

Pédologie et système d'information géographique

Comment introduire les cartes de sols et les autres données sur les sols dans les SIG ? *

Pierre BRABANT

Orstom, 32, av. Henri-Varagnat, 93140 Bondy.

RÉSUMÉ

L'importance croissante des études sur l'environnement, les performances de l'informatique favorisant le développement des SIG et le fait que le sol constitue un élément majeur de notre environnement terrestre nous amènent à poser cette question. Comment introduire dans un SIG les cartes de sols et les autres données sur les sols pour que cela puisse servir aux acteurs du développement rural et contribuer à aider les planificateurs dans leur prise de décision ?

Les études de sols se situent dans un environnement rural qui est différent d'un environnement urbain. Celui-ci, construit par l'homme, est donc artificiel, fait d'objets à formes géométriques, hiérarchisés, ordonnés et emboîtés, identifiables de visu, formant des motifs répétitifs (par exemple, blocs d'immeubles séparés par des rues). Cela est relativement facile à structurer dans un SIG, d'où le développement beaucoup plus rapide et spectaculaire des SIG « urbains » que des SIG « ruraux ».

L'environnement rural forme un continuum, ayant rarement des formes géométriques mais de nombreuses propriétés pouvant fluctuer de manière apparemment aléatoire. La question est donc de savoir comment structurer l'espace rural avec sa couverture pédologique et les données qui les décrivent pour les stocker dans un SIG.

Nous proposons pour cela une structure à 4 niveaux, hiérarchisés et emboîtés :

Le niveau 1 est le plus important et forme l'ossature du SIG. Il est constitué par les Unités naturelles de terrain (ou UNT), comparables à des terroirs au sens agricole du terme.

Elles sont définies par des caractéristiques stables du terrain : topographie, formes du modelé, nature de la roche, du sol, de la végétation spontanée, forme du réseau hydrographique. Ces unités sont identifiables sur des images aérospatiales et présentent un motif répétitif des variations de certaines propriétés. Par exemple, le sol est constitué d'une combinaison d'horizons ordonnés en fonction de la topographie et du modelé. Les UNT sont toujours géocodées dans le SIG.

Le niveau 2 correspond à des subdivisions d'une UNT correspondant aux différentes Unités de modelé (UM) identifiables dans cette UNT. Ces formes sont ordonnées dans le paysage selon un motif répétitif : sommet, versant, bas-fond par exemple. Les objets du niveau 2 sont géocodés dans le SIG ou simplement modélisés, si l'échelle des cartes est trop petite.

Le niveau 3 correspond à des subdivisions dans une Unité de modelé correspondant à différentes Unités de sol (US), identifiables dans cette UM et généralement disposées dans le même ordre répétitif. Les objets du niveau 3 sont parfois géocodés mais plus souvent modélisés, l'échelle de la carte étant généralement trop petite.

* Cet article a déjà été publié dans le Cah. Orstom, vol. XXVII, n° 2, 1992. Une inversion de pages s'étant produite, nous le republions dans ce numéro.

Au niveau 4 chaque Unité de sol est subdivisée en horizons, disposés dans un ordre déterminé du sommet à la base du sol. Les objets du niveau 4 sont modélisés dans le SIG sauf dans le cas des cartes tomographiques à grande échelle, rarement disponibles.

Le découpage de l'espace rural sur la base des Unités naturelles de terrain en quatre niveaux hiérarchisés et emboîtés satisfait : (1) aux conditions requises par l'informatique, (2) aux exigences des changements d'échelle, (3) aux besoins des utilisateurs du développement rural car ces unités correspondent à la dimension des unités d'aménagement, (4) aux objectifs de la science du sol : faire reconnaître le rôle majeur du sol dans la gestion de l'environnement.

MOT CLÉS : SIG — Cartes de sol — Données sur les sols.

ABSTRACT

SOIL SCIENCE AND GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. HOW TO INTRODUCE SOIL MAPS AND THE OTHER SOIL DATA INTO GIS ?

The growing importance of environmental studies, the development of geographical information system through progress in information technology and the fact that the soil is a major element in our terrestrial environment these factors together lead us to ask how soil maps and other soil data can be integrated into a GIS in a way that is useful to those involved in rural development and helpful to planners in their decision-making.

The rural environments in which soil studies are carried out are very different from urban environments. Urban environments, being man-made and artificial, constitute orderly, hierarchical arrangements of interlocking, geometrically-shaped objects which are identifiable on sight and form repeating patterns, eg. of blocks of buildings separated by streets. All this makes the urban environment relatively easy to structure in a GIS, and accounts for the fact that urban GIS have developed far more rapidly than rural GIS.

The rural environment, by contrast, is a continuum in which forms are rarely geometrical and where numerous different properties can vary in an apparently random way. The problem is to find a way of structuring rural space, its soil mantle and the data that describe them, so that they can be stored in a GIS.

What we propose is a hierarchical structure of four levels, each composed of units that readily subdivide into units of the level below.

Level 1 is the most important and forms the backbone of the GIS. It is composed of Natural terrain units, or NTUs, comparable in concept to land systems.

NTUs are defined by stable terrain features : topography, landform, type of rocks and soils, natural vegetation, pattern of drainage network. They can be identified from satellite imagery, and present a repeating pattern of variations of certain properties. For example, the soil consists of a combination of horizons arranged according to topography and landform. NTUs are always geocoded in the GIS.

Level 2 is composed of Landform units (LUs), the subdivisions identifiable within the NTUs. These units show up as repeating motifs in the landscape : eg. summit, slope and bottom land. The level 2 units are either geocoded in the GIS or, if the map scale is too small for this, simply modelled.

Level 3 is composed of the subdivisions of the LUs; these are its different Soil units (Sus) identifiable within the LUs and generally arranged in the same repeating pattern. Sus are sometimes geocoded but are more often modelled, map scale being generally too small for geocoding.

At Level 4, each soil unit is subdivided in decific order from the surface to the base of the soil. Horizons are modelled in the GIS, rarely geocoded in the cases where large-scale tomographic maps are available.

Use of this four-level hierarchy to divide up rural space on the basis of Natural Terrain Units meets four requirements : (1) the conditions required by information technology, (2) the requirements of scale changes, (3) the needs of rural development users, since NTUs and LUs corresponds in size to land development units, (4) the objective of Soil Science, which is to ensure recognition of the crucial role of the soil in environmental management.

KEYWORDS : GIS — Soil maps — Soil data.

Le développement des Systèmes d'information géographique (SIG) a débuté vers 1980, en relation directe avec les performances de l'informatique. Il s'accélère actuellement et une très forte croissance est à prévoir au cours de cette décennie.

Un SIG est une base de données numérisées dans laquelle sont stockées des informations variées mais ayant un dénominateur commun : elles sont toutes repérées par leur position géographique à la surface de la Terre. On dit, de ce fait, qu'elles sont géocodées ou géoréférencées ; d'où l'expression aussi employée de Système d'information géocodée.

Un SIG peut stocker des informations sur des objets de nature très diverse, par exemple : topographique, climatique, pédologique, agronomique, socio-économique. Connaissant les relations spatiales existant entre ces objets, il est possible de croiser et de traiter ces données. Aussi l'utilisation d'un SIG correspond à une activité pluridisciplinaire.

Des données sur les sols ont été stockées depuis le début des années soixante-dix dans des bases informatisées par les services des sols de plusieurs pays.

La structure de ces bases était fondée sur les profils de sols, correspondant aux pédoncs définis dans les classifications. Dans le même temps, des cartes de sols ont été numérisées. Comme les légendes de ces cartes sont fondées le plus souvent sur les unités des classifications de sols, nous retrouvons la même situation que dans le cas précédent. D'autre part, ces bases n'ont pas été normalisées, si bien que les échanges de données sont difficiles ou impossibles entre les différents services.

Ces bases ont été exploitées avec plus ou moins de succès et leur utilisation s'est limitée le plus souvent à un exercice monodisciplinaire.

Or, les pédologues sont interpellés de plus en plus par la communauté scientifique internationale pour répondre à des questions concernant l'environnement de la planète, l'évolution et la dégradation de cet environnement. C'est le cas, par exemple, pour le programme international géosphère et biosphère (IGBP).

Face à ces interpellations, les pédologues, par comparaison avec des chercheurs d'autres disciplines, sont très discrets, voire timorés selon certains, alors que le sol devrait être un pôle majeur de ces programmes, en ce qui concerne au moins les travaux sur les terres émergées.

Les projets de surveillance et de contrôle de l'environnement planétaire, favorisés par les performances croissantes des engins spatiaux, vont nécessairement s'orienter vers une utilisation accrue des SIG et des systèmes de repérage terrestre (G.P.S. ou *Global Positioning System*).

Il nous paraît donc primordial que la pédologie se préoccupe de savoir comment elle peut collaborer à ces activités et comment elle peut introduire les données sur les sols, sur leur répartition et sur leur environnement dans les SIG ;

cela pour répondre aux questions posées et pour jouer le rôle important qui devrait être le sien dans la gestion des terres et de l'environnement au niveau local, national et international.

Nous allons examiner d'abord quelle est la situation actuelle concernant l'utilisation des SIG, quelles sont les contraintes principales de cette utilisation et comment nous pouvons introduire des données sur les sols en réduisant ou en évitant ces contraintes.

SITUATION ACTUELLE DES SIG

Nous pouvons faire à ce sujet deux constatations. Premièrement, il existe de nombreux SIG utilisés pour les études et les travaux en zone urbaine mais peu de SIG mis en œuvre en zone rurale. Deuxièmement, les SIG mis en œuvre en zone urbaine sont opérationnels alors que les autres ne le sont pas encore ou rarement, car ils sont soumis à des contraintes d'utilisation non maîtrisées.

Nous verrons d'abord ce qui fait le succès des premiers, puis quelles sont les difficultés de mise en œuvre des SIG en zone rurale et enfin nous proposerons une solution pour contourner ces difficultés en l'illustrant par un exemple pris dans le domaine de la pédologie.

SIG en zone urbaine ou urbanisée

L'expression « zone urbaine » désigne les villes stricto sensu, où la plus grande partie de l'espace est aménagée par l'homme sous forme de constructions diverses. L'expression « zone urbanisée » a un sens plus large car elle désigne des structures existant en zone rurale, mais résultant essentiellement d'une activité humaine. Ce sont, par exemple, le parcellaire agricole (*land use*), le découpage cadastral, les zones de reboisement industriel aménagées, l'implantation des polders, le réseau de voies de communications, etc.

Nous verrons que pour l'informatique la structure de l'espace urbain strict et certaines structures de l'espace rural, résultant des activités humaines, sont équivalentes.

Pour illustrer sommairement la façon dont un SIG de zone urbaine peut être structuré, prenons l'exemple de la ville de Paris.

Cette structure est constituée d'une dizaine de niveaux successifs et hiérarchisés, comme cela est schématisé sur la figure 1 :

— Niveau 1 : c'est l'agglomération parisienne couvrant plus de 1 000 km². Elle est identifiable dans sa totalité sur une image satellitaire, où on peut la distinguer de l'espace rural environnant, bien que la limite entre les deux soit très irrégulière.

— Niveau 2 : un premier découpage sépare Paris intramuros, limité approximativement par le boulevard périphérique, de la banlieue.

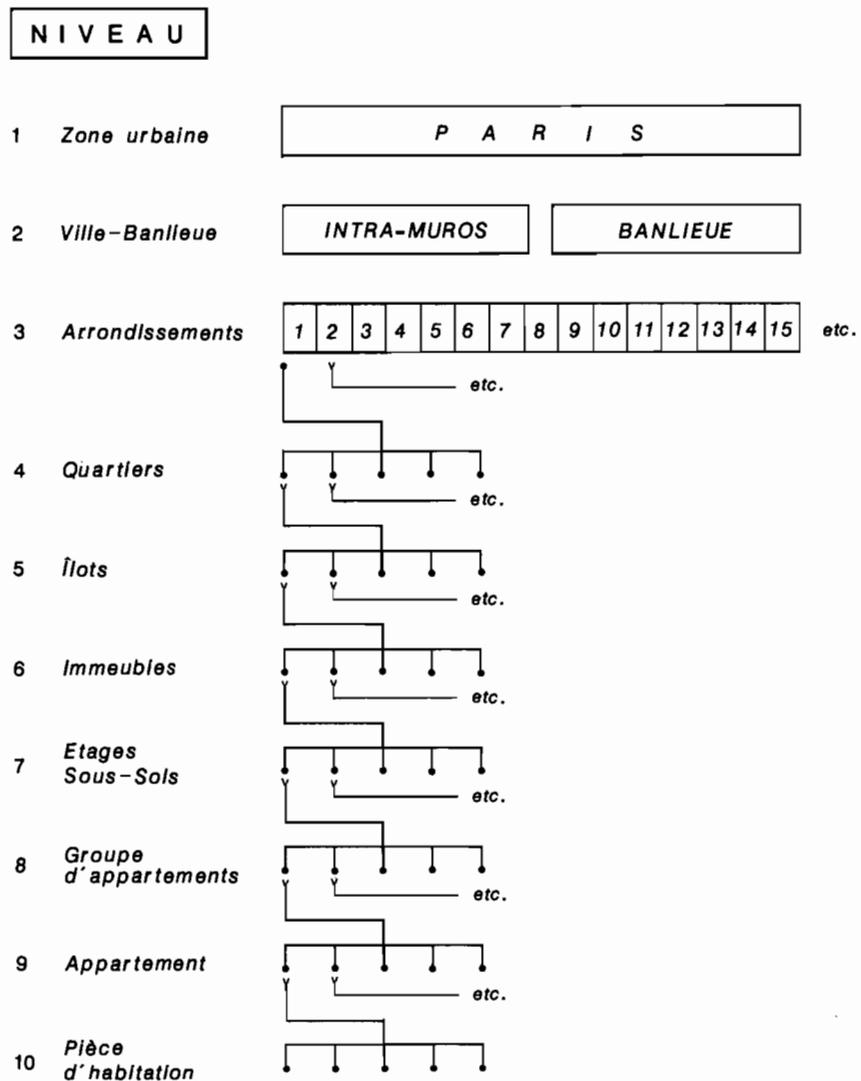


FIG. 1. — Exemple de structure d'un SIG en zone urbaine.
Example of the structure of a GIS on an urban area.

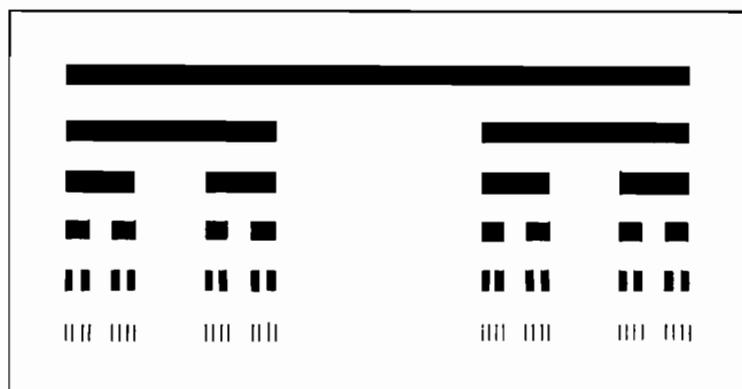


FIG. 2. — Schéma d'une structure fractale.
Fractal structure.

— Niveau 3 : Paris intra-muros est divisé en 20 arrondissements, limités par des avenues, des boulevards ou par la Seine.

— Niveau 4 : chaque arrondissement est divisé en quartiers, séparés par des avenues ou des rues principales.

— Niveau 5 : chaque quartier est divisé en îlots ou blocs d'immeubles.

— Niveau 6 : chaque îlot est divisé en immeubles, séparés parfois par des ruelles ou des impasses.

— Niveau 7 : chaque immeuble est divisé en étages et en sous-sols, séparés par des planchers.

— Niveau 8 : chaque étage est divisé en groupes d'appartements, séparés par des couloirs : côté cour et côté rue, exposition nord ou exposition sud par exemple.

— Niveau 9 : chaque groupe est divisé en appartements individuels, séparés par des murs.

— Niveau 10 : chaque appartement est divisé en pièces d'habitation, séparées par des cloisons.

Cette zone urbaine présente des caractéristiques qui facilitent la mise en œuvre de SIG. Nous en identifions six principales :

1 — Cette zone urbaine est bien structurée et formée de plusieurs niveaux hiérarchisés et emboîtés (1). Les structures présentent un motif répétitif, ce qui facilite la modélisation.

2 — La forme des objets est géométrique (2). Ce sont des surfaces, donc des objets à deux dimensions x et y , ou des volumes à trois dimensions, x , y et z : z étant positif, s'il s'agit d'étages d'immeubles, z étant négatif, s'il s'agit de sous-sols. La limite des objets est nette (un plancher séparant deux étages par exemple). Les structures sont ordonnées par rapport à une multitude de points qui peuvent être géocodés.

Toutes ces caractéristiques conviennent parfaitement aux exigences des procédures de l'informatique.

3 — Ces objets sont identifiables sur des images aérospatiales (image satellitaire ou radar, photographie aérienne) du niveau 1 au niveau 7 inclus, excepté pour les sous-sols.

4 — Les informations extraites du SIG à un niveau déterminé peuvent être référencées par rapport aux autres niveaux, supérieurs et inférieurs. Par exemple : un étage repéré comporte un nombre déterminé d'appartements et il fait partie d'un immeuble constituant un îlot d'un quartier, etc.

5 — La structure de base du SIG ne change pas quelle que soit la spécificité des utilisateurs : urbaniste, architecte, expert-géomètre, ingénieur des travaux publics, in-

génieur des télécommunications, écologue, inspecteur des services fiscaux, enquêteur du recensement, etc.

6 — Les objets, dont les caractéristiques sont introduites dans les SIG, sont des unités artificielles. Elles sont construites par l'homme, de même que le matériel informatique et les logiciels utilisés pour stocker ces données. Par conséquent, cela constitue un ensemble cohérent pour le mental de l'homme.

Ce type de SIG est bien adapté à une utilisation dans les pays fortement industrialisés et urbanisés, ayant aussi un espace rural très anthropisé, comme l'Europe de l'Ouest, le Japon et une partie de l'Amérique du Nord. En revanche, leur utilisation devient difficile dans les zones où l'espace urbain s'est étendu sans contrôle pour constituer des zones mal structurées. C'est le cas des favelas d'Amérique du Sud ou des zones d'occupation périurbaine dans les villes africaines par des migrants venus des campagnes.

Bien que les SIG en zone urbaine soient généralement opérationnels, tous les problèmes de leur mise en œuvre ne sont pas encore résolus. Cependant, les principaux ne sont pas de nature technique ou informatique. Ce sont des problèmes relationnels entre les différents utilisateurs. En effet, chaque administration, chaque service technique ou collectivité locale construit et utilise un SIG en fonction de ses préoccupations. Il en résulte que l'échange de données entre les SIG est parfois difficile ou impossible. Ce problème majeur devrait être résolu prochainement par la normalisation des formats d'échange à l'échelon national (France), puis européen. Le choix s'oriente vers la norme DIGEST (*Digital Geographic Information Exchange Standard*) et sa couche géographique, dénommée EDIGEO. Concernant la couche de transmission entre les bases de données, le choix se porterait sur la norme ISO 8211 (*Revue Géomètre*, octobre 1990).

Un indice très significatif montre que les SIG utilisés en zone urbaine sont en plein développement et qu'ils donnent des résultats satisfaisants : 80 à 90 % au moins des communications scientifiques présentées dans les congrès et séminaires se rapportent à l'utilisation des SIG en zone urbaine ou concernant les structures anthropisées des zones rurales : parcellaire agricole (*land use*), utilisation des terres (*land cover*) ou découpage cadastral.

SIG en zone rurale

La mise en œuvre de SIG en zone rurale se révèle beaucoup plus difficile, car les exemples en ce domaine sont

(1) Cette structure peut être comparée à celle des fractals, schématisée sur la figure 2.

(2) Cela est particulièrement net dans les villes nouvelles ; par exemple, le secteur de Manhattan à New York est quadrillé de façon très géométrique par des avenues et par des rues.

relativement rares. Nous pouvons citer celui du Projet ILWIS, réalisé par l'ITC (3).



De haut en bas :

PHOTO. 1. — Zone urbaine : la ville de Paris (Photo IGN)

Urban area : the city of Paris

PHOTO. 2. — Zone rurale à aspect contrasté

Rural area with varying pattern

PHOTO. 3. — Zone rurale à aspect uniforme

Rural area with unvarying pattern

Les données qui caractérisent l'espace rural peuvent aussi être introduites dans les SIG comme celles de l'espace urbain ; mais ces deux espaces possèdent des caractéristiques très différentes. La principale différence de l'espace rural est que le terrain forme un continuum. Or, pour

stocker les données, il faut d'abord les structurer. Par conséquent, on est amené obligatoirement à faire des découpages dans ce continuum. La photo 1 montre que ce découpage est facilité en milieu urbain par l'existence de structures artificielles géométriques construites par l'homme. En zone rurale (photos 2 et 3) se pose la question de savoir sur quels principes se fonder pour procéder à ce découpage, préalable à l'introduction des données dans les SIG.

Examinons d'abord comment les spécialistes des différentes disciplines scientifiques effectuent actuellement ce découpage.

Chaque thématicien qui étudie une zone rurale procède à ce découpage en fonction de ses objectifs immédiats et des exigences de sa discipline scientifique. Les SIG qui en résultent sont des regroupements de plusieurs fichiers, chacun d'entre eux correspondant à un thème : topographie, hydrologie, géologie, climat, mode d'utilisation des terres, limites administratives, etc.

Les SIG sont ainsi constitués de couches superposées, comme cela est illustré par la figure 3. Dans chacune de ces couches, il existe un découpage particulier de l'espace rural, représenté sur les cartes par le contour de polygones, regroupés en unités cartographiques dans la légende.

Les logiciels permettent techniquement de faire le croisement des données extraites des différentes couches ; mais les documents produits sont extrêmement complexes, car ils résultent de la superposition des contours de polygones appartenant à des unités cartographiques de nature très diverse (cf. un exemple donné dans l'annexe II).

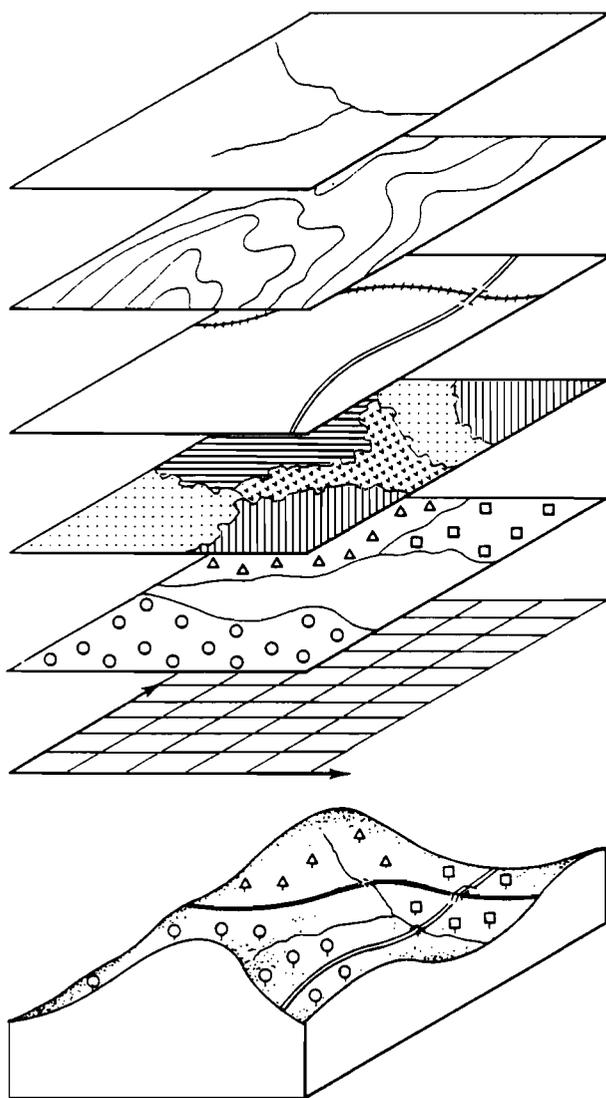
Les cartes, produits habituels de ce type de traitement, sont difficiles à interpréter et inexploitablement directement pour le développement rural. à cela s'ajoutent des problèmes de terminologie, car celle-ci varie d'un thème à l'autre.

D'autre part, l'utilisation de ces fichiers pose des problèmes de changement d'échelle, entraînant une perte d'information au cours de cette opération. Finalement, en comparant d'une part les gros investissements nécessaires pour construire ces SIG, collecter et saisir les données, et d'autre part les résultats concrets utilisables pour le développement rural, le rendement de ce type de SIG est relativement faible et leur coût excessivement élevé.

Si on compare maintenant la mise en œuvre d'un SIG urbain (4) avec celle d'un SIG rural, on constate que le matériel et les logiciels utilisés ont des capacités suffisantes et que les informaticiens sont aussi compétents. La difficulté de mise en œuvre d'un SIG rural n'est donc pas d'ordre technique et informatique ; elle est de nature conceptuelle et thématique. Elle provient principalement du

(3) International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede, Pays-Bas.

(4) Dans la suite de l'exposé, nous utiliserons, pour simplifier, les expressions : SIG urbain et SIG rural.



Using GIS, the planner overlays different maps of the same location. Shown (from top) are maps of rivers, elevation, roads, soil and vegetation. These are then registered to a common coordinate system, producing a description of the Earth surface (bottom)

FIG. 3. — Exemple de structure d'un SIG en zone rurale, constitué à partir de fichiers thématiques superposés (FAO-AGLS Division, Rome — *Land and Water*, August 1989).
 Example of the structure of a GIS on a rural area, built up by overlaying thematic data files.
 (FAO-AGLS Division, Rome — *Land and Water*, August 1989).

fait que chaque thématicien découpe l'espace rural de la façon qui lui convient. Ce découpage n'aboutit pas à constituer un système cohérent comme celui des SIG urbains (cf. page 318). à cette difficulté vient s'ajouter évidemment le manque de normalisation des formats d'échange.

Le type de SIG le plus utilisé actuellement pour l'étude des espaces ruraux (cf. fig. 3) peut ainsi être considéré comme un simple regroupement de bases de données monodisciplinaires.

La principale contrainte de la mise en œuvre d'un SIG rural résulte donc d'un découpage thématique, hétérogène et non approprié de l'espace rural.

COMMENT ÉLIMINER OU RÉDUIRE CETTE CONTRAINTE MAJEURE POUR L'UTILISATION D'UN SIG DANS LES ESPACES RURAUX ?

En examinant les fichiers thématiques précédents, on remarque qu'ils sont constitués de deux groupes de données. Celles du premier groupe concernent des caractéristiques du terrain que l'homme peut modifier : le réseau de communications, les aménagements ruraux (parcellaire agricole, infrastructures) et la répartition de la végétation.

Celles du second groupe concernent des caractéristiques du terrain que l'homme ne peut pas modifier, du moins facilement, ou ne veut pas modifier pour des raisons de rentabilité économique évidentes : la topographie et les formes du modelé, la nature des roches, l'aspect du réseau hydrographique, la nature et la répartition des sols. Ces caractéristiques sont donc relativement stables.

D'autre part, nous savons que, dans les régions tropicales au moins, il existe des corrélations très étroites entre :

- 1 — la topographie et le modelé ;
- 2 — les roches ;
- 3 — l'aspect du réseau hydrographique ;
- 4 — les sols et leur répartition ;

5 — la végétation naturelle ou spontanée (5), si elle existe encore.

Par conséquent, il serait possible de découper le *continuum* de l'espace rural en Unités naturelles de terrain (6), qui seraient définies par l'association des 4 ou 5 caractéristiques dites stables et énumérées ci-dessus.

Ces caractéristiques sont d'autant plus faciles à identifier pour un observateur que le terrain est peu transformé par les activités humaines. C'est encore le cas dans de vastes zones des régions tropicales. La dimension de ces unités est très variable : de quelques kilomètres carrés à plusieurs milliers de kilomètres carrés.

(5) Et la nature du climat, mais celui-ci n'est pas, comme les autres caractéristiques, identifiable de visu.

(6) Que nous pourrions aussi dénommer par l'expression « unité géographique naturelle » ou une autre expression équivalente, satisfaisante pour une majorité de thématiciens. Retenons pour cette exposé l'expression « unité naturelle de terrain » (en anglais : natural terrain unit).

En admettant ce type de découpage de l'espace rural, la structure d'un SIG rural serait fondée non plus sur une collection de fichiers monodisciplinaires, mais sur une seule base de données pluridisciplinaires, caractérisant les

diverses Unités naturelles de terrain. Cela permettrait de lever la contrainte conceptuelle et thématique résultant d'un découpage non approprié de l'espace rural.

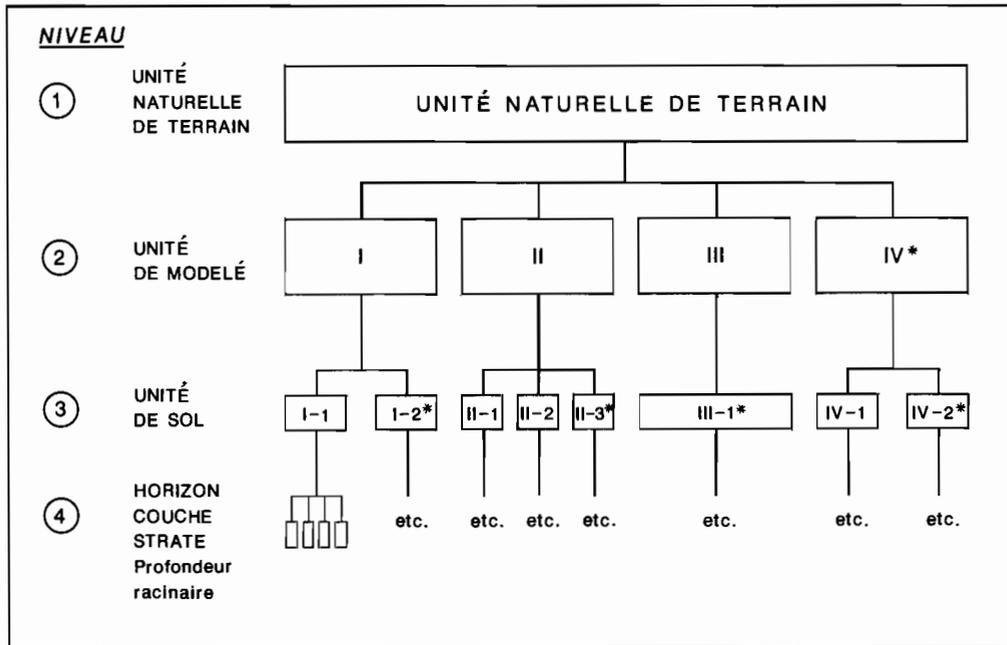


FIG. 4. — Structure des quatre premiers niveaux d'une base de données sur les sols, leur répartition et leur environnement, destinée à la mise en œuvre d'un SIG rural.

Structure of the first four levels of a data base on soils, their distribution and their environment, designed for use in a rural GIS.

Une Unité naturelle de terrain, modélisée par cette toposéquence,

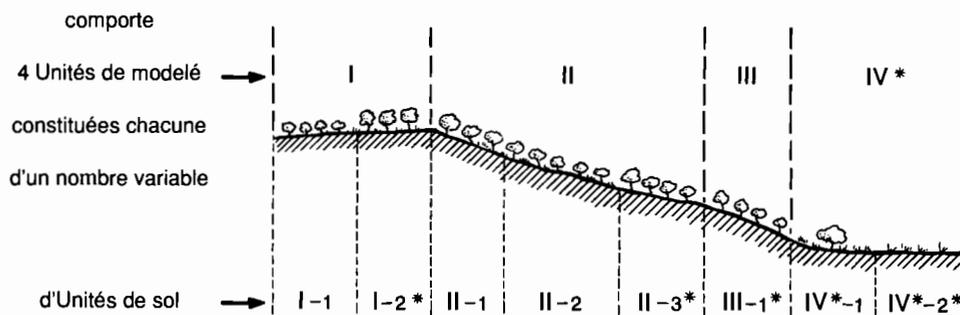


FIG. 5. — Exemple de numérotation des Unités de modelé et des Unités de sols qui constituent une Unité naturelle de terrain (UNT).

Example of numbering of the Landform units and Soil units that make up a Natural terrain unit (NTU).

SOLUTION CHOISIE POUR INTRODUIRE DANS UN SIG LES DONNÉES SUR LES SOLS, LEUR RÉPARTITION ET LEUR ENVIRONNEMENT

Ce choix résulte de l'analyse des résultats obtenus par de nombreux pédologues de l'Orstom ou du Cirad au cours de recherches menées depuis une vingtaine d'années dans les régions tropicales d'Afrique, d'Amérique du Sud et d'Asie.

La base de données sur laquelle nous travaillons actuellement, pour être utilisée dans un SIG, est structurée en plusieurs niveaux successifs, hiérarchisés et emboîtés. Le schéma de la figure 4 indique comment sont structurés les 4 premiers niveaux. Nous allons décrire ceux-ci de manière détaillée car ils sont utilisés plus fréquemment, pour les travaux pluridisciplinaires, que les niveaux suivants (niveaux 5, 6, etc.) plus spécifiques à la pédologie (cf. fig. 14).

Remarques concernant la figure 4

1 — Les différentes Unités de modelé, constituant une Unité naturelle de terrain (ou UNT) (7), sont numérotées en chiffres romains en partant des points topographiques les plus hauts du paysage vers les plus bas. Un astérisque placé après un de ces chiffres (par exemple : IV*) signifie que cette UNT est constituée de quatre Unités de modelé et de quatre seulement. Cet astérisque est donc placé après le numéro d'Unité de modelé localisée dans la partie topographique la plus basse de l'UNT concernée (cf. fig. 5).

2 — Les Unités de sol, constituant une Unité de modelé, sont repérées par deux chiffres. Le premier est un chiffre romain qui indique l'Unité de modelé dont cette Unité de sol fait partie ; le second est un chiffre arabe ; il désigne le numéro d'ordre de l'Unité de sol dans l'Unité de modelé concernée. L'ordre est déterminé en partant du point le plus haut de l'Unité de modelé vers le plus bas. Un astérisque placé après ce chiffre (par exemple : II-3*) signifie que cette Unité de modelé (ici l'unité II) comporte trois Unités de sols et trois seulement. Cet astérisque est donc placé après le numéro d'Unité de sol localisée dans la partie topographique la plus basse de l'Unité de modelé concernée (cf. fig. 5).

DESCRIPTION DES 4 PREMIERS NIVEAUX

Niveau 1 — Unité naturelle de Terrain

Voici la définition que nous avons proposée récemment (BRABANT, 1991) :

Cette définition est comparable à celle d'un système-sol donnée dans l'ouvrage cité en référence. En tant que pédologue, nous avons employé par commodité dans cet

ouvrage le terme de « système-sol », mais un terme plus général comme « Unité naturelle de terrain » utilisé ici ou « Unité géographique naturelle » ou encore « Système de paysage » pourrait aussi convenir.

Volume déterminé de terrain, ayant une dimension variable, souvent kilométrique.

— *Son aire peut être identifiée sur des images aérospatiales et représentée sur une carte.*

— *Ses caractéristiques englobent, d'une part, les formes du modelé et celles du réseau hydrographique, la nature et le mode de combinaison ordonnée des horizons du sol, la nature du matériau originel et de la végétation naturelle ou spontanée, d'autre part, le fonctionnement cyclique journalier et saisonnier de l'air, de l'eau, et des activités humaines, animales et végétales ; elles incluent aussi le fonctionnement cumulatif, qui peut transformer cette unité naturelle en une autre au cours du temps.*

— *Généralement, elle se présente dans le paysage comme un motif répétitif de la forme du terrain et du réseau hydrographique, de la végétation, de la combinaison ordonnée des horizons du sol et des autres caractéristiques. (D'après « Le sol des forêts claires du Cameroun » P. BRABANT, 1991).*

Une Unité naturelle de terrain est identifiée et délimitée à partir des caractéristiques citées dans la définition, qui sont au nombre de 4 ou 5 (8), selon que la végétation naturelle existe ou non. Ce type d'unité est véritablement un système, dans le sens systémique du terme, car des études ont déjà montré qu'il remplit les conditions requises suivantes :

« Un système est un objet complexe dont les parties ou composantes sont liées de telle façon que l'objet se comporte à certains égards comme une unité et non pas comme la simple réunion de ses éléments » (M. Bunge, 1983, cité par J. Quensière, 1990).

Ou encore du même auteur :

« Une chose est un système si et seulement si son comportement change de façon appréciable lorsqu'on lui enlève une de ses composantes ou qu'on la remplace par une autre tout à fait différente. »

Cette seconde définition en particulier est parfaitement applicable aux sols. En effet, la propriété la plus spécifique d'un sol est l'existence d'horizons. Ceux-ci sont associés selon des lois de sociabilité (BRABANT, 1991). L'absence de l'un d'entre eux dans une association suffit pour que le fonctionnement du sol tout entier soit modifié ; en effet,

(7) Nous utiliserons parfois dans la suite du texte les initiales UNT au lieu de « Unité naturelle de terrain ».

(8) Forme du modelé, forme du réseau hydrographique, sol, matériau originel, végétation.

ce fonctionnement est déterminé par un grand nombre d'interrelations existant entre les divers horizons.

PROPRIÉTÉS D'UNE UNITÉ NATURELLE DE TERRAIN

Cette unité, telle qu'elle a été définie, possède trois propriétés intéressantes, car elles vont nous permettre de compartimenter l'espace rural continu :

— Elle est très souvent identifiable dans sa totalité sur les images satellitaires (cf. photo 4).

— Elle apparaît très souvent dans le paysage comme un motif répétitif. Cela permet de la représenter par un modèle de dimension réduite, sous la forme d'une toposéquence ou d'un bassin versant élémentaire.

— Elle est constituée, en ce qui concerne le sol, d'une combinaison de couches ou horizons, ordonnés dans le paysage par rapport à des repères topographiques.

Cette unité étant structurée et géocodée, il faut donc repérer l'arrangement des horizons par rapport aux indices topographiques dans des sites représentatifs, c'est-à-dire identifier la disposition des horizons les uns par rapport aux autres à l'échelle du paysage. La nature du sol, en dehors des sites représentatifs, peut ensuite être reconnue dans les autres unités naturelles équivalentes, en se basant simplement sur des repères topographiques (9). Quelques vérifications de terrain sont simplement nécessaires.

La photo 4 représente un exemple d'une Unité naturelle de terrain, située sur le plateau de l'Adamaoua au Cameroun. Celle-ci est identifiée sur l'image Landsat dans sa totalité .

Elle couvre sur cette image à l'échelle de 1/500 000 une surface de 300 km² environ, ce qui représente une superficie de 1 200 km² sur le terrain.

Cette unité est formée sur une roche basique ; la topographie est fortement vallonnée et le modelé comporte deux unités : un sommet de versant fortement convexe et un bas-fond de forme concave, faiblement évasé. On distingue sur l'image le motif répétitif constitué par la succession des versants et des bas-fonds. Ainsi, cette unité peut être modélisée par une toposéquence schématisée sur la figure 6. Ces caractéristiques, ainsi que l'aspect du réseau hydrographique, celui de la végétation et la nature du sol différent de l'autre UNT qui l'entoure, formée sur une roche granitique.

Les deux facteurs principaux à l'origine de la différence entre ces deux UNT sont la nature et l'âge du matériau original du sol : une roche basique d'origine volcanique d'âge quaternaire dans un cas, et dans l'autre une roche granitique beaucoup plus ancienne.



PHOTO. 4. — Landsat 1 — Cameroun (Novembre 1977)
Landsat 1 — Cameroon (November 1977)

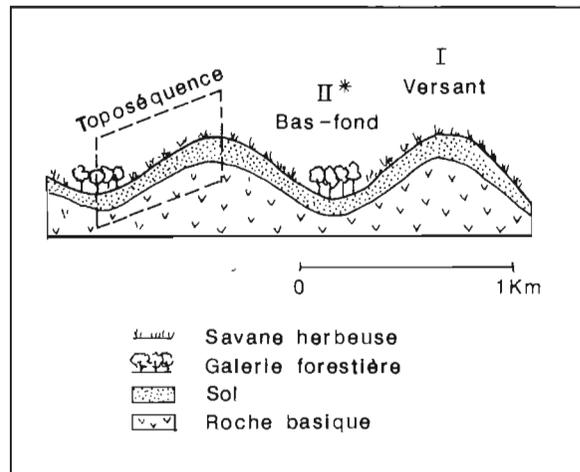


FIG. 6. — Unité naturelle de terrain identifiée sur une image satellite et modélisée par une toposéquence. On distingue deux Unités de modelé.

A natural terrain unit, identified on a satellite image and modelled by a toposéquence. Two landform Units can be distinguished.

(9) Un des inconvénients majeurs de l'étude des sols est le fait qu'ils ne sont pas directement accessibles à un observateur comme le sont d'autres objets naturels, les plantes et les animaux par exemple. Il faut donc creuser le terrain pour les observer et les échantillonner.

La photo 5 est une image SPOT 1 à 1/500 000 montrant une partie seulement d'une zone occupée par un autre type d'Unité naturelle de terrain dans le haut bassin de la Bénoué au Cameroun. Cette UNT couvre au total plusieurs milliers de kilomètres carrés répartis en une vingtaine de zones. Elle est formée sur le socle granitique ; la topographie est vallonnée et le modelé comporte trois unités : un versant convexe à pente modérée, une rupture de pente, un bas-fond concave et évasé, non chenalisé vers l'amont des bassins versants, chenalisé vers l'aval. Le réseau hydrographique est de forme dendritique ; la végétation spontanée est une forêt claire, dense sur les versants, moins dense et moins haute vers la rupture de pente et une savane herbeuse dans les bas-fonds.

On distingue sur l'image SPOT un motif répétitif dû à la répartition des formations végétales en relation avec les unités de modelé et la nature du sol sous-jacent. Les unités de modelé peuvent être observées sur les photographies aériennes en stéréoscopie.

La structure de cette UNT peut encore être modélisée par une toposéquence (cf. fig. 7).

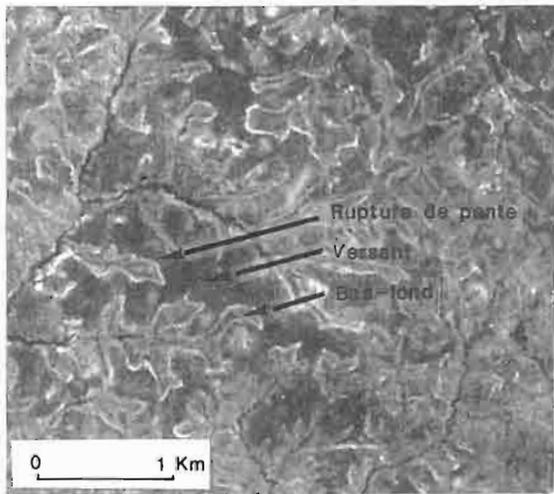


PHOTO. 5
SPOT 1 — XS — Cameroun (Novembre 1989)
SPOT 1 — XS — Cameroon (November 1989)

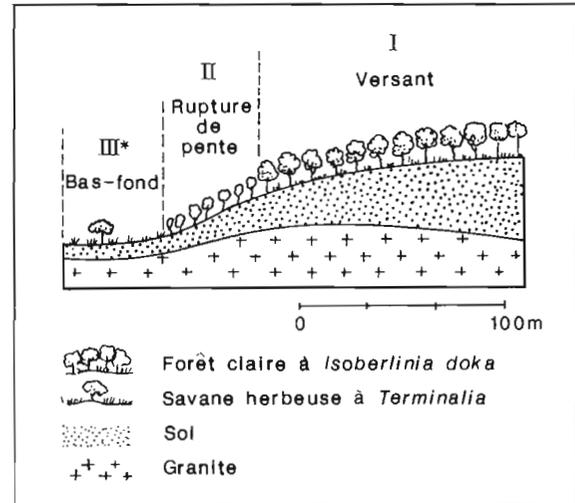


FIG. 7. — Partie d'une Unité naturelle de terrain, identifiée sur une image satellite et modélisée aussi par une toposéquence. On distingue ici trois Unités de modelé.

Part of a natural terrain unit identified on a satellite image and modelled by a toposéquence. Here three landform Units can be distinguished.

COMMENT INTRODUIRE LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE UNITÉ NATURELLE DE TERRAIN DANS UN SIG ?

Les deux exemples d'Unités naturelles de terrain que nous avons identifiés sur les images satellitaires (cf. photos 4 et 5) peuvent être représentés chacun sur une carte (10) par un polygone ayant une dimension proportionnelle à la superficie couverte sur le terrain en fonction de l'échelle de cette carte.

La surface du polygone, représentant sur une carte à 1/1 000 000 une des zones couvertes par l'UNT de la photo 5, est de 4 cm² (cf. fig. 9-1). On attribue à ce polygone une couleur ou une trame, et un numéro pour le repérer sur la carte.

Le contour de ce polygone — c'est-à-dire le contenant de l'UNT — peut être numérisé, en mode vecteur par exemple, et introduit dans le SIG. Les caractéristiques (11) (ou attributs) de cette UNT — c'est-à-dire le contenu — peuvent aussi être numérisées et introduites dans le SIG. Le contenant et le contenu, une fois numérisés, peuvent ensuite être extraits du SIG par un utilisateur : le premier se présentera sous la forme d'un tracé graphique (le contour du polygone) et le second sous la forme de données tabulaires, comme cela est indiqué dans le tableau I.

(10) La production de cartes n'est évidemment pas la seule manière d'exploiter un SIG. Une analyse de données, produisant des diagrammes, tableaux, calculs statistiques, est une autre possibilité. Cependant, les cartes sont le produit le plus courant et le plus demandé par les utilisateurs.

(11) Dans la terminologie informatique, celles-ci sont dénommées attributs. L'annexe I indique la liste des principaux attributs, numérisés au niveau I et qui concernent principalement l'environnement des UNT.

Parmi ces attributs figurent la description des Unités de modelé et celle du sol correspondant. Après avoir été codifiées, elles sont introduites dans le SIG d'où elles peuvent être extraites sous forme de données tabulaires.

En revanche, la répartition et l'étendue occupée dans ce polygone par chaque Unité de modelé sont des données graphiques. Ces unités sont visibles sur les images satellitaires (cf. photo 5) quand on examine la végétation, répartie en fonction des Unités de modelé ou par stéréoscopie sur certaines images du satellite SPOT et sur les photographies aériennes.

Cependant, la répartition et l'étendue de chaque Unité de modelé, bien qu'elles soient connues par le pédologue, ne peuvent pas être introduites graphiquement dans le SIG au niveau 1 à partir d'une carte à 1/1 000 000, ni par conséquent extraites sous la forme de carte à la même échelle pour la raison suivante : l'une des deux dimensions x et y des Unités de modelé (la dimension x sur la figure 8) est trop petite pour que ces unités puissent être représentées chacune séparément sur une carte à 1/1 000 000 et que la carte reste lisible pour un utilisateur ($x = 0,05$ mm à 1/1 000 000).

TABLEAU I

Exemple de données tabulaires : légende explicative d'une unité cartographique sur une carte à très petite échelle (1/1 000 000 ou plus petite)

Example of data in table form : explanatory text for a mapping unit on a very small-scale map (1 : 1,000,000 or smaller)

UNITÉ CARTOGRAPHIQUE	MODELÉ	VÉGÉTATION	MATÉRIAU ORIGINAL	NATURE DU SOL
SOL DES FORÊTS CLAIRES	Glacis d'érosion, vallonnés à ondulés, disséqués dans la partie médiane et aval des bassins versants	Association de forêt claire sur les versants et de savane herbeuse dans les bas-fonds	Roches cristallines acides Granites et gneiss dominants	Sol apparenté à la catégorie n°7 du référentiel établi pour le Nord-Cameroun P.BRABANT, M.GAUAUD (1985)

Le calcul indique qu'il en serait de même pour une carte à l'échelle de 1/500 000 ($x = 0,1$ mm), à 1/250 000 ($x = 0,2$ mm) ou à 1/200 000 ($x = 0,25$ mm).

1 Unité naturelle de terrain

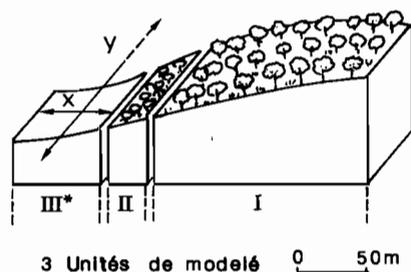


FIG. 8. — Exemple montrant les deux dimensions, X et Y, d'une Unité de modelé.

Example showing the X and Y dimensions of a Lanform unit.

En introduisant les attributs de cette Unité naturelle de terrain dans un SIG au niveau 1, il se produit donc une perte d'information déjà acquise par le pédologue et importante pour l'utilisateur : la distinction de trois Unités de modelé différentes et des Unités de sol associées. Cela signifie aussi que l'échelle des cartes représentant cette

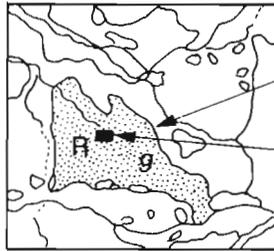
UNT n'a qu'une importance mineure dans une gamme allant de 1/1 000 000 à 1/200 000, puisque le contour seulement du polygone de 4 cm², représentant la superficie de 400 km² sur le terrain, peut être introduit graphiquement dans le SIG au niveau 1, mais pas les limites de chaque Unité de modelé à l'intérieur de ce polygone.

Pour ne pas perdre l'information acquise, nous procédons de la manière suivante (cf. fig. 9).

On sélectionne un petit secteur représentatif (12) (0,022 cm², par exemple) dans le polygone couvrant 4 cm² sur la carte et équivalent à 400 km². Puis on fait de ce secteur un agrandissement suffisant (0,022 cm² sur une carte à 1/1 000 000, équivalent à 2,2 km² sur le terrain, est agrandi 40 fois) pour que la localisation et l'étendue occupée par chaque Unité de modelé puissent être représentées graphiquement sur un échantillon de carte à une échelle plus grande (1/50 000, cf. fig. 9-3). La répartition des Unités de modelé dans l'UNT est modélisée par un bloc-diagramme (cf. fig. 9-2), ainsi que la répartition topographique de ces unités (cf. fig. 9-4). Puis la carte et les blocs-diagrammes sont numérisés graphiquement dans le SIG au niveau 1. Une photographie aérienne oblique peut aussi être scannerisée et introduite dans le SIG (la photo 6 par exemple). Ces données peuvent ensuite être extraites sous la même forme par un utilisateur.

(12) Notons que la dimension de ce secteur est souvent du même ordre de grandeur que celui d'un bassin versant élémentaire.

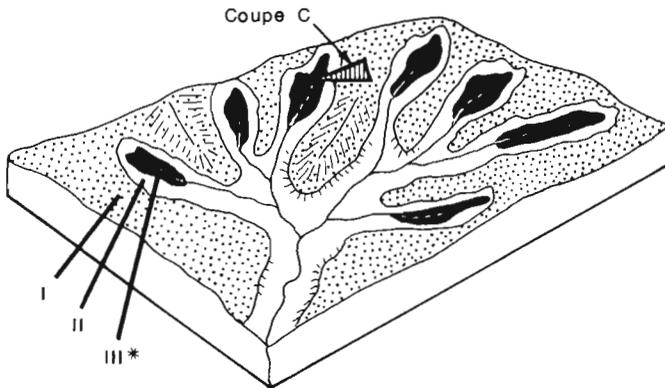
1



Carte à 1/1 000 000 où un polygone numéroté 9 représente une superficie de 400 km², couverte par une Unité Naturelle de Terrain

Voici un secteur représentatif de ce polygone (R) couvrant 0,022 cm² (ce qui représente 2,2 km² sur le terrain). Ce secteur est agrandi 40 fois

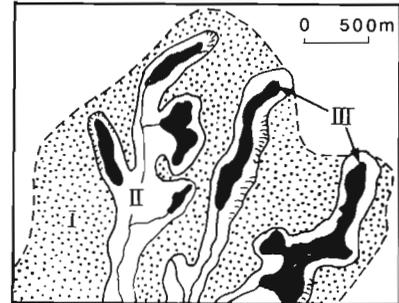
2 - Vue sous forme de bloc-diagramme de ce secteur



Trois unités de modelé sont distinguées:

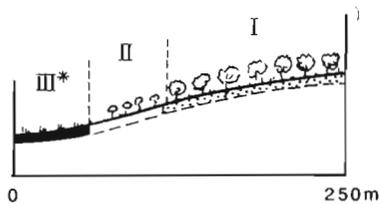
- I - Versant convexe
- II - Rupture de pente
- III* - Bas-fond concave

3 - Vue en plan de ce secteur



Carte des Unités de modelé à 1/50000

4 - Vue en coupe (COUPE C)



Les 3 Unités de modelé regroupées et modélisées dans une toposéquence



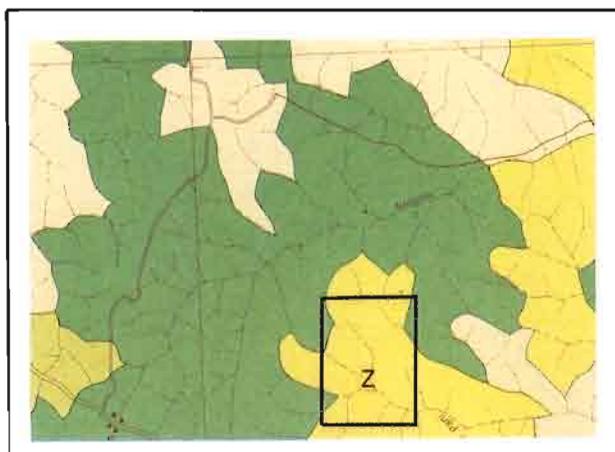
Photo 6 - Exemple de photographie scannée et introduite dans le SIG au Niveau 1.

Au premier plan, sous la ligne blanche, une partie d'une UNT comportant trois Unités de modelé

FIG. 9. — Introduction des données au niveau 1. Zoom sur un secteur représentatif pour visualiser les unités de modelé et montrer leur répartition dans une Unité naturelle de terrain.

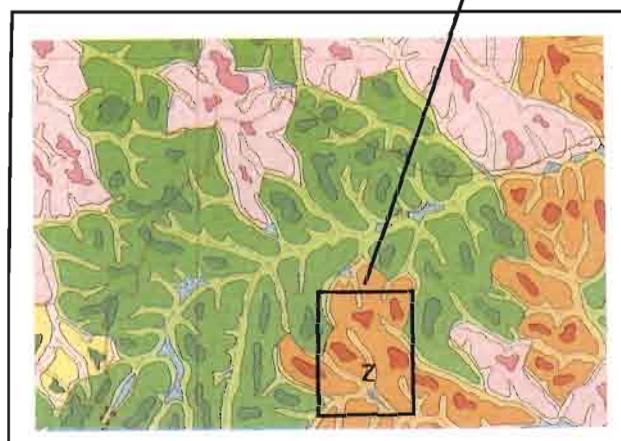
Introduction of Level 1 data. Close-up of a representative sector showing landform units and how they are distributed in a Natural terrain unit.

1 - Carte des UNT



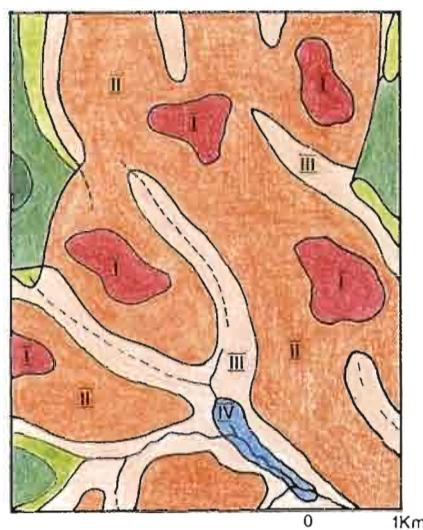
Polygones tracés sur une carte à 1/200.000 représentant des superfoles couvertes par des catégories différentes d'UNT. Chacune de celles-ci est identifiée par une couleur différente (Extrait de la carte Katiola 1/200 000 réduite ici deux fois)

2 - Carte des unités de modelé



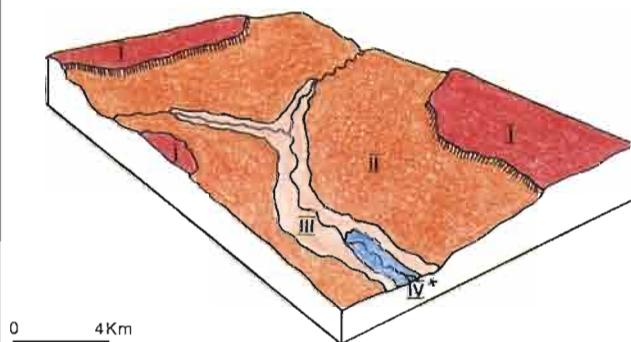
Dans chaque UNT de la carte 1, les unités de modelé sont délimitées sur des photos aériennes à 1/50 000; puis ces limites sont reportées sur une carte à 1/50 000. Celle-ci est ensuite réduite à 1/200.000 pour faciliter la comparaison avec la carte 1. Dans la zone Z d'une UNT (encadrée sur la carte 1), on distingue ainsi quatre unités de modelé sur la carte 2. (Extrait de la carte Katiola 1/200 000 réduite ici deux fois)

3 - Zone Z agrandie



Polygones représentant sur une carte à 1/50.000 (réduite ici deux fois) les quatre unités de modelé de la zone Z

4 - Modélisation sous la forme d'un bloc diagramme



Bloc-diagramme modélisant la répartition des quatre unités de modelé dans le paysage

FIG. 10. — Exemple montrant le découpage d'une Unité naturelle de terrain en Unités de modelé et leur représentation cartographique. (D'après la feuille Katiola à 1/200 000 Côte-d'Ivoire. Carte des paysages et des unités morpho-pédologiques R. Poss, 1982).

Example showing the division of a Natural terrain unit into Landform units and how they are represented on a map, (From the 1 : 200,000 Katiola sheet, Côte d'Ivoire. Map of landscapes and morpho-pedological units — R. Poss, 1982).

En procédant de cette manière, nous avons introduit l'information manquante dans le niveau 1 du SIG sous forme d'un échantillon du niveau 2.

Cette procédure est utilisable pour introduire dans un SIG au niveau 1 les données sur les sols, leur répartition et leur environnement quand on dispose de cartes à une échelle allant de 1/200 000 à 1/1 000 000 et plus. D'autre part, cette procédure facilite le changement d'échelle et fait la transition avec le niveau 2 du SIG.

Niveau 2 — Unités de modelé

Une Unité de modelé est une partie d'une Unité naturelle de terrain « ayant des caractéristiques homogènes et qui peut se distinguer des unités adjacentes sur le terrain et/ou sur des images aérospatiales » (BRABANT, 1991).

On estime que plus de 75 % des Unités naturelles de terrain dans les régions tropicales ne comportent que deux à quatre Unités de modelé ; ce nombre atteint parfois cinq mais rarement plus.

Les limites entre les Unités de modelé peuvent être représentées graphiquement sur des cartes dont l'échelle peut varier de 1/10 000 à 1/100 000 selon la nature du terrain. Par conséquent le contour des polygones de ces cartes, c'est-à-dire le contenant, peut être numérisé graphiquement dans un SIG. Le contenu (c'est-à-dire les attributs), dont une liste est donnée comme exemple dans l'annexe I, se rapporte principalement aux caractéristiques de l'environnement, comme pour le niveau 1. Le contenant et le contenu peuvent ensuite être extraits du SIG par un utilisateur ; le premier sous la forme d'un tracé graphique (le contour des polygones) et le second sous la forme de données tabulaires.

Passer du niveau 1 du SIG, correspondant à des données d'une carte à 1/1 000 000, au niveau 2, qui se réfère à une carte à 1/50 000, et inversement, est relativement aisé pour un utilisateur.

Grâce à l'opération effectuée sur un secteur représentatif, il sait en consultant le SIG au niveau 1 qu'un polygone de 4 cm², tracé par l'imprimante sur la carte puis identifié par une couleur homogène et un numéro, ne correspond pas à une zone de terrain homogène. Le secteur agrandi et le bloc-diagramme, tracés aussi par l'imprimante ou l'examen de la photo, lui indiquent que cette zone est en réalité hétérogène et constituée de 3 Unités de modelé différentes, associées dans un ordre et dans des proportions déterminées (cf. fig. 9-4 et photo 6).

Si au contraire l'utilisateur consulte le SIG au niveau 2, il sait que les 3 Unités de modelé, constituant des unités cartographiques différentes à l'échelle de 1/50 000 (cf. fig. 9-3), sont des parties d'une même Unité naturelle de

terrain qui peuvent être regroupées dans le même ensemble au niveau 1.

La figure 10 illustre de manière plus didactique encore la façon de découper une Unité naturelle de terrain en plusieurs Unités de modelé. Cet exemple est extrait d'une carte réalisée par l'Orstom en Côte-d'Ivoire (POSS, 1982).

D'autre part nous savons, à partir des études détaillées de sites représentatifs, que chaque Unité de modelé est constituée le plus souvent de deux ou de plusieurs Unités de sol ou compartiments verticaux de sol (13) de nature différente (cf. fig. 12-2), plus rarement d'une seule unité. Les attributs de la description des Unités de sol, après avoir été codifiés, sont introduits dans le SIG d'où ils peuvent être extraits sous forme de données tabulaires. En revanche, la répartition et l'étendue occupée dans chaque polygone, représentant une Unité de modelé, par les diverses Unités de sol qui la constituent sont des données graphiques. On se trouve ainsi dans la même situation que pour le niveau 1, où une Unité naturelle de terrain comportait plusieurs Unités de modelé. Ici chaque Unité de modelé comporte plusieurs Unités de sol. Celles-ci ne peuvent pas être introduites graphiquement dans le SIG au niveau 2, ni par conséquent extraites sous forme de carte, pour la même raison déjà évoquée au niveau 1 à propos des Unités de modelé. Une des dimensions des Unités de sol est généralement trop petite pour que chacune de ces dernières puisse être représentée séparément sur une carte à une échelle variant de 1/20 000 à 1/50 000.

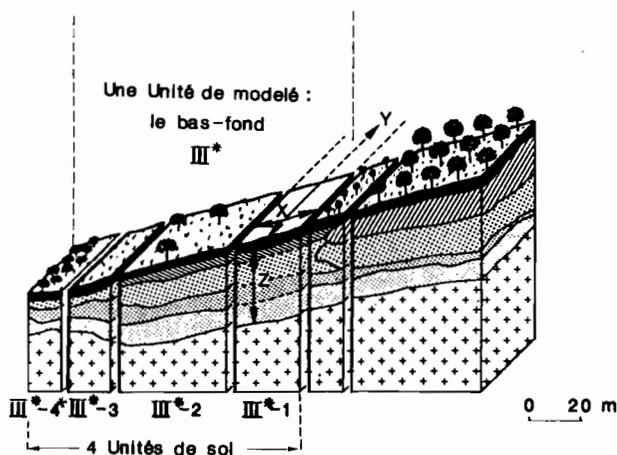


FIG. 11. — Exemple montrant les trois dimensions, X, Y, et Z, d'une Unité de sol.

Example showing the three dimensions (X, Y and Z) of a Soil unit.

La figure 11 montre l'exemple d'une Unité de modelé (le bas-fond) constituée de trois Unités de sol. On constate

(13) Se reporter à la définition de ce terme au niveau 3, page 318.

que l'une au moins des trois dimensions (x, y, z) d'une Unité de sol (la dimension x sur la figure) est trop petite pour que ce compartiment puisse être représenté sur une

carte à 1/50 000 par exemple et que la carte reste lisible pour un utilisateur, la dimension de x étant de 0,4 mm à 1/50 000.

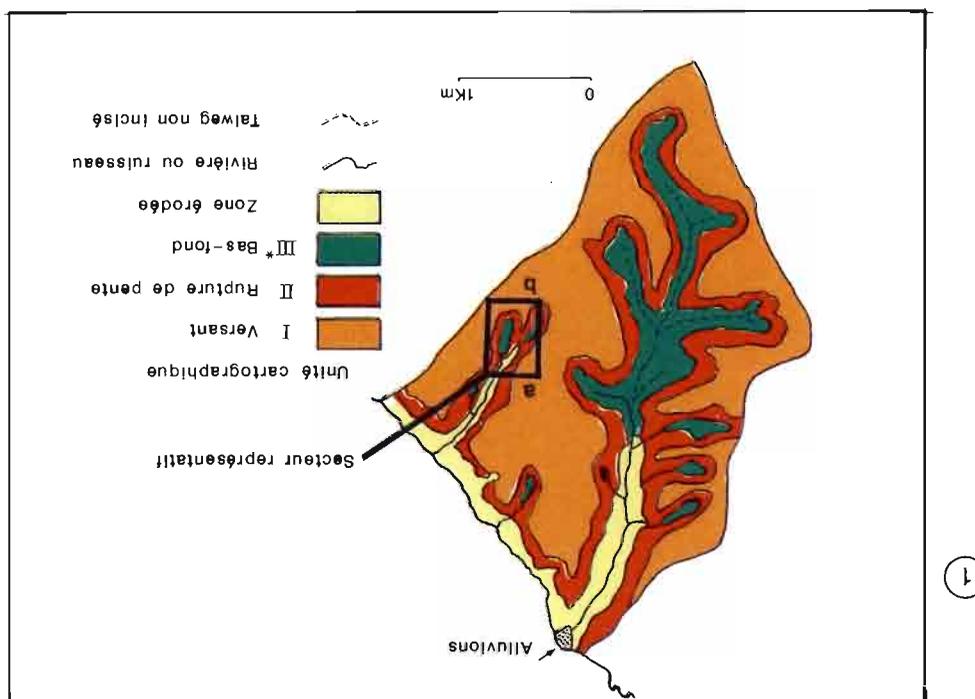


FIG. 12-1. — Échantillon de carte à 1/50 000. Les trois unités cartographiques représentent les trois Unité de modelé.
 Extract from a 1: 50,000 scale map. The three mapping units represent the three Landform units.

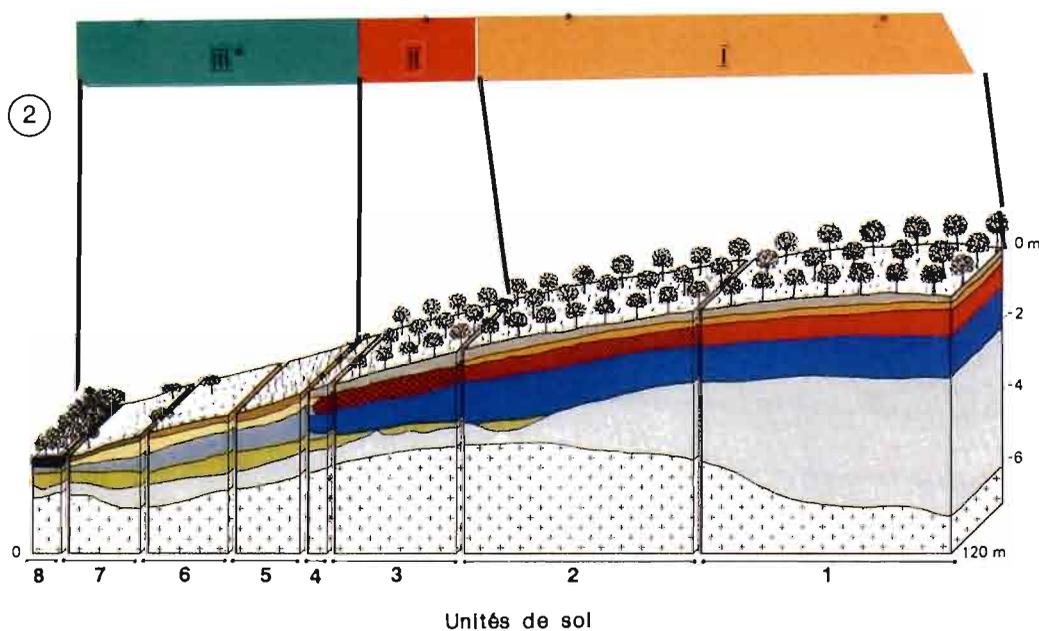


FIG. 12-2. — Bloc-diagramme montrant la répartition des Unités de sol dans les trois Unités de modelé, sous la forme d'une toposéquence.
 Diagram showing the distribution of Soil units in the three Landform units, in the form of a toposequence.

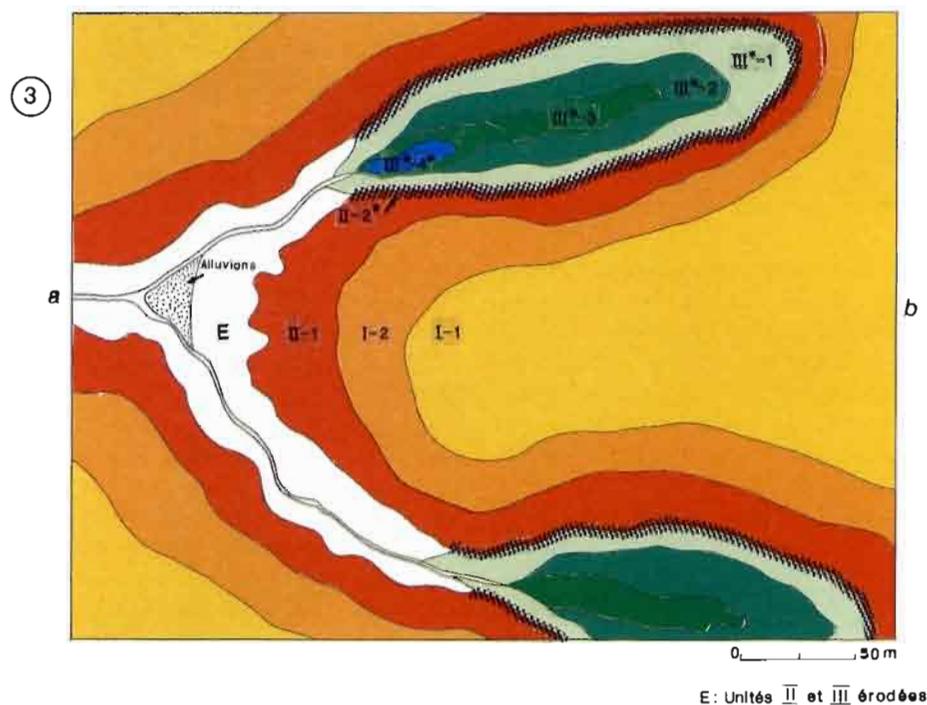


FIG. 12-3. — Secteur représentatif de la figure 12-1, dessiné sur une carte à 1/2 500, dont la légende est constituée par le bloc-diagramme ci-dessous.

Les 8 unités cartographiques représentent les 8 Unités de sol.

Representative section of figure 12-1, drawn on a scale of 1 : 2,500. The key is provided by the diagram below.

The 8 mapping units represent the 8 Soils units.

unités cartographiques

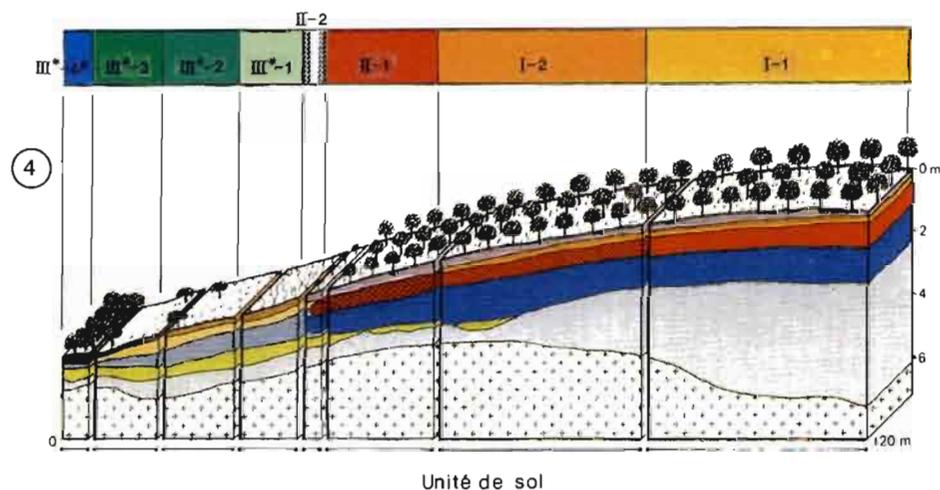


FIG. 12-4. — Introduction des données au niveau 2. Zoom sur un secteur représentatif pour visualiser les unités de sols et montrer leur répartition dans chaque Unité de modelé.

Introduction of Level 2 data. Close-up of a representative sector, showing the Soil units and their distribution within each Landform unit.

En introduisant les caractéristiques de cette Unité de modelé dans un SIG au niveau 2, il y a donc encore une perte d'information déjà acquise par le pédologue et importante pour l'utilisateur : la distinction de 3 Unités de sol différentes dans une Unité de modelé.

Pour ne pas perdre cette information, nous allons procéder de la même manière que précédemment pour le niveau 1.

On sélectionne un petit secteur représentatif sur une carte à 1/50 000 (cf. fig. 12-1), dont on fait ensuite un agrandissement suffisant (0,25 cm² sur une carte à 1/50 000 équivalant à 0,25 km² sur le terrain, est agrandi 20 fois) pour que la localisation et l'étendue occupée par chaque Unité de sol dans les Unités de modelé puissent être représentées graphiquement sur un échantillon de carte à échelle plus grande (1/2 500, cf. fig. 12-3). La disposition des Unités de sol dans une Unité de modelé est modélisée par un bloc-diagramme. Comme les Unités de modelé sont associées en toposéquence, on regroupe toutes ces Unités de sol sur le même bloc-diagramme (cf. fig. 12-2). Puis le bloc-diagramme et la carte sont numérisés graphiquement dans le SIG au niveau 2. Ils peuvent ensuite être extraits sous la même forme par un utilisateur.

Ainsi nous avons de nouveau introduit l'information manquante dans le niveau 2 du SIG sous la forme d'un échantillon du niveau 3.

Cette procédure est utilisable pour introduire dans un SIG des données sur les sols et leur répartition, quand on dispose de cartes à une échelle allant de 1/20 000 à 1/100 000 environ. De plus, elle facilite le changement d'échelle et fait la transition avec le niveau 3 du SIG.

Niveau 3 — Unités de sol

Une Unité de sol est un compartiment vertical d'une Unité de modelé qui constitue elle-même une partie d'une Unité naturelle de terrain ; elle est définie de la manière suivante :

« Partie d'une Unité de modelé constituée par une superposition verticale déterminée d'horizons, entre la surface du terrain et à la base le matériau originel, et caractérisée par un mode de fonctionnement cyclique saisonnier, en particulier par son cycle hydrique et son cycle thermique.

Les variations latérales des propriétés morphologiques, physico-chimiques, minéralogiques, hydriques et thermiques sont trop faibles pour exercer une influence édaphique significative sur la croissance des plantes d'un point à un autre de la superficie de terrain ainsi délimitée ». (BRABANT, 1991).

En se référant à cette définition, on peut considérer que :

— une Unité de sol est homogène pour une utilisation agronomique déterminée ;

— chaque Unité de sol peut être identifiée et décrite par une coupe verticale de dimension métrique (cf. fig. 13-1-2), allant de la surface topographique jusqu'au matériau originel.

Ce niveau 3 est caractérisé par des attributs qui sont principalement de nature pédologique et il introduit systématiquement une troisième dimension z qui vient s'ajouter aux deux autres x et y utilisées dans les niveaux 1 et 2.

Chaque Unité de modelé comporte souvent 2 à 3 Unités de sol, parfois une seule mais rarement plus de 3.

Les limites entre ces Unités de sol peuvent être représentées graphiquement sur des cartes dont l'échelle est généralement inférieure à 1/10 000 (cf. fig. 12-3). Comme pour les niveaux précédents, le contenant, sous la forme des contours de polygones, peut être numérisé graphiquement et le contenu des polygones sous la forme d'attributs codifiés. Une liste d'attributs est donnée dans l'annexe I.

Passer du niveau 2 du SIG qui correspond à des données d'une carte à 1/50 000 par exemple, au niveau 3 qui se réfère à une carte à 1/5 000 ou 1/2 500, et inversement, est relativement aisé pour un utilisateur.

Grâce à l'opération effectuée sur un secteur représentatif il sait, en consultant le SIG au niveau 2, qu'un polygone représentant une Unité de modelé ne correspond pas à une zone de terrain homogène. Le secteur représentatif agrandi et le bloc-diagramme lui indiquent que cette zone est constituée par exemple de trois Unités de sol différentes, associées dans un ordre et des proportions déterminées (cf. fig. 12-2).

Si cet utilisateur consulte le SIG au niveau 3, il constate que ces trois Unités de sol, constituant des unités cartographiques différentes à l'échelle du 1/2 500, sont des parties d'une même Unité de modelé et peuvent être regroupées dans le même ensemble au niveau 2.

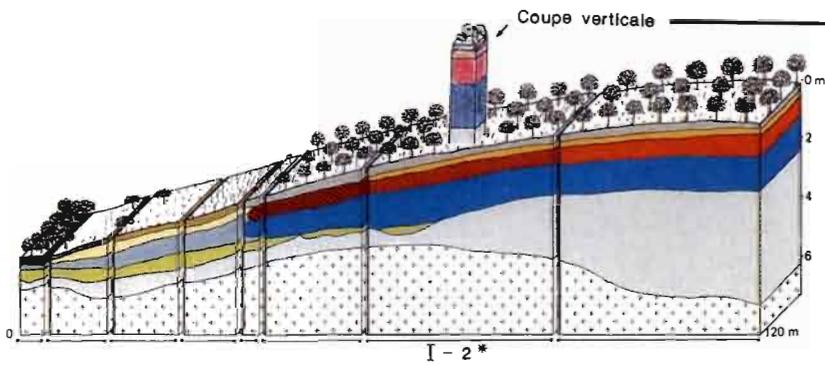
D'autre part, cet utilisateur connaît, en consultant le bloc-diagramme numérisé au niveau 3, le nombre et la succession verticale des horizons de chaque Unité de sol (cf. fig. 13-1). Cela lui permet ainsi de faire la transition avec le niveau 4.

Niveau 4 — Horizon et couche — strate et profondeur racinaire

À ce niveau, nous introduisons dans le SIG les différentes composantes de chaque Unité de sol, celle-ci étant modélisée par une coupe verticale partant du sommet des arbres jusqu'à la roche-mère ou le matériau originel du sol (cf. fig. 13-1-2).

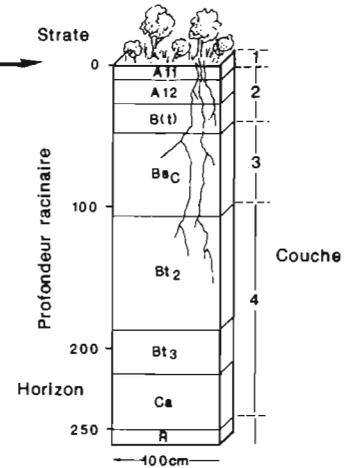
La composante de base choisie pour caractériser le sol lui-même est l'horizon. La coupe indique donc la succession verticale des horizons (cf. fig. 13-2), chacun d'eux étant caractérisé par plusieurs dizaines d'attributs (cf. annexe I).

1 - Modélisation d'une unité de sol par une coupe verticale



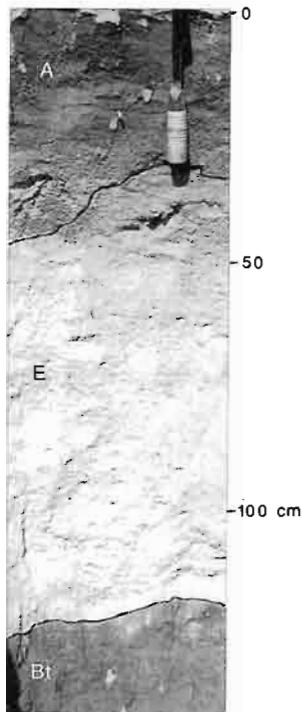
chaque unité de sol (l'unité I-2 sur la figure) peut être modélisée par une coupe verticale

2 - Coupe verticale



- 1- Couche d'humus
- 2- Couche arable
- 3- Couche de latérite
- 4- Sous-sol

Photo 7



Exemple d'une coupe de sol montrant la superposition de trois horizons principaux

FIG. 13. — Introduction des données au Niveau 3.

Zoom sur une coupe d'Unité de sol pour montrer le nombre et la disposition des horizons, des couches, des strates végétales et du profil racinaire.

Introduction of level 3 data.

Close-up of a cross section of a Soil unit, showing the number and arrangement of horizons, layers, vegetation storeys and root profile layers.

Le terme de couche (14) (cf. fig. 13-2) peut se substituer à celui d'horizon quand on veut employer un langage plus familier aux utilisateurs : par exemple la couche d'humus ou la couche arable pour les agriculteurs, la couche de latérite pour les spécialistes des travaux routiers. Cependant l'emploi du terme de couche doit se référer à la succession verticale des horizons qui constitue la donnée de base au niveau 4 du SIG.

En ce qui concerne la végétation, le terme de strate conviendrait pour la partie aérienne des plantes (par exemple, strate arborée, strate herbacée) avec des subdivisions possibles et celui de profondeur racinaire pour la partie souterraine.

Ce niveau 4 est donc caractérisé par des attributs principalement de nature pédologique ou floristique.

Les relations entre les niveaux 3 et 4 sont différentes de celles qui relient les niveaux 1, 2 et 3. Les données qui caractérisent ces trois premiers niveaux sont géoréférencées alors que celles du niveau 4 ne le sont que ponctuellement au point d'observation de la coupe verticale de sol. Il n'y a donc pas de données graphiques sous forme de cartes en deux dimension x et y à introduire dans le SIG au niveau 4.

Il est rare que l'extension latérale en x et y des horizons et que leurs variations d'épaisseur, c'est-à-dire les valeurs de z, soient déterminées. Cela peut être réalisé dans des sites dont la superficie ne dépasse pas quelques hectares ou quelques dizaines d'hectares.

Dans ce cas, les données sont présentées sous forme de cartes d'analyse structurale (BOULET et al., 1982) ou de tomographies (GIRARD, 1983).

On remarque que la troisième dimension z est positive quand elle concerne certaines couches (la couche de litière par exemple) ou la partie aérienne des plantes ; elle est négative quand elle concerne les horizons du sol situés, par définition, sous la surface topographique et le système racinaire des plantes. Cela correspond dans un SIG urbain aux étages (z positif) et aux sous-sols (z négatif).

AUTRES NIVEAUX INFÉRIEURS

Par analogie avec un SIG urbain (cf. fig. 1), il est possible de déterminer dans la structure d'un SIG rural d'autres niveaux inférieurs, qu'il serait trop long de décrire dans cet article.

En comparant les figures 1 et 14, on constate qu'elles présentent une forte analogie. On peut remarquer aussi que la gamme des techniques d'identification des objets va de la microscopie, pour les niveaux inférieurs, à la télédétection, pour les niveaux supérieurs, et que la gamme des

utilisateurs s'élargit des niveaux inférieurs vers les supérieurs.

PROPRIÉTÉS D'UN SIG RURAL FONDÉ SUR LA CARACTÉRISATION DES UNITÉS NATURELLES DE TERRAIN

Nous allons comparer maintenant les deux types de SIG, rural et urbain, pour rechercher leurs similitudes et leurs différences (cf. page 318).

— Les similitudes : un SIG rural, dont la structure est fondée sur les caractéristiques des Unités naturelles de terrain, présente les similitudes suivantes :

1 — Il est bien structuré et formé de plusieurs niveaux hiérarchisés et emboîtés. Sa structure présente un motif répétitif, ce qui facilite la modélisation.

2 — Les objets à caractériser sont des surfaces à deux dimensions (une Unité de modelé par exemple) ou des volumes à trois dimensions avec un z, positif ou négatif (une Unité de sol par exemple).

3 — Les objets, au moins ceux des niveaux 1 à 4, peuvent être géocodés.

4 — Les objets sont tous identifiables dans leur totalité sur les images aérospatiales dans les niveaux 1 et 2, mais en partie seulement dans les niveaux 3 et 4.

5 — Les objets référencés à un niveau donné peuvent être situés par rapport aux autres niveaux, supérieurs et inférieurs. Par exemple : un horizon (niveau 4) est rattaché à une Unité de sol (niveau 3) de telle Unité de modelé (niveau 2) ; il possède aussi un mode d'agrégation (niveau 5) avec des types déterminés de fond matriciel (niveau 6).

6 — La structure de base du SIG rural ne change pas, quels que soient le mode d'utilisation et la spécialité des utilisateurs : géographe, géologue, pédologue, agronome, hydrologue, etc. Chaque spécialiste peut adapter des modules à cette structure de base en fonction de ses besoins particuliers.

Les différences entre SIG urbain et SIG rural portent sur la forme, le contour et la nature des objets :

1 — La forme des objets n'est pas géométrique, au moins pour ceux des niveaux 1 à 8, et leur contour n'est pas net mais plus ou moins flou.

2 — Les objets ne sont pas artificiels mais naturels. Cela implique qu'ils possèdent des particularités telles qu'une variation, paraissant parfois aléatoire, de certaines propriétés dans le même ensemble. Par exemple, la teneur en argile d'un horizon est caractérisée par une valeur moyenne de 12 %, alors que cette valeur peut varier en réalité de 9 à 15 % d'un point à un autre de cet horizon.

(14) Couche : subdivision effectuée dans une coupe de sol et correspondant à une partie d'un horizon, à un horizon ou regroupant deux ou plusieurs horizons.

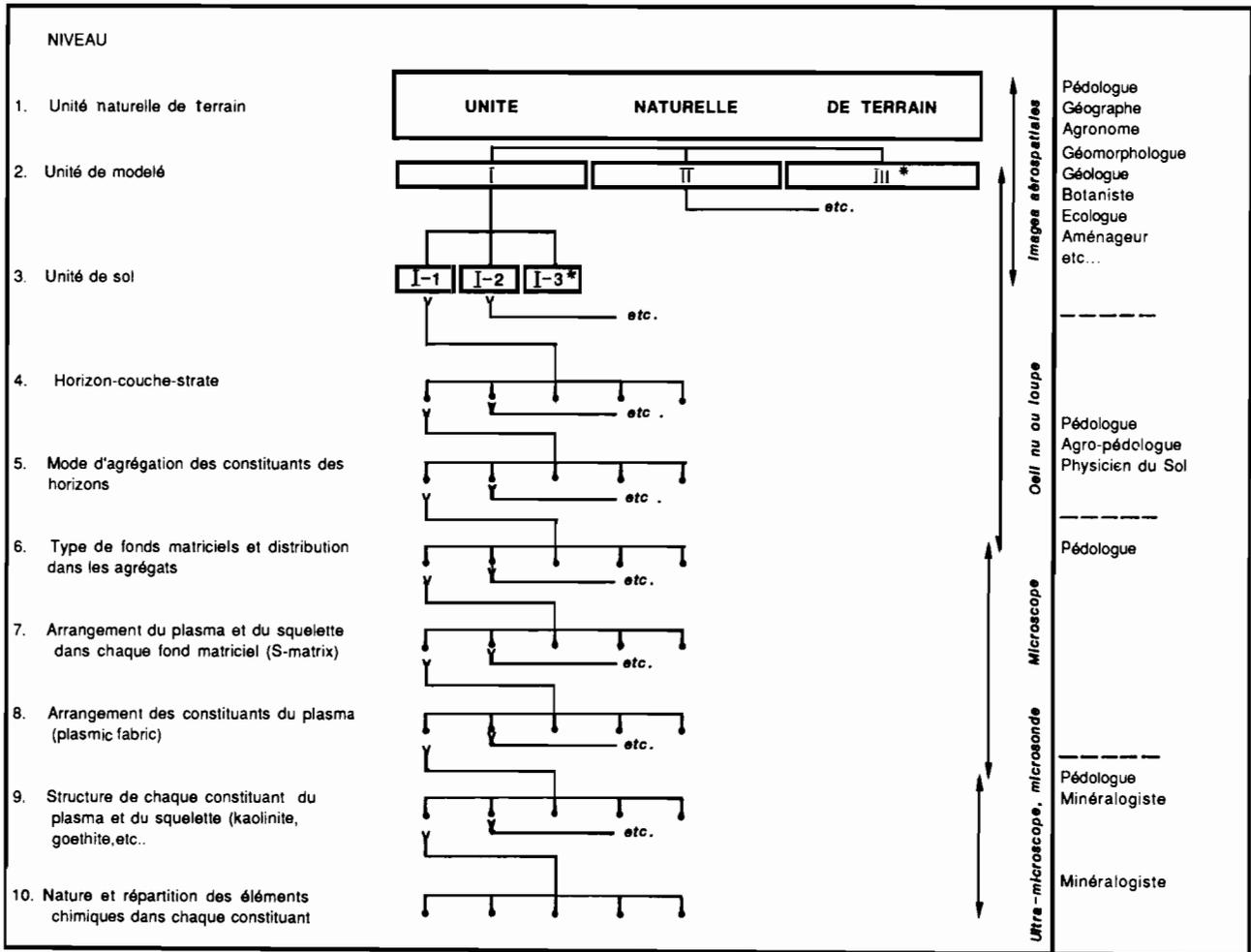


FIG. 14. — Structure d'une base de données comportant, en plus des quatre premiers niveaux, les niveaux 5 à 10, spécifiques à la pédologie ou à la minéralogie.

Structure of a data base comprising levels 5 to 10 (specifically pedological or mineralogical) as well as the first four levels.

Les problèmes techniques et relationnels rencontrés dans les SIG urbains existent aussi dans les SIG ruraux comme la normalisation des formats d'échange, de la couche de transmission. La solution de ces problèmes est également prévisible à court terme.

CONCLUSIONS

Le découpage de l'espace rural en Unités naturelles de terrain et la structure du SIG correspondant, constituée de niveaux hiérarchisés et emboîtés, sont compatibles avec :

- les conditions requises par l'informatique ;
- les exigences des changements d'échelle, et la recherche d'une perte minimale d'informations au cours de ces changements ;

— une approche pluridisciplinaire, puisque les études sont orientées vers le même objet et qu'elles relèvent de plusieurs disciplines ;

— les besoins des utilisateurs du développement rural, puisque les unités définies aux niveaux 1, 2 et 3 ont des dimensions équivalentes aux unités d'aménagement rural : le bassin versant (niveau 1), l'exploitation agricole (niveau 2), la parcelle (niveau 3), le site d'expérimentation (niveau 4) ;

— l'un des objectifs principaux de la science du sol : mieux s'insérer dans la communauté scientifique et faire connaître le rôle majeur du sol dans la gestion de l'environnement.

Par ailleurs, la principale recommandation à faire est que les thématiciens des diverses disciplines s'accordent sur un découpage de l'espace rural qui soit fondé sur un

dénominateur commun : au moins le concept d'Unité naturelle de terrain décrit au niveau 1 du SIG. Ils pourraient ensuite moduler le découpage des niveaux inférieurs en fonction des nécessités de leur discipline et de leurs recherches, mais en respectant cette base commune minimale. Notons en passant que le concept d'Unité naturelle de terrain est comparable au concept de « terroir », bien connu des agronomes et des géographes.

Nous savons qu'il ne suffit pas de regrouper des thématiciens ou de réaliser des fichiers thématiques numérisés et de les croiser pour réaliser des travaux pluridisciplinaires. Il est essentiel que les divers thématiciens travaillent sur le même objet.

Nous sommes conscients aussi qu'un tel accord n'est pas facile à obtenir. Les difficultés relationnelles, déjà observées dans l'utilisation des SIG urbains, vont se présenter à nouveau. Chaque thématicien aura tendance à identifier des unités naturelles en fonction de ses connaissances, de ses préoccupations et de ses objectifs.

Nous ajouterons que les pédologues ont aussi des efforts importants à faire. Ils devraient éviter de donner au concept de « pédon » trop réductionniste bien que largement utilisé depuis cinquante ans, l'importance qu'il n'a pas. En effet, l'utilisation de ce concept a déjà montré ses limites, a freiné le développement de la science du sol dans certains domaines et a gêné la coordination avec des disciplines complémentaires.

Le découpage systémique de l'espace rural nous paraît être le meilleur moyen de rendre un SIG rural opérationnel, de favoriser l'insertion des pédologues dans les grands projets de contrôle et de gestion des terres et de l'environnement de la planète au cours du XXI^e siècle. D'autre part, ce type de SIG est adapté aux espaces ruraux des pays tropicaux. Or, l'évaluation, l'utilisation durable et la conservation des terres et la protection de l'environnement rural sont des problèmes vitaux pour de nombreux pays de la zone tropicale, qui sont encore à large dominance rurale. Cela concerne la plus grande partie de l'Afrique, de larges étendues en Asie tropicale et en Amérique du Sud, c'est-à-dire les trois quarts environ des terres émergées arables.

Enfin, il est encourageant de constater que la nécessité d'une approche systémique est ressentie aussi par d'autres

disciplines, comme la géologie par exemple. Voici des extraits de l'exposé de Y. SCANVIC du BRGM à la Journée nationale de la recherche géographique (12 juin 1989, à Paris) concernant les recherches en télédétection au service de l'information géologique et géographique :

« La réponse spectrale des objets géologiques est un critère nécessaire mais non suffisant des classifications [de ces objets]. Il faut donc faire appel à d'autres descripteurs compatibles avec l'interprétation analytique... »

« Les premiers résultats montrent qu'on peut définir sur les images [satellites] des "unités de paysage" ; ce sont des surfaces d'étendue quelconque, présentant des relations constantes entre certaines de leurs composantes. Les différentes composantes traduisent des liens étroits entre la végétation, la morphologie, la fracturation et le substratum. L'approche consiste donc à synthétiser cet ensemble de données, à choisir des parcelles d'entraînement homogènes et représentatives... »

QUELQUES PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Trois principales perspectives de recherches peuvent être proposées :

— la première concerne les spécialistes de la télédétection qui pourraient apporter leur contribution pour faciliter l'identification des Unités naturelles de terrain, qui sont le fondement des SIG ruraux et constituent la « boîte noire » dont peuvent dériver une grande partie des données physiques (15) ;

— la deuxième s'adresse aux informaticiens pour qu'ils adaptent leur outil aux nécessités imposées par les caractéristiques des objets naturels. Des recherches pourraient être menées ou poursuivies sur les possibilités de la logique floue (*fuzzy logic*) qui semble bien adaptée à l'étude des objets naturels ;

— la troisième se rapporte à un domaine actuellement peu exploré : celui des ensembles fractals. Des recherches en ce domaine, en liaison avec les spécialistes de la télédétection, pourraient apporter des résultats nouveaux et intéressants sur la répartition et la structure des Unités naturelles de terrain.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 30 juin 1992.

BIBLIOGRAPHIE

ACMIS 89-90, 1990. — Groupe de travail. *Analyse comparée de modèles d'information spatialisée*. Orstom, Paris, 70 p. *multigr.*

BOULAIN (J.), 1978. — Les unités cartographiques en pédologie. Analyse de la notion de génon. *Science du Sol*, n° 1 : 15-29.

BOULET (R.), CHAUVEL (A.), HUMBEL (F. X.), LUCAS (Y.), 1982 a. — Analyse structurale et cartographique en pédologie. I — Prise en compte de l'organisation bidimensionnelle de la couverture pédologique : les études de toposéquences et leurs principaux apports à la connaissance des sols. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XIX, 4 : 309-321.

- BOULET (R.), HUMBEL (F. X.), LUCAS (Y.), 1982 b. — Analyse structurale et cartographique en pédologie. II — Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XIX, 4 : 323-339.
- BOULET (R.), HUMBEL (F. X.), LUCAS (Y.), 1982 a. — Analyse structurale et cartographique en pédologie. — Passage de la phase analytique à une cartographie générale synthétique. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XIX, 4 : 341-351.
- BOURGEON (G.) BERTRAND (R.), 1983. — Organisation de la couverture pédologique et précision de sa cartographie. Analyse d'un exemple. *Science du Sol*, n° 1 : 49-61.
- BRABANT (P.), 1989. — « La connaissance de l'organisation des sols dans le paysage : un préalable à la cartographie et à l'évaluation des terres ». In : *Actes du premier séminaire franco-africain de pédologie tropicale*, Lomé, Togo, 6-12 février 1989. Orstom, Paris, 484 p : 65-85.
- BRABANT (P.), 1991. — *Le sol des forêts claires du Cameroun. Exemple d'étude d'un site représentatif en vue de la cartographie des sols et de l'évaluation des terres*. Orstom-Mesires, Paris. Tome 1, 530 p. Tome 2, 278 p.
- BRABANT (P.), GAUVAUD (M.), 1985. — *Les sols et les ressources en terres du Nord-Cameroun*. Notice explicative n° 103, Orstom, Paris, 285 p.
- BURROUGH (P. A.), 1986. — *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Clarendon Press, Oxford, 194 p.
- Conseil national de l'information géographique, 1989. — *Actes de la Journée Nationale de la Recherche géographique*, 12 juin 1989, Paris. CNIG, Paris, 152 p.
- Conseil national de l'information géographique, 1990. — Thème : intégration de la télédétection dans les SIG et les études géographiques. Panorama sur l'activité française en matière de télédétection associée aux SIG. André Mangin — SCOT Conseil, 43 p.
- CONACHER (A. J.), DALRYMPLE (J. B.) 1977. — The nine unit landsurface model: an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma*, 18 : 1-154.
- DIJKERMAN (J. C.), 1974. — Pedology as a science, the role of data, models and theories in the study of natural soil system. *Geoderma*, 11 : 73-93.
- DUDAL (R.), 1986. — « The role of pedology in meeting the increasing demands on soils ». In : *C.R. du XIII^e Congrès de l'assoc. Internat. de la Sci. du Sol*. Hambourg, août 1986, vol. 1 : 80-96.
- ESCADAFAL (R.), 1990. — *Pédologie et systèmes d'information géographique*. Notes réunies par R. ESCADAFAL. Orstom, Paris, 12 p. *multigr.*
- F.A.O., 1989. — *Land and water*, n° 33, August. AGLS Division. Rome, 16 p.
- GÉOMÈTRE, 1990, n° 1 janvier. — Dossier : systèmes d'informations géographiques (SIG) : 40-82.
- GÉOMÈTRE, 1990, n° 10 octobre. — Dossier : les formats d'échange : 36-63.
- GÉOMÈTRE, 1991, n° 3 mars. — Dossier : Global Positioning system (GPS).
- GERRARD (A. J.), 1981. — *Soils and landforms. An integration of geomorphology and pedology*. G. Allen and Urwin, London, 219 p.
- GIRARD (M. C.), 1983. — *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne*. Thèse, Institut national agronomique, Paris - Grignon.
- HUGGET (R. J.), 1975. — Soil landscape systems: a model of soil genesis. *Geoderma*, vol. 13 : 1-22.
- Informatique et biosphère, 1971. — *Glossaire de pédologie. Description de l'environnement en vue du traitement informatique*. Paris, 173 p.
- ISRIC, 1990. — *Proceeding of the international workshop on procedures manual revisions for the Global Soils and Terrain Digital Database*. Wageningen, 24-26 April 1990. N.H. Batjes (editor), 25 p.
- MEIJERINK (M. J.), VALENZUELA (C.), STEWART (A.), ILWIS project, 1988. The integrated land and watershed management information system. *ITC Publication*, n° 7, Enschede, The Netherlands, 115 p.
- NORTHCOTE (K. M.), 1984. — Soil-landscapes, taxonomic units and soil profiles : a personal perspective of some unresolved problems of soil survey. *Soil survey and Land evaluation*, vol. 4, n° 1 : 1-7.
- PLANCHON (O.), 1991. — *Étude spatialisée des écoulements sur les versants et de leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion. Exemple en savane humide (Booro-Borotou, Côte-d'Ivoire)*. Orstom, 340 p. *multigr.*
- POSS (R.), 1982. — *Étude morpho-pédologique de la région de Katiola (Côte-d'Ivoire). Cartes des paysages pédologiques et des unités morpho-pédologiques. Feuille Katiola, 1/200 000*. Notice explicative n° 94, Orstom, Paris 142 p.
- QUENSIERE (J.), 1990. — « Systémique et pluridisciplinarité : l'exemple du Programme d'étude de la pêche dans le delta intérieur du Niger ». Séminaire, *Seminfor IV*, Orstom, Paris : 475-492.
- SCANVIC (Y.), 1989. — « Recherches en télédétection au service de l'information géographique ». In : *Actes de la Journée Nationale de la Recherche géographique*, 12 juin 1989, Paris : 113-118.
- SOLTROP 89 1989. — *Actes du premier séminaire franco-africain de pédologie tropicale*, Lomé, Togo, 6-12 février 1989. Orstom, Paris, 484 p.
- SOMBRÆK (W. G), VAN DE WEG (R. F.), 1980. — *Some considerations on quality and readability of soil maps and their legends*. I.S.R.I.C., Wageningen, The Netherlands. Reprinted from annual report, 17 p.
- SOMBRÆK (W. G), BRAUN (H. M. H.), VAN DE POWW (B. J. A.), 1982. — Exploratory soil maps and agro-climatic zone map of Kenya, scale 1/1 000 000. Ministry of Agriculture, Nairobi, Republic of Kenya.
- Soter project 1986. — World Soils and terrain Digital Data Base at a scale of 1/1 000 000. Project proposal. I.S.R.I.C., Wageningen, The Netherlands, 138 p.

ANNEXE I

EXEMPLES D'ATTRIBUTS UTILISÉS POUR CARACTÉRISER LES QUATRE NIVEAUX DE DONNÉES DU SIG

Niveau 1**Exemples d'attributs utilisés pour caractériser une Unité naturelle de terrain****1. REPÉRAGE GÉOGRAPHIQUE**

- 1.1. Pays
- 1.2. Région ou province
- 1.3. Préfecture
- 1.4. Échelle de la carte -Année -Auteur -Éditeur
- 1.5. Références de la carte topographique utilisée (échelle -année -auteur)
- 1.6. Unité cartographique ou référence du type d'Unité naturelle de terrain
- 1.7. Numéro du polygone dans cette unité cartographique
- 1.8. Coordonnées géographiques de la partie centrale du polygone
- 1.9. Références de l'image-satellite utilisée
- 1.10. Références de l'image-radar utilisée
- 1.11. Références des photos aériennes utilisées

2. ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE

Attributs 2.1 à 2.19

3. ENVIRONNEMENT GÉOMORPHOLOGIQUE

Attributs 3.1 à 3.6

4. ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE

Attributs 4.1 à 4.6

5. ENVIRONNEMENT HYDROGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE

- 5.1. Références de la carte ou des études hydrologiques
- 5.2. Références de la carte hydrogéologique ou des études hydrogéologiques
- 5.3. Nom du bassin versant local et régional
- 5.4. Forme du réseau hydrographique
- 5.5. Densité du réseau hydrographique
- 5.6. Distance moyenne entre les axes de drainage d'ordre 1, d'ordre 2
- 5.7. Degré d'incision du réseau hydrographique sur ces axes d'ordre 1 et 2
- 5.8. Type de régime hydrologique
- 5.9. Coefficient d'écoulement moyen annuel
- 5.10. Coefficient de ruissellement moyen annuel
- 5.11. Débit spécifique moyen annuel
- 5.12. Période et durée de tarissement de l'écoulement sur les axes d'ordre 1, 2 et 3
- 5.13. Pourcentage de terrain inondable saisonnièrement et localisation
- 5.14. Présence ou absence de nappe phréatique dans le sol
- 5.15. Nappe permanente ou saisonnière
- 5.16. Régime de la nappe
- 5.17. Présence ou absence de nappe dans le sous-sol
- 5.18. Profondeur et débit approximatif de cette nappe
- 5.19. Conductivité et pH de la nappe

6. ENVIRONNEMENT VÉGÉTAL (VÉGÉTATION NATURELLE ET SPONTANÉE)

Attributs 6.1 à 6.7

7. ENVIRONNEMENT HUMAIN

- 7.1. Aucune utilisation ou utilisation
- 7.2. Densité de population rurale
- 7.3. Mode d'exploitation dominant (si utilisation)
- 7.4. Système d'exploitation dominant
- 7.5. Système de culture
- 7.6. Modification de l'environnement géomorphologique
- 7.7. Modification de l'environnement hydrique et hydrologique
- 7.8. Modification de l'environnement végétal
- 7.9. Amélioration ou dégradation du sol
- 7.10. Type d'amélioration
- 7.11. Type dominant de dégradation
- 7.12. Degré de dégradation
- 7.13. Extension de la dégradation
- 7.14. Vitesse estimée de la dégradation
- 7.15. Causes principales de la dégradation
- 7.16. Effets hors site

8. ENVIRONNEMENT PÉDOLOGIQUE

- 8.1. Références de la carte des sols utilisée (Échelle -Année -Auteur)
- 8.2. Type de système-sol (Référenciel utilisé)
- 8.3. Nombre d'horizons majeurs et liste de ces horizons
- 8.4. Horizon ou couple d'horizons diagnostiques
- 8.5. Références du pédon ou des deux pédons dominants (IRB ou légende FAO)
- 8.6. Régime hydrique général du système-sol
- 8.7. Caractéristiques hydriques à l'échelle du bassin versant élémentaire
- 8.8. Bilan hydrique annuel à l'échelle du bassin versant élémentaire

9. ZOOM SUR UN SECTEUR DE RÉFÉRENCE DU POLYGONE

Transition vers le niveau 2

Niveau 2

Exemples d'attributs utilisés pour caractériser une Unité de modelé

1. REPÉRAGE

- 1.1. Pays
- 1.2. Région ou province
- 1.3. Préfecture
- 1.4. Unité cartographique ou référence du type d'Unité naturelle de terrain
- 1.5. Numéro du polygone dans cette unité cartographique
- 1.6. Nombre d'Unités de modelé (cf. Zoom au niveau 1)
- 1.7. Numéro de l'Unité de modelé
- 1.8. Pourcentage de la superficie occupée par cette Unité de modelé dans le polygone

2. ENVIRONNEMENT GÉOMORPHOLOGIQUE

- 2.1. Type de forme
- 2.2. Dénivellation
- 2.3. Gradient de pente
- 2.4. Longueur de la pente
- 2.5. Mode de raccordement avec le ou les formes voisines
- 2.6. Taux de recouvrement en surface par les cailloux et les blocs
- 2.7. Dimension des blocs
- 2.8. Affleurements rocheux. Pourcentage de terrain couvert
- 2.9. États de surface du sol

3. ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE

- 3.1. Matériau originel (si 2 ou 3 formations identifiées dans le polygone)
- 3.2. Profondeur de la roche compacte

4. ENVIRONNEMENT HYDROGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE

- 4.1. Présence ou absence de nappe phréatique
- 4.2. Nappe permanente ou saisonnière
- 4.3. Extension dans l'Unité de modelé
- 4.4. Durée de la présence de la nappe en mois (si saisonnière)
- 4.5. Profondeur du niveau hydrostatique au maximum saisonnier d'humidité
- 4.6. Profondeur du niveau hydrostatique au minimum saisonnier (si nappe permanente)
- 4.7. Conductivité et pH de la nappe
- 4.8. Couleur et turbidité
- 4.9. Pas de submersion ou submersion temporaire
- 4.10. Localisation et pourcentage de terrain submergé dans l'Unité de modelé
- 4.11. Périodicité et durée de la submersion
- 4.12. Hauteur de la nappe d'eau de submersion
- 4.13. Cause de la submersion

5. ENVIRONNEMENT VÉGÉTAL

- 5.1. Formation végétale dominante
- 5.2. Taxon ou famille dominante (ex: graminées, cypéracées)
- 5.3. Degré d'anthropisation

6. ENVIRONNEMENT HUMAIN

- 6.1. Aucune utilisation ou utilisation
- 6.2. Utilisation continue ou discontinue du sol
- 6.3. Rapport entre la durée des périodes de culture et de jachère
- 6.4. Mode d'exploitation
- 6.5. Type d'utilisation
- 6.6. Pratiques culturelles
- 6.7. Avec ou sans amélioration foncière
- 6.8. Amélioration avec ou sans modification du modelé
- 6.9. Nature de la modification

- 6.10. Type principal de dégradation
- 6.11. Degré le plus fréquent de dégradation
- 6.12. Vitesse estimée de la dégradation
- 6.13. Causes principales de la dégradation
- 7. ZOOM SUR UNE UNITÉ DE SOL DE CETTE UNITÉ DE MODELÉ
Transition vers le niveau 3

Niveau 3

Exemples d'attributs utilisés pour caractériser une Unité de sol

1. REPÉRAGE

- 1.1. Pays
- 1.2. Région ou province
- 1.3. Préfecture
- 1.4. Unité cartographique ou référence du type d'Unité naturelle de terrain
- 1.5. Numéro du polygone dans cette unité cartographique
- 1.6. Numéro de l'Unité de modelé (Zoom au niveau 1, cf.9)
- 1.7. Numéro de l'Unité de sol dans cette Unité de modelé (Zoom au niveau 2, cf.7)
- 1.8. Pourcentage de la superficie occupée par cette Unité de sol dans l'Unité de modelé
- 1.9. Période d'observation

2. ENVIRONNEMENT

- 2.1. État de la strate arborée
- 2.2. État de la strate arbustive
- 2.3. État de la strate herbacée
- 2.4. Abondance des résidus végétaux en surface ou absence de résidus
- 2.5. Présence ou absence de rejets de terre d'origine biologique en surface
- 2.6. Périodes de l'année où le sol est nu
- 2.7. Microrelief
- 2.8. État de surface
- 2.9. Variations saisonnières de l'état de surface
- 2.10. Façons culturales et soins culturaux
- 2.11. Amendement
- 2.12. Fumure organique
- 2.13. Fertilisation minérale
- 2.14. Intensité et localisation de la fertilisation
- 2.15. Vitesse d'infiltration de l'eau en surface
- 2.16. Amélioration du sol
- 2.17. État actuel de dégradation de la couche superficielle du sol ou de la couche arable

3. SOL

- 3.1. Nombre de profils de sol utilisés pour la sélection du profil de référence ou utilisation d'un seul profil considéré comme représentatif
- 3.2. Type de profil: U-G-D
- 3.3. Présence ou absence de marques d'hydromorphie
- 3.4. Hydromorphie constatée sur le terrain (présence de nappe par exemple)
- 3.5. Profondeur d'apparition de l'hydromorphie
- 3.6. Niveau hydrostatique maximum atteint par la nappe au cours d'une année à pluviosité «normale»
- 3.7. Profondeur atteinte par le front de dessiccation au cours du cycle hydrique annuel
- 3.8. Longueur (en jours) de la période végétative au cours d'une année
- 3.9. Succession verticale des horizons — Profondeur de la limite supérieure et inférieure de chacun
- 3.10. Succession verticale des couches et profondeur des limites (4 couches au maximum)
- 3.11. Profondeur d'enracinement possible pour les plantes ligneuses / pour les plantes herbacées
- 3.12. Épaisseur du matériau d'altération (en mètres)
- 3.13. Texture du matériau d'altération
- 3.14. Type d'altération (minéraux dominants)
- 3.15. Références taxonomiques du profil représentatif de l'Unité de sol : légende FAO, CPCS, Soil Taxonomy, autre classification, Dénomination vernaculaire et langue utilisée
- 3.16. Régime hydrique et thermique (selon les normes de la Soil Taxonomy)

4. ZOOM SUR UN HORIZON DU PROFIL REPRÉSENTATIF DE CETTE UNITÉ DE SOL

Transition vers le niveau 4

Niveau 4

Exemples d'attributs utilisés pour caractériser un horizon.

1. REPÉRAGE

Attributs 1.1 à 1.11 ;

2. CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES

- 2.1. Profondeur moyenne
- 2.2. Variations d'épaisseur dans l'unité de sol
- 2.3. Couleur, homogène ou hétérogène
- 2.4. Teinte (hue), valeur et chroma — à l'état sec/état humide (réf. Munsell) d'une ou de deux couleurs (si celle-ci est hétérogène)
- 2.5. Présence ou absence de taches
- 2.6. Distribution des taches
- 2.7. Couleur des taches dominantes — à l'état sec/à l'état humide
- 2.8. Texture
- 2.9. Teneur en éléments grossiers (supérieurs à 2 mm)
- 2.10. Pourcentage d'éléments à hydroxydes et oxydes.
- 2.11. Pourcentage d'éléments calci-magnésiques
- 2.12. Structure
- 2.13. Tenue des agrégats immergés dans l'eau
- 2.14. Vitesse d'humectation des agrégats par l'eau
- 2.15. Porosité
- 2.16. Consistance à l'état sec/à l'état humide
- 2.17. Degré d'activité biologique et type d'activité dominante (exemple : termites, vers de terre).
- 2.18. Densité des racines et grosseur
- 2.19. Mode de pénétration des racines
- 2.20. Type de transition avec l'horizon supérieur
- 2.21. Type de transition avec l'horizon inférieur

3. PROPRIÉTÉS MINÉRALOGIQUES

Attributs 3.1 à 3.4.

4. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Attributs 4.1 à 4.10

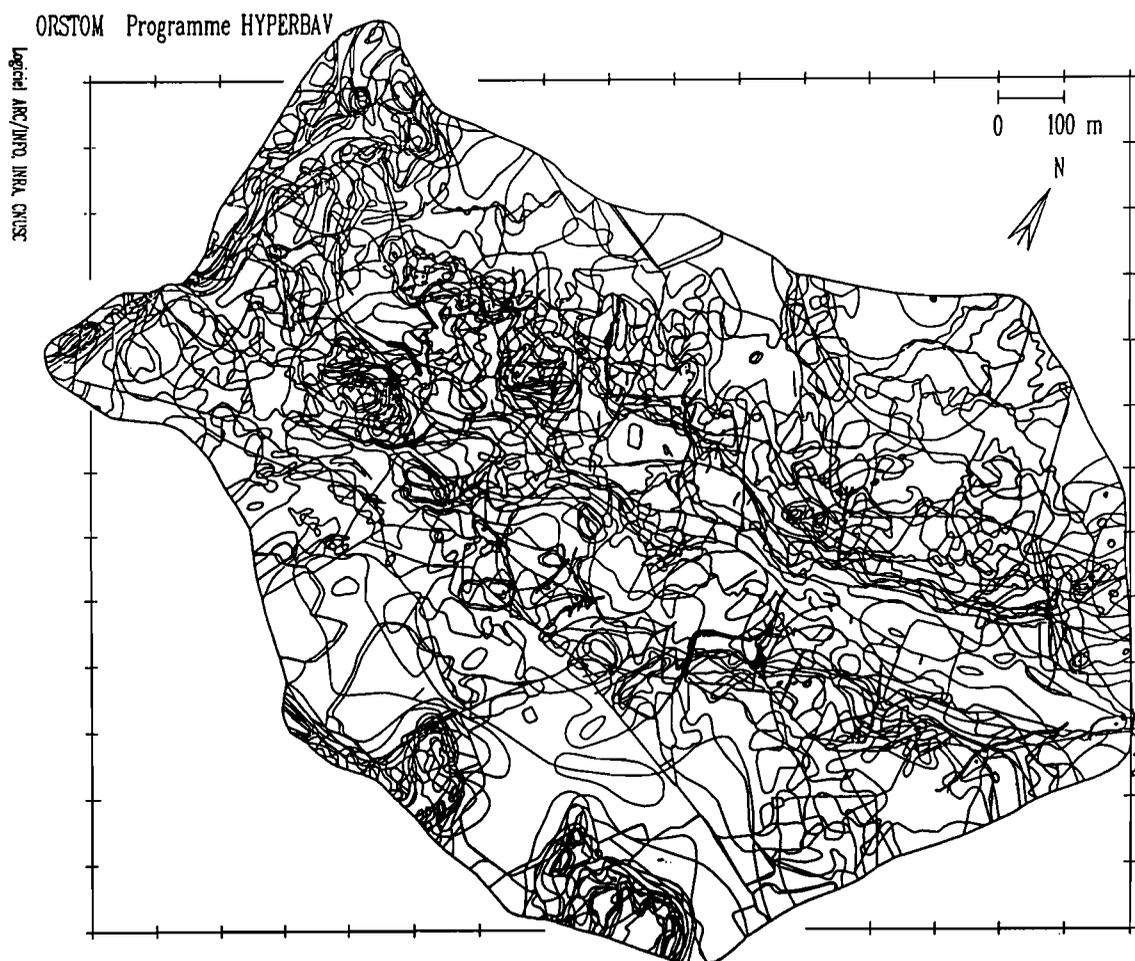
5. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES ET PHYSICO-CHIMIQUES

- 5.1. pH H₂O
 - 5.2. pH HCl
 - 5.3. Carbone %
 - 5.4. Azote %
 - 5.5. Phosphore total
 - 5.6. Phosphore assimilable
 - 5.7. Calcium échangeable
 - 5.8. Magnésium échangeable
 - 5.9. Potassium échangeable
 - 5.10. Sodium échangeable
 - 5.11. Aluminium échangeable
 - 5.12. C.E.C. de la terre fine à pH 7,0
 - 5.13. Taux de saturation en bases
 - 5.14. C.E.C. effective au pH du sol
 - 5.15. Capacité d'échange d'anion
 - 5.16. Acidité d'échange
 - 5.17. Réserves en calcium
 - 5.18. Réserves en magnésium
 - 5.19. Réserves en potassium
 - 5.20. Réserves en sodium
 - 5.21. Calcaire total (CO₃Ca)
 - 5.22. Gypse (Ca SO₄, 2H₂O)
 - 5.23. Fer total
 - 5.24. Fer dithionite
 - 5.25. Fer oxalate
 - 5.26. Microéléments — Déficience ou excès
 - 5.27. Taux de sodium échangeable
 - 5.28. Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée
- ##### 6. PROPRIÉTÉS HYDRIQUES
- 6.1. Humidité équivalente
 - 6.2. Capacité au champ
 - 6.3. Humidité au pF 4,2

- 6.4. Taux d'humidité au minimum saisonnier
- 6.5. Variation saisonnière du taux d'humidité
- 6.6. Définition générale du régime hydrique
- 6.7. Durée de la saturation par l'eau (si période de régime saturé)
- 6.8. Périodicité de la saturation
- 6.9. Durée maximale des périodes de saturation
- 6.10. Durée de la période de dessiccation (humidité inférieure à la teneur en eau au pF 4,2)
- 6.11. Nombre de millimètres de pluie nécessaires pour que la teneur en eau de l'horizon atteigne la capacité au champ après la période de dessiccation saisonnière
- 6.12. Teneur en eau utilisable par les plantes
- 6.13. Conductivité hydraulique de l'horizon
- 7. REPÉRAGE DES COUCHES
 - 7.1. Couche 1 — Dénomination — Limites supérieure et inférieure
 - 7.2. Couche 2 — Dénomination — Limites supérieure et inférieure
 - 7.3. Couche 3 — Dénomination — Limites supérieure et inférieure
 - 7.4. Couche 4 — Dénomination — Limites supérieure et inférieure
- 8. DESCRIPTION DES STRATES DE LA VÉGÉTATION
- 9. DESCRIPTION DE L'IMPLANTATION RACINAIRE

ANNEXE II

EXEMPLE DE CROISEMENT DE FICHIERS MONOTHÉMATIQUES DANS UN SIG, UTILISANT LE LOGICIEL ARC-INFO.



Limites des 6 700 polygones obtenus par le croisement des cinq cartes numérisées.
 Boundaries of the 6 700 polygones drawn by overlaying the five digitalized maps.

Cinq fichiers différents ont été numérisés dans le SIG à partir des données recueillies dans un bassin versant couvrant 1,36 km² : (1) la carte des sols, (2) la carte des gravillons, (3) la carte des cuirasses, (4) la carte des organisations pelliculaires de surface, (5) la carte du couvert végétal.

Le croisement de ces cinq fichiers génère la carte ci-dessus, qui comporte 6 700 polygones, dont la superficie moyenne est équivalente à un carré de 15 mètres de côté.

Cet exemple, bien que caricatural, montre cependant la difficulté pour un utilisateur de ce type de SIG à exploiter les données pour des applications pratiques.

Extrait de « Etude spatialisée des écoulements sur les versants et de leurs conséquences sur l'hydrologie et l'érosion ». Exemple en savane humide (Booro-Borotou, Côte-d'Ivoire). Olivier Planchon, 1991, p. 118.