont représentatives. Toutefois, les valeurs du χ^2 sont, dans la plupart des cas, plus grandes que les valeurs critiques au seuil de signification de 0,95 sauf pour les variables nom du sol FAO-UE niveaux 2 et 3. Les fréquences observées au sein des cartes 1/100 000 publiées diffèrent donc significativement des fréquences théoriques correspondant à l'ensemble du territoire français.

Les mêmes calculs effectués à partir des cartes levées 1/100 000 entraînent une diminution des valeurs de χ^2 . L'introduction des nouvelles cartes en cours de finition conduit donc globalement vers une meilleure représentation du territoire. Toutefois, les valeurs de χ^2 observées restent toujours supérieures aux valeurs critiques au seuil de 0,95 (seules les valeurs calculées pour les variables Nom du sol FAO-UE niveaux 2 et 3 restent plus petites que les valeurs théoriques). On en conclut que l'on pourrait utiliser les « échantillons » constitués par les cartes 1/100 000 (les 25 publiées ou mieux les 40 levées) pour établir des enquêtes statistiques nationales sur la nature ou l'usage des sols mais, pour établir des estimations nationales à partir de ces échantillons, on devra alors introduire un calcul correctif tenant compte des différences de fréquence de distribution entre le territoire national et ces cartes 1/100 000.

Figure 4 - Histogramme des fréquences de distribution de la variable « Nom du Sol FAO-EU, niveau 1 » : (1) pour l'ensemble du territoire français, (2) pour les cartes 1/100 000 publiées, (3) pour les cartes 1/100 000 levées. L'ordre des classes de sols, du haut vers le bas, est l'ordre décroissant des fréquences sur l'ensemble du territoire. La signification des modalités est précisée planche 1.

Figure 4 - Histogram of the data distribution of the variable "FAO-EU soil name level 1" : (1) for the whole French territory, (2) for the 1:100,000 published soil maps, (3) for the 1:100,000 surveyed soil maps. Classes are ordered from the top to the bottom according to the decreasing frequencies on the whole French territory. Modalities are described on planche 1.



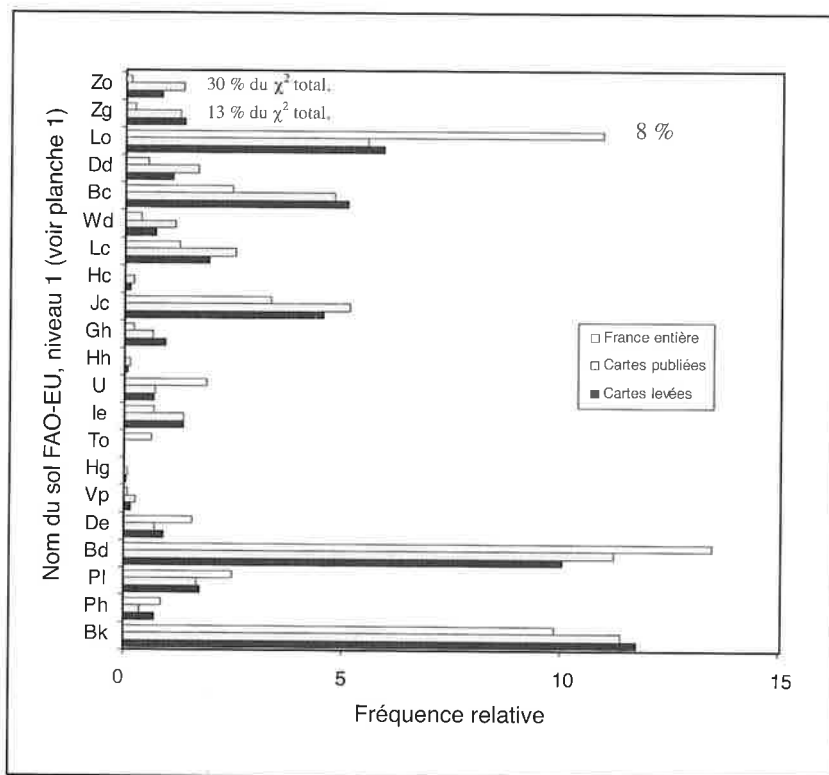
Fréquences de distribution des types de sol

Les résultats précédents méritent un examen plus détaillé car les valeurs de χ^2 ne donnent qu'une estimation « moyenne » de la comparaison entre deux populations. Certaines classes peuvent jouer un rôle déterminant sur cette moyenne alors qu'elles ne représentent qu'une très faible proportion du territoire. Présenter et discuter quelques histogrammes en détail est donc nécessaire afin d'identifier les classes sur-représentées ou sous-représentées au sein des cartes 1/100 000. Nous examinons tout d'abord les variables de la base de données des sols puis les variables des autres couvertures, notamment la géologie et l'occupation des sols.

Dans le cas de l'histogramme de distribution des types de sols (variable FAO-UE au niveau 1, figure 4), la plupart des fréquences obtenues par les cartes 1/100 000 (publiées ou levées) sont très proches de celles correspondant à l'ensemble du territoire. Notamment, l'estimation du pourcentage de surface de Cambisols avoisine 40 % pour les deux échantillons et la population totale. Par contre, les Luvisols (L) sont sous-estimés pendant que les Fluvisols (J) et les Lithosols (I) sont sur-

Figure 5 - Histogramme des fréquences de distribution de la variable « Nom du Sol FAO-EU, niveau 2 » : (1) pour l'ensemble du territoire français, (2) pour les cartes 1/100 000 publiées, (3) pour les cartes 1/100 000 levées. L'ordre des classes de sols, du haut vers le bas, est l'ordre décroissant des contributions de chaque classe au calcul du χ^2 (ce classement permet de visualiser les 20 premières classes contribuant le plus à la valeur totale du χ^2 , soit ici 93 %). La signification des modalités est précisée *planche 1*.

Figure 5 - Histogram of the data distribution of the variable "FAO-EU soil name level 2" : (1) for the whole French territory, (2) for the 1:100,000 published soil maps, (3) for the 1:100,000 surveyed soil maps. Classes are ordered from the top to the bottom according to the contribution of each class to the χ^2 calculation. (this method shows the first 20 classes contributing to the χ^2 , here 93%). Modalities are described on *planche 1*.



estimés. Vers les fréquences les plus faibles, les différences, bien que moins visibles sur la *figure 4*, sont proportionnellement plus importantes. On remarque notamment la sur-estimation des solonchaks (Z) qui intervient pour plus de 55 % dans le calcul du χ^2 alors que sa surface n'atteint pas 0,3 % de la France. Globalement, les résultats sont remarquables puisque la plus grande différence (classe des Luvisols L) ne dépasse pas 4 %.

En examinant les différences à un niveau plus détaillé de la légende FAO (sous-classe de sol correspondant au niveau 2 du nom du sol FAO-UE), on constate qu'il peut y avoir des nuances entre les sur-estimations et sous-estimations à l'intérieur d'une même classe. Sur la *figure 5*, les fréquences de distribution des sous-classes de sols sont représentées par ordre décroissant du haut vers le bas de leur contribution au résultat du χ^2 . Parmi les 66 classes présentes sur le territoire français, seules les 20 premières classes contribuant le plus à ce calcul sont indiquées. Ces 20 sous-classes interviennent pour 93 % dans la valeur du χ^2 et les 46 sous-classes restantes montrent des fréquences quasi égales entre les échantillons et la population totale. Parmi les Luvisols (L) examinés précédemment, la sous-classe des Orthic Luvisols (Lo) reste sous-estimée par les cartes 1/100 000 mais la sous-classe des Chromic Luvisols (Lc) est sur-estimée. De façon plus marquée, on constate que les Cambisols (B) n'ont pas du tout la même représentation selon leur degré de saturation (Calcic Cambisols (Bc) sur-estimés, Distric Cambisols (Bd) sous-estimés). Les Solonchaks

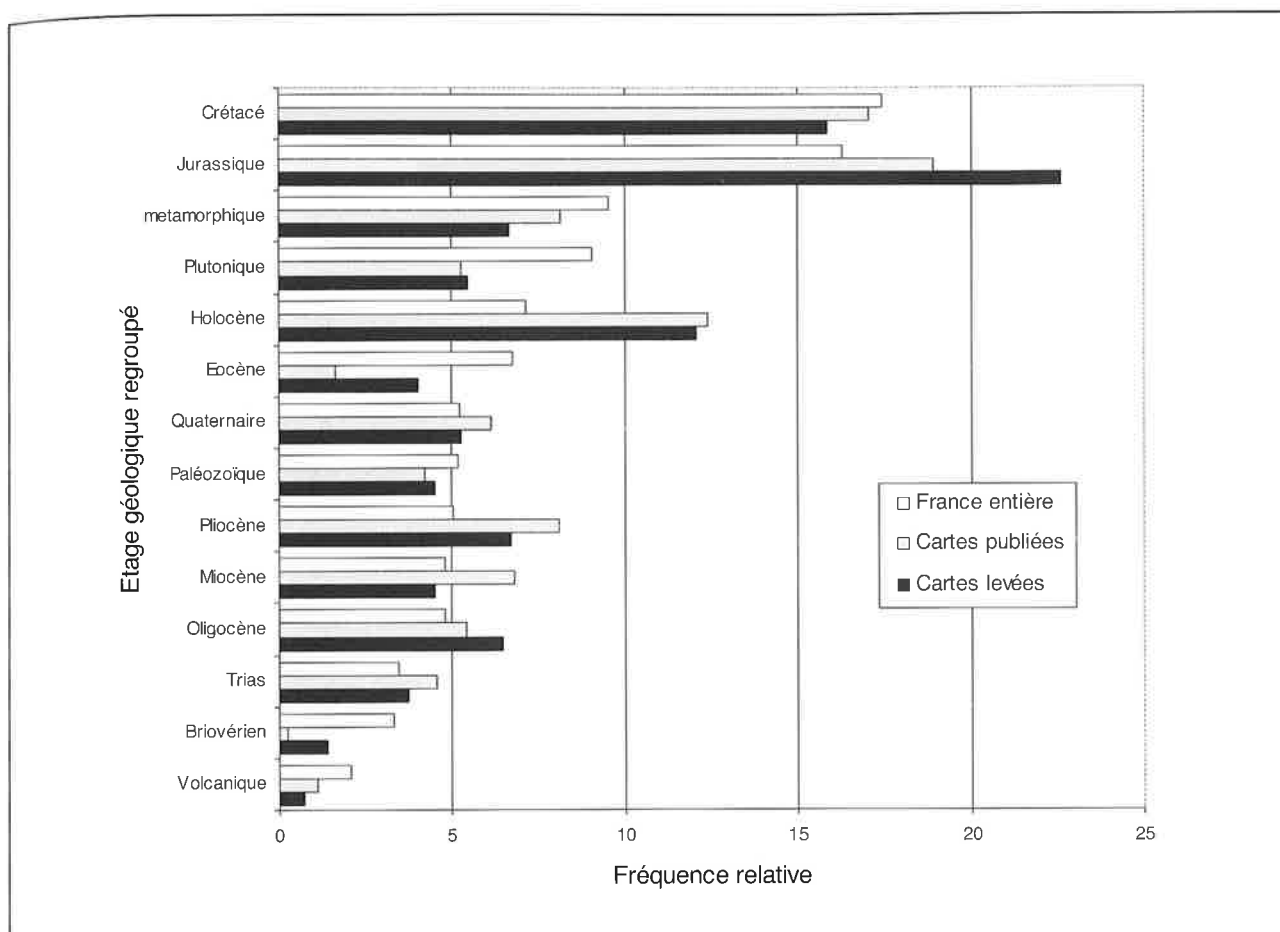
restent par contre toujours sur-estimés qu'ils soient Gleyic (Zg) ou Orthic (Zo).

Au niveau 3 du nom du sol FAO-UE, les résultats sont les mêmes qu'au niveau 2. Les principales conclusions sont donc une sous-représentation un peu inattendue des Orthic Luvisols (Lo) pourtant largement étudiés au plan scientifique. La sous-représentation des Distric Cambisols (Bd) ainsi que des Rankers (U) et des Andosols (To) provient d'un nombre plus faible de cartes 1/100 000 en montagne et plus généralement dans les massifs cristallins. La sur-représentation des Solonchaks (Z) est due à des cas particuliers relevant de travaux spécifiques de recherche (exemple des travaux de Salin, 1969 et de Servant, 1975). La sur-représentation de certains types de sols comme les Distric Podzoluvisols (Dd) ou les Distric Planosols (Wd) serait due soit à une sous-estimation de la surface de ces sols lors de l'élaboration du 1/1M, soit à des difficultés de conversion entre les classifications de sols (de CPCS vers FAO).

L'examen détaillé de ces différences ne doit pas masquer le résultat principal qui est une bonne adéquation entre les pourcentages de surface des types de sols présents dans les cartes 1/100 000 et ceux présents sur l'ensemble du territoire national. Cette bonne représentativité pourrait indiquer une relation de dépendance réciproque entre l'élaboration des cartes CPF 1/100 000 et la base de données au 1/1M. Considérer d'autres couches d'information est un moyen complémentaire de mesurer la représentativité du programme CPF et d'approfondir cette discussion.

Figure 6 - Histogramme des fréquences de distribution de la variable « Etage géologique regroupé » : (1) pour l'ensemble du territoire français, (2) pour les cartes 1/100 000 publiées, (3) pour les cartes 1/100 000 levées. L'ordre des classes de sols, du haut vers le bas, est l'ordre décroissant des fréquences sur l'ensemble du territoire.

Figure 6 - Histogram of the data distribution of the variable "Geological formation": (1) for the whole French territory, (2) for the 1:100,000 published soil maps, (3) for the 1:100,000 surveyed soil maps. Classes are ordered from the top to the bottom according to the decreasing frequencies on the whole French territory.



Examen des couches d'information représentant des facteurs de la pédogenèse

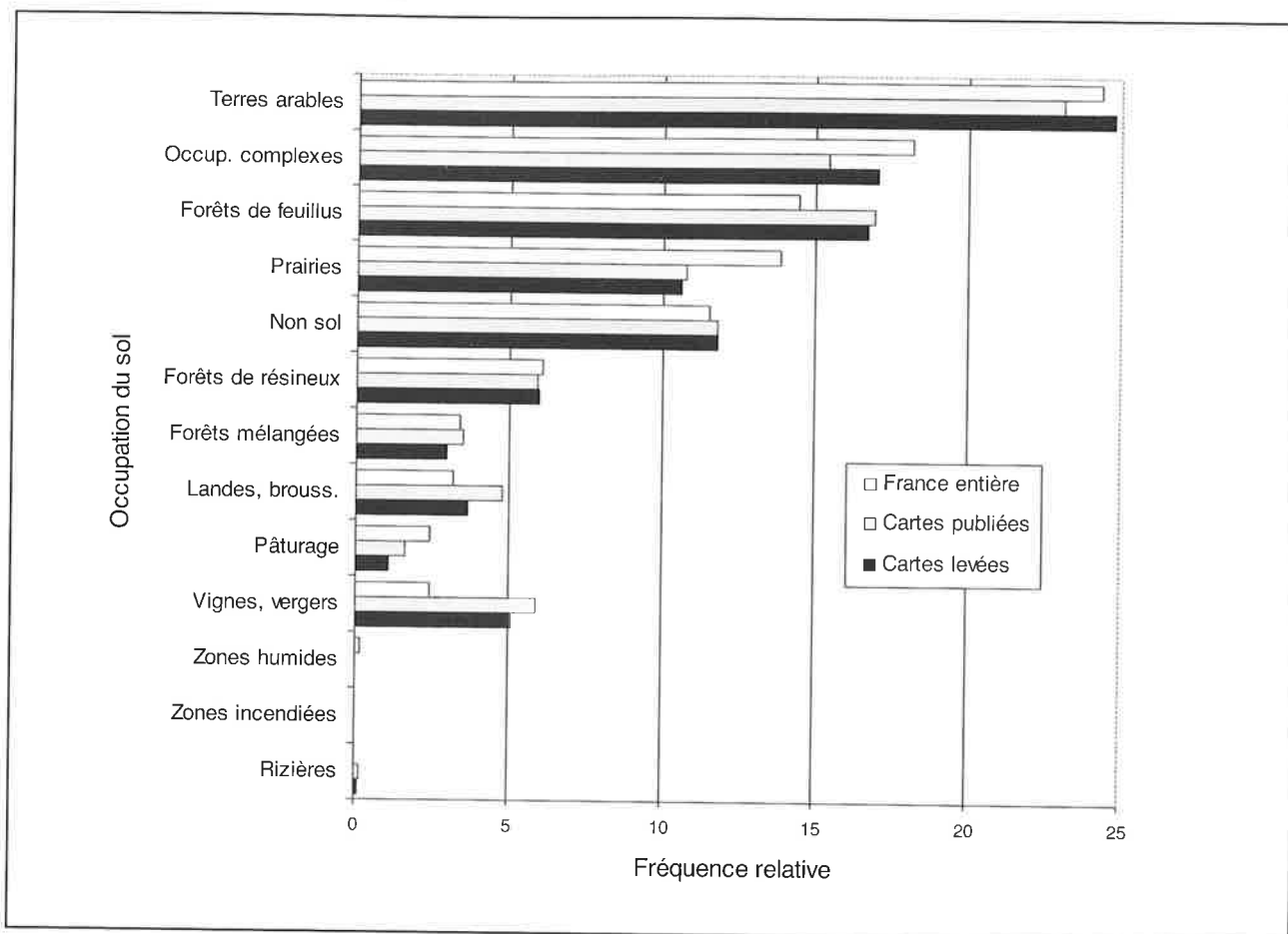
La majorité des classes géologiques montre des fréquences de distribution du même ordre de grandeur entre les cartes 1/100 000 et le territoire national (figure 6). Cependant, quelques classes présentent des différences marquées. Le Jurassique est sur-représenté surtout dans l'ensemble des cartes levées. Cela correspond à une forte concentration de cartes dans l'Est de la France sur l'auréole jurassique du Bassin Parisien. Ce résultat va dans le même sens que la sur-représentation des Calcic et Calcariques Cambisols (Bc et Bk). Les roches métamorphiques et plutoniques, ainsi que le Briovérien et les roches volcaniques sont largement sous-représentées au sein des cartes 1/100 000. Ce

constat est le même que celui mis en évidence pour les sols. Il confirme le nombre plus faible de surfaces cartographiées au 1/100 000 sur les massifs anciens et les montagnes. L'Eocène est peu représenté contrairement à l'Oligocène et au Pliocène. Cela est dû au faible nombre de cartes dans le Nord de la France où l'Eocène est très largement représenté. Enfin, les alluvions holocènes sont sur-représentées, résultat qui va également dans le même sens que celui obtenu avec la sur-représentation des Fluvisols (J).

L'histogramme des fréquences de distribution des classes de pente indique que toutes les classes sont bien représentées sauf les deux plus extrêmes. La classe « 0-1 % » est sur-représentée tandis que la classe « > 30 % » est sous-représentée. Cela reflète la différence entre les zones de plaines et de montagnes déjà évoquée précédemment.

Figure 7 - Histogramme des fréquences de distribution de la variable « Occupation du sol » : (1) pour l'ensemble du territoire français, (2) pour les cartes 1/100 000 publiées, (3) pour les cartes 1/100 000 levées. L'ordre des classes de sols, de gauche à droite sur l'axe des x, est l'ordre décroissant des fréquences sur l'ensemble du territoire.

Figure 7 - Histogram of the data distribution of the variable "Land cover" : (1) for the whole French territory, (2) for the 1:100,000 published soil maps, (3) for the 1:100,000 surveyed soil maps. Classes are ordered from the left to the right according to the decreasing frequencies on the whole French territory.



L'histogramme des classes de précipitation est plus difficile à interpréter puisque les classes de faibles et fortes précipitations sont sous-représentées au profit des classes moyennes.

Enfin, l'histogramme des classes d'occupation des sols montre une très bonne adéquation entre les fréquences de distribution des cartes 1/100 000 et l'ensemble du territoire (figure 7). Les classes de prairie, de pâturage et d'occupation complexe sont sous-représentées. Elles correspondent aux sols acides sur matériaux cristallins. De même, la sur-représentation des vignes et vergers correspond certainement aux zones alluviales. Par contre, les forêts de feuillus sont légèrement sur-représentées sans rapport immédiat avec les résultats obtenus avec les autres couches d'information.

D'une façon générale, l'étude de ces histogrammes fournit une grande convergence des résultats. Ils confirment que la localisation

d'un grand nombre de cartes 1/100 000 a été choisie dans des plaines sédimentaires, et ciblée de façon plus particulière au sein ou autour de zones alluviales récentes (se reporter à la planche 1). La sous-représentation des massifs cristallins anciens et des montagnes récentes est constatée dans tous les cas. Par contre, la sous-représentation des luvisols (L) n'est pas directement perceptible au travers de l'étude des autres couches d'information. Cela est certainement dû à l'absence des formations superficielles, notamment des formations loessiques, sur la carte géologique à cette échelle. Enfin, la relative sur-représentation de certains sols acides (Wd, Dd, Rd, Po) pourrait être mise en relation avec la sur-représentation de certaines zones forestières mais cette interprétation mériterait une analyse spatiale plus détaillée impliquant le croisement géographique des différentes couvertures utilisées.

Unités Cartographiques de Sols du 1/1M recoupées ou à proximité des cartes 1/100 000

La surface des Unités Cartographiques de Sols (UCS) non atteintes par une carte 1/100 000 publiée représente 27 % du territoire national (*figure 8a*). Les régions principalement concernées sont le Nord Ouest et l'Ouest de la France ainsi que les régions de hautes montagnes. Les UCS recoupées 3 fois et plus représentent 24 % et mettent en évidence les zones d'influence des centres de cartographie les plus impliqués dans le programme CPF (Montpellier, Nancy, Versailles-Orléans).

Le fait de savoir qu'une UCS est recoupée ou non par une carte 1/100 000 ne suffit pas pour affirmer que la connaissance pédologique de cette UCS (ou de la région qu'elle représente) est acquise. Lors de l'élaboration de la carte des sols au 1/1M, les unités cartographiques proposées dans les premières esquisses ont été regroupées afin de limiter leur nombre et d'obtenir une carte harmonisée à l'échelle européenne (Tavernier, comm. orale). On fait l'hypothèse qu'une carte 1/100 000 est plus représentative des UCS situées à proximité de cette carte que des UCS éloignées. Sur la *planche 2a*, on note que la plupart des UCS proches géographiquement des cartes 1/100 000 sont présentes dans ces cartes. En effet, les auréoles de couleur autour des cartes sont progressives (vert puis jaune). La *planche 2a* met tout de même en évidence quelques nouvelles zones où les cartes 1/100 000 risquent de ne pas être de bonne référence (couleur rouge clair). Ainsi, 16 % de la surface des UCS recoupées par une carte 1/100 000 se situe à plus de 100 km de la carte 1/100 000 la plus proche où cette UCS est présente. On note en particulier le nord du Bassin Parisien, le Limousin, le nord des Alpes, une grande partie du Bassin Aquitain. Cumulées avec les surfaces des UCS jamais recoupées par des cartes 1/100 000 (en rouge sur la *planche 2a*), on atteint 43 % du territoire considéré comme insuffisamment représenté par les cartes publiées du programme CPF.

Un calcul similaire est réalisé en s'intéressant, non pas à la carte la plus proche mais à la carte où l'UCS est la plus représentée. Sur la *planche 2b*, on constate que certaines cartes peuvent être considérées comme « représentatives » des régions avoisnantes (cas de la carte de Condom au Sud-Ouest où l'auréole régulière de dégradé des couleurs indique que toutes les UCS sont définies dans cette carte). D'autres, au contraire, sont constituées d'UCS majoritairement présentes dans des cartes parfois éloignées (cas de la carte Saint Etienne, constituée de plusieurs UCS de couleur rouge clair indiquant qu'elles sont définies majoritairement dans des cartes éloignées). Avec ces nouveaux résultats, on obtient 52 % du territoire considéré comme insuffisamment représenté par les cartes publiées du programme CPF (cumul des UCS jamais recoupées et des UCS à plus de 100 km de la carte où elles sont les plus représentées).

DISCUSSION

Influence du programme CPF sur l'élaboration de la base de données des sols de France à l'échelle du 1/1M

La représentativité des cartes 1/100 000 est principalement analysée à partir de la base de données des sols de France au 1/1M. La première version de cette base provient de la numérisation de la carte publiée à cette échelle en 1985 (Platou *et al.*, 1989). Or, à cette date, 16 cartes 1/100 000 étaient déjà publiées et la plupart des autres étaient en cours de levés. Cette carte publiée en 1985 est elle-même issue de la carte publiée en 1966 (Dupuis, 1966), date à laquelle 13 cartes 1/100 000 annoncent que leurs levés étaient déjà en cours. Il peut donc exister un biais dans notre analyse de représentativité puisque ce sont les mêmes connaissances (ou tout du moins les mêmes experts) qui ont instruit les deux programmes (1/100 000 et 1/1M).

Pourtant, plusieurs arguments ne confirment pas cette hypothèse. Tout d'abord, on constate qu'il n'y a pas nécessairement de rapport direct entre les informations contenues dans les notices et légendes des cartes 1/100 000 et les informations extraites de la base 1/1M. Par exemple, le nombre d'UCS/100 définies au 1/100 000 par les auteurs de chaque carte CPF est sans relation avec le nombre d'UCS définies au 1/1M et présentes dans ces mêmes cartes (coefficient de corrélation proche de zéro ; $r_{UCS} = -0,06$). Le même résultat est obtenu avec les Unités Typologiques de Sol ($r_{UTS} = -0,03$). Deux éléments peuvent expliquer ce type de résultat. Premièrement, l'harmonisation des travaux à l'échelle européenne a pu niveler les différences de précision d'une carte 1/100 000 à l'autre. Deuxièmement, plusieurs informations autres que celles issues du programme CPF ont servi dans l'élaboration de la carte au 1/1M, par exemple : les travaux des compagnies d'aménagement (Hardy, 1992 ; Duclos, 1994), les études de secteur de référence drainage (Favrot, 1987) et les divers programmes de cartographie régionale (Bornand, 1997 ; King *et al.*, 1999).

Ensuite, si l'élaboration de la base de données des sols de France au 1/1M dépendait explicitement des cartes 1/100 000, on ne devrait pas observer de zones jamais recoupées par ces cartes 1/100 000. Or c'est le cas pour un quart du territoire français.

Enfin, l'analyse de représentativité avec les autres couches d'information confirme les résultats obtenus avec la base 1/1M des sols de France, à savoir : (1) toutes les classes des variables sont observées dans les cartes 1/100 000 ; (2) les tests de χ^2 ne permettent pas de rejeter l'hypothèse que ces cartes 1/100 000 sont représentatives du territoire français ; (3) quelques classes sont nettement sur ou sous-représentées. Cette convergence de résultats à partir de couches d'information acquises indépendamment des programmes pédologiques permet donc de limiter le doute sur l'influence réciproque entre les cartes 1/100 000 et la base sols au 1/1M.

Apport complémentaire des cartes 1/100 000 en cours

15 cartes 1/100 000 sont en cours de levés, de rédaction ou de publication. La question est de savoir si ces 15 cartes supplémentaires vont améliorer globalement la représentativité du programme CPF. Les mêmes méthodes ont été appliquées à l'échantillon constitué des 25 cartes publiées et des 15 cartes en cours (soit 40 cartes levées au total).

Comme nous l'avons vu précédemment, l'introduction de ces 15 nouvelles cartes améliore les valeurs de χ^2 quelle que soit la couche d'information analysée (tableau 3). Toutefois, ces valeurs n'atteignent pas les valeurs critiques nécessaires à une bonne représentativité du programme CPF. On peut également noter sur les histogrammes des figures 4 à 7 que l'apport de 15 nouvelles cartes ne modifie pas de façon notable les courbes de distribution. Par contre, avec 40 cartes, il ne reste plus que 13 % de la France ayant des UCS de la base sols au 1/1M non atteintes par une carte 1/100 000 (figure 8b). Avec ces mêmes 40 cartes, 12 % de la surface des UCS se trouve à une distance supérieure de 100 km de la carte 1/100 000 où elle est la plus représentée. Enfin, les planches 2c et 2d permettent d'identifier les régions qui nécessitent le plus l'ouverture de nouveaux chantiers cartographiques.

En résumé, ces différents résultats montrent que ces 15 cartes supplémentaires apporteront des informations nouvelles. Elles ne parviendront pas toutefois à couvrir toute la diversité pédologique du territoire français puisqu'environ 25 % du territoire restera insuffisamment connu (cumul des UCS jamais recoupées et des UCS à plus de 100 km de la carte 1/100 000 la plus proche). Deux pistes sont proposées : d'une part, il faut relancer des programmes de cartographie restés à l'état de levés partiels ou de maquettes (par exemple, dans les zones de montagnes : Chamonix-Thonon, Céret-Mont-Louis, Saint-Claude...), d'autre part, il faut promouvoir l'ouverture de nouveaux chantiers dans des zones insuffisamment inventoriées. Si la publication sous forme papier représente un temps trop long et un coût trop élevé, il faut mettre la priorité sur la formalisation sous forme informatique des données pédologiques.

Prise en compte des autres programmes de cartographie à moyenne échelle

Par ailleurs, il existe de nombreuses autres études cartographiques réalisées aux moyennes échelles et harmonisées dans le cadre de programmes régionaux ou départementaux (du 1/25 000 au 1/200 000, Bornand, 1997) : par exemple, la publication de la carte des sols de l'Aisne (Jamagne, 1967) ou celle de la Région Centre (Studer *et al.*, 1982). La prise en compte de ces documents devrait éliminer des zones jugées insuffisamment connues par la présente étude. L'inventaire de ces études est répertorié dans un document (Hardy *et al.*, 1999) et il constituera la future base de données Réfersols accessible sur internet. L'analyse de représentativité proposée dans cet article sera à reprendre avec ce nouvel échantillon de cartes lorsque les périmètres des études seront tous numérisés.

La représentativité de ce nouvel ensemble plus complet de cartes devrait être nettement améliorée puisque les programmes régionaux ont été complémentaires du programme CPF. Il faut noter que les différentes cartes enregistrées dans la base Réfersols ne constituent pas un ensemble harmonisé des connaissances au même titre que le programme CPF. Toutefois, l'informatisation des données devrait permettre de résoudre les problèmes d'accessibilité, de standardisation et de mémorisation de ces données. Ce travail apparaît urgent à réaliser compte tenu du départ à la retraite de la majorité des auteurs et de l'absence de renouvellement des compétences. Les moyennes échelles ne sont pas les seules concernées (Bornand, 1997). Il existe notamment un grand nombre d'informations au sein des études sur les secteurs de référence (Favrot, 1989). Ces informations mériteraient de façon tout aussi urgente d'être structurées dans une base de données commune rassemblant les connaissances pédologiques du territoire français.

Généralisation de la méthode à d'autres pays ou d'autres thèmes

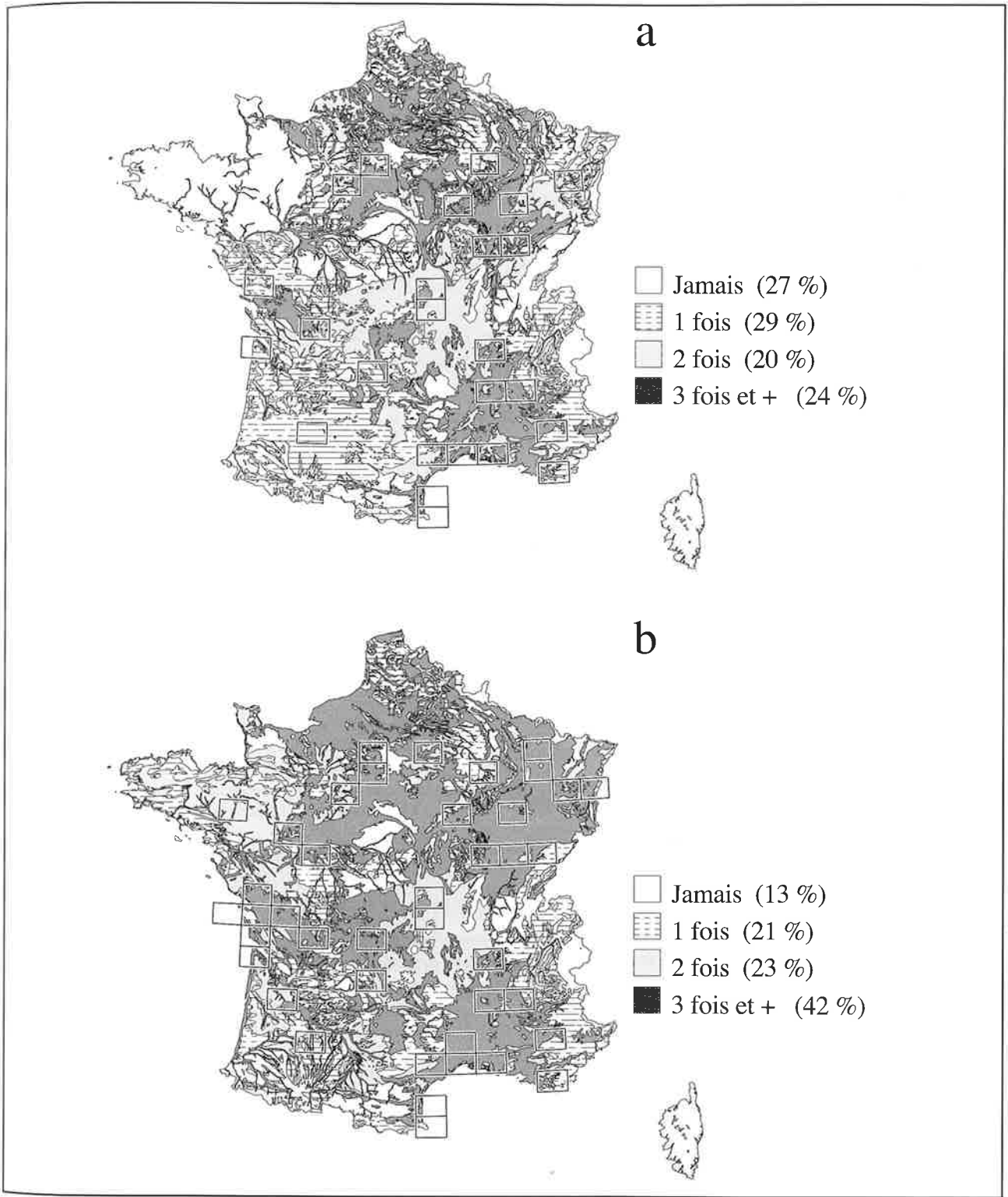
Les programmes d'inventaire systématique ont fortement régressé au cours de la dernière décennie, quel que soit le thème traité et quel que soit le pays. Par contre, des moyens importants ont été investis soit pour développer des programmes d'acquisition numérique (notamment avec les observations satellitaires), soit pour informatiser et mémoriser sous forme de base de données les connaissances acquises dans le passé. Pour ce deuxième cas, et parfois pour le premier, on ne dispose pas d'une couverture complète des territoires. Ainsi, comme pour le programme CPF, la question se pose de connaître la représentativité de l'échantillon constitué par les zones déjà cartographiées.

Les méthodes proposées dans cet article donnent un premier exemple d'analyse de cette représentativité. Elles se fondent sur la disponibilité de couvertures exhaustives sur l'ensemble du territoire étudié. Elles utilisent des comparaisons statistiques et graphiques entre le territoire complet et l'échantillon constitué par les zones cartographiées à plus grande échelle. Les critères proposés peuvent être utilisés dans tous les cas de figures : surfaces des modalités jamais rencontrées dans l'échantillon, test de χ^2 entre population totale (distribution théorique) et échantillon (distribution observée), comparaison des courbes de fréquence de distribution, cartographie des unités cartographiques jamais atteintes par l'échantillon, distance aux zones cartographiées les plus proches.

La principale difficulté tient dans l'existence (ou la disponibilité) de couvertures exhaustives contenant des données pertinentes à l'échelle de l'ensemble du territoire étudié. La seconde difficulté est liée aux relations pouvant exister entre les cartes réalisées à grande échelle et les couvertures exhaustives disponibles à petites échelles. Par ailleurs, plus les thèmes demandés seront ciblés, plus il sera difficile d'analyser la représentativité d'une carte par rapport à une zone plus large. Il est alors nécessaire de vérifier pour le thème traité la validité d'un transfert d'échelle entre les cartes 1/100 000 et les informations du 1/1M.

Figure 8 - a) Nombre de fois où une UCS de la base 1/1M des sols de France est atteinte par une carte 1/100000 publiée du programme CPF. **b)** Nombre de fois où une UCS de la base 1/1M des sols de France est atteinte par une carte 1/100000 levée du programme CPF (=publiée + en cours)

Figure 8 - a) Number of occurrences where a soil mapping unit of the French soil database at 1:1M is reached by a 1:100,000 published soil map. **b)** Number of occurrences where a soil mapping unit of the French soil database at 1:1M is reached by a 1:100,000 surveyed soil map (surveyed = published + in progress).



CONCLUSION

Beaucoup d'inventaires cartographiques des sols dans le monde, et en particulier en Europe, restent inachevés faute de moyens suffisants. Le programme « Connaissance Pédologique de la France » (CPF) à l'échelle du 1/100000 est un bon exemple puisque son objectif initial était un inventaire exhaustif de la France et que les cartes publiées ou en cours ne représentent que 15 % du territoire. Toutefois, une analyse des documents correspondant aux 24 cartes publiées montre que ce programme rassemble un ensemble de connaissances harmonisées et fondamentales dans les domaines de la typologie et de l'organisation spatiale des sols. Pour savoir s'il faut arrêter ou poursuivre ce type de programme, il faut connaître la représentativité des zones étudiées par rapport aux zones non prospectées.

Sur la base des typologies présentes dans plusieurs couvertures d'information disponibles à l'échelle nationale (sols, étages géologiques, pentes, précipitations, occupations du sol), on constate que les 24 cartes publiées CPF recourent toute la diversité des modalités rencontrées. Ceci est vérifié en particulier pour la typologie des sols issue de la base de données des sols de France au 1/1M. L'hypothèse d'une influence réciproque étroite entre l'élaboration de cette base et celle des cartes au 1/100000 peut être minimisée puisque l'on constate que, croisées avec les couches d'information issues de travaux menés indépendamment de la pédologie, les cartes 1/100000 recourent de la même façon la diversité des types d'étages géologiques, de classes pluviométriques, de pentes et d'occupations des sols.

De façon globale, les cartes 1/100000 du programme CPF montrent des fréquences de distribution de leurs types de sols similaires à celles calculées sur l'ensemble du territoire. Ce résultat, appuyé par des tests de χ^2 , souligne la bonne représentativité des cartes 1/100000 publiées. Cependant, un examen au niveau des Unités Cartographiques de Sols de la base sols au 1/1M (UCS) aboutit à un résultat sensiblement différent. On note en effet que 27 % de la surface française est composée d'UCS qui ne sont jamais recoupées par une carte 1/100000. De plus, 16 % de la surface française appartenant à des UCS recoupées par une carte 1/100000, est à plus de 100 km de cette carte. Sur ce constat, on peut donc considérer que 43 % de la surface française est « insuffisamment connue » (naturellement, au regard du seul programme CPF).

En prenant en compte les 15 cartes en cours d'acquisition ou de publication, on améliore la représentativité du programme CPF. Les valeurs de χ^2 diminuent pour toutes les couches d'information. De même, le cumul des surfaces non recoupées ou éloignées de plus de 100 km de la carte la plus proche chute à 25 %, ce qui reste encore une valeur élevée à l'échelle du territoire.

Il existe d'autres programmes de cartographie menés régionalement à des échelles proches de celle du programme CPF. La digitalisation des périmètres des études recensées dans la base de données Référents permettra l'application de la méthodologie proposée. On peut espérer une diminution des surfaces « insuffisamment

connues » car les programmes régionaux ont été dans certains cas complémentaires des travaux CPF. Il faut toutefois noter que ces programmes ne présenteront pas le même degré de standardisation avancée que le programme CPF, d'où l'urgence d'harmoniser et de mettre en mémoire ces données dans des bases informatisées pour mieux les intégrer à la connaissance déjà existante des sols de France.

La méthode proposée pour l'analyse de la représentativité du programme CPF peut s'appliquer plus généralement dans d'autres contextes, que ce soit pour d'autres programmes et/ou d'autres territoires. Au-delà de l'analyse statistique de représentativité, la méthode permet de localiser les zones insuffisamment connues et donc d'orienter le choix de nouvelles prospections. De cette façon, on espère atteindre un niveau satisfaisant de représentativité des zones étudiées par rapport à l'ensemble du territoire. On valorise ainsi des programmes d'inventaire sans couvrir l'exhaustivité de ce territoire. Il restera toutefois à mettre en œuvre ou à développer des méthodes de généralisation spatiale (Lagacherie *et al.*, 1997) des connaissances acquises à partir des secteurs cartographiés vers les régions non prospectées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Marcel Jamagne et Michel Bornand pour leurs conseils et leurs encouragements dans la réalisation de ce travail. Ils remercient également les organismes ayant fourni les informations à l'échelle du territoire français, le BRGM pour la base de données géologiques au 1/1M, l'INRA et le CCR pour la base de données 1/1M des sols d'Europe, l'IFEN pour la base CORINE land cover et Météo-France pour les données de précipitations.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D., 1983 - Les planosols de Champagne humide. Pédogénèse et fonctionnement. Thèse Doc. Etat. Université de Nancy. 358 p.
- Benichou P. et Le Breton O., 1987 - Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques : la méthode Aurelhy. In : Agrométéorologie des régions de moyenne montagne. Les colloques de l'INRA, Paris. 51-69.
- Blöschl G., Sivapalan M., 1995 - Scale issues in hydrological modelling : a review. Hydrological processes. 9 251-290.
- Bornand M., 1978 - Altération des matériaux fluvioglaciers, genèse et évolution des sols sur terrasses quaternaires dans la moyenne vallée du Rhône. Thèse Doc. Etat - USTL Montpellier 329 p.
- Bornand M., 1997 - Connaissance et suivi de la qualité des sols en France. Etat des lieux, enjeux, besoins en données, proposition pour une gestion raisonnée de la ressource en sol. Rapport d'expertise du ministère de l'agriculture, du ministère de l'environnement et de l'INRA. Montpellier. 176 p.
- Bourennane H., 1997 - Etude des lois de distribution spatiale des sols de Petite Beauce. Application à la cartographie d'un horizon par couplage de méthodes morphométriques et géostatistiques. Thèse Université Orléans. 237 p.
- BRGM, 1996 - Carte géologique de la France au millionième. 6^e édition. Guide de Lecture. Service Géologique Nationale. Editions BRGM. 8 p.
- Bullock P., 1999 - Soil resources of Europe, an overview. In : Soil Resources of

Planche 1 - Exemple du calage des cartes 1/100 000 sur la partie française de la base de données des sols d'Europe à l'échelle du 1/1 000 000 (1/1M).

Planche 1 - Example showing the overlay of the 1:100,000 soil maps on the French part of the soil database of Europe at 1:1,000,000 scale (1:1M).

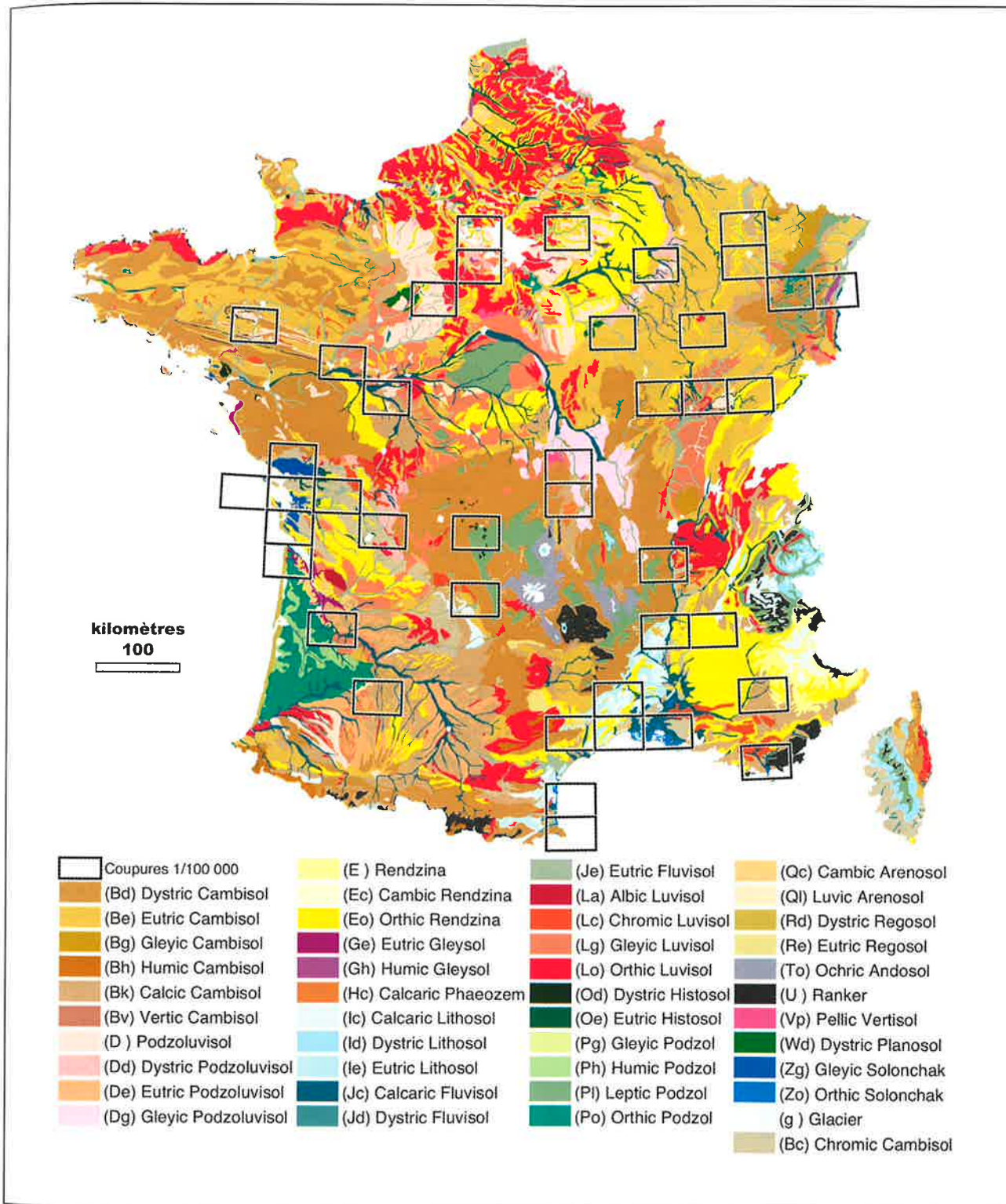


Planche 2 - a) Distance en km à la carte 1/100 000 publiée la plus proche où l'UCS est présente,

b) Distance en km à la carte 1/100 000 publiée la plus proche où l'UCS est la plus représentée,

c) Distance en km à la carte 1/100 000 levée la plus proche où l'UCS est présente,

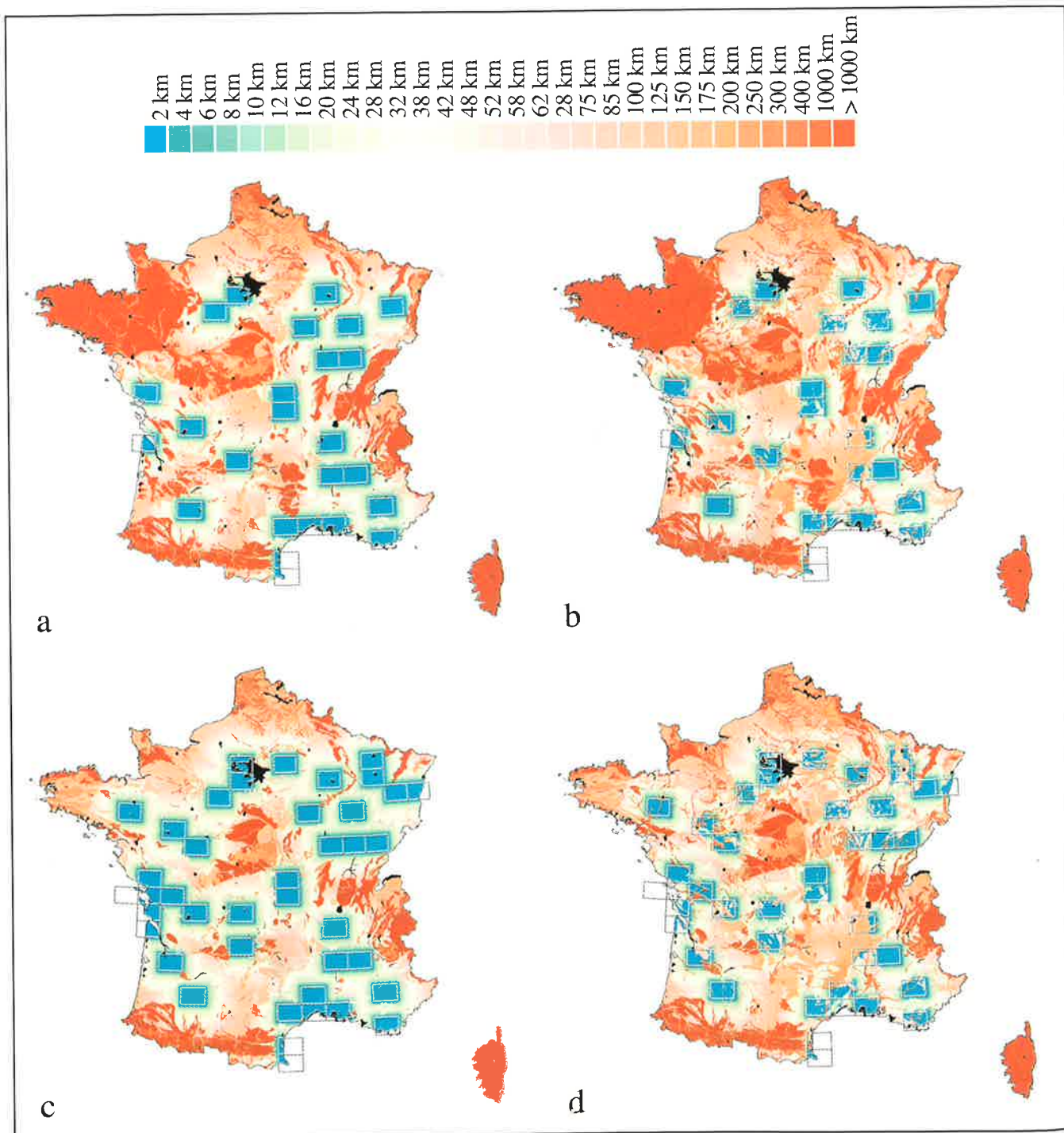
d) Distance en km à la carte 1/100 000 levée la plus proche où l'UCS est la plus représentée.

Planche 2- a) Distance (km) of the nearest 1:100,000 published soil map where the soil mapping unit is present,

b) Distance (km) of the nearest 1:100,000 published soil map where the soil mapping unit is most represented,

c) Distance (km) of the nearest 1:100,000 surveyed soil map where the soil mapping unit is present,

d) Distance (km) of the nearest 1:100,000 surveyed soil map where the soil mapping unit is most represented.



- Europe. Eds: Bullock P., Jones R.J.A., Montanarella L. European Soil Bureau Report n° 6. EUR 18991 EN. Office for official publications of the European Communities, Luxembourg. 3-14 pp.
- Callot G., 1976 - Analyse d'un système géo-pédologique régional Nord-Aquitaine. Thèse Doc. Etat - USTL Montpellier. 107 p.
- CEC, 1985 - Soil Map of the European Communities at 1:1,000,000. CEC DG VI. Office for official publications of the European Communities, Luxembourg. 124 p.
- CEC, 1993. CORINE Land Cover. Guide technique, Brussels. 144 p.
- Chrétien J., 1986 - Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur les ébènes et sur terrasses fluviales. Thèse Doc. Etat Université de Dijon. 412 p.
- DMA, 1992 - Development of the Digital Chart of the World: Defense Mapping Agency. Washington, D.C., U.S. Government Printing Office.
- Duclos G., 1994 - Atlas des sols de la région Provence - Alpes - Côte d'Azur. Editions Services Développement SCP. 955 p.
- Ducloux J., 1978 - Contribution à l'étude des sols lessivés sous climat atlantique. Thèse Doc. Etat - Université de Poitiers, 200 p.
- Dudal R., Deckers J., 1999 - Soil survey in Belgium and its application. In: Soil Resources of Europe. P. Bullock, R.J.A. Jones, L. Montanarella (Eds). European Soil Bureau Report n° 6. EUR 18991 EN. Office for official publications of the European Communities, Luxembourg. 43-48 pp
- Dupuis J., 1966 - Carte Pédologique de France à 1/1 000 000. INRA-SESCPF, Paris, 56 p.
- Falipou P., 1987 - Inventaire des thèses de Science du Sol soutenues dans les pays francophones. AFES-ACCT. INRA Montpellier. 226p.
- FAO, 1974 - FAO/Unesco - Soil Map of the World 1:5,000,000. Vol. I, Legend - Unesco. Paris, France.
- FAO, 1989 - FAO/Unesco - Carte Mondiale des Sols 1:5,000,000 - Légende révisée. Rapport sur les ressources en sols du monde, 60. FAO, Rome, 125 p.
- Favrot J.-C., 1987 - Etudes et recommandations préalables au drainage: la méthode des Secteurs de Référence. C.R. Aca. Agric. Fr. 87-73 (4). 23-32.
- Favrot J.-C., 1989 - Une stratégie d'inventaire cartographique à grande échelle: la méthode des secteurs de référence. Science du Sol. 27. 351-358.
- Gury M., 1990 - Genèse et fonctionnement actuel des pseudogleys podzoliques sur terrasses alluviales de l'Est de la France. Thèse Doc. Etat. Univ. Nancy I. 331p.
- Hardy R., 1992 - Connaissance et inventaire cartographique des sols en France. Le rôle de coordination scientifique de l'INRA, aux plans national et européen, pour une meilleure valorisation des données. Colloque Qualité et vulnérabilité des sols, Ferrara, Italie, 3-4/12/92.
- Hardy R., Favrot J.-C., Couturier A., Moulard N., 1999 - REFERSOLS, Répertoire pour la France d'études pédologiques avec cartographie des sols aux petites et moyennes échelles (du 1/50000 au 1/500000). INRA Orléans, 146 p.
- Hutchinson, M.F., 1989 - A new method for gridding elevation and stream line data with automatic removal of pits: J. Hydrol, 106. 211-232.
- INRA, 1998 - La base de données géographiques des sols de France à 1/1 000000. INRA SESCOF-Orléans. CDRom.
- INRA, 1969-2000 - Programme Connaissance Pédologique de la France. Favrot J.-C., Vichy L15 (1969); Servant J., Perpignan L 24-25 (1970); Portier J., Toulon P23 (1974); Favrot J.-C., Moulins L14 (1974); Callot G., Angoulême H16 (1975); Séguy J., Condom H21 (1975); Chrétien J., Dijon O12 (1976); Bonfils P., Brive J18 (1976); Bornand M. *et al.*, Privas N19 (1977); Baize D., Tonnerre M10 (1978); Bonneau M. *et al.*, Saint-Dié Q19 (1978); Wilbert J., Lesparre F17 (1978); Isambert M., Châteaudun I9 (1978); Crahet M., Chartres J8 (1981); Arnal H., Montpellier M22 (1983); Benoit Janin P., Langres O10 (1986); Dutil P., Saint Dizier N8 (1992); Bonfils P., Lodève L22 (1993); Bouteyre J. et Duclos G., Arles N22 (1994); Chrétien J., Beaune (1996); Bornand *et al.*, Digne (2000).
- Jamagne M., 1967 - Bases et techniques d'une cartographie des sols. Annales Agronomiques. Vol. 18. Numéro hors série.
- Jamagne M., Hardy R., King D., Bomand M., 1995 - La base de données géographique des sols de France. Etude et Gestion des Sols 2(3). 153-172.
- Jamagne M., King D., Le Bas C., Daroussin J., Burill A., Vossen P., 1994 - Creation and use of a European Soil Geographic Database. 15th International Congress of Soil Science, Transactions - Vol. 6a - Commission V - Symposia - Acapulco - Mexico, 728-742.
- Jamagne, 1999 - 16e congrès mondial de la Science du Sol. Compte rendu succinct des travaux. Note de synthèse, Etudes et Gestion des Sols 6(1). 55-78.
- Jerrold H. Zar. 1999. Testing for Goodness of Fit. Chapter 22. In: Biostatistical Analysis Fourth Edition. Prentice Hall. 663 pp.
- King D., Daroussin J., Tavernier R., 1994 - Development of a soil geographic database from the Soil Map of the European Communities. Catena, 21. 37-56.
- King D., Fox D.M., Daroussin J., Le Bissonnais Y., Danneels V., 1998-1 - Upscaling a simple erosion model from small areas to a large region. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 50, 143-149.
- King D., Meyer-Roux J., Thomasson A.J., Vossen P., 1998-2 - A proposed European soil information policy. In: Land information systems. Developments for planning the sustainable use of land resources. European Soil Bureau Report n° 4. EUR 17729 EN. Office for official publications of the European Communities, Luxembourg. 11-18.
- King D., Jamagne M., Arrouays D., Bornand M., Favrot J.-C., Hardy R., Le Bas C., Stengel P., 1999 - Inventaire cartographique et surveillance des sols en France. Etat d'avancement et exemples d'utilisation. Etude et Gestion des Sols 6(4). 215-228.
- Lagacherie P., Cazemier D.R., Goans P.F.M., Burrough P.A., 1997 - Fuzzy-k-means clustering of fields in an elementary catchment and extrapolation to a larger area. Geoderma 77, 197-216.
- Lagacherie P., Cazemier D.R., Martin-Clouaire R., Wassenaar T., 2000 - A spatial approach using imprecise soil data for modelling crop fields over vast areas. Agriculture, Ecosystems and Environment 81, 5-16.
- Lagacherie P., Voltz M., 2000 - Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. Geoderma 97. 187-208.
- Lancaster, H. O. 1969. The Chi-Squared Distribution. John Wiley, New York. 356 pp.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J., King D., 2001 - Mapping erosion risk for cultivated soil in France. Catena, (in press).
- Legros J.-P., 1982 - L'évolution granulométrique au cours de la pédogenèse. Approche par simulation sur ordinateur. Thèse Doc. Etat - USTL, Montpellier, 402 p.
- Platou S.W., Norr A.M. and Madsen H.B., 1989 - Digitizing of the EC Soil map, In: Proceedings of the international workshop of computerization of land use data, Pisa. CEC-DGVI, Luxembourg. 12-24.
- Salin R., 1969 - Contribution à l'étude du climat et de l'économie de l'eau dans les sols du marais poitevin (marais mouillé). Thèse Université de Poitiers. 144 p.
- Servant J., 1975 - Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse INRA-ENSA, Montpellier. 194 p.
- Studer R., Servant J., Dupont J., Lafrechoux M., Nicoulaud B., 1982 - La carte des sols de la Région Centre. Bulletin inf. IGN. n° 45.
- Thomas A.L., King D., Dambrine E., Couturier A., Roque J., 1999 - Predicting soil classes with parameters derived from relief and geologic materials in a sandstone region of the Vosges mountains (Northeastern France). Geoderma, 90, 291-305.