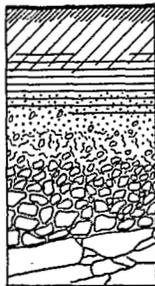


R. MAIGNIEN

**manuel
de
prospection
pédologique**



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER



INITIATIONS - DOCUMENTATIONS TECHNIQUES

N° 11

O. R. S. T. O. M.

PARIS

1969

manuel
de prospection pédologique

R. MAIGNIEN
Inspecteur général de recherches
de l'O. R. S. T. O. M.

TABLE DES MATIÈRES

	pages
INTRODUCTION _____	5
Première partie : LE SOL	
I – HISTORIQUE ET DEFINITION _____	7
II – PASSAGE D'UNE ROCHE A UN SOL _____	9
1. Le matériau originel _____	9
2. Mise en place du matériau originel _____	9
3. La formation du sol _____	10
III – PROFIL ET HORIZONS _____	10
IV – ETUDE DU SOL EN PLACE _____	12
1. Ouverture de la tranchée d'observation _____	12
1.1. Problèmes théoriques _____	13
1.2. Problèmes pratiques _____	13
2. Description du sol _____	14
2.1. Données générales _____	14
2.1.1. Numéro du profil _____	14
2.1.2. Localisation _____	14
2.1.3. Nom de l'observateur _____	14
2.1.4. Date _____	14
2.1.5. Conditions atmosphériques _____	15
2.2. Données concernant les conditions du milieu _____	15
2.2.1. Site _____	15
2.2.2. Végétation ou système de culture _____	16
2.2.3. Roche-mère et matériau originel _____	17
2.2.4. Aspect de la surface du sol _____	18
2.2.5. Régime hydrique de surface _____	20
2.3. Données concernant les profils _____	21
2.3.1. Limite des horizons _____	21
2.3.2. Description des horizons _____	22
3. Prélèvement des échantillons _____	47
3.1. Horizon à prélever _____	48
3.2. Partie d'horizon à prélever _____	48
4. Matériel pour l'étude du sol en place _____	49
4.1. Outils pour creuser et prélever _____	49
4.2. Matériel d'étude et d'observation _____	50
4.3. Matériel pour recueillir et transporter les échantillons _____	51
V – IDENTIFICATION DES HORIZONS - NOMENCLATURE _____	52
1. Nomenclature _____	52
2. Horizons de diagnostic _____	54
2.1. Horizons de diagnostic de surface _____	54
2.2. Horizons de diagnostic de profondeur _____	55
2.3. Horizons de diagnostic secondaires _____	56
3. Autres caractéristiques du sol _____	56

Deuxième partie : LA CARTE PEDOLOGIQUE

GENERALITES _____	59
I - DEFINITION _____	59
1. Le sol comme unité cartographique _____	59
2. Les limites d'un sol _____	62
2.1. Echelle de la carte _____	63
2.2. Caractéristiques de terrain _____	64
2.3. Influence de l'ensemble des caractéristiques sur la valeur de la transition _____	64
2.4. Importance agronomique _____	64
2.5. Importance de la surface couverte par les unités pédologiques voisines _____	64
3. La série unité cartographique de base _____	65
4. Les différentes unités cartographiques _____	67
II - LES DIFFERENTES CATEGORIES DE CARTES _____	68
1. Les échelles et leurs relations avec l'objectif _____	68
1.1. Question d'expression pédologique _____	69
1.2. Question de nombre d'observations à effectuer sur le terrain _____	70
1.3. Question des documents de base disponibles _____	71
1.4. Question d'échelle de publication et d'expression thématique _____	72
2. Carte pédologique et cartes de classement des terres _____	72
2.1. Les différentes cartes de classement des terres _____	75
2.2. Exploitation des cartes pédologiques _____	76
2.2.1. La classe _____	77
2.2.2. La sous-classe _____	77
2.2.3. Les groupes _____	77
2.2.4. Les sous-groupes _____	78
2.2.5. Les familles _____	78
2.2.6. Les séries _____	78
2.2.7. Les types de sols et les phases _____	78
2.3. Cartes d'interprétation de la carte pédologique _____	79
2.3.1. Cartes des propriétés techniques des sols _____	79
2.3.2. Cartes d'utilisation actuelle des terres _____	79
2.3.3. Cartes de réponses aux cultures et aux méthodes d'aménagement _____	79
2.3.4. Cartes d'aptitudes culturales _____	79
2.3.5. Cartes des terres suivant les recommandations _____	82
2.3.6. Cartes des terres selon un programme d'exécution _____	82
III - REALISATION D'UNE CARTE PEDOLOGIQUE _____	82
1. Définition de l'étude _____	83
1.1. Objectifs et raisons de l'entreprise _____	83
1.2. Cadre de l'étude _____	83
1.3. Type de cartographie _____	83
1.4. Choix de l'échelle _____	84
1.5. Délais d'exécution _____	84
1.6. Nature des documents à fournir _____	84
1.7. Moyens financiers disponibles ; coût de l'opération _____	85
2. Etude et analyse des données connues _____	85
3. Travaux de terrain _____	86
3.1. Prospection de reconnaissance _____	86
3.2. Levé systématique de la carte _____	87
3.2.1. Notions de photogrammétrie indispensables aux pédologues _____	88

3.2.2. Inventaire des unités pédologiques	105
3.2.3. Tracé des limites	107
- Photo-interprétation pédologique	110
3.2.4. Prélèvement et conditionnement des échantillons	116
4. Travaux de laboratoire	117
4.1. Nombre d'échantillons à prélever et à analyser	118
4.2. Types d'analyses à effectuer	118
4.3. Valeur des résultats analytiques	118
4.4. Interprétation des résultats analytiques	119
IV - MOYENS A METTRE EN ŒUVRE	120
1. Personnel de terrain	120
1.1. Composition des équipes de travail	120
1.2. Organisation du travail sur le terrain	122
2. Matériel de prospection	123
2.1. Matériel d'étude et de lever de carte	123
2.2. Matériel et problème du transport	123
2.3. Matériel de campement et organisation du séjour sur le terrain	124
3. Matériel cartographique, graphique et de photo-interprétation	126
3.1. Matériel cartographique et graphique	126
3.2. Matériel et documents pour photo-interprétation	127
V - ELEMENTS DU PRIX DE REVIENT D'UNE CARTE PEDOLOGIQUE	128
VI - DELAIS D'EXECUTION - RENDEMENT	130
Bibliographie	131

INTRODUCTION

Lorsqu'une roche est mise à l'affleurement, on observe, après un temps plus ou moins long, qu'elle subit de profondes transformations. Elle s'effrite ; certains de ses constituants se décomposent ; des organismes vivants se développent dans et sur ces produits ameublés, apportant de la matière organique qui se mélange plus ou moins intimement aux éléments minéraux. Les eaux de pluie qui circulent dans cet ensemble entraînent certains matériaux qui sont exportés au loin ou s'accumulent en profondeur.

On passe ainsi progressivement à un milieu où s'individualisent des couches qui se superposent et qui dépendent étroitement les unes des autres. *Un sol* s'est formé qui se caractérise par la succession de ces couches appelées *horizons*. L'ensemble des horizons d'un sol constitue le *profil du sol*.

L'étude du sol ou Pédologie (du mot grec "pedon" qui signifie plaine) oblige aux mêmes approches que dans les autres Sciences Naturelles. Il faut d'abord *décrire*, puis *classer* et *expliquer*. Ce manuel est limité à la première partie de ce cheminement. Son objet est de décrire. Il n'est donc pas un traité de Pédologie. Il ne veut être qu'un outil pour celui qui travaille sur le terrain. On y développe donc tout ce qui concerne la *description des profils* et la *cartographie pédologique*.

PREMIÈRE PARTIE

LE SOL

I - HISTORIQUE ET DÉFINITION

Le sol a attiré l'attention des hommes depuis fort longtemps. Il a d'abord été considéré comme le milieu où se développe le système racinaire des plantes utiles, contribuant par là à la subsistance des êtres humains. Dans cette optique, on s'est aperçu très tôt que les sols n'étaient pas tous comparables et, en particulier, qu'ils n'étaient pas tous capables de fournir les mêmes produits que ce soit en qualité ou en quantité. Ces observations ont amené ceux qui les utilisaient, en premier lieu les agriculteurs, à faire un choix sur une certaine connaissance du milieu naturel. Ce choix peut être constaté depuis la plus haute antiquité et explique la distribution des principaux berceaux de civilisation.

On pourrait donc penser que le sol est un milieu parfaitement défini. Pourtant les définitions ont fort varié au cours des temps passés. L'attention s'est d'abord portée sur la plante, celle-ci apparaissant comme le reflet du sol. Certaines études agronomiques actuelles sont encore le prolongement de cette attitude. Dans cet esprit, MITSCHERLICH donne la définition suivante :

"Le sol est un mélange de particules solides pulvérisées, d'eau et d'air qui servent de support aux éléments nutritifs des plantes". Il s'agit de rechercher, connaissant les besoins des plantes, quels sont les produits qui peuvent être fournis.

Les sols ayant des valeurs différentes vis-à-vis des cultures, des considérations économiques ont rapidement amené à développer des systèmes d'évaluation débouchant sur une cartographie. Les premiers essais ont porté sur les relations sols/roches sous-jacentes et ont abouti à des cartes agro-géologiques (RISSLER). Mais très rapidement le développement de la chimie, vers la fin du XIX^{ème} siècle, a donné une impulsion considérable aux études de sols. On s'est alors attaché à en préciser leurs caractéristiques chimiques avec définition ponctuelle de leur fertilité. Comme il était matériellement impossible de multiplier les points d'étude, pour des raisons purement matérielles, la cartographie qui ne pouvait se faire que par intrapolation a été quelque peu mise en veilleuse. L'influence de la chimie agricole a été prépondérante sur le développement de l'agronomie jusqu'au début de ce siècle. Elle a contribué à une très large diffusion des engrais, et elle influence encore considérablement nombre d'études actuelles.

Dès la seconde partie du XIX^{ème} siècle, la Science du Sol a pris une individualisation propre. Il est apparu que le sol pouvait être considéré comme une entité naturelle résultant des interréactions qui se réalisent à la surface de la terre entre le monde minéral et le monde végétal.

C'est à DOKUCHAIEV que revient le concept moderne de la Pédologie. *"Les sols sont des corps naturels indépendants, dont chaque individu présente une morphologie particulière résultant d'une combinaison spécifique du climat, de la matière vivante, de la roche, du relief et de la durée d'évolution. La morphologie de chaque sol, telle qu'elle se manifeste dans le profil reflète les effets combinés d'une série particulière de facteurs génétiques déterminant son développement"*. Cette définition a amené DOKUCHAIEV à mettre au point un système de classification sur les principaux facteurs génétiques de formation du sol : climat, végétation, roche-mère et âge. La cartographie des sols est facilitée. A partir de quelques points d'observations bien choisis, il est possible d'extrapoler les résultats en s'appuyant sur les facteurs de formation connus.

A la suite de DOKUCHAIEV de nombreux pédologues se sont préoccupés de la classification génétiques des sols, particulièrement en France, négligeant quelque peu la cartographie à grande échelle. Or, un sol n'est pas un simple profil ; il a une extension latérale qui permet de le cartographier. Mais le passage d'un sol à un autre n'est pas brutal. Le passage est plus ou moins graduel, et il est délicat d'en tracer les limites. Ces difficultés ont amené les pédologues américains à préciser leurs méthodes de prospection et de cartographie, et à donner une définition extrêmement stricte aux différents termes employés. Dans la 7^{ème} Approximation USDA *"le sol est l'ensemble des corps naturels de la surface terrestre, portant une végétation, dont la limite inférieure correspond à la plus profonde des deux limites suivantes :*

"— dans les matériaux meubles d'origine minérale ou organique, la limite atteinte par le développement racinaire des plantes perennes indigènes.

"— si des horizons impénétrables aux racines se sont développés, la mince tranche de la croûte terrestre présentant des propriétés qui diffèrent de celles de la roche sous-jacente par suite des interréactions entre le climat, les organismes vivants, la roche-mère et le relief".

Cette définition débouche sur une classification analytique qui s'appuie sur la présence ou l'absence de certains niveaux particuliers, dits horizons de diagnostic.

D'un point de vue purement cartographique, cette définition oblige à une certaine interpolation, d'où la nécessité de nombreuses observations. Aussi, parce qu'elle est plus pratique pour les travaux de terrains, on retient plutôt ici la définition suivante du "Soil Survey Manual" de 1951 : *"le sol se définit comme une collection de corps naturels occupant une partie de la surface du globe, qui supporte des plantes et dont les propriétés découlent de l'effet intégré du climat et de la matière vivante sur un matériau originel conditionné par la nature des roches, le relief et le temps"*.

Cette définition est importante car elle conditionne l'attitude du pédologue devant un sol. Le pédologue ne doit pas considérer les éléments analytiques de son étude en eux-mêmes, mais toujours les référer au profil, lequel représente la somme des différentes fonctions qui contribuent à son individualisation. Même d'un point de vue pratique, un sol ne peut être défini seulement par quelques caractéristiques analytiques (profondeur, texture, structure, saturation du complexe absorbant, etc.), ni même par un horizon particulier (horizon lessivé, horizon d'accumulation, etc.), mais par la réunion de toutes ces données qui se concrétisent par un profil spécifique. Il doit donc être fait continuellement référence au profil dans son ensemble.

Il est important aussi de définir les limites latérales du profil pour en préciser l'extension. Comme il est matériellement impossible de les suivre en multipliant les fosses d'observation, on cherche à préciser l'importance relative des différents facteurs externes qui

contribuent au développement et à la distribution du profil et, à partir de ces données, on déduit les limites qui doivent être vérifiées en quelques points. L'étude d'un sol ne doit donc jamais être dissociée de l'étude de ses facteurs de formation : climat, matière vivante, nature lithologique, roche-mère, relief, temps*.

II - PASSAGE D'UNE ROCHE A UN SOL

1. Le matériau originel

Sous l'action du climat, les roches profondes qui sont mises à l'affleurement se trouvent en déséquilibre par rapport aux conditions originelles de leur formation. Elles s'altèrent. Les processus d'altération transforment une roche en produits variables tant par leur forme que par leur nature. Ces produits ne ressemblent plus à la roche qui leur a donné naissance. Dans un premier temps, la roche est ébranlée, la structure est conservée : c'est un *regolithe*. Mais très rapidement la structure s'effondre, sans qu'il y ait à proprement parler départ d'éléments, donnant naissance à un *saprolithe*. En même temps qu'ils évoluent, les produits d'altération sont soumis à un certain nombre de phénomènes qui provoquent un mélange plus ou moins complexe de matériaux transformés sur et dans lequel va se développer le sol. C'est le *matériau originel***.

2. Mise en place du matériau originel

Les processus d'altérations auxquels sont soumises les roches font apparaître plusieurs catégories de produits :

- des produits en solution ;
- des produits de diagenèse ;
- des produits résiduels ayant plus ou moins résistés à l'altération.

Leur mélange varie en qualité et quantité suivant les caractéristiques de la roche-mère, le type et le niveau d'altération. Cet ensemble est souvent appelé *écorce d'altération*. Mais il n'est pas stable ; il évolue ; il se transforme ; il s'approfondit sous l'action combinée des eaux qui l'imprègnent et des remaniements dont il est le siège. A ce stade, les conditions physico-chimiques du milieu (type de drainage, pH, présence ou absence de certains éléments, etc.) orientent, ou le départ de certains matériaux à travers ou hors de l'écorce d'altération, et (ou) la recombinaison d'une partie de certains d'entre eux avec apparition de produits *neogènes*.

En même temps que ces processus divers se réalisent, le complexe d'altération est soumis à l'ensemble des mécanismes qui contribuent à la mise en place du modelé. Il se produit des remaniements mécaniques (érosion, solifluxion, tassements, glissements, etc.), des

* Bien que la principale application de la Pédologie soit de contribuer au développement de l'Agriculture, il ne semble pas utile de faire allusion ici aux possibilités du sol de porter ou non des cultures. L'étude pédologique peut également servir à la construction de routes, de barrages, de terrains d'aviation, etc. Dans ces cas, on tient compte surtout des propriétés minéralogiques et mécaniques des sols.
- Pour les Ingénieurs de Génie Civil, le mot "sol" est employé dans un sens différent. Il équivaut à "regolithe" ou à n'importe quel matériau non consolidé, indépendant de la profondeur ou du mode de formation.

** L'individualisation du matériau originel est étroitement associée à l'évolution du modelé.

matériaux sont triés, d'autres sont entraînés au loin, d'autres encore viennent contaminer le milieu (colluvions, alluvions, cendrées volcaniques, etc.). Ainsi, le produit final, le matériau originel, se différencie de plus en plus de la roche sous-jacente.

3. La formation du sol

Très tôt, souvent aux premiers stades de l'altération des roches, des organismes vivants (microorganismes, végétaux inférieurs) prolifèrent dans et sur le matériau en évolution. L'activité biologique et les produits qui en dérivent agissent à leur tour sur les constituants minéraux, soit pour les mobiliser, soit pour les transformer, soit pour les stabiliser. Une macrofaune et une macroflore se développent à leur tour participant à la formation d'une couche de matière organique qui s'accumule dans les niveaux supérieurs des produits altérés.

Sous l'action du mouvement des eaux qui traversent cet ensemble (mouvements verticaux : remontées ou descentes ; mouvements latéraux ou obliques), des migrations se réalisent portant sur certains matériaux (argiles, fer, calcaire, etc.), appauvrissant certains niveaux ou en enrichissant d'autres. Ces mécanismes provoquent l'apparition de couches de nature différente qui se superposent. Les caractéristiques de ces couches (épaisseur, morphologie, composition), leur succession, sont spécifiques des conditions du milieu et des divers processus mis en cause. Ces couches dépendent étroitement les unes des autres. Par exemple, à une couche supérieure appauvrie en argile, succède une couche sous-jacente où cette argile s'est accumulée. Un équilibre entre ces couches se réalise. Un sol s'est individualisé.

La Pédologie ne considère pas le sol comme un milieu stable, inerte, limité à quelques centimètres de terre végétale, offrant certaines propriétés physiques et chimiques entièrement déterminées par une roche sous-jacente, mais comme un complexe dynamique (DUCHAUFOR, 1964). C'est un milieu complexe car le sol doit être considéré dans ses aspects physiques, chimiques et biologiques. C'est surtout un milieu dynamique car le sol s'individualise progressivement sous l'influence des facteurs du milieu. Il prend naissance à partir d'un matériau minéral, il évolue jusqu'à atteindre une certaine stabilité qui correspond à un équilibre nouveau, ou même disparaître lorsque les conditions changent fondamentalement. Lorsque l'on étudie un profil, on ne saisit que l'expression instantanée de l'action des différents facteurs qui tend vers un certain équilibre. Il est donc indispensable de situer ce stade à l'intérieur d'une chaîne évolutive.

"Ainsi comprise, la Pédologie a apporté une véritable révolution dans le concept sol. Elle a introduit dans son étude une méthode précise et rigoureuse. Elle ne se borne pas à décrire et à analyser la couche la plus superficielle du sol, mais elle procède à une comparaison morphologique et analytique détaillée des horizons successifs qui caractérise le sol" (DUCHAUFOR). Mais pour aborder ce travail de comparaison, il est nécessaire de bien reconnaître l'objet à étudier, d'analyser en détail les différentes caractéristiques morphologiques qui permettent son identification et d'explicitier ces dernières en termes clairs, objectifs et fidèles.

III - PROFIL ET HORIZONS

La formation et l'évolution du sol sous l'influence des facteurs du milieu conduisent à la différenciation de strates successives de texture - et/ou de structure - et/ou de couleurs différentes. Ces couches sont appelées horizons. L'ensemble des horizons qui se succèdent sur une même tranche de sol s'appelle profil.

Le substratum géologique, la roche-mère, fournit par sa décomposition les éléments minéraux du profil, alors que la végétation et la faune donnent naissance à de la matière organique. Les facteurs climatiques et biologiques provoquent une transformation et un mélange plus ou moins intense de ces éléments. En outre, les substances solubles et colloïdales se déplacent d'un horizon à l'autre. Certains horizons sont appauvris, d'autres sont enrichis. L'ensemble de ces processus conduit à la différenciation des horizons ou développement du profil.

Les horizons successifs sont d'autant mieux différenciés que le profil est plus évolué. Les sols jeunes sont très superficiels, peu épais, très voisins de la roche-mère initiale. Aucun horizon n'est différencié. Les sols faiblement évolués sont caractérisés seulement par une couche enrichie en humus (horizon A), reposant sur la roche-mère altérée (horizon C). Le profil est du type AC. Lorsque l'évolution se poursuit, un horizon résultant de l'altération plus poussée de la roche-mère, mais pauvre en matière organique, se constitue (horizon B). Le profil est alors du type A(B)C. Enfin, les phénomènes de translocation, de migration de substances, caractérisent les sols encore plus évolués. Les horizons supérieurs s'appauvrissent en éléments fins ou solubles par suite de leur entraînement par les eaux d'infiltration (éluviation). Ils sont dits horizons lessivés ou éluviaux et sont toujours désignés par la lettre A. Suivant leurs teneurs en humus, on les subdivise en A1 (horizon où se trouvent en mélange matières organiques et minérales) et A2 (horizon essentiellement minéral). Les horizons inférieurs sont, au contraire, enrichis en éléments venant de la surface. Ce sont les horizons d'accumulation ou illuviaux désignés par la lettre B. Le profil est du type ABC. Il correspond au degré maximum de développement du profil.

En fait, le problème est beaucoup plus compliqué. Les profils sont souvent complexes du fait que les sols se forment fréquemment sur un substratum hétérogène. Des strates préexistantes à la formation des horizons pédologiques peuvent interférer sur la morphologie et l'interprétation devient difficile.

Parfois aussi certains sols se forment sur l'emplacement même où existe un sol plus ancien, sol fossile souvent appelé paléosol, qui s'est développé sous des conditions de climat et de végétation différentes des conditions actuelles. Le sol fossile joue le rôle de roche-mère pour le sol actuel. Il est alors parfois délicat de distinguer ce qui revient à la pédogénèse actuelle et ce qui est hérité de la pédogénèse plus ancienne.

Dans certains cas, la superposition de couches sédimentaires successives simule la formation d'horizons pédologiques et donne l'impression qu'on se trouve en présence d'un sol très évolué, alors qu'au contraire le sol est jeune et qu'aucun horizon pédologique ne s'est encore constitué. Il s'agit d'un pseudo-profil. Ainsi, un apport sableux superficiel rappelle un horizon A2 lessivé ; une couche argileuse profonde simule un horizon B d'accumulation.

Inversement un profil pédologique très évolué peut se trouver modifié après coup, de sorte que la succession normale des horizons n'est plus visible. Là encore l'interprétation est difficile. L'érosion est souvent responsable de la perturbation des horizons. Elle peut provoquer soit un mélange d'horizons meubles préalablement superposés, soit une disparition de ces horizons meubles amenant en surface les horizons profonds. Le sol est alors tronqué. On peut signaler que l'horizon B, ainsi mis à l'affleurement, peut se comporter en roche-mère et subir une nouvelle évolution pédologique.

La perturbation des horizons peut être causée par des engins divers, instrument agricole ou de génie civil. Ces horizons labourés sont appelés Ap.

Enfin, différents matériaux par alluvionnement ou ruissellement peuvent recouvrir des sols préexistants et compliquent la morphologie des profils. Il s'agit alors de sols enterrés.

Ainsi, l'étude des profils apparaît comme une opération délicate. Mais c'est une opération fondamentale qui est à la base de toute la Pédologie. Une bonne observation des faits fournit un grand nombre de renseignements indispensables à l'utilisateur. Aussi la description des profils doit toujours être menée avec un très grand soin dans un esprit objectif.

IV - ÉTUDE DU SOL EN PLACE

Le sol se définit par son profil, lequel se caractérise par un aspect spécifique, une morphologie qu'il s'agit de décrire et de traduire en notes. Cette description contribue à l'identification du sol. Elle exige l'emploi de termes objectifs, précis et représentatifs. Elle doit être analytique et complète. Cette opération n'est scientifique qu'à ces seules conditions.

1. Ouverture de la tranchée d'observation

Pour observer un profil il est nécessaire de creuser dans le sol une tranchée. Celle-ci doit être suffisamment large et profonde pour laisser apparaître le profil entier. C'est une opération un peu fastidieuse, mais relativement simple qui pose un certain nombre de problèmes théoriques et pratiques.

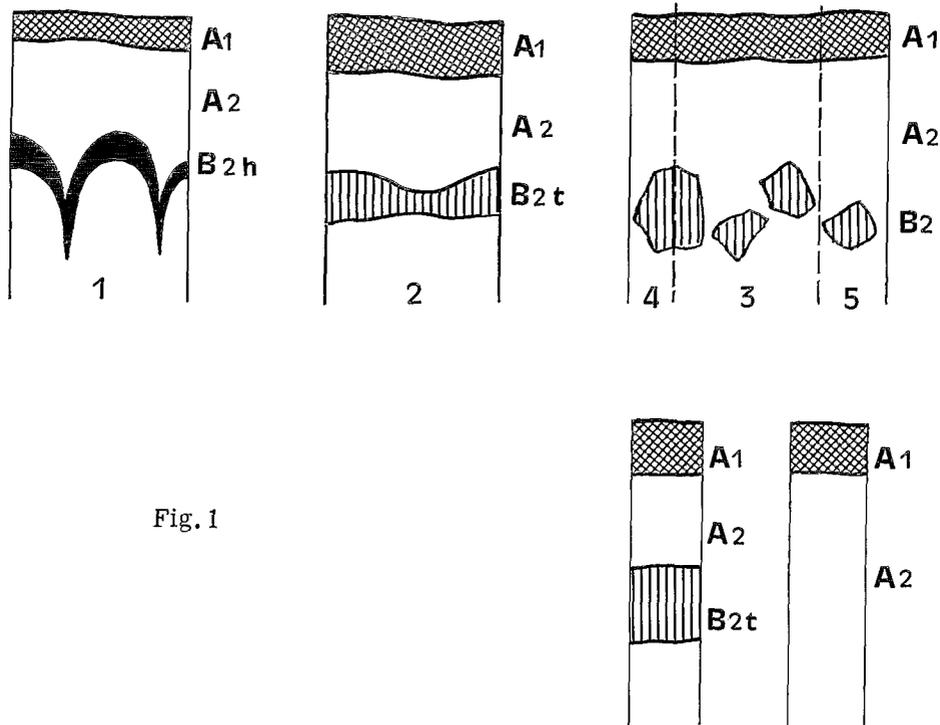


Fig. 1

1.1. Problèmes théoriques

- . *Profondeur* — La profondeur doit permettre l'observation de tous les horizons constituant le profil, de la surface jusqu'au matériau originel. Cette profondeur est extrêmement variée suivant les types de sol, de quelques centimètres pour les sols faiblement évolués, à parfois plus de dix mètres pour certains sols tropicaux. Mais en moyenne la profondeur maximum ne dépasse pas deux mètres.

- . *Largeur* — Les dimensions latérales sont suffisamment larges pour l'étude des variations de chaque horizon. Ces variations intéressent surtout la profondeur, l'épaisseur et les discontinuités. Si les horizons ont des limites ondulées, la largeur englobe un cycle entier de ces ondulations (profil 1). Si l'épaisseur des horizons varie, la largeur observée groupe l'ensemble de ces variations (profil 2). Et si l'horizon est discontinu, l'observation doit caractériser cette discontinuité (profil 3). Dans ce cas, on conçoit facilement que si le profil n'est pas suffisamment large on peut conclure suivant les cas à la présence d'un horizon continu (profil 4), ou à l'absence d'un tel horizon (profil 5). La largeur à considérer est donc fonction des variations du profil.

1.2. Problèmes pratiques

- Les dimensions doivent permettre au prospecteur de descendre dans la tranchée. Il faut aussi qu'il puisse s'y mouvoir facilement, d'abord pour avoir un peu de recul pour l'observation et aussi pour qu'il puisse s'accroupir pour l'étude et le prélèvement des horizons profonds.
- Les dimensions doivent également être compatibles avec l'utilisation des outils, en fait supérieurs à la longueur d'un manche de pelle.
- La tranchée doit être orientée de façon que la face observée bénéficie au moment de l'observation d'un maximum d'éclairément. En régions tropicales fortement éclairées c'est parfois le problème inverse qui se pose. Une bonne orientation facilite également les possibilités de prise de vue.
- Enfin, lors du creusement, on jette la terre à l'opposé de la face observée pour ne pas contaminer la surface du profil étudié.

De ces différentes considérations, et aussi pour des questions de prix de revient, les dimensions moyennes suivantes sont souvent retenues :

150 cm de longueur ; 75 cm de largeur ; 200 cm de profondeur.

Bien entendu, si c'est nécessaire, ces dimensions peuvent être modifiées.

Naturellement, il n'est pas indispensable de multiplier les tranchées. Leur nombre est fonction du type de préoccupation et, en particulier, dans le cas d'une cartographie pédologique, de l'échelle retenue. On se limite généralement à un ou deux profils par unité cartographique.

On peut également utiliser les coupes naturelles ou artificielles telles que bordures de plateaux, de terrasses, tranchées de routes, de chemins de fer, carrières, etc. Toutefois, il faut prendre certaines précautions car il existe fréquemment au sommet de ces coupes des quantités plus ou moins importantes de terre "rapportée" qu'il n'est pas toujours facile de distinguer. Par ailleurs, la mise à l'air d'une tranche de sol peut, au bout d'un certain temps,

apporter certaines modifications dans la couleur (par les poussières, les eaux de ruissellement), dans la structure (tendance à l'effritement ou, au contraire, à l'induration, formation de fentes de retrait), etc. Enfin, ces coupes diverses correspondent souvent à des aspects spéciaux du milieu. Donc, avant toute observation, il faut commencer par nettoyer le profil, le "rafrac chir".

Pour limiter le nombre de tranchées, on peut procéder à des sondages à la tarière. Cet outil permet de descendre assez facilement vers deux mètres de profondeur, et de remonter des échantillons d'horizons atteints. Mais les matériaux sont plus ou moins perturbés, et on n'en peut tirer qu'un nombre limité d'observations. Cette pratique sert donc d'appoint pour vérifier l'homogénéité d'une surface déterminée ou pour préciser les limites entre deux sols. Les renseignements obtenus concernent l'épaisseur, partiellement la couleur et la texture. Il est évident que la structure est détruite.

2. Description du sol

La description du sol fait appel à trois séries de données :

- . des données générales situant l'observation ;
- . des données concernant les conditions du milieu étudié ;
- . la description successive des horizons constituant le profil.

2.1. Données générales

2.1.1. Numéro du profil

Cette numérotation est indispensable pour se référer à l'observation. Elle s'appuie sur un code alphanumérique constitué ordinairement par l'association d'initiales et de chiffres arabes. Elle suit l'ordre chronologique des descriptions :

par exemple : GRM 14 concerne la 14ème observation effectuée sur le secteur de Grimari en République Centrafricaine.

2.1.2. Localisation

La localisation du point d'observation doit être très précise car elle permet de retrouver l'emplacement du sol étudié. Il est recommandé, lorsque cela est possible, de fournir les coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude). Si l'on utilise un nom local de lieu, il faut rappeler la région et le pays pour que tout lecteur puisse restituer l'observation.

2.1.3. Nom de l'observateur

Cette donnée n'appelle aucun commentaire. Elle précise la paternité de l'étude.

2.1.4. Date

Il est important d'indiquer la date de l'observation. Elle sert de repère dans le classement des échantillons prélevés. Elle évite la confusion entre deux prélèvements portant par erreur la même numérotation. Enfin et surtout elle situe l'observation dans le temps.

2.1.5. Conditions atmosphériques

Les conditions du milieu et les caractéristiques du sol peuvent subir des variations sensibles suivant les saisons ; on précise :

- . le caractère général de la saison : par exemple, pleine saison sèche ; printemps humide, etc. ;
- . les conditions atmosphériques au moment de l'observation ;
- . les conditions atmosphériques pendant la période précédant l'étude.

Ces données ont une incidence certaine sur l'interprétation des résultats tant de terrain que de laboratoire.

2.2. Données concernant les conditions du milieu

Il est fondamental de préciser ces données car l'étude d'un sol ne peut être dissociée de celle des facteurs qui contribuent à son individualisation et son évolution. La connaissance de ces liaisons oriente le choix des méthodes à mettre en œuvre lors de l'utilisation des sols.

2.2.1. Site

Modelé

Le modelé est souvent en relation avec le type de sol et vice versa. Les données à fournir sont les suivantes :

- . forme du modelé : par exemple, modelé de colline, modelé monoclinal, modelé de plateau, dépression, etc.

Ainsi les cuirasses ferrugineuses se mettent généralement en place sur les modelés monoclinaux ; les sols ferrallitiques sont associés à des modelés de collines ; les vertisols s'individualisent en bordure des dépressions ; etc.

- . position dans le modelé : signaler si l'observation se situe au sommet ou au bas d'une pente par exemple. En régions forestières intertropicales, les sols en sommet de pente sont généralement rouges ; ils sont jaunes le long des pentes et gris en bas de pente.
- . situation relative de la forme du modelé au lieu de l'observation : cette donnée aide à l'interprétation de la pédogénèse des sols qui s'étagent sur les différentes formes du modelé et qui peuvent être d'âges différents.

Par exemple, sur les plateaux d'Afrique Occidentale on observe des sols de cuirasse ferrallitique très anciens ; sur les glacis des sols ferrugineux tropicaux actuels.

Souvent même cette position relative permet d'expliquer le développement de certains types de sols. Ainsi les vertisols observés en bordure des cuvettes des régions ouest de Haute-Volta doivent leur origine à la concentration du calcium et magnésium qui drainent des reliefs plus élevés.

évolution actuelle du modelé : cette caractérisation est à relier aux processus d'érosion. On précise s'il s'agit d'un modelé jeune ou rajeuni, pour des causes diverses (disparition d'un seuil en particulier), auquel cas il y a tendance au décapage des horizons meubles du sol, ou au contraire s'il s'agit d'une forme sénile, auquel cas il y a tendance au remblaiement. On indique également si les causes de ces mécanismes sont à rattacher à des influences géographiques générales ou à des influences locales, par exemple : un déboisement.

Altitude

Les effets de l'altitude sont importants : elle provoque, en particulier, une augmentation très sensible des teneurs en matières organiques. Il y a donc lieu de distinguer les sols de montagnes des sols de niveaux inférieurs. L'altitude est donnée en valeur absolue et en mètres. On peut aussi indiquer la cote relative du lieu étudié, méthode d'un emploi courant lorsque l'on travaille sur des terrasses alluviales (terrasses + 7 m, + 23 m, etc.) ou des surfaces d'érosion.

Relief

On distingue le relief général du microrelief de la surface du sol. La forme d'un paysage se caractérise par l'allure générale du relief. On peut reconnaître quatre classes de paysages :

- paysage accidenté : région constituée d'un ensemble de collines à surfaces subhorizontales réduites et à pentes supérieures à 25 %.
- paysage ondulé : région constituée par un ensemble de collines à surfaces horizontales réduites et à dominance de pentes de 8 à 25 %.
- paysage largement ondulé : ensemble de collines ou de plateaux à grandes surfaces subhorizontales, coupées par des pentes qui varient de 8 à 25 %.
- paysage plan : paysage constitué par des unités horizontales et subhorizontales dont les pentes ne dépassent pas 8 %.

Il est également possible de classer le relief par rapport aux possibilités d'écoulement des eaux superficielles :

- relief nul ou concave : surfaces à drainage superficiel très lent ou nul.
- relief subnormal : surfaces plus ou moins planes à drainage superficiel lent.
- relief normal : surfaces ondulées à drainage superficiel moyen.
- relief excessif : surfaces accidentées à drainage superficiel rapide.

Pentes

La pente induit la circulation des eaux sur et à l'intérieur des profils. Cette donnée est importante. On note la pente en degrés ou en %, en signalant s'il s'agit d'une pente simple ou d'une pente complexe dont on donne les différents éléments :

- . sa longueur : s'il y a ruissellement, les phénomènes d'érosion apparaissent après une certaine distance ;
- . son exposition : l'ouest est souvent plus arrosé que l'est ;
- . sa forme : plane, convexe, concave. La connaissance de ces éléments oriente les types d'aménagements et de protection contre le ruissellement. Si la pente est convexe, il sera facile d'évacuer les surplus d'eau. Il n'en est pas de même pour une pente concave qui présente des risques d'inondation à la base.

2.2.2. Végétation ou système de culture

Sans aller jusqu'à une étude phytosociologique exhaustive, un certain nombre de caractéristiques doivent être précisés :

- type de formation : forêt (ombrophile, xérophile, de savane, etc.), steppe, prairie, plantation arbustive, champs cultivés, etc. ; et leurs hauteurs.

strate herbacée			
0 - 10 cm	10 - 50 cm	50 - 100 cm	> 100 cm
prostrée	inférieure	moyenne	supérieure
strate ligneuse			
< 25 cm	0,25 - 2 m	2 - 8 m	> 8 m
prostrée	buissonnante	arbustive	arborée

- espèces dominantes et caractéristiques en indiquant dans l'ordre : les arbres, les arbustes, puis les espèces herbacées annuelles et vivaces. On donne les noms botaniques et (ou) les noms vernaculaires ;
- aspect physiognomique des peuplements. Signaler en particulier si les espèces végétales sont de belle venue ou, au contraire, dégradées pour des raisons diverses (feux, nappe phréatique, présence d'un niveau imperméable, déficit hydrique, cultures, etc.) ;
- degré de recouvrement du sol. Cette donnée permet d'apprécier les possibilités d'ensoleillement à la surface du sol ; le rôle du couvert végétal contre l'érosion ; le renouvellement du stock organique, etc. ;
- relations entre la végétation et le type de litière (mor, moder, mull, etc.).

2.2.3. Roche-mère et matériau originel

L'ensemble des données concernant la roche-mère et le matériau originel a une grande influence sur l'évolution des sols. Aussi elle doit être précisée le mieux possible. En particulier, il est indispensable d'indiquer s'il y a ou non des relations entre la roche fraîche sous-jacente et le matériau originel. Des apports secondaires peuvent modifier sensiblement le matériau et doivent être signalés. Les caractéristiques à considérer sont les suivantes :

- **nature des roches** : on donne le nom de la roche et, suivant les cas, on précise son état de cristallisation s'il s'agit d'une roche éruptive, ou sa friabilité s'il s'agit d'une roche sédimentaire ; sa richesse en certains éléments déterminants pour la pédogénèse : cations alcalino-terreux (calcium, magnésium, sodium), minéraux noirs riches en fer, en manganèse, etc.
- **gisement** : cette donnée informe sur les conditions de drainage des eaux de percolation. On signale, en particulier : le pendage des roches, la présence ou l'absence de lignes de moindre résistance, les diaclases et leurs orientations. Ainsi un schiste à gisement horizontal limite la circulation verticale des eaux, à l'opposé des schistes redressés qui l'accélèrent.
- **mode d'altération** : il n'y a pas toujours des relations de cause à effet entre le type d'altération des roches et la pédogénèse actuelle. De nombreux sols se développent sur d'anciens produits d'altération. Il est donc important de préciser à quel type d'altération les roches ont été soumises : arenisation, argilitisation, ferrallitisation, etc. On indique également les matériaux ou débris de roches qui ont échappé à ces altérations.
- **remaniements, contaminations** : l'observation du matériau originel fait fréquemment apparaître des remaniements, un triage des matériaux, des apports d'éléments étrangers qui signalent les différents mécanismes qui ont présidé à sa mise en place. On note ces données en signalant, soit les enrichissements en produits résiduels par entraînement d'autres matériaux, soit la présence d'éléments étrangers (débris de roches, de poteries, charbon de bois, etc.).

2.2.4. Aspect de la surface du sol

Microrelief

Le microrelief concerne les variations de forme de la surface du sol. Les microreliefs sont naturels ou artificiels (liés aux activités humaines) et les formes sont variées. Par exemple :

- . microreliefs naturels : gilgai = succession de petites buttes et de petites zones déprimées dues à des mécanismes de gonflement et de rétraction de certaines argiles sous l'action alternante de l'humidité et de la dessiccation ; tortillons de vers de terre formant des petites buttes aux pieds de touffes de graminées ; griffes d'érosion ; termitières diverses ; fentes de retrait ; bombements et buttes liées à la végétation.
- . microreliefs artificiels : céanes = puits à parois non consolidées et partiellement effondrées ; anciens fossés de drainage ou d'irrigation ; levées artificielles ; déblais ; tumuli ; etc.

On note :

- pour les microreliefs : les dimensions, longueur d'onde et amplitude ;
- pour les fentes de retrait :
 - . forme et taille du réseau principal ;
 - . ouverture des fentes ; aspect des bordures de fentes ;
 - . caractère d'un réseau secondaire éventuel et son recoupement avec le réseau principal ;
- pour les effondrements :
 - . forme, taille, profondeur, bordures ;
 - . situation dans le microrelief ;
 - . alignement, orientation.

Présence de pierres

Par pierres on entend des matériaux dont le diamètre /moyen est supérieur à 20 cm et qui ne sont pas ancrées dans le sol. Ces accidents sont obligatoirement notés. Ne pas les mentionner rend certaines cartes pédologiques ininterprétables.

On exprime la présence de pierres en notant le pourcentage de surface couvert par ces matériaux. Les différentes classes sont définies en tenant compte de l'incidence pratique de ces pierres sur l'emploi des machines agricoles. Elles sont les suivantes :

Classe 1 — pas de pierre ou trop peu de pierres pour gêner les pratiques culturales. Elles couvrent moins 0,1 % de la superficie totale.

Classe 2 — suffisamment de pierres pour gêner, mais non pour rendre impossible les pratiques culturales. Les pierres sont dispersées à la surface du sol à des distances variant de 10 à 30 mètres. Elles occupent 0,1 à 1 % de la superficie totale.

Classe 3 — suffisamment de pierres pour rendre impossible les cultures ; néanmoins le sol peut être exploité en prairie de fauche ou en pâturage améliorée, si les autres caractéristiques du sol le permettent.

Classe 4 — suffisamment de pierres pour rendre impossible toute utilisation de machines, à l'exception de machines très légères ou des instruments à main. Pâturages naturels ou forêts si les conditions du sol le permettent.

Classe 5 — suffisamment de pierres pour rendre impossible toute utilisation de machines. Vaines pâturages, forêts.

Classe 6 — plus de 90 % de la surface est recouverte de cailloux. Aucune utilisation agricole possible.

Ces différentes classes peuvent être également utilisées pour les sols couverts de cailloux, ces derniers ayant un diamètre moyen variant de 5 à 20 cm. Les incidences sur les façons culturales sont alors moins prononcées.

Présence de roches

Le terme "roche" est utilisé arbitrairement pour désigner les formations indurées affleurantes, profondément ancrées dans le sol. Les classes sont définies en tenant compte à la fois de la surface couverte et de la distance séparant ces matériaux, distance réglant les possibilités d'intervention des instruments mécaniques :

- Classe 1 — pas de roche : moins de 2% de la surface est couverte par les roches.
- Classe 2 — peu de roches : 2 à 5% de la surface est occupée par des roches distantes en moyenne de 35 à 100 mètres.
- Classe 3 — assez peu de roches : 2 à 10% de la surface est occupée par des affleurements distants en moyenne de 10 à 35 mètres.
- Classe 4 — moyennement rocheux : les roches couvrent 10 à 50% de la surface totale. Elles sont distantes en moyenne de 3, 5 à 10 mètres.
- Classe 5 — beaucoup de roches : la superficie couverte par les roches distantes de moins de 3, 5 mètres est de 50 à 90% de la surface.
- Classe 6 — rocheux : plus de 90% de la surface est couverte par des roches.

Lorsque les sols sont à la fois pierreux et rocheux, on note séparément les deux classes.

Erosion

Les marques de l'érosion sur le sol sont décrites en détail car elles permettent de préciser les types d'aménagement compatibles avec l'équilibre du milieu. On distingue les deux types classiques d'érosion : par le vent et par l'eau. On signale s'il y a décapage ou apport. On note les formes, les horizons atteints, la surface couverte.

Erosion éolienne

. Déflation — Il s'agit de l'entraînement des matériaux fins superficiels. On signale l'épaisseur des horizons atteints ; la présence éventuelle de matériaux résiduels (cailloux, sables grossiers) ; s'il y a rabottage, la forme des stries à la surface du sol.

. Accumulation — On indique la nature des matériaux accumulés, leur épaisseur ; les relations entre les zones d'accumulation et certains facteurs du milieu (accumulation aux pieds des buissons, par exemple) ; la forme des accumulations (barkhanes, ensablement diffus, dunes diverses, etc.).

Erosion hydrique

. Décapage — Comme pour l'érosion éolienne, on signale l'épaisseur des tranches de sol entraînées au loin, les différents horizons atteints.

Une attention particulière doit être portée à la forme de l'érosion par l'eau. On reconnaît les formes suivantes :

- Erosion par battement : "splash". La goutte d'eau qui frappe le sol fait éclater les agrégats. Les constituants les plus fins sont projetés parfois à plusieurs dizaines de centimètres de leur gangue terreuse qui reste sur place. Les différents éléments texturaux sont triés et confèrent à la surface du sol une battance de forme réticulée caractéristique.

- Erosion en nappe. Une mince tranche de sol est décapée sur une grande surface. Ce mécanisme fournit également un aspect superficiel réticulé au sol.

- Erosion en nappe ravinante. Des tranches de sol de plusieurs centimètres d'épaisseur sont entraînées en masse avec formation de petits "à pic" en amont. Il y a formation d'un microrelief "en escaliers".

- Erosion en rigoles. Des petites rigoles, que l'on nomme souvent aussi griffes d'érosion, sont creusées par l'eau. Leurs dimensions en largeur et profondeur varient de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres.

- Erosion en ravins. Il s'agit d'une forme accusée de la précédente. Les ravins ont plusieurs mètres de profondeur, certains atteignent plus de dix mètres.

- Erosion par mouvements de masse. La masse entière de sol se décroche sur une grande épaisseur et glisse le long de la pente. Une forme particulière de l'érosion par mouvements de masse est l'érosion en "Lavaka" caractéristique des Hauts Plateaux Malgaches.

- Erosion par chenaux souterrains. L'eau de ruissellement s'engouffre en profondeur par le canal d'une fente de retrait et creuse des chenaux souterrains à l'intérieur du sol. On observe des effondrements discontinus alignés caractéristiques.

En dehors des formes de l'érosion, on note les dimensions des griffes (largeur, longueur, épaisseur); le pourcentage de surface érodée; les relations avec certaines interventions humaines ou autres (déboisement, construction de routes, travail du sol, etc.).

. Accumulation — On fournit les mêmes données que pour l'érosion éolienne : épaisseur, nature des matériaux accumulés, superficie, mode et répartition du recouvrement.

2.2.5. Régime hydrique de surface

Drainage

Le drainage du sol se réfère à la manière dont les excès d'eau sont évacués à la fois de la surface des sols et au sein des profils. On distingue le drainage externe, qui exprime la façon selon laquelle l'eau est évacuée de la surface, du drainage interne qui caractérise les possibilités de percolation de l'eau à travers le profil. On peut également apprécier la perméabilité des différents horizons par des mesures sur le terrain, et, de la synthèse des états précédents, en déduire des classes de drainage.

On se limite dans ce paragraphe au **drainage externe** qui fait appel aux seules données d'observations directes. Le drainage externe est sous la dépendance à la fois de la pente et de la porosité du sol. Ces données définissent les classes suivantes :

Drainage nul — l'eau accumulée en surface ne s'évacue pas par ruissellement. Il y a stagnation dans ou sur le sol. L'infiltration est très réduite. L'eau ne s'évacue que par évaporation.

Drainage très lent — l'eau stagne en majeure partie à la surface du sol. Il n'y a pas de ruissellement. L'évacuation se fait en partie par pénétration lente dans le sol et en partie par évaporation.

Drainage lent — l'eau accumulée en surface s'évacue lentement. Le ruissellement est faible mais sensible. L'eau se maintient un certain temps à la surface et pénètre en partie dans le sol.

Drainage moyen — l'eau stagne peu en surface. Elle s'évacue à la fois par ruissellement et par infiltration.

Drainage rapide — l'eau de précipitation s'évacue en grande partie par ruissellement aussi rapidement qu'elle arrive à la surface du sol.

Drainage très rapide — toute l'eau accumulée s'évacue par ruissellement. L'infiltration est réduite ou nulle. Il en résulte une érosion plus ou moins sévère.

Naturellement, lorsque cela est possible, on distingue l'état du drainage naturel de celui du drainage artificiel après assainissement.

Inondation

Il y a inondation de la surface étudiée soit par évacuation défectueuse des eaux accumulées, soit par apport excessif d'eau par débordements d'une rivière ou ruissellement accéléré des zones amont. Ces caractéristiques précisées, on distingue :

- . les sols longuement inondés. L'eau stagne pendant la majeure partie de l'année ;
- . les sols périodiquement inondés. L'inondation est limitée à quelques mois chaque année ;
- . les sols parfois inondés. L'inondation n'a lieu qu'en années humides ;
- . les sols exceptionnellement inondés. L'inondation ne se réalise qu'en années exceptionnelles par débordement ou rupture de digues ;
- . les sols jamais inondés. A l'abri de toute accumulation d'eau en surface.

2.3. Données concernant les profils

Les opérations consistent à reconnaître les différents horizons constituant le profil ; à préciser ensuite comment s'effectue le passage d'un horizon à l'autre ; puis à décrire successivement chaque horizon en commençant par l'horizon supérieur.

Pour reconnaître les horizons on s'appuie sur plusieurs critères : la couleur, la teneur en matière organique, la texture, la structure, la présence éventuelle de certaines caractéristiques (teneurs en carbonates de calcium, en sesquioxydes, en sels divers, etc.). Cette détermination est une opération délicate qu'il faut exécuter avec toute la précision désirable. Les profils étant des tranches verticales sont parfois mal éclairés et il est difficile de reconnaître des horizons peu contrastés. Un procédé facile consiste à faire des petits prélèvements tous les 5 centimètres environ et à reconstituer le profil horizontalement sur un fond bien éclairé. Le profil est toujours examiné le dos à la lumière.

2.3.1. Limite des horizons

Les limites entre horizons diffèrent en netteté et régularité. La distinction dépend partiellement du contraste entre les horizons et partiellement aussi de la netteté de la limite ou de l'importance de la transition entre un horizon et le suivant :

— netteté. Cette donnée s'appuie sur la largeur de la transition.

On définit les classes suivantes :

- . passage brutal : la transition est inférieure à 2 cm ;
- . passage distinct : la transition a de 2 à 5 cm ;
- . passage graduel : la transition se situe entre 5 et 15 cm ;
- . passage progressif (ou diffus) : la transition est supérieure à 15 cm.

— régularité. Cette donnée concerne la forme de la transition.

Elle peut être :

- . régulière : la limite est pratiquement parallèle à la surface du sol ;
- . ondulée : la limite constitue des poches jointives dont la largeur est supérieure à la profondeur ;
- . irrégulière : la limite constitue des poches jointives dont la largeur est inférieure à la profondeur ;
- . discontinue : les parties d'horizons ne sont pas jointives.

2.3.2. Description des horizons

Chaque horizon est décrit en notant les caractéristiques ci-après :

A - ÉPAISSEUR

L'épaisseur des horizons est mesurée en centimètres et on note de haut en bas la profondeur des différentes limites. La limite supérieure est la surface du sol minéral. Différemment, l'épaisseur des dépôts organiques superficiels est notée de bas en haut à partir de la surface du sol minéral*.

B - COULEUR

La couleur des horizons est uniforme ou bariolée. Quand il y a bariolage on observe des taches plus ou moins distinctes, de formes diverses. On décrit le bariolage de la façon suivante :

- . on note la couleur de fond et la ou les couleurs des taches principales ;
- . puis on décrit le dessin des taches.

La couleur est déterminée d'après un code (cf. détermination des couleurs).

Le dessin des taches est décrit par quatre ensembles de notations (contraste, nombre, dimensions, formes).

Le *contraste* est :

- vague : les taches ne sont reconnaissables que de fort près ;
- distinct : les taches se distinguent facilement de la couleur de fond ;
- frappant : les taches sont nettement individualisées et se dégagent nettement de la couleur de fond.

Il peut arriver aussi que l'horizon ne soit constitué que d'un mélange de taches.

Le *nombre* se détermine par appréciation grossière du pourcentage de surface verticale couverte par les taches. Cette opération est facilitée en comparant les faits à des modèles schématiques.

- . Il y a peu de taches lorsqu'elles occupent moins de 2% de la surface ;
- . Les taches sont assez nombreuses lorsqu'elles couvrent 2 à 20% de la superficie totale ;
- . Il y a beaucoup de taches lorsqu'elles couvrent plus de 20% de la surface.

* La longueur de la description de chaque horizon pouvant être variable, il est recommandé de noter ces différentes valeurs sur une ligne spéciale du carnet de notes et de reprendre ces chiffres en face de chaque horizon décrit.

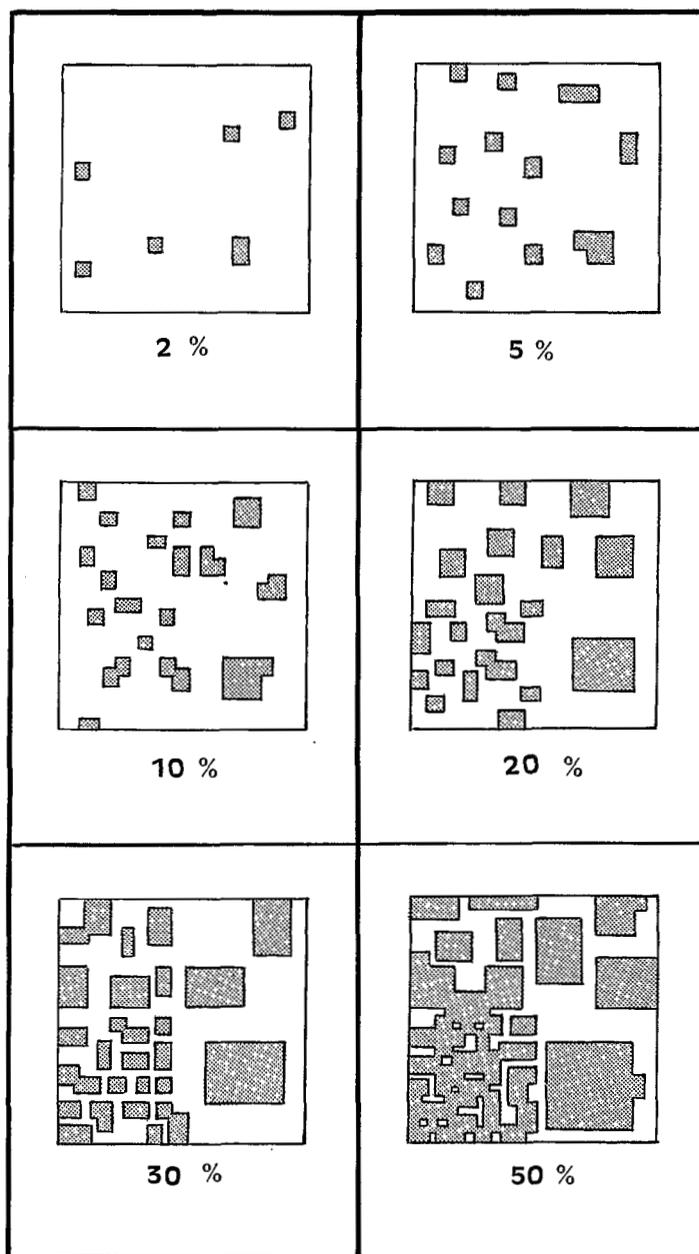


Fig.2. HORIZON BARIOLE - POURCENTAGE DE TACHES

Les *dimensions* se réfèrent au diamètre moyen des taches.

- . Elles sont petites lorsque le diamètre est inférieur à 5 mm ;
- . " " moyennes lorsque le diamètre se situe entre 5 et 15 mm ;
- . " " grosses lorsqu'elles ont plus de 15 mm de diamètre.

Les *formes* des taches peuvent être diverses. On observe des taches circulaires, des marbrures, des stries, des langues. Ces différents dessins peuvent être discontinus ; ils sont parfois jointifs et forment alors une trame ; toutes ces données doivent être décrites minutieusement car elles sont souvent en relation avec des processus pédogénétiques spécifiques. Il est parfois nécessaire d'ajouter d'autres détails et d'indiquer si les limites sont assez nettes (moins de 2 mm de largeur) ou diffuses (plus de 2 mm de largeur). Lors de cette étude, il est utile de noter si l'on observe des relations entre la répartition et la nature des taches et d'autres caractéristiques de l'horizon, en particulier la texture, la structure et la porosité. Par exemple, dans les argiles bariolées, les taches rouges correspondent fréquemment à une texture plus sableuse.

On vérifie également, en cassant les agrégats, si la couleur ne concerne qu'un mince revêtement ou toute la masse du matériau. De nombreuses concrétions, en sols ferrugineux tropicaux, sont brunes (fer) sur leur pourtour et noires (manganèse) en leur centre. Souvent la couleur change lorsque l'on pétrit les agrégats et il peut y avoir des relations spécifiques entre la couleur d'une unité structurale naturelle et sa couleur après pétrissage.

Détermination des couleurs

Les couleurs sont déterminées par référence à un code. L'appréciation directe est à déconseiller, la précision variant avec chaque individu et les termes utilisés étant subjectifs.

Deux codes peuvent être employés :

- . le code expolaire de TAYLOR et CAYEUX ;
- . le "Munsell Soil Color Chart".

A l'expérience, il apparaît que ce dernier, malgré son prix élevé, est plus intéressant car :

- . il est utilisé par la majorité des pédologues dans le monde d'où des possibilités de corrélations simplifiées ;
- . les cotations sont rationnelles et correspondent à de bonnes caractéristiques du sol ;
- . il est d'un emploi mnémotechnique facile.

Sa nomenclature consiste en deux systèmes complémentaires :

- . un terme de couleur ;
- . une notation Munsell.
 - Les termes sont utilisés pour les publications et pour un usage de vulgarisation, car ils font images.
 - Les notations apportent :
 - o un complément de précision ;
 - o une abréviation pour les descriptions sur le terrain ;
 - o elles précisent des relations spécifiques entre les couleurs observées et offrent la possibilité d'un traitement statistique.

Le "Munsell Soil Color Chart" comprend normalement 175 cartons colorés ou "chips". Ces cartons sont groupés systématiquement d'après leur notation "Munsell" sur des

Ainsi, sur chaque planche, les couleurs les plus sombres se situent en bas et à gauche ; elle s'éclaircissent progressivement vers le haut et à droite.

L'ordre à respecter dans la notation est : gamme, valeur, intensité. Les chiffres de la valeur et de l'intensité sont séparés par une barre oblique, par exemple : 2, 5 YR 4/6 = rouge.

Si la cotation de la couleur nécessite l'emploi d'une subdivision d'un nombre entier, on emploie des décimales mais jamais de fractions. Par exemple, la notation pour une couleur à mi-distance entre 10 YR 4/3 et 10 YR 5/3 est 10 YR 4,5/3 ; si la couleur se situe entre 7,5 YR 5/6 et 5 YR 5/6, on la note 6,25|YR 5/6, et de même pour l'intensité.

Pour trouver la couleur d'un horizon, on compare un morceau d'échantillon aux cartons colorés. Comme il est rare que la couleur d'un échantillon soit exactement celle d'un carton, on retient la couleur la plus approchée. On se tient toujours le dos à la lumière.

Lorsque l'on note les couleurs, il est indispensable d'indiquer l'humidité de l'horizon. En effet, la couleur change avec la teneur en eau. Ce phénomène est frappant pour certains sols. Il peut parfois être caractéristique du type de sol. Ainsi, les sols ferrugineux tropicaux lessivés présentent des différences de 2 à 3 unités en valeur et intensité entre l'état sec et l'état humide ("value" et "chroma").

En pratique les cotations de couleurs s'exécutent soit sur des échantillons séchés à l'air, soit sur des échantillons dont l'humidité est voisine de celle de la capacité au champ. Dans la plupart des descriptions, la couleur est donnée sur échantillon humide. En région sèche, il est nécessaire de donner la couleur à l'état sec, puis de mouiller l'échantillon à l'aide d'un jet de pissette et de noter la couleur lorsque les films d'eau ont disparu.

C - MATIÈRE ORGANIQUE

Sous cette rubrique on décrit tout ce qui a trait à l'état de la matière organique dans les différents horizons.

On signale d'abord si l'horizon est enrichi en matière organique ou non et on cherche à préciser grossièrement cet enrichissement. Les horizons sont classés en :

- . organique
- . moyennement organique
- . faiblement organique

— **Horizon organique** : il contient plus de 20% de matière organique s'il est sableux et plus de 30% s'il est argileux. La morphologie est dominée par les matériaux organiques qui se reconnaissent par leur aspect fibreux.

— **Horizon moyennement organique** : il contient en moyenne de 6-8 à 20% de matière organique. Il est fortement assombri. Il est difficile de distinguer la matière organique décomposée du complexe minéral.

— **Horizon faiblement organique** : il est peu coloré par la matière organique.

On précise ensuite la décomposition de cette matière organique en reconnaissant l'état de dégradation des débris organiques, s'ils sont encore reconnaissables ou non. Un bon test consiste à sentir un échantillon. Une odeur butyrique signale une mauvaise décomposition en milieu anaérobie. Une odeur de champignon signale une bonne décomposition en milieu aéré.

On note enfin le degré d'association des matériaux organiques et minéraux. En effet, ils peuvent être grossièrement séparés ou, au contraire, intimement associés. Des revêtements organiques peuvent ainsi recouvrir les agrégats*.

D - TENEURS EN CALCAIRE

Le carbonate de calcium a une profonde influence sur la morphologie des profils. En particulier, il oriente l'évolution de la matière organique ; il freine le lessivage de l'argile. Il est donc important de signaler la présence ou l'absence de ce minéral.

On apprécie la teneur en CO_3Ca en projetant sur le profil, à l'aide d'une pissette, de l'acide chlorhydrique au 1/2, et l'on observe s'il y a foisonnement ou non. On se rappellera qu'un sable calcaire réagit plus vigoureusement qu'une marne, aux teneurs en CO_3Ca comparables ; que l'effervescence peut être également liée à la présence de carbonate de magnésium ou de carbonate de sodium.

On distingue les classes suivantes :

- . non calcaire : aucune effervescence
- . peu calcaire : très faible effervescence, juste visible, mais nettement perceptible à l'oreille
- . calcaire : effervescence visible
- . très calcaire : forte effervescence ; le calcaire se reconnaît généralement "de visu"**.

On note ensuite la localisation du carbonate, son abondance et, si besoin est, la forme et la taille des accumulations = en poudre, en pseudomycélium, en concrétions, en poupées, en nodules.

E - TEXTURE

La texture rend compte de la composition granulométrique de l'horizon considéré. Elle s'exprime par la teneur relative des différentes fractions granulométriques dont le diamètre moyen est inférieur à 2 mm. La présence de particules à taille supérieure à 2 mm (graviers, cailloux, pierres) est signalée en ajoutant un adjectif aux noms des classes de texture.

La distinction entre les fractions granulométriques est plus ou moins arbitraire. Ces fractions sont définies dans différents systèmes :

— le système international d'ATTERBERG comprenant :

argile	< 0,002 mm
limon	0,002 à 0,02 mm
sable fin	0,020 et 0,20 mm
sable grossier	0,20 à 2,00 mm

* Dans la recherche de ces caractéristiques, il faut se méfier de la couleur. Un assombrissement du profil n'est pas forcément lié à une augmentation des teneurs en matière organique. Certains sels ferreux, le manganèse, noircissent les horizons. On se limite donc aux caractéristiques nettement définies et reconnaissables.

** Il est possible, avec un peu d'entraînement et pour une région donnée, d'apprécier la charge en calcaire avec plus de précision.

— le système U.S.D.A. comprenant :

argile	< 0,002 mm
limon	0,002 à 0,05 mm
sable très fin	0,05 à 0,10 mm
sable fin	0,10 à 0,25 mm
sable moyen	0,25 à 0,50 mm
sable grossier	0,50 à 1,00 mm
sable très grossier	1,00 à 2,00 mm

En fait, pour la majorité des sols ces divisions sont moins poussées et réduites à 5 :

argile	< 0,002 mm
limon fin	0,002 à 0,02 mm
limon grossier	0,02 à 0,05 mm
sable fin	0,05 à 0,20 mm
sable grossier	0,20 à 2,00 mm

Les résultats précis des analyses granulométriques sont obtenus au laboratoire.

Il est cependant important d'apprécier rapidement et approximativement la texture sur le terrain car il s'agit d'une caractéristique permanente du sol qui permet de tirer des conclusions importantes (lessivage, accumulation argileuse, destruction de la texture, etc.).

On détermine la texture d'un horizon en écrasant et en roulant un échantillon entre les doigts à l'état sec quand cela est possible, puis à l'état humide. D'après les réactions au toucher on arrive rapidement, avec un peu d'expérience, à apprécier la texture en appliquant les critères suivants :

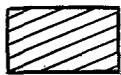
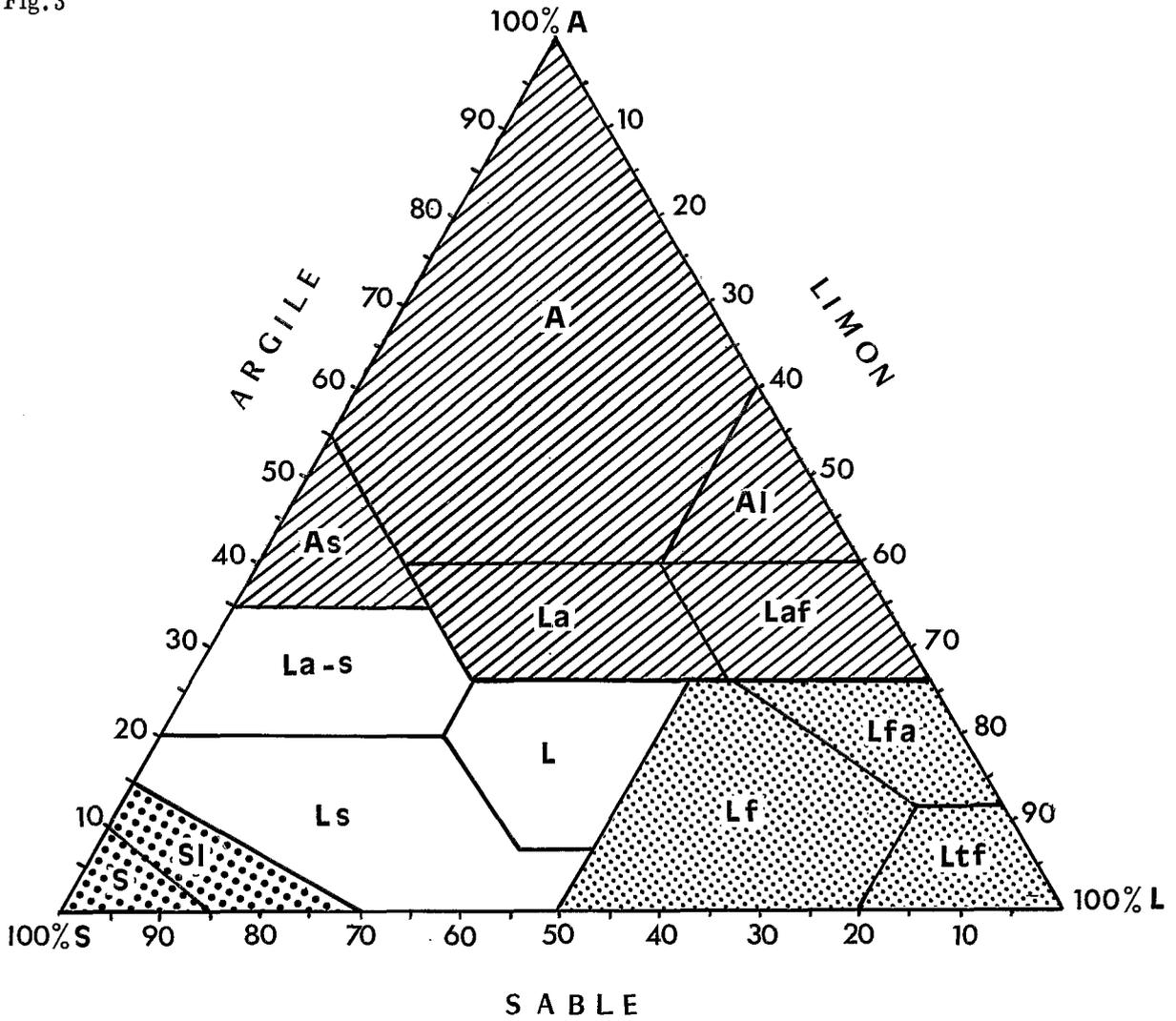
- . l'argile forme, à l'état humide, une pâte qui colle aux doigts ;
- . le limon, à l'état sec, fournit une impression douce comparable à celle du talc ; à l'état humide, il forme une pâte qui ne colle pas aux doigts et qui s'effrite rapidement ;
- . les sables fins, difficilement observables, crissent sous les doigts et donnent une impression de rugosité ;
- . les sables grossiers s'observent "de visu".

Suivant les proportions relatives de ces différents composants, on obtient des réactions spécifiques. Un prospecteur entraîné peut ainsi apprécier la texture à 5% près. Il faut cependant faire attention à ce que les réactions des argiles sont différentes suivant leur composition minéralogique. Une kaolinite, par exemple, colle beaucoup moins qu'une montmorillonite. La valeur des tests utilisés est donc toute relative.

La dénomination des classes de textures se fait en nommant en premier la fraction granulométrique dominante et en second la fraction granulométrique qui lui succède en pourcentage.

Ainsi le terme "sablo-argileuse" signale une texture à dominance sableuse et à teneur à argile appréciable.

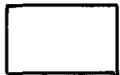
Fig. 3



Texture argileuse



Texture limoneuse



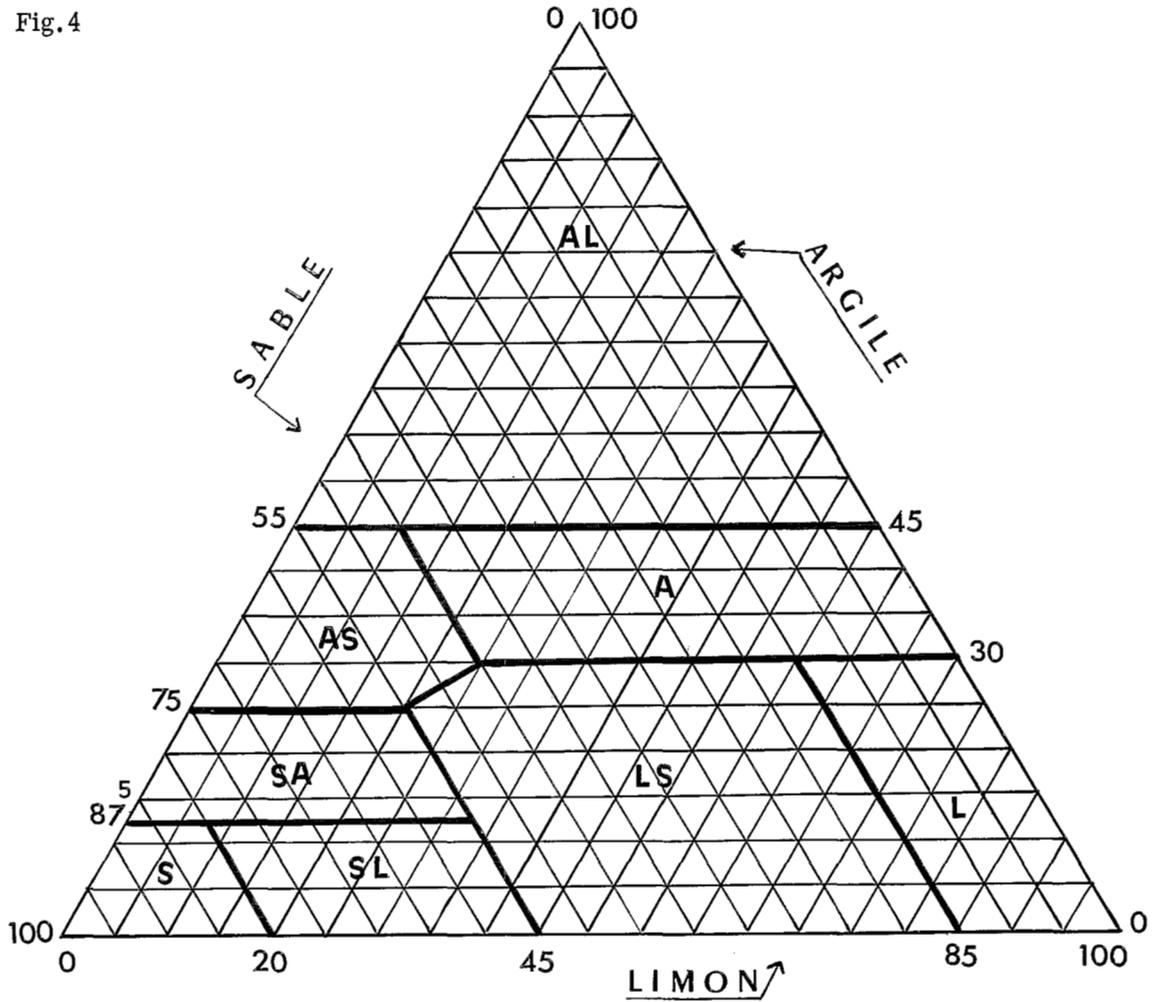
Texture équilibrée



Texture sableuse

DIAGRAMME DES TEXTURES
(Classification américaine)

Fig. 4



TRIANGLE DES TEXTURES POUR L'ETABLISSEMENT
DE LA CARTE DES SOLS DE L' AISNE (M. JAMAGNE - 1966)

La définition des classes est déduite d'une représentation triangulaire à partir des résultats obtenus en laboratoire. Sur chaque côté d'un triangle équilatéral sont portées les teneurs en sable, limon et argile de 0 à 100. Soit un sol ayant la composition suivante :

Argile = 50% Limon = 20% Sable = 30%

Sur la branche "argile", on repère le point 50 et on trace une parallèle au côté "sable". Sur la branche "limon" on repère le point 20 et on trace une parallèle au côté "argile". Les deux demi-droites se coupent en A. La parallèle menée de A au côté "limon" coupe le côté "sable" en 30.

Le triangle est divisé ainsi en secteurs qui correspondent à un certain nombre de zones de textures. Plusieurs triangles sont proposés, ce qui prouve qu'il n'est peut-être pas nécessaire de rechercher des définitions générales car il y a des différences sensibles entre la notion de texture (expression de terrain) et celle de granulométrie (expression de laboratoire). Les définitions n'ont le plus souvent qu'une valeur régionale.

Lorsque les teneurs en matière organique sont élevées (plus de 10%), on ajoute des termes adjectifs précisant cette donnée.

Exemple : argile humifère ; sable limono-humifère.

Il peut être intéressant aussi d'ajouter des termes plus spécifiques comme "tourbe", "tourbeux". De même, des teneurs élevées en carbonate de calcium (plus de 10%) amènent à l'emploi des mots : calcaire, calcareux.

Exemple : sable calcaireux ; limon calcaire.

- **Éléments grossiers**

Les différents horizons des sols ne sont pas toujours composés de fractions granulométriques inférieures à 2 mm. Ils contiennent souvent des éléments plus grossiers en proportions appréciables. Pour indiquer ce fait on complète le nom de classe texturale par un adjectif approprié. Cet adjectif est choisi en fonction du pourcentage et de la dimension moyenne des matériaux grossiers.

Dénominations employées pour les fragments grossiers du sol :

% éléments grossiers	dimensions dominantes Ø 0, 2 - 7,5 cm	Ø 7,5 - 20 cm	Ø > 20 cm
2 - 15	peu graveleux	peu caillouteux	peu pierreux
15 - 50	graveleux	caillouteux	pierreux
50 - 90	très graveleux	très caillouteux	très pierreux
> 90	graviers	cailloux	pierres

Nature des éléments grossiers

Les éléments grossiers marquent la dynamique des sols, non seulement par leur nombre et leur taille, mais aussi par leur composition et leur forme. Comme ces matériaux sont facilement observables, il est aisé de faire des distinctions détaillées. Mais on ne retient que les données qui peuvent avoir une influence effective sur l'évolution du sol en particulier sur l'infiltration et l'écoulement des eaux de percolation, sur le développement et la croissance des racines, etc.

La forme et, en relation avec celle-ci, l'orientation des matériaux grossiers sont signalés ; les fragments peuvent être arrondis, anguleux (dangers de blessures sur les racines), phylliteux. Dans ce dernier cas, si les fragments plats sont parallèles à la surface du sol, ils freinent l'écoulement de l'eau ou la pénétration des racines.

Il est donc possible de substituer à la combinaison pourcentage-dimension, la combinaison pourcentage-nature. Par exemple, une argile à silex est une argile contenant de 15 à 80% de silex.

F - STRUCTURE

La structure du sol exprime le mode d'assemblage des particules élémentaires du sol en particules composées. Il semble acquis que la structure n'est pas liée uniquement à la notion d'agrégats, mais d'une façon plus générale correspond à la manière dont les éléments constitutifs du sol sont arrangés les uns par rapport aux autres. Ces assemblages peuvent être constitués par :

- . des éléments simples ou particulières, c'est-à-dire les éléments mêmes de la texture ;
- . des agrégats ou particules composées naturelles ;

Ces assemblages ne doivent pas être confondus avec :

- . les **mottes** dues à des causes artificielles (labour par exemple) ;
- . les **fragments** causés par rupture de la motte ;
- . les **concrétions**, nodules, cuirasses, accidents divers, qui résultent de la cimentation d'éléments particulières.

Un agrégat ("ped" en anglais) est un solide géométrique naturel qui conserve une forme individuelle, spécifique, déterminée, lorsqu'on le manipule doucement. Il est constitué par des éléments de terre fine et éventuellement par des inclusions d'éléments grossiers. Ces éléments sont liés entre eux par des ciments colloïdaux ou des forces de cohésion variées qui sont plus ou moins réversibles. Chaque agrégat est séparé des agrégats voisins par des surfaces de moindre résistance. Les surfaces extérieures de certains agrégats portent des revêtements minces de couleurs différentes qui aident à les individualiser.

La description de la structure fait appel à trois ensembles de données :

- le type de structure qui concerne la forme et l'arrangement des agrégats ;
- la classe de structure qui se réfère à la dimension des agrégats ;
- le degré de développement de la structure qui a trait à une évolution plus ou moins marquée de l'agrégation.

On évite ainsi les termes imagés ou même des néologismes destinés à définir rapidement et synthétiquement des structures particulières pour retenir une terminologie analytique simplifiée.

• *Types de structures*

- Structures naturelles

On distingue trois catégories de types de structures naturelles : les structures particulières, les structures massives ou continues, les structures fragmentaires.

◦ Structures particulières

Dans cette catégorie de structures, le sol est formé par les éléments du squelette textural non associés entre eux et n'ayant pas de cohésion.

Ces particules sont :

minérales

La classification correspond alors à celle de la texture. Une mention spéciale doit être faite pour les structures particulières à éléments très fins, difficilement discernables à l'œil, constitués généralement de limons et d'argiles que l'on désigne sous le nom de poudres. Ces poudres sont plus ou moins fines et présentent des aspects variés. On reconnaît :

- . une structure poudreuse caractéristique de certains sols halomorphes (en fait, il s'agit de microagrégats argileux) ;
- . une structure cendreuse caractéristique de l'horizon A₂ des podzols, constituée par l'enchevêtrement de fins cristaux de quartz ;
- . une structure farineuse ("fluffy" en anglais), caractéristique de l'horizon A₁₂ des sols ocre-podzoliques qui est un mélange d'argiles dégradées et de sables (aspect de farine charançonnée).

organiques

La classification repose sur la forme des matériaux organiques. On distingue :

- . une structure fibreuse lorsqu'il y a enchevêtrement de racines ;
- . une structure feuilletée lorsqu'il y a orientation de fibres formant des couches superposées.

Quand ces formes ne sont pas reconnaissables, il s'agit nécessairement d'agrégats et l'on est ramené à l'étude des formes structurales résultant d'un assemblage.

Pour plus de précisions, il peut être intéressant de signaler la dimension des fibres, leur enchevêtrement, la compacité et la porosité de la masse, son comportement mécanique, etc. Ces données analytiques évitent l'emploi de termes trop subjectifs tels que : feutré, spongieux, "dermo", etc.

o Structures continues

L'horizon forme un bloc unique qui se caractérise par l'impossibilité à séparer les éléments structuraux.

Quand la pâte ne présente pas de constituants différenciables à l'œil on a une structure fondue.

Quand elle se compose d'éléments individualisés on distingue les types de structures d'après la dimension moyenne de constituants. On note :

- . des structures grèseuses : les éléments de type sableux sont liés par un ciment ;
- . des structures poudingiformes et conglomératiques : les éléments de la taille "gravier" ou supérieure sont noyés dans un ciment fin*.

* Il est parfois difficile de distinguer la structure fondue de la structure finement particulière lorsque la cohésion entre les éléments est faible. Pratiquement, on essaie de rompre un fragment d'élément structural entre les doigts. S'il s'écrase en même temps qu'il se rompt, on classe la structure comme particulière légèrement cohérente (ou fondue). A l'opposé, si l'élément structural massif se casse avec facilité, on le classe d'après sa plus ou moins grande fragilité.

◦ Structures à éléments fragmentaires

Cette catégorie de structures est la plus fréquente. Les particules fragmentaires de la structure sont classées d'après leur forme, puis l'orientation des solides géométriques reconnus.

On distingue trois séries de formes fondamentales :

- des formes anguleuses
- des formes arrondies
- des formes intermédiaires

Formes anguleuses

Elles se caractérisent par la présence de faces planes et d'angles vifs. Les surfaces des polyèdres sont étroitement moulées les unes sur les autres :

— formes à angles droits :

- . sans dimension préférentielle : structure cubique
- . à une dimension préférentielle (verticale) : structure prismatique
- . à deux dimensions préférentielles (dans le plan horizontal) : structure en plaquettes encore appelée, lorsque l'épaisseur est faible, structure lamellaire. Ce sont deux formes de la structure tétraédrique.

La structure en colonne ou colonnaire est un cas particulier de la structure prismatique. Elle se caractérise par des prismes surmontés de formes hémisphériques.

La structure squameuse est un cas particulier de la structure lamellaire. Les lamelles se décollent et se recourbent sous l'action de la dessiccation.

— formes à angles aigus : structure polyédrique

Formes arrondies

Elles sont sphériques ou ellipsoïdes. Elles définissent deux aspects de la structure grenue. Les surfaces ne s'accordent pas ou très peu aux surfaces des agrégats voisins. Les agrégats sont peu poreux.

Formes intermédiaires

Elles sont constituées par l'assemblage de formes simples :

— assemblage de formes arrondies : structure grumeleuse

Les surfaces des agrégats ne s'accordent pas mais les agrégats sont poreux.

— assemblage de formes planes et arrondies : structure polyédrique émoussée encore appelée structure subangulaire ou nuciforme.

— Structures artificielles

A côté des formes structurales naturelles existent des formes artificielles résultant du travail de l'homme. Ces formes sont nombreuses. Elles peuvent cependant être ramenées à quelques types principaux dont la terminologie s'explique d'elle-même :

- . structure motteuse
- . structure en rouleaux
- . structure à éclats

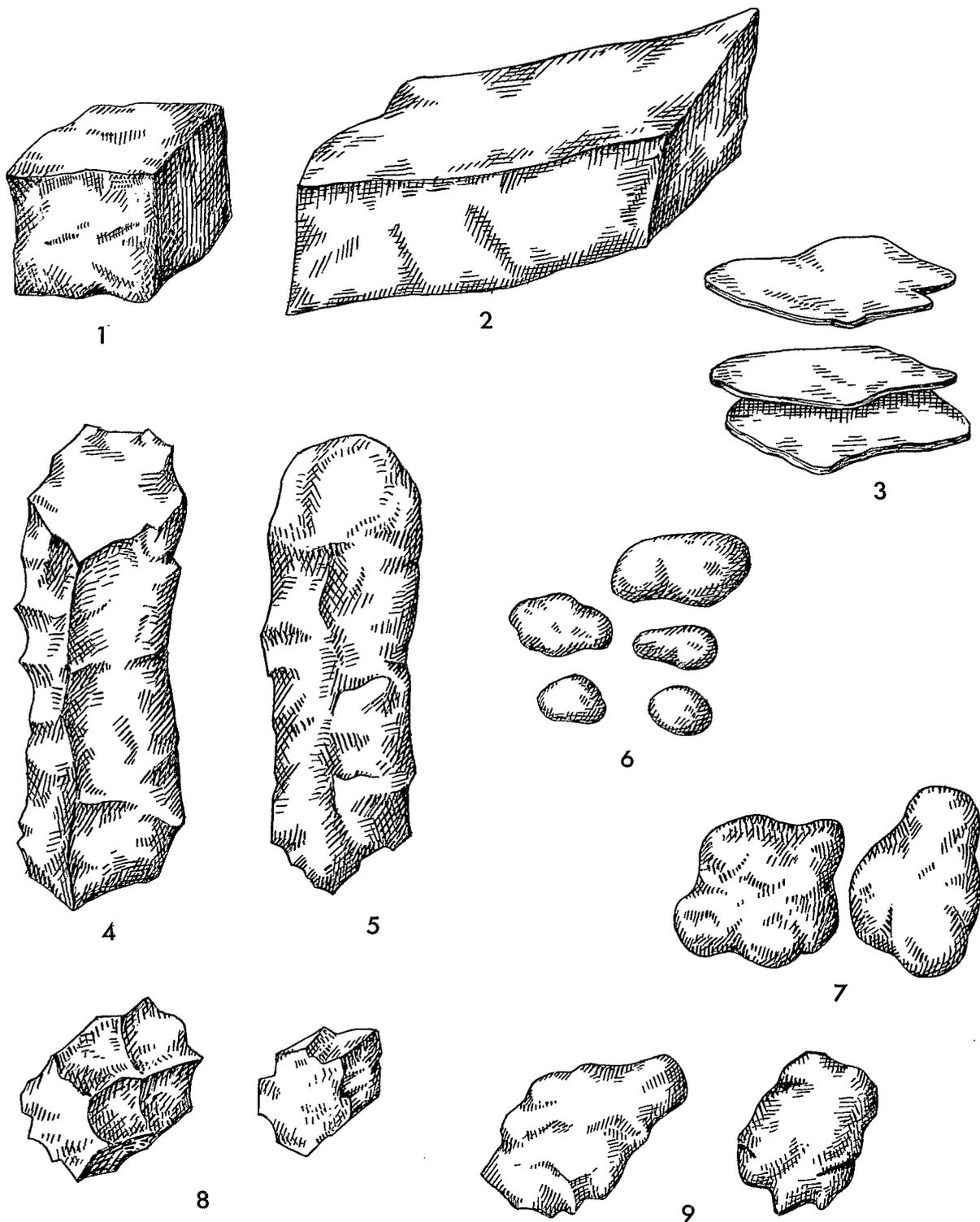


Fig. 5

DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURE :

- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| 1 - Cubique | 6 - Grenue |
| 2 - En plaquettes | 7 - Grumeleuse |
| 3 - Lamellaire | 8 - Polyédrique |
| 4 - Prismatique | 9 - Subangulaire ou nuciforme |
| 5 - Columnaire | |

Enfin, il doit être fait mention ici des semelles de labour et des semelles d'irrigation qui constituent des niveaux difficilement pénétrables aux racines, sans parler de certains accidents pédologiques tels que les "pans" dont il sera traité plus loin.

- Combinaison de plusieurs types de structures

Il est fréquent d'observer des mélanges d'éléments structuraux. On les nomme en notant les deux types extrêmes, par exemple structure prismatique à cubique exprimant le mélange de ces deux formes ; ou structure prismatique à tendance cubique signalant la présence de prismes peu développés en hauteur. Il faut obligatoirement faire ressortir l'impression générale dégagée par l'horizon. Par exemple, pour une terre constituée par des pierres et d'un peu de matériaux fins, on a une structure à éléments pierreux avec remplissage granulaire ou polyédrique, ou s'il n'y a qu'une certaine quantité de pierres et une proportion beaucoup plus importante d'éléments fragmentaires, on dit structure à éléments pierreux emballée dans une structure polyédrique ou structure polyédrique à éléments pierreux.

Il arrive fréquemment, en particulier dans le cas de terres battantes, que l'on observe des poches limoneuses englobées à l'intérieur de fragments. On signale leur présence en précisant leur structure (souvent litée).

Des éléments limoneux ou sableux peuvent se trouver entraînés dans les cavités ou les fissures. On indique la présence de ces accidents en parlant d'inclusion ou de remplissage.

Il existe enfin dans certains horizons des éléments massifs discontinus, dont le caractère est d'être cimenté par des constituants relativement peu sensibles à l'eau (carbonates ou hydroxydes). Ce sont des concrétions qui remplissent le même rôle que les éléments grossiers et qui doivent être décrits comme tels (cf. paragraphe précédent).

- Sur-structure et sous-structure

Les constituants de la structure ont parfois tendance à se regrouper pour redonner de nouveaux éléments structuraux ou, au contraire, à se diviser pour en donner des plus fins. On est alors amené à parler de sur-structure et de sous-structure.

La *sur-structure* est l'ensemble des orientations, ou fissures, ou assemblages réguliers que l'on distingue à l'œil autour de l'élément structural principal.

La *sous-structure* est une subdivision de l'élément structural principal. Par exemple, une structure prismatique peut avoir une sous-structure à éléments cubiques ou en plaques. Cette subdivision n'apparaît pas d'emblée mais peut s'obtenir à la main avec un léger effort. Inversement, des éléments structuraux nuciformes peuvent être englobés dans un système de fissures d'allure prismatique qui est une sur-structure.

Les éléments de la structure pris comme base de la description sont ceux qui permettent de décrire l'état global de l'horizon. Les autres n'apparaissent que lors d'un examen ultérieur plus fin. De toutes façons, il est indispensable de suivre un ordre logique et constant en notant d'abord la définition fondamentale de la structure avant de préciser les différentes sur ou sous-structures, les orientations, inclusions ou accidents divers.

Fig. 6

TYPE ET CLASSE DE STRUCTURE

Très fine : moins de 1mm	• •
Fine : 1-2 mm	◦ ◦ ◦
Moyenne : 2-5 mm	◐ ◐ ◐ ◐
Grossière : 5-10 mm	◑ ◑ ◑ ◑ ◑
Très grossière : plus de 10mm	◒ ◒ ◒

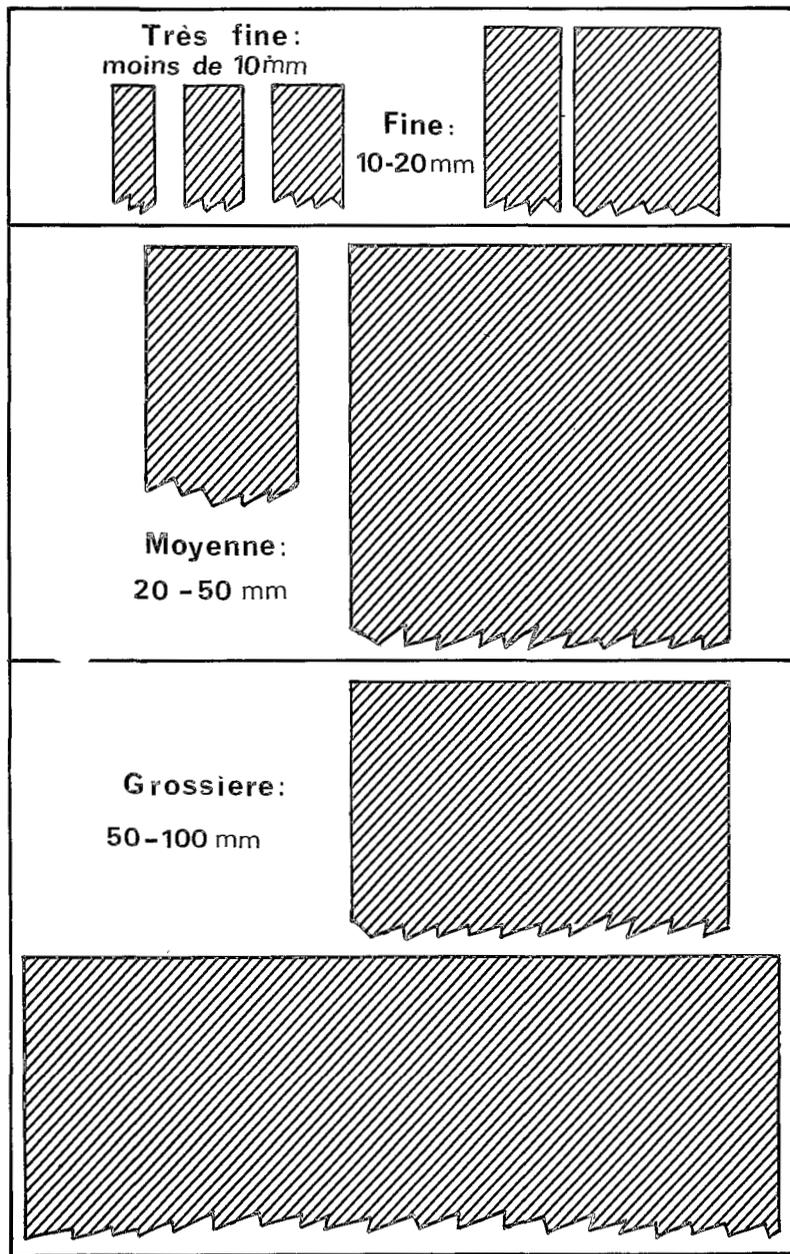
Très fine : moins de 5mm	▣ ▣ ▣ ▣
Fine : 5-10 mm	▤ ▤
Moyenne : 10-20mm	▥ ▥
Grossière : 20-50mm	▦ ▦

STRUCTURES GRENUE ET GRUMELEUSE

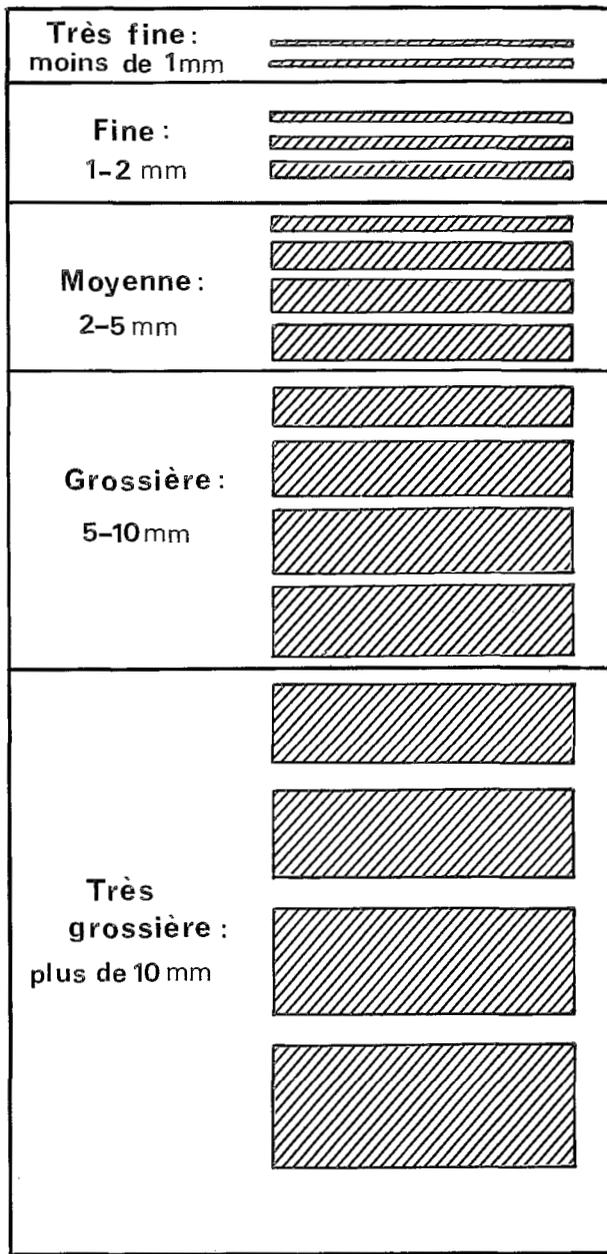
STRUCTURES POLYEDRIQUE ET CUBIQUE

Fig. 7

TYPE ET CLASSE DE STRUCTURE



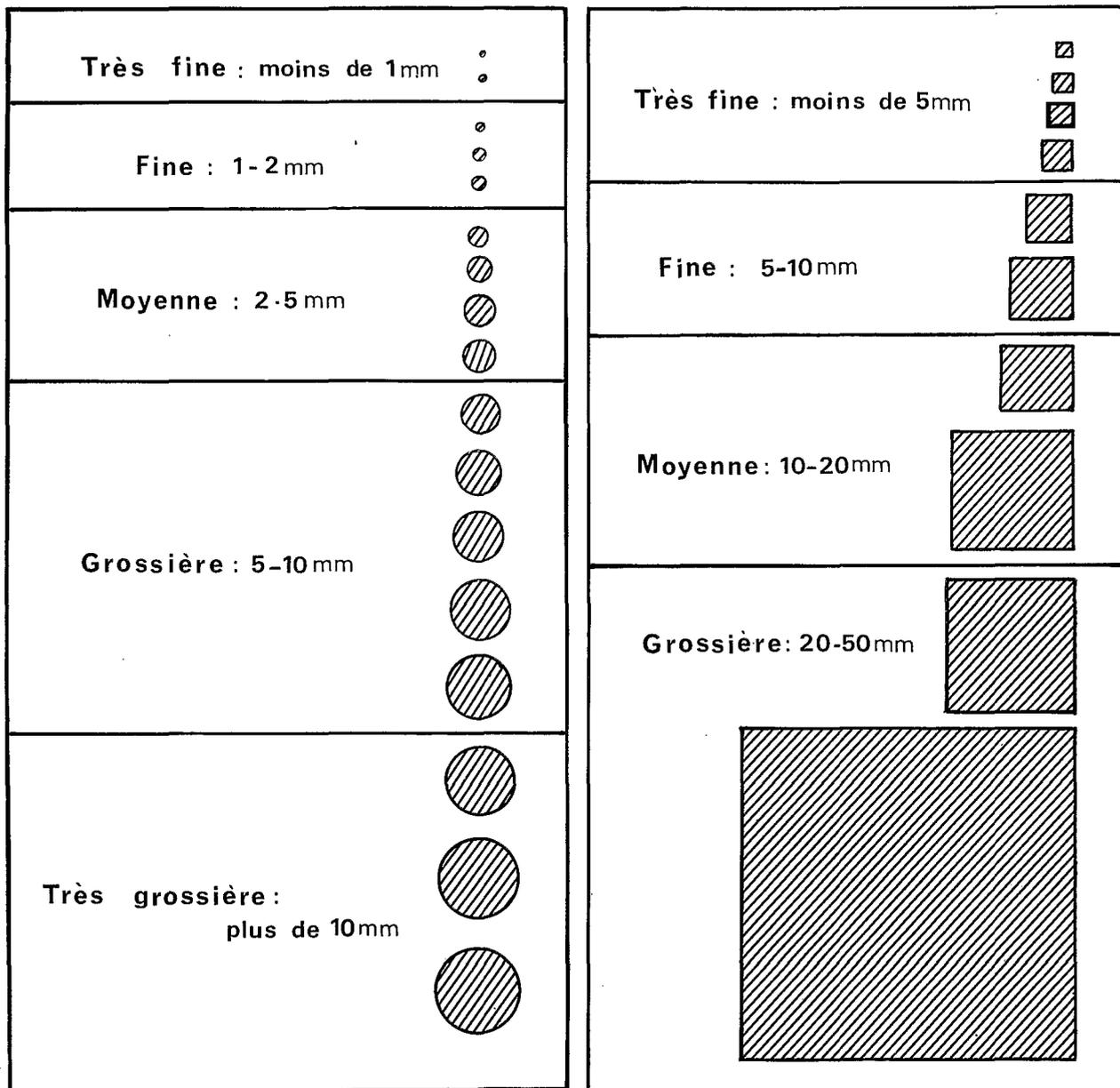
STRUCTURE PRISMATIQUE



STRUCTURE LAMELLAIRE

Fig.6

TYPE ET CLASSE DE STRUCTURE

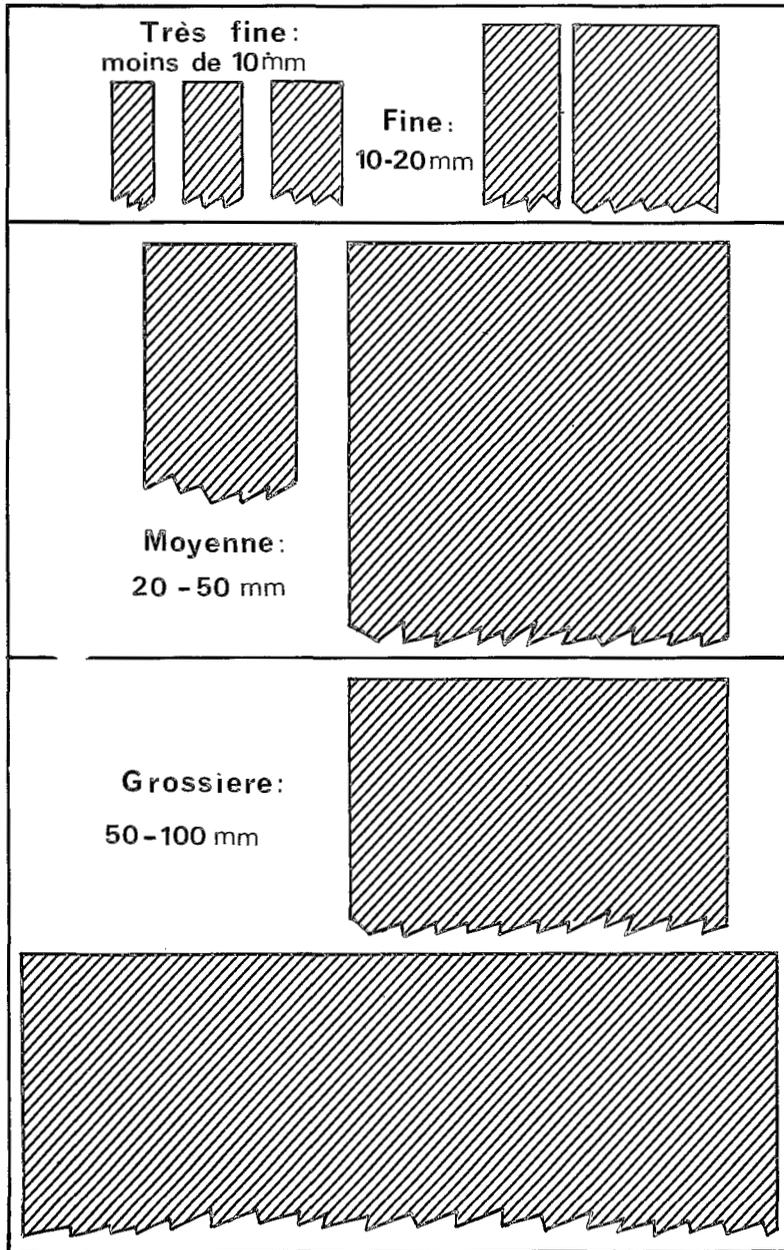


STRUCTURES GRENUE ET GRUMELEUSE

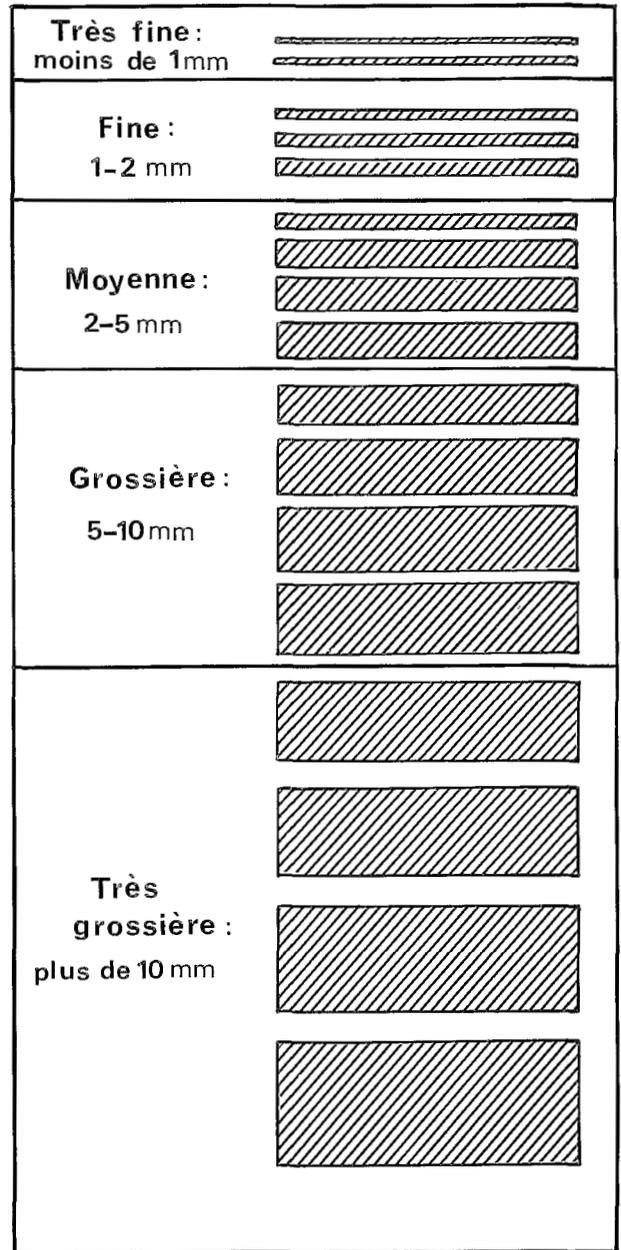
STRUCTURES POLYEDRIQUE ET CUBIQUE

Fig.7

TYPE ET CLASSE DE STRUCTURE



STRUCTURE PRISMATIQUE



STRUCTURE LAMELLAIRE

- Assemblage des éléments structuraux

La disposition des éléments structuraux peut conférer un certain aspect au profil qu'il importe de préciser lorsqu'il n'est pas inclus dans la définition fondamentale. Par exemple, on ne souligne pas les fissures verticales d'une structure prismatique, ou les fissures horizontales d'une structure en plaque. Par contre, on parle de **litage** dans le cas d'assemblages parallèles coupés par des petites discontinuités ; de stratification lorsqu'il y a superposition de couches de natures différentes.

On tient compte également de l'existence d'accidents se manifestant sans donner lieu à des formes régulières. On observe des fentes, des canaux, des alvéoles. Suivant que les fissures s'élargissent, qu'il s'agisse de tubes ou de cavités fermées. Quand ces cavités sont petites et fréquentes, on obtient une structure assez caractéristique appelée parfois **structure en mie de pain**. La forme et la fréquence de ces accidents sont notées.

• Classes de structures

Les classes de structures se réfèrent aux dimensions des unités structurales. Il s'agit naturellement de dimensions moyennes. Les dimensions des différentes classes varient suivant le type de structure. Par exemple, les dimensions d'une structure polyédrique fine correspondent à celles d'une structure grumeleuse grossière. On distingue cinq classes par type de structures.

Classes de Structures (dimensions en mm)

	très fine	fine	moyenne	grossière	très gros
en plaque	< 1	1 - 2	2 - 5	5 - 10	> 10
prismatique.	< 10	10 - 20	20 - 50	50 - 100	> 100
polyédrique	< 5	5 - 10	10 - 20	20 - 50	> 50
polyédrique émoussé ...	< 5	5 - 10	10 - 20	20 - 50	> 50
grumeleux	< 1	1 - 2	2 - 5	5 - 10	> 10
grenue	< 1	1 - 2	2 - 5		

Pour faciliter la description, il est pratique de disposer de planches sur lesquelles sont dessinées en ombres chinoises les modèles des différents types et classes de structures.

• Degré de développement de la structure

Le degré de développement de la structure exprime la différence entre la cohésion à l'intérieur des agrégats et l'adhésion des agrégats entre eux. Cette mesure varie avec l'humidité du sol. Elle doit être réalisée aux humidités en place du sol étudié. D'une façon générale, sur échantillons secs ou faiblement humides la structure est toujours mieux marquée. Afin de préciser cette mesure, il convient donc d'indiquer grossièrement l'état d'humidité de l'horizon considéré. Pour estimer le degré de développement de la structure, on ébranle l'échantillon doucement entre les doigts de façon à séparer les agrégats les uns des autres. Une partie du matériau reste agrégé en polyèdres caractéristiques, une autre s'effrite en poussière et l'on compare les proportions relatives de ces deux fractions.

On distingue quatre degrés définis comme suit :

- **sans agrégats** : il n'y a pas d'agrégation observable. La structure est fondue à l'état cohérent, sinon elle est particulière.
- **faiblement agrégé** : les unités structurales sont mal formées, difficilement perceptibles. L'échantillon se divise en peu d'agrégats entiers, mêlés à de nombreux agrégats brisés et beaucoup de matériaux meubles.
- **moyennement agrégé** : les unités structurales sont bien définies et distinctes sur l'échantillon mais assez difficilement perceptibles sur le profil.
Les échantillons se décomposent en de nombreux agrégats entiers. Il y a peu d'unités structurales incomplètes et peu de matériaux meubles.
- **fortement agrégé** : les unités structurales sont extrêmement stables et distinctes. Elles sont plus ou moins cohérentes les unes aux autres. Elles s'observent parfaitement sur le profil en place. Les échantillons se débitent uniquement en agrégats entiers. Il n'y a pratiquement plus d'unités brisées et de matériaux meubles.

G - POROSITÉ

Il faut distinguer la **porosité vraie** qui est une porosité diffuse et qui est plutôt une caractéristique d'ordre quantitatif à déterminer au laboratoire, de la description des **cavités** qui est une caractéristique autant qualitative que quantitative.

Sur le terrain il s'agit d'apprécier l'abondance de pores visibles à l'œil nu, soit sur une section de la masse de l'horizon dans le cas d'un horizon non structuré, soit sur une section des unités structurales. On fait donc une distinction entre cette porosité à l'intérieur des agrégats et la porosité correspondant aux espaces qui séparent les unités structurales. On pourrait donc parler de micro et de macroporosité en tenant compte pour celle-ci des fentes de retrait qui peuvent avoir une influence considérable sur le drainage du sol en début d'irrigation.

Concernant la porosité à l'intérieur des agrégats les normes suivantes sont proposées (après observation à la loupe) (DUCHAUFOR) :

Compact : moins de 10 pores par cm^2
Assez poreux : 10 à 25 pores par cm^2
Poreux : 25 à 50 pores par cm^2
Très poreux : plus de 50 pores par cm^2 .

En ce qui concerne les cavités apparentes, on se rattache aux formes suivantes :

- cavernes
- fissures
- alvéoles
- tubes

Les dimensions et les liaisons spécifiques sont précisées chaque fois que cela est possible. Par exemple, certains tubes peuvent être ferruginisés ; des fissures peuvent être associées à des phénomènes de réduction, etc. On vérifie s'il y a communication entre les cavités, ce qui facilite la circulation des eaux. Certains horizons paraissant très poreux sont en fait peu perméables, les cavités étant isolées et ne communiquant pas les unes avec les autres. On parle parfois alors de **porosité vésiculaire**.

En se rapportant uniquement à l'aspect actuel de la porosité globale, on distingue trois classes au niveau de chaque horizon.

- très poreux : on observe nettement les interstices entre les particules. Les racines sont ramifiées, très garnies de poils absorbants avec parfois localisation de ces poils. Le pied s'enfonce dans le sol qui est qualifié de creux ou de soulevé.
- moyennement poreux : les interstices entre les particules sont peu visibles. Les racines s'installent mais sont peu garnies de poils. Le pied s'enfonce difficilement dans le sol, qui est dit rassis.
- peu poreux ou compact : on ne distingue aucun interstice entre les particules. Les racines ne pénètrent pas ou mal. Le pied ne s'enfonce pas dans le sol qui est tassé.

L'étude de la porosité peut être complétée en précisant la perméabilité des différents horizons par des mesures sur le terrain. En fait, la perméabilité du profil est déterminée par celle de l'horizon le moins perméable.

Les normes suivantes, s'appuyant sur la vitesse de percolation de l'eau, peuvent être appliquées :

- . très lente ... : inférieur à 0,1 cm/heure
- . lente : 0,1 à 0,5 cm/heure
- . assez lente.. : 0,5 à 2 cm/heure
- . moyenne : 2 à 6,5 cm/heure
- . assez rapide. : 6,5 à 12,5 cm/heure
- . rapide : 12,5 à 25 cm/heure
- . très rapide .. : plus de 25 cm/heure

La valeur de ces différents chiffres dépend des techniques utilisées sur le terrain. Elles sont parfois remplacées par des méthodes de laboratoire.

H - CONSISTANCE

La consistance est le comportement mécanique du sol à l'égard d'une force. Sur le terrain on se limite à ce qui peut être apprécié aux doigts et à l'œil. La consistance comprend les caractéristiques exprimées par le type et le degré de cohésion, d'adhésion ou par la résistance à la déformation et à la rupture.

La consistance est sous la dépendance étroite de l'humidité. Elle est définie par les limites d'ATTERBERG. Sur le terrain, les tests varient suivant les degrés d'humidité des sols. On distingue trois états :

- . sec à l'air : l'humidité est inférieure au point de flétrissement. Les caractéristiques de l'horizon sont sa fragilité et sa résistance à l'éclatement ;
- . humide : l'humidité se situe entre le point de flétrissement et la capacité au champ. L'horizon est à l'état plastique, c'est-à-dire qu'il peut subir une déformation sans rupture ;
- . trempé : l'humidité est supérieure à la capacité au champ. Le sol est à l'état pâteux ou pseudo-fluide. Il peut s'écouler sous son propre poids.

D'un façon générale, la détermination de la consistance s'effectue, soit au niveau de l'horizon, soit au niveau des agrégats, lorsque cela est possible.

Consistance à l'état sec

A ce degré d'humidité l'échantillon se caractérise par sa rigidité, sa fragilité. Il présente une résistance maximum à la pression ; une tendance plus ou moins grande à être écrasé

en poudre ou en fragments à arêtes vives. Par pression, le matériau écrasé ne peut pas devenir à nouveau cohérent.

Pour estimer les différents degrés de cet état, on cherche à briser une certaine quantité de matériau sec entre les mains et à écraser les fragments entre les doigts.

On distingue les classes suivantes :

- . *meuble* : non cohérent ;
- . *peu cohérent* : le matériau est fragile. Il tombe en poudre ou en grains individuels sous faible pression ;
- . *moyennement cohérent* : l'échantillon est peu résistant à la pression, mais la résistance est sensible. Il est facilement brisé entre le pouce et l'index ;
- . *dur* : l'échantillon résiste à la pression. Il peut sans difficulté être brisé entre les mains, mais résiste à l'écrasement entre le pouce et l'index.

Consistance à l'état humide

A ce degré d'humidité, le sol montre une forme de consistance qui se caractérise par :

- . une tendance à se briser en fragments plus petits ;
- . une tendance à se déformer avant rupture ;
- . une absence de fragilité ;
- . une possibilité à devenir à nouveau cohérent par pression des fragments.

Comme la résistance à l'écrasement diminue avec le degré d'humidité, la valeur des tests est limitée par l'estimation de cette humidité. Pour déterminer ces valeurs on écrase et on serre dans la paume de la main et entre les doigts une certaine quantité de terre légèrement humide.

On reconnaît les classes suivantes :

- *très friable* : le matériau s'écrase facilement sous faible pression. Il n'offre pas de résistance sensible. Il redevient cohérent après une nouvelle pression ;
- *friable* : le matériau s'écrase sous une légère pression nettement perceptible. Il redevient cohérent après une nouvelle pression ;
- *ferme* : le matériau s'écrase sous une pression modérée. La résistance à l'écrasement est sensible. Il ne devient plus cohérent après une nouvelle pression ;
- *très ferme* : le matériau ne s'écrase que sous une forte pression et très difficilement entre le pouce et l'index ;
- *extrêmement ferme* : le matériau résiste pratiquement à toute pression. Il faut le briser morceau par morceau.

Consistance à l'état trempé

A cet état, on observe des films d'eau à la surface des agrégats. Il peut être aussi possible de faire suinter de l'eau en serrant fortement l'échantillon dans la main.

Pour les plus fortes humidités, on apprécie l'adhésivité, sinon on détermine le degré de plasticité.

• Adhésivité

Le test s'appuie sur la propriété du sol à adhérer à d'autres objets. Pour son évaluation sur le terrain, le matériau est pressé entre le pouce et l'index, puis en écartant les doigts on note le degré d'adhérence. On détermine les classes suivantes :

- non collant : après pression, aucun matériau n'adhère au pouce et à l'index ;
- peu collant : après pression, le matériau adhère au pouce et à l'index, mais se détache de l'un d'eux lorsque l'on écarte les doigts, sans qu'il soit étiré d'une façon notable ;
- collant : après pression, le matériau adhère au pouce et à l'index. Il a tendance à s'étirer un peu, puis à se rompre plutôt qu'à se détacher d'un des doigts lorsque l'on écarte ces derniers ;
- très collant : après pression, le matériau adhère au pouce et à l'index, et s'étire fortement lorsque l'on écarte les doigts.

• Plasticité

La plasticité est la propriété d'un matériau qui consiste à changer continuellement de forme sous pression et à conserver cette forme après suppression de la pression. Pour déterminer la plasticité sur le terrain, on roule le matériau entre les doigts et l'on essaie de faire un paton cylindrique de plus en plus fin. On détermine les classes suivantes :

- non plastique : on ne peut pas former le rouleau ;
- peu plastique : on peut former un rouleau, mais la masse se déforme facilement ;
- plastique : on peut former un rouleau et il est nécessaire d'appliquer une pression modérée pour déformer la masse ;

- très plastique : on peut former un rouleau et il faut appliquer une forte pression pour déformer la masse.

I - COHÉSION

La cohésion peut être appréciée au niveau de l'horizon ou au niveau des agrégats. Il faut distinguer entre la **cohésion réversible** et la **cohésion irréversible**. Dans le premier cas, la cohésion disparaît en tout ou en partie sous l'action de l'humidité ; dans le second cas, le matériau reste cohérent même en milieu très humide. Il s'agit alors d'une cimentation.

Cohésion réversible

Au niveau de l'horizon, cette propriété n'a pas de sens physique précis. Elle ne se définit que par un effort physique correspondant à une utilisation particulière qui varie suivant la nature de l'outil employé.

Le terme "meuble" se définit par l'absence de cohésion entre les éléments de petite taille. A sec, il y a formation d'un talus d'écoulement. Le terme "meuble" s'oppose à "cohérent". On peut distinguer la cohésion vraie qui résulte de l'action de liaisons internes homogènes (pour sa détermination on est ramené aux tests de la consistance des sols à l'état sec) ; et la pseudo-cohésion dont les effets similaires sont dus à ces causes exter-

nes variées, non homogènes, par exemple à l'exchevêtrement d'éléments, aux frottements, aux vibrations, aux pressions d'instruments aratoires, de glaciers, etc. comme c'est le cas pour les semelles de labour et pour certaines formations particulières comme les "fragipans".

Cimentation

La cimentation se réfère à une consistance dure et fragile, causée par un liant, autre que les minéraux argileux, tel que carbonates, silices, sesquioxydes, etc. Elle implique que l'induration ne change pas ou peu avec l'humectation. La cimentation peut être homogène ou discontinue à l'intérieur d'un horizon. Suivant les cas, elle est appréciée au niveau de l'horizon ou au niveau des éléments cimentés.

On distingue les catégories suivantes :

- peu cimenté : la masse est fragile et dure mais peut être brisée entre les mains ;
- cimenté : la masse se brise difficilement entre les mains. Elle se façonne facilement à l'aide d'un instrument tranchant (bêche, couteau).
- fortement cimenté : la masse ne peut plus être brisée entre les mains. Elle se façonne difficilement à l'aide d'un instrument tranchant. Elle se brise sous le choc du marteau.
- très cimenté : la masse se brise difficilement au marteau qui rebondit au choc. Le matériau résonne au coup.

J - ENRACINEMENT

L'étude du système racinaire est extrêmement importante. Il y a, en effet, étroites relations entre la morphologie des sols et le mode de développement du système racinaire.

Il importe de signaler :

- la nature des racines, en distinguant :
 - . les grosses racines lignifiées, vivantes ou mortes ;
 - . les racines herbacées ;
 - . le chevelu de poils absorbants.
- les espèces auxquelles appartiennent les racines, lorsque cela est possible.
- la taille des racines : grosses (plus de 10 mm de diamètre) ;
moyennes (2 à 10 mm) ;
chevelu (moins de 2 mm).
- la répartition des racines entre et dans les horizons, et leur abondance.
- la direction de pénétration des racines et la façon dont elles prospectent le sol. On signale si les racines suivent des fentes ou des lignes de moindre résistance, si les poils absorbants pénètrent ou ne pénètrent pas à l'intérieur des agrégats. Il arrive que des racines buttent sur un horizon plus cohérent, et s'étalent horizontalement au sommet de ce dernier ou se plaquent à la surface des agrégats, etc.
- l'état sanitaire des racines. Ce fait se caractérise par des pourritures dégageant des odeurs butyriques, ou par des blessures sur les racines provenant de l'attaque d'animaux, ou du contact avec certains matériaux durs et coupants.
- on précise enfin les liaisons qui existent entre la présence des racines et certaines formations particulières (trainées rouille dans les horizons de surface, langues de marmorisation, concrétions, gley, etc.).

K - FORMATIONS PARTICULIÈRES

Ces formations, dont la liste jointe n'est pas exhaustive, sont importantes car elles correspondent à des processus pédogénétiques particuliers qui permettent l'interprétation des profils.

Revêtement argileux

Ce sont de minces pellicules d'argiles qui se déposent, dans certains horizons, sur les unités structurales ou le long des fentes de retrait. Ces revêtements sont plus ou moins épais et plus ou moins continus.

On indique leur **emplacement**, leur **épaisseur**, la présence éventuelle d'une **stratification**, leur **couleur**, leurs **formes**.

Les faces de glissement ou "slickensides"

Ce sont des faces polies et striées qui s'observent sur certains agrégats. L'origine est liée au frottement de deux masses l'une contre l'autre à la suite du gonflement différentiel d'argiles expansives.

Tubes ferruginisés, signalant d'anciennes racines.

Morceaux de charbon de bois, de poteries, débris divers confirmant des contaminations et des remaniements, des actions anthropiques.

Formations dues à la faune du sol : galeries d'insectes ou d'animaux fouisseurs, déjections de vers de terre, etc.

Efflorescences salines diverses : degré de cristallisation, couleur, goût, etc.

L - pH

Il s'agit d'une mesure à effectuer parfois sur le terrain mais plus souvent précisée au laboratoire. Elle est effectuée à l'aide d'indicateurs colorés ou d'appareils portatifs à piles.

Une conclusion sur la valeur diagnostique de chaque horizon suit immédiatement la description. La synthèse des différentes caractéristiques morphologiques permet, en effet, d'aboutir à une formulation simple : horizon humifère ; horizon lessivé ; horizon d'accumulation d'argile, de fer, de carbonates ; horizon à gley, pseudo-gley ; etc. Au niveau de cette formulation, on peut être amené à vérifier et compléter certaines observations.

On effectue ainsi la description de chaque horizon. Celle du sol est terminée quand on a reconnu, décrit et identifié tous les horizons du profil, de la surface jusqu'au matériau originel. La comparaison des horizons les uns par rapport aux autres permet :

- . d'apprécier le type et le degré de développement du profil ;*
- . de tirer des conclusions générales.*

M - APPRÉCIATION DU DRAINAGE

Parmi ces conclusions, il faut citer l'appréciation du drainage interne. Il caractérise les possibilités de percolation de l'eau à travers le profil. Il est conditionné par la texture, la structure, la stratification et la profondeur de la nappe phréatique. Sa connaissance

est indispensable lorsque l'on veut assainir les sols. Les différentes classes sont définies d'après la présence ou l'absence de taches de gley ou de pseudo-gley et leur position dans le profil.

On distingue les sols à drainage interne suivants :

- nul : pas de percolation de l'eau (horizon imperméable ou nappe phréatique superficielle). Les sols très mal drainés ont une nappe phréatique élevée pendant toute l'année et/ou subissent un engorgement permanent du profil, souvent accompagné d'inondations temporaires. Le gley est présent dans tout le profil.
- très lent : les sols mal drainés subissent une fluctuation temporaire de la nappe phréatique dans tout le profil. Ce drainage résulte parfois de l'imperméabilité du sol. On observe un engorgement généralisé avec apparition de taches rouille jusque dans l'horizon A1. La saturation en eau dure au moins deux mois.
- imparfait : les sols subissent une fluctuation de la nappe phréatique dans la plus grande partie du profil, à l'exception des horizons superficiels. Les taches rouille apparaissent dans l'horizon B. Si le drainage imparfait est provoqué par un horizon superficiel imperméable, il en résulte un engorgement temporaire de surface avec apparition de taches rouille dans la partie supérieure du profil.
- moyen : les sols enregistrent pendant toute ou une partie de l'année une fluctuation de la nappe phréatique à la base du profil, notamment dans l'horizon C et (ou) la partie inférieure de l'horizon B, où apparaissent des taches rouille. S'il y a saturation du profil, celle-ci ne dure que quelques jours et le système racinaire n'en souffre pas.
- rapide : les sols bien drainés ont un bilan hydrique favorable. La nappe phréatique ne fluctue pas dans le profil. La percolation de l'eau n'est pas excessive, mais parfois lente. Il n'y a pas de taches rouille.
- très rapide : le profil est très poreux. Il n'y a pas d'engorgement par nappe phréatique. Le sol perd rapidement son humidité et manque souvent d'eau. La grande porosité est due à la texture grossière.

Naturellement, on indique aussi si l'hydromorphie est due à une nappe phréatique, une nappe perchée, une nappe artésienne, etc.

En rapprochant les conditions du drainage externe et interne, il est possible de déterminer les classes de drainage suivantes :

- . très mauvais drainage : peu ou pas d'évacuation d'eau. Inondation ou saturation du profil pendant la majeure partie de l'année. L'horizon A1 est noir ou foncé, généralement tourbeux, souvent taché de rouille ou de gley.
- . mauvais drainage : lente évacuation de l'eau. Sol humide pendant une grande partie de l'année ; éventuellement inondations périodiques. Couleur grise en surface ; horizons réduits en profondeur (gley et/ou pseudo-gley).
- . drainage imparfait : assez lente évacuation de l'eau ; sols humides en période humide. La couleur de l'horizon de surface est comparable à celle des sols bien drainés correspondants. Taches rouille dans la partie supérieure de l'horizon B, pratiquement entre 40 et 80 cm.
- . drainage moyen (assez bon) : le sol est périodiquement humide pendant un temps très court. Les taches apparaissent à plus de 80 cm de profondeur, dans la partie inférieure de l'horizon B et dans C.
- . bon drainage : l'eau est évacuée assez rapidement. Les taches n'apparaissent plus qu'au-dessous de 120 cm de profondeur ou sont absentes. La capacité pour l'eau est maximum.

P
R
O
F
I
L
S

1 - Sol ferrallitique désaturé
(Lac Mantasoa - Madagascar)

cliché R. MAIGNIEN

2 - Sol rouge ferrallitique sur calcaires
(Majunga - Madagascar)

cliché R. MAIGNIEN

3 - Sol ferrallitique dérivé de roche sédimentaire
argilo-sableuse d'origine continentale
(Plateau du Bongo Lava - Madagascar)

cliché P. SEGALEN

4 - Podzol humo-ferrugineux sur sables
(Tamatave - Madagascar)

cliché R. MAIGNIEN

5 - Vertisol à drainage externe nul, structure massive,
sur alluvions
(Cuvette tchadienne)

cliché R. MAIGNIEN



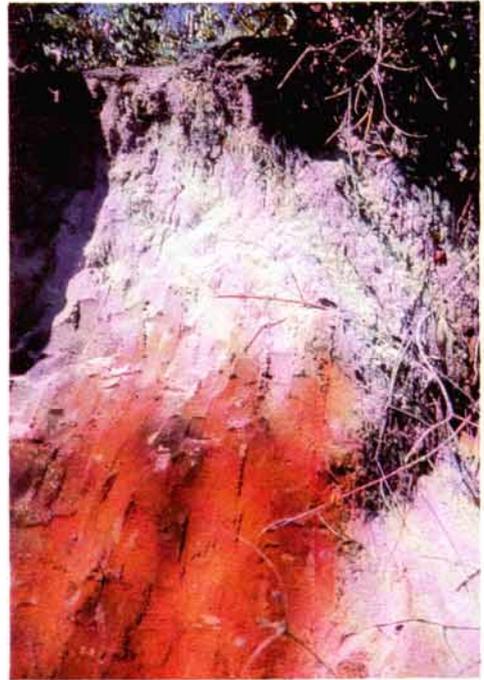
1



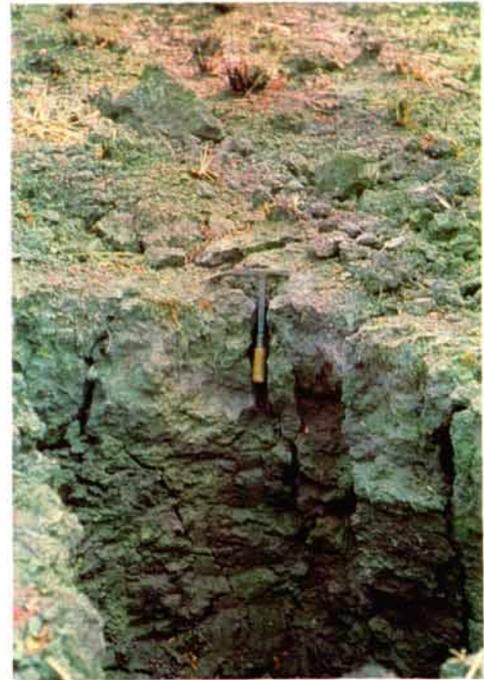
2



3



4



5

- . drainage légèrement excessif : l'eau est évacuée rapidement. Sol généralement sableux ou régosol. Pas de tache de pseudo-gley. Nécessité d'irrigation.
- . drainage excessif : l'eau est évacuée très rapidement. Généralement lithosol. Pratiquement toute production impossible, même avec irrigation.

On indique naturellement l'état du drainage naturel et, quand cela est possible, l'état du drainage artificiel après assainissement. Eventuellement, on signale l'état de l'ancien drainage pour les sols fossiles, enterrés ou non.

N - CONCLUSION

Enfin, le terrain suggère des idées qu'il ne faut pas hésiter à noter, même si elles ont un caractère hypothétique. Ces notes aident à orienter le travail ultérieur et à la rédaction du rapport. Il faut éviter de faire confiance à la mémoire sinon on est rapidement influencé par des impressions qui, par leurs caractères subjectifs, limitent la valeur des travaux de corrélation.

La confrontation de l'ensemble de ces données permet de classer le sol ainsi étudié. Allant du particulier au général, on indique successivement : la série, la famille, le sous-groupe et le groupe. Cette énumération est à faire sur le terrain ; les travaux de laboratoire complètent et précisent la définition.

La liste des caractéristiques possibles de la morphologie des profils montre que la description d'un sol est une opération longue, délicate et complexe. Mais ce travail, qui est la base de toute étude pédologique sérieuse, est indispensable et ne peut être allégé. Pour faciliter les opérations, il faut toujours suivre le même ordre de présentation. Il est aussi possible, pour éviter une trop longue énumération, de remplacer les termes descriptifs par des symboles. Quoiqu'il en soit la description d'un profil est une opération qui demande plusieurs heures de travail même à un pédologue entraîné. Il est donc pratiquement impossible d'effectuer cette opération sur tous les profils. Comme il n'est pas possible non plus d'effectuer de trop nombreuses tranchées (coût de revient élevé et perturbation des terrains cultivés), on limite l'observation exhaustive aux sols caractérisant les unités cartographiées. L'étude de leur extension, de leurs variations et de leurs limites se fait ensuite par carottage à l'aide de sondes à main. Les résultats ainsi obtenus sont généralement suffisants pour l'extrapolation cartographique.

3. Prélèvement des échantillons

L'étude morphologique du sol se complète de détermination analytique portant sur les principaux horizons du profil. Pour ce faire, on prélève une série d'échantillons représentatifs qui sont envoyés aux laboratoires. La confrontation de l'ensemble des résultats, tant morphologiques qu'analytiques, permet une exploitation globale des données en vue de l'application.

Le prélèvement des échantillons est une opération fondamentale au même titre que la description de profil, car les résultats analytiques n'ont de valeur que dans la mesure où les échantillons sont caractéristiques du sol étudié. Ceci amène à poser deux problèmes :

- . quels horizons faut-il prélever pour caractériser le profil ?
- . quelles parties des horizons faut-il prélever pour caractériser ces derniers ?

3.1. Horizon à prélever

Théoriquement, il faudrait analyser tous les horizons du profil. En fait, comme les travaux de laboratoire sont coûteux et longs, on se limite ordinairement à quelques horizons fondamentaux, appelés horizons majeurs, à savoir, lorsqu'ils existent, l'horizon humifère de surface, l'horizon lessivé, l'horizon d'accumulation et le matériau originel, soit quatre horizons. Il est certain que, suivant le problème à résoudre et la morphologie des profils, on peut réduire ou augmenter ce nombre : pour des vérifications agronomiques, on se limite à deux ou trois prélèvements par profil ; pour une caractérisation d'unité de classification on a intérêt à traiter six à huit horizons, parfois plus.

3.2. Partie d'horizon à prélever

Les horizons ont des épaisseurs variées. Si l'horizon est mince (10/15 cm), il est possible de prélever sur toute l'épaisseur. Si, par contre, l'horizon est épais (plus de 30 cm), on choisit la partie la mieux exprimée sur 10/15 cm, partie qui se situe le plus souvent à la base de l'horizon.

Mais les horizons sont aussi plus ou moins homogènes dans leur constitution. A travers ces variations, il faut prélever un échantillon moyen. Si l'horizon est d'aspect homogène il n'y a aucune difficulté. Si, au contraire, l'horizon présente des éléments de ségrégations (taches de couleur, concrétions, mélanges de matériaux grossiers et fins, etc.), il est nécessaire que la partie prélevée soit représentative de cette hétérogénéité aussi bien dans ses parties constitutives que dans les proportions de ces dernières. On a donc tout intérêt à prélever un volume suffisamment grand, dont les dimensions pratiques sont les suivantes : 10/15 cm de hauteur ; 20/30 cm de largeur ; 10/15 cm de profondeur. La quantité en poids à prélever est fonction du nombre des déterminations analytiques que l'on veut faire effectuer. En général, un kilogramme suffit.

Le prélèvement, en vue de détermination chimique, est une opération simple qui demande cependant quelques précautions :

- . prélever l'échantillon avec un outil propre ; bien nettoyer le fer de bêche avant de procéder à la prise sur une face rafraîchie du profil ;
- . commencer les prélèvements par l'échantillon le plus profond pour terminer vers la surface. On évite ainsi de prélever des échantillons contaminés par les déblais provenant de la prise d'échantillons adjacents ;
- . homogénéiser la prise sur une surface propre (feuille de papier fort, toile) avant d'en prélever un aliquote d'environ un kilogramme. On a intérêt à effectuer cette opération à l'aide d'une cuillère en prélevant au hasard à travers le tas. On prendra garde au fait que les matériaux fins tendent à se concentrer à la base du tas alors que les débris les plus grossiers se distribuent au sommet. La précision espérée est de l'ordre de 5%.
- . mettre l'échantillon dans un sac ou une boîte cartonnée, numéroté à l'extérieur et pourvu d'un papier portant le même numéro à l'intérieur ;
- . repérer avec précision sur la carte ou sur la photographie aérienne l'emplacement exact des prélèvements et du profil étudié, soit par l'intersection de deux traits fins, soit par un petit trou d'aiguille en notant au verso le numéro de l'observation.

Pour des déterminations physiques, on prend soin de perturber le moins possible l'arrangement textural de l'échantillon. Le plus simple est de prélever de grosses mottes que l'on cale soigneusement dans des caissettes rigides. Il en est de même pour des études micro-morphologiques. Il faut prendre garde, dans chaque cas, à orienter soigneusement la prise.

4. Matériel pour l'étude du sol en place

Pour mener à bien l'examen du sol en place, il n'est besoin que d'un matériel relativement simple :

- des outils pour creuser les trous et prélever des échantillons ;
- des sachets pour recueillir et transporter les échantillons ;
- du matériel d'observation.

En règle générale, il faut éviter les instruments lourds et encombrants, et porter son choix sur du matériel simple et robuste, demandant peu d'entretien, pour faciliter la mobilité et la rapidité d'action. Ce matériel doit toujours être immédiatement disponible, donc à portée de la main.

4.1. Outils pour creuser et prélever

- . bêches et pelles : tous les modèles peuvent être utilisés la préférence allant aux outils rustiques et solides. On évitera des manches trop longs qui présentent une gêne certaine lorsque les trous doivent être profonds de plus d'un mètre.
La pelle-bêche portative et pliante de l'Armée peut rendre de bons services lorsque le sol est meuble. Elle est particulièrement utile pour prélever des échantillons.
- . pioches et pics : ces instruments sont indispensables lorsque le sol est dur et (ou) caillouteux. On peut les compléter d'une barre à mine de taille moyenne lorsque l'on a à attaquer des niveaux indurés (croûte calcaire, cuirasse ferrallitique).
- . sondes : il existe de très nombreux modèles plus ou moins adaptés à des opérations spécifiques et à la consistance du sol. En prospection pédologique les plus couramment employés sont de deux types :
 - les tarières hélicoïdales
 - les sondes tubulaires.

Parmi les tarières hélicoïdales, on utilise souvent le type "Helix" qui, en permettant de forer rapidement le sol, fournit une carotte peu perturbée. Elle consiste en deux joues latérales formant une sorte de cylindre évidé, terminé par une pointe hélicoïdale qui facilite la pénétration. Suivant la consistance du terrain, on utilise des modèles de diamètres variés. Les dimensions les plus couramment utilisées sont 80 et 100 mm, mais elles peuvent être plus faibles lorsque le sol est lourd.

La longueur de l'instrument (125 cm) est suffisante dans la plupart des cas. Mais il est possible d'utiliser des rallonges amovibles de 100 cm de long. Pour apprécier la profondeur atteinte, on gradue la tige de sonde. Si l'on utilise les rallonges, il faut se munir de deux clefs robustes à manche suffisamment long pour débloquer le pas de vis souvent grippé. On se munit également d'un outil tranchant et robuste en forme de cuillère pour dégager l'échantillon des joues de la sonde, opération difficile lorsque le sol est très argileux et peu humide.

Les sondes tubulaires sont d'un emploi aussi très courant. Lorsque le diamètre est suffisamment large (100 mm), elles ont l'avantage sur les précédentes de ne pas perturber la "carotte", ce qui permet l'observation de la structure. Mais, pour un si grand diamètre, il est difficile de les enfoncer dans le sol. Aussi, on les réserve souvent aux sols organiques ou, pour certaines opérations de prélèvement, à faibles profondeurs. Il y a pratiquement autant de modèles que de cas posés. On peut trouver la description des différents modèles dans la littérature spécialisée.

4.2. Matériel d'étude et d'observation

Ce matériel constitue l'équipement de base du prospecteur. Il doit être limité à l'essentiel, d'un poids léger, peu encombrant, pouvoir être groupé dans une sacoche de faible volume, toujours à portée de la main.

- . piochon de pédologue : il s'agit d'un outil de faible encombrement et de poids peu élevé qui a son utilisation pour rafraîchir les profils et prélever les échantillons. En France, on utilise souvent le marteau-piochon d'ardoisier renforcé qui comporte d'un côté une tête courte servant à casser les matériaux indurés, et de l'autre une large lame coupante. C'est un outil bien équilibré et très robuste. Il a pour inconvénient d'écraser certains constituants du sol (sables, concrétions), ce qui modifie parfois la couleur des horizons, et de lisser partiellement la tranche observée en effaçant la structure.
- . marteau de géologue : cet instrument est parfois utile pour casser des matériaux très durs (roches). Il est d'un emploi moins courant que le piochon.
- . outils coupants divers : pour faire apparaître la structure, on dégage certaines formations (taches, concrétions, racines). Il est bon de disposer d'un instrument pointu et coupant : couteau, spatule de vitrier, poinçon. Il n'est aucune règle dans le choix de cet instrument, sinon la recherche d'un matériel robuste et bien en main.
- . double-mètre : il a pour objet la mesure de la profondeur et de l'épaisseur des horizons. Le choix est varié : double-mètre en bois, double-mètre ruban en acier. Certains prospecteurs disposent d'un double-mètre ruban en toile que l'on fixe au sommet du profil. Ce ruban, suffisamment large (3 à 5 cm), à chiffres très apparents, sert de repère lorsque l'on photographie le sol.
- . loupe : elle sert à observer les agrégats et inclusions diverses du sol. On donne la préférence à des loupes de poches à recouvrement et à fort grossissement.
- . boussole : ses utilisations sont multiples, en particulier pour déterminer le point de station. On recherche le plus faible encombrement, compatible avec la meilleure précision. Les boussoles de géologue sont le plus fréquemment utilisées mais elles sont fragiles. On préfère les modèles permettant une lecture directe lors de la visée.
- . clinimètre : cet instrument a pour objet la mesure des pentes. Il est d'un emploi courant. Certains modèles permettent également la mesure rapide des distances sur une échelle stadimétrique.
- . flacon d'acide chlorhydrique au 1/2 : il s'agit d'une petite pissette en matière plastique contenant de l'acide chlorhydrique au 1/2 pour apprécier la présence et la charge en calcaire.
- . flacon d'eau : une petite réserve d'eau est parfois utile pour mouiller les échantillons secs et les étudier à l'état humide.
- . trousse pour mesure du pH : on peut utiliser soit du papier pH, soit des petites trousses portatives qui permettent d'apprécier rapidement et approximativement le pH sur le terrain.
- . trousse pour analyse qualitative de sels solubles : dans certains cas (sols halomorphes), il peut être utile de disposer de quelques flacons de réactifs pour apprécier les teneurs en chlorures ou en sulfates (nitrate d'argent et chlorure de baryum).
- . stéréoscope de poche : ce petit appareil sert à repérer sur des photographies aériennes l'emplacement des points d'observation grâce à la vision stéréoscopique. Il y en a

de nombreux modèles. On se limite aux modèles les plus simples qui s'adaptent sur des petites plaquettes afin de maintenir les clichés qui se gondolent facilement.

- . **code de couleur** : on donne la préférence au code MUNSELL, spécialement adopté pour les sols et qui a été décrit précédemment.
- . **carnet de note** : ce carnet sert à noter toutes les observations concernant les profils étudiés. Il est indispensable. Aucune règle ne peut être avancée quant à ses caractéristiques. On évite seulement l'emploi d'un bloc à feuilles détachables.
- . **crayons** : le prospecteur doit disposer à la fois de crayons noirs et de crayons de couleur, de préférence dans une poche rigide. Pour les inscriptions sur plastique ou sur photographie, on dispose de crayons dermographes qui présentent cependant l'inconvénient de s'amollir en période de chaleur.
- . **planchette** : n'est pas indispensable, mais très utile pour étaler les cartes ou les photographies aériennes et pour reporter les visées.
- . **appareil photographique** : permet de compléter l'observation et d'illustrer les rapports. On prend généralement une vue du profil et une vue du paysage.

Le transport du petit matériel d'observation et d'étude est avantageusement assuré par l'utilisation d'une sacoche porte-document. De nombreux modèles peuvent être trouvés sur le marché. On donne la préférence au modèle comportant plusieurs poches à soufflet permettant le rangement des cartes, de la planchette, des carnets ; plus un certain nombre de pochettes pour le rangement de la loupe, du stéréoscope, du clisimètre, des crayons, de l'appareil photographique et éventuellement un petit nécessaire de pharmacie. Un large rabattant à joues latérales protège l'ensemble des intempéries, et une courroie permet de le porter en bandoulière.

4.3. Matériel pour recueillir et transporter les échantillons

Les modèles proposés sont nombreux. Ils dépendent du but recherché. En effet, il peut être nécessaire de conserver des échantillons non perturbés pour étudier la structure ou la microstructure, ou pour mesurer la porosité ou l'humidité. Suivant les cas, on emploie un matériel différent :

- . les échantillons destinés à des mesures d'humidité sont placés en boîtes hermétiques ;
- . les échantillons destinés à des mesures de porosité sont parfois paraffinés et placés dans des boîtes en bois ou en carton ;
- . les échantillons destinés à l'étude de la microstructure sont généralement recueillis dans des petites boîtes métalliques.

KUBIENA utilise des feuilles de fer-blanc prédécoupées et prépliées qui, mises en forme, donnent des petits cadres parallélépipédiques que l'on enfonce directement dans le sol. Deux couvercles permettent ensuite de protéger l'échantillon. On fait très attention à marquer l'orientation de la prise d'échantillon.

Mais plus fréquemment, en vue d'analyses chimiques, les échantillons sont recueillis dans des sachets de nature diverse :

- sachets en toile ou en jute qui doivent être à trame serrée pour ne pas perdre d'éléments fins en cours de transport. Ils conviennent parfaitement lorsque la terre est sèche. Par contre, certains échantillons humides, riches en bactéries cellulolytiques ou en sels toxiques peuvent attaquer la toile ;

- sachets en film plastique de polyéthylène. Ils sont de plus en plus employés, car très robustes et d'un prix de revient modique. Leur imperméabilité offre un certain nombre d'avantages (risque de pertes limité, conservation de l'humidité); par contre, elle présente aussi quelques inconvénients (risque de pourriture, fermentation, respiration, etc.);
- boîtes cartonnées et paraffinées. Ont l'avantage d'être transportées pliées et d'être rapidement montées au moment de l'emploi. Une certaine rigidité permet une conservation partielle de l'agrégation. On ne peut pratiquement les utiliser que pour des échantillons secs ou peu humides.

Les échantillons prélevés sont étiquetés avec soin. Une petite fiche pliée avec les marques d'identification est mise à l'intérieur du sachet, lequel est marqué aussi extérieurement du même sigle, soit directement sur le sac, soit sur une étiquette cartonnée. Il peut être utile d'indiquer la date de prélèvement, ce qui permet de différencier des échantillons lors de l'erreur d'emploi d'une même numérotation.

V - IDENTIFICATION DES HORIZONS - NOMENCLATURE

Un horizon est une couche de sol grossièrement parallèle à la surface, sensiblement homogène quant à l'aspect, la composition et les diverses propriétés, et qui diffère des horizons voisins. Un horizon se différencie des horizons voisins par des caractéristiques observables et mesurables sur le terrain. Les résultats de laboratoire complètent ces données.

On doit pouvoir désigner les horizons avec précision. La nomenclature actuelle dérive de l'emploi de symbole génétique. Ceci suppose, en plus de la description objective des faits, une interprétation. Il en résulte que les symboles ne doivent être indiqués qu'après l'étude critique du profil. Si cette opération est souvent faite après les observations "in situ", il est parfois nécessaire de s'appuyer aussi sur des données de laboratoire. Mais la mise au point d'un vocabulaire commun pour désigner les horizons est indispensable à la réalisation d'un travail coordonné.

1. Nomenclature

Les définitions ci-dessous exposées sont celles actuellement retenues par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols de France (Sept. 1965).

Les horizons A₀₀, A₀ d'une part, les horizons A d'autre part, se superposent dans l'ordre indiqué quand ils sont présents simultanément dans le profil.

A₀₀ - Horizon de surface, formé de débris de végétaux facilement identifiables (feuilles, brindilles et autres) et non reliés ensemble par du mycelium. Cet horizon correspond à ce que divers auteurs désignent par la lettre L.

A₀ - Horizon constitué principalement de débris végétaux partiellement décomposés et pratiquement non reconnaissables sur le terrain. Les horizons peuvent être subdivisés en F et H. La couche H se distingue par l'absence complète de structure végétale.

A l'analyse, ils contiennent en général plus de 30% de matière organique totale. Ils sont mesurés de bas en haut à partir du sommet de A₁. Certains de ces horizons peuvent manquer.

L'horizon A est un horizon majeur occupant la partie supérieure ou l'ensemble du profil du sol et présentant l'un ou l'autre des caractères suivants ou les deux en même temps :

- a - présence de matière organique ;
- b - appauvrissement en constituants tels que argile, fer, alumine, etc.

L'horizon A₁ est un horizon minéral présentant en général moins de 30% de matière organique bien mélangée à la partie minérale et de couleur généralement sombre. Il peut être ou non un horizon éluvial.

L'horizon A₂ est un horizon de couleur plus claire que l'horizon subjacent ; il est appauvri en fer, en argile, en aluminium avec concentration corrélative de minéraux résistants. C'est un horizon d'éluviation par lessivage de matériaux en solution ou suspension. Les éléments se déplacent généralement à l'état dissous ou dispersés vers l'horizon B et/ou hors du profil.

L'horizon A₃ est un horizon de transition entre A et B mais il est plus proche de A que de B. Si l'horizon de transition ne peut être valablement attribué à l'un ou l'autre, on écrira AB.

Horizon B — Horizon majeur situé au-dessous de A et caractérisé par des teneurs en argile, en fer, en humus, plus élevées qu'en A. Cet enrichissement peut être dû, soit à des transformations sur place des minéraux préexistants, soit à des apports illuviaux. On désigne cet horizon par B.

Si la variation de teneur est très faible et que la différenciation avec A ou C ne porte que sur la consistance, la structure, ou la couleur, on désignera cet horizon par (B).

Une lettre minuscule, placée après B, précisera la nature de l'enrichissement ou de la différenciation. L'horizon est divisé en :

- B₁ Horizon de transition avec A, mais plus proche de B que de A ;
- B₂ Horizon constituant la partie essentielle de B, correspondant soit à l'accumulation principale, soit au développement maximum de la différenciation ;
- B₃ Horizon de transition avec C, mais plus proche de B que de C.

Remarque : on peut affecter les horizons d'un nouveau chiffre secondaire (tel que B₂₁, B₂₂, etc) sans autre signification que d'avoir introduit une subdivision.

Horizon C — Horizon minéral, autre que la roche brute, placé sous B (ou sous A s'il n'y a pas de B), analogue ou différent du matériau dont dérive le couple AB et relativement peu affecté par les processus pédogénétiques ayant conduit à l'individualisation des horizons A et B sus-jacents et ne présentant pas leurs caractéristiques.

Horizon R — Roche brute sous-jacente. En cas de discontinuité lithologique, on désignera chaque matériau originel par un chiffre romain qui précèdera l'horizon. S'il n'y a qu'un seul matériau, on omettra le chiffre romain. Dans le cas de plusieurs matériaux, celui du dessus (I) pourra être omis.

ex. : A - A₂ - B₁ - B₂₁ - II B₂₂ - II C₁ - III C₂ - IV R

Symboles utilisés pour désigner les caractéristiques particulières des horizons précédents :

Ca	accumulation de calcaire	} Ca diffus } Ca en nodules
Cs	accumulation de sulfate de calcium	
Cn	accumulation de concrétions ferroalumineuses	
g	pseudogley	
G	Gley	
Sa	sels plus solubles que le sulfate de Ca	
p	horizon labouré (ou perturbé)	
B ₂ h	horizon d'accumulation humique	} des podzols
B ₂ fe	horizon d'accumulation ferrugineuse	
Bt	horizon d'accumulation d'argile (textural)	
x	fragipan	
m	horizon massif à forte cimentation	

2. Horizons de diagnostic

La 7ème Approximation Américaine (USDA 1960) a introduit une notion nouvelle qui permet de caractériser et de classer les profils d'après la reconnaissance d'horizons de diagnostic. En effet, avec la nomenclature précédente, il est difficile de comparer des horizons entre eux, car ils peuvent différer profondément par leur morphologie et leurs propriétés. Ils ne font que caractériser un certain degré de développement des profils. Il est donc nécessaire de définir certaines unités qui permettent de grouper les sols d'après leur parenté génétique. Ce sont les horizons de diagnostic qui peuvent être groupés en trois ensembles.

Les données suivantes ne sont fournies que pour information. Elles ne sont pas utilisées systématiquement par les pédologues français qui réfutent certaines de ces définitions (par exemple : les pourcentages d'accumulation dans les horizons argiliques).

2.1. Horizons de diagnostic de surface

Ils sont encore appelés "epipedons", de epi : au-dessus. L'epipedon inclut toute la partie supérieure du sol colorée par de la matière organique. L'epipedon n'est donc pas synonyme d'horizon A. Il peut comprendre également tout ou partie de l'horizon B autant que celui-ci est coloré par de la matière organique imprégnant le sol de façon continue depuis la surface.

- . epipedon mollique : horizon humifère, épais de plus 25 cm, de couleur foncée (chroma au moins égal à 4), à structure grumeleuse, riche en cations bivalents (taux de saturation supérieur à 50%) et en azote (C/N inférieur à 17). Le taux de matière organique est supérieur à 1%. La teneur en P₂O₅ soluble dans l'acide citrique est inférieur à 250 ppm. Il correspond sensiblement au mull calcique ou eutrophe.
- . epipedon anthropique : satisfait aux conditions ci-dessus, mais contient plus de 250 ppm de P₂O₅ soluble dans l'acide citrique. C'est un horizon formé à la suite de cultures continues et de longues durées. Sa limite inférieure est généralement brutale. L'action intense des vers de terre peut parfois la rendre plus progressive.

- . epipedon ombrique : aspect comparable à l'epipedon mollique mais plus acide (S/T est inférieur à 50%). Il est pauvre en azote (C/N supérieur à 17). La structure est souvent massive ou durcie à l'état sec : Mor, Moder, armoor acide et épais.
- . epidedon histique : horizon tourbeux de plus de 30 cm d'épaisseur. Il contient plus de 30% de matière organique si les teneurs en argile sont supérieures à 20%, ou plus 20% sur sables.
- . epipedon ochrique : horizon de couleur claire, pauvre en matière organique ou trop peu épais pour entrer dans une des rubriques précédentes (mull ou moder peu épais).
- . Plaggen epipedon : horizon humifère, gris-noir, dont les fortes teneurs en matière organique sont liées aux actions humaines. Cet horizon est épais parfois de plus de 50 cm. Il contient de nombreuses inclusions matérialisant les apports par l'homme (débris de poteries, charbon de bois, etc.).

2.2. Horizons de diagnostic de profondeur

Ce sont généralement des horizons B, mais parfois aussi partie de A, en particulier A₂.

- . horizon argilique : horizon d'accumulation d'argile faisant suite à un déplacement. Ce n'est donc pas un horizon à neo-synthèse argileuse. En pratique, il y a de grosses difficultés à distinguer ces deux formes. Il semble y avoir une différence minéralogique (la kaolinite migrerait peu ; la montmorillonite facilement). On distingue l'argile illuviale par son orientation sur les agrégats et dans les pores. Il y a mise en place d'une mince pellicule de revêtements argileux orientés. Cette orientation se matérialise sous microscope polarisant par une birefringence. Sur le terrain l'accumulation s'observe facilement lorsque les revêtements sont épais. Mais elle est d'autant plus difficile à reconnaître que les revêtements sont plus minces et le matériau de réception plus argileux. Les enduits, généralement luisants, peuvent être confondus avec des faces de glissement. Une bonne méthode pour les reconnaître est de casser l'agrégat et d'observer à la loupe. Les revêtements sont souvent de couleur et d'orientation différentes, tranchants sur la masse de l'agrégat. Le passage entre un horizon A₂ et un horizon argilique se réalise rapidement, sur moins de 30 cm d'épaisseur.

On considère qu'il y a accumulation lorsque les conditions suivantes sont réunies :

- si A contient moins de 15% d'argile, l'horizon argilique doit contenir 3% d'argile de plus que l'horizon A ;
- si A contient entre 15 et 40% d'argile, le rapport de lessivage entre horizon alluvial et horizon d'accumulation est au moins égal à 1, 2 ;
- si A contient plus de 40% d'argile, l'horizon argilique doit contenir 8% de plus d'argile que A.

- . horizon agrique : horizon d'illuviation d'argile et d'humus, formé sous culture, directement sous la couche labourée. Cet horizon se situe généralement dans et sous la semelle de labour. Il se caractérise par la présence de fibres foncées et épaisses et par des revêtements à la surface des unités structurales et dans les galeries de vers de terre. Ces fibres et revêtements occupent au moins 15% du volume.
- . horizon natrique : forme spéciale d'horizon argilique. Aux propriétés générales de ce dernier s'ajoute la présence :
 - soit d'une structure colonnaire ;
 - soit plus de 15% de saturation en sodium échangeable.
- . horizon spodique : horizon d'accumulation des sesquioxydes libres, accompagnés parfois d'une quantité appréciable de carbone organique. Certains de ces horizons peuvent

être cimentés (alios). Ils ne montrent ni revêtements argileux, ni structure (type fondue à particulaire).

- . horizon cambique : horizon d'altération qui n'a subi aucun des processus pédologiques amenant à l'individualisation de A ou de B. La structure de la roche est effondrée. On observe une libération d'oxydes de fer et un début d'argilisation. De nombreux minéraux restent inaltérés.
- . horizon oxique : horizon B des sols ferrallitiques. L'altération très poussée a fait disparaître tous les silicates primaires. On observe une concentration relative de sesquioxydes de fer et d'aluminium, ainsi que des neosynthèses kaolinitiques. Cet horizon contient très peu d'éléments texturaux de la taille des limons.
- . horizon albique : horizon lessivé en fer et plus ou moins en argile (A₂). Sa couleur claire est déterminée par des particules sableuses et limoneuses sans revêtement.

2.3. Horizons de diagnostic secondaires

- . horizon calcique : horizon d'accumulation secondaire de carbonate de calcium ou de calcium et de magnésium. Son épaisseur est supérieure à 15 cm. Il contient plus de 15% de CO₃Ca et au moins 5% de plus que C.
- . horizon gypsique : équivalent du précédent, mais avec enrichissement secondaire en sulfate de calcium.
- . horizon salique : identique aux précédents mais avec enrichissement secondaire en sels plus solubles dans l'eau froide que le gypse ; au moins 2% de sels.
- . Pans sont des niveaux durcis du sol. On distingue :
 - *Duripan* : horizon induré ; cimenté en partie par un agent soluble dans de l'alcali concentré. Le ciment est probablement de la silice ou un silicate d'alumine. Parfois, le ciment est constitué de couches fines et alternantes de fer et de silice. Il y a souvent aussi enrichissement en carbonate de calcium.
 - *Fragipan* : horizon de profondeur, limoneux, se développant souvent en dessous de B. Il est très pauvre en matière organique. Sa densité apparente est élevée. Il manque de porosité et semble apparemment cimenté à l'état sec. Il est grossièrement feuilleté à l'intérieur d'une large sur-structure prismatique. Le fragipan est fréquemment associé à des processus de marmorisation. Il se développe surtout dans les limons.

3. Autres caractéristiques du sol

Les sols présentent fréquemment des caractéristiques particulières qui correspondent à des processus pédologiques spécifiques. Leur connaissance est donc intéressante mais, vu leur nombre, il est pratiquement impossible d'en donner une liste exhaustive. Voici les plus courantes :

- gilgai : microreliefs en buttes, liés à l'alternance de phases humides et sèches dans des sols à argiles gonflantes. Caractérise certains vertisols.
- horizon cimenté :
 - . *cuirasse* : horizon continu, fortement induré, riche en sesquioxyde de fer et (ou) d'alumine, parfois de manganèse.
 - . *carapace* : horizon continu, moyennement induré (se fagonne facilement à la bêche), riche en sesquioxydes. Équivalent approximativement du terme américain "plinthite" qui est une formation riche en sesquioxydes, pauvre en humus, mélangée de quartz

et de produits très altérés, généralement bariolée, susceptible de durcir irréversiblement en "hardpans" ou en agrégats irréguliers sous l'action alternante et répétée de l'humidité et de la sécheresse.

- . *alios* : horizon induré de sesquioxydes libres, accompagnés parfois d'une quantité appréciable de carbone organique. Caractérise certains podzols.
- . *croûte calcaire* : horizon continu, induré, riche en carbonate de calcium. Une dalle est l'équivalent le plus dur ; l'encroûtement le moins induré (équivalence américaine : caliche).

— noyaux cimentés et indurés :

- . *concrétions* : noyaux indurés, de sesquioxydes formés "in situ" de formes et de tailles variées (inférieures à 5 cm), noyés dans une matrice meuble.
- . *gravillons* : noyaux indurés, de sesquioxydes, arrondis, remaniés, d'origine soit résiduelle, soit détritique.
- . *nodules* : noyaux fortement indurés, arrondis, de carbonate de calcium, possédant généralement une géode au centre.
- . *granules* : noyaux moyennement indurés, cimentés par du carbonate de calcium, de taille généralement plus petite que les nodules (moins de un centimètre de diamètre).

— "self mulching" : terme se référant à la tendance que présentent certaines argiles à former en surface un niveau finement grenu ou polyédrique sous l'action de la dessiccation.

— "sequum" : association d'un horizon lessivé et de son horizon d'accumulation.

— miroirs de glissement (slickensides) : faces de larges agrégats lissées et striées ; caractérisent les vertisols.

— "permafrost" : niveau du profil sous lequel la température est en permanence inférieure à 0°.

— revêtements : minces pellicules d'argiles, de sesquioxydes ou de matière organique, continues ou discontinues, d'épaisseurs variées, moulant les agrégats, les canalicules ou colmatant les pores du sol. Les revêtements argileux ("clay skins") orientés signalent une illuviation. Ils caractérisent l'horizon argilique.



DEUXIÈME PARTIE

LA CARTE PÉDOLOGIQUE

GÉNÉRALITÉS

La cartographie pédologique a pour objet de délimiter des zones homogènes de sols. Ceci suppose qu'un profil se retrouve comparable à lui-même sur une certaine surface. Or, en toute rigueur il n'y a jamais deux profils de sol entièrement identiques. Cependant, les variations par rapport à un type moyen sont souvent négligeables tout au moins sur une certaine surface. Il faut donc, avant toute cartographie, définir l'unité élémentaire de sol par un travail préalable d'abstraction (BOULAINÉ). La cartographie pédologique a ceci d'essentiel qu'elle permet de mettre en évidence des unités dont l'homogénéité est déterminée par un ensemble de facteurs généraux liés au climat, à la géologie, à la physiographie, à la végétation et aux actions humaines. Dans ce sens, elle offre une garantie de précision que l'on ne peut atteindre par une autre approche. Les cartes pédologiques sont avant tout des cartes synthétiques qui intègrent l'ensemble des données qui définissent le milieu naturel (rapport C. P. C. S. 1965).

I - DÉFINITION

1. Le sol comme unité cartographique

Si, pour caractériser un sol, on s'appuie sur l'étude de son profil, pour le cartographier il est indispensable de préciser les modalités de ses extensions latérales. Le sol s'individualise en effet suivant trois dimensions. Il occupe un certain volume dont les limites sont :

- en surface : la surface du terrain,
- en profondeur : le matériau originel,
- latéralement : des roches, de l'eau ou d'autres sols.

Isolons en pensée le volume correspondant à un sol et examinons des coupes verticales d'emplacements et d'orientations variées (a - b - c - d).

Les profils ne sont pas tous identiquement semblables. On observe des petites variations dans la profondeur, l'épaisseur des différents horizons, dans leur texture, leur structure,

leur couleur, ainsi que dans leurs différentes caractéristiques chimiques et biologiques. Mais ces variations sont faibles et se groupent autour de valeurs dominantes. Pour définir parfaitement ce sol en tant qu'unité cartographique, il faut donc fournir non seulement ses caractéristiques moyennes, mais l'écart de variations tolérées à travers la surface considérée. Ce ne sont donc pas des profils qui sont classés et cartographiés mais des séries de profils que l'on groupe avec une certaine part d'arbitraire, difficile à éliminer, autour d'une abstraction définie par les valeurs dominantes. Par exemple, un profil se caractérisant par un horizon particulier de 15 cm d'épaisseur avec une tolérance de plus ou moins 3 cm, groupe tous les sols à horizon comparable dont l'épaisseur varie de 12 à 18 cm. La définition donnée, il est possible de préciser les limites du sol sur le terrain, donc de la cartographie.

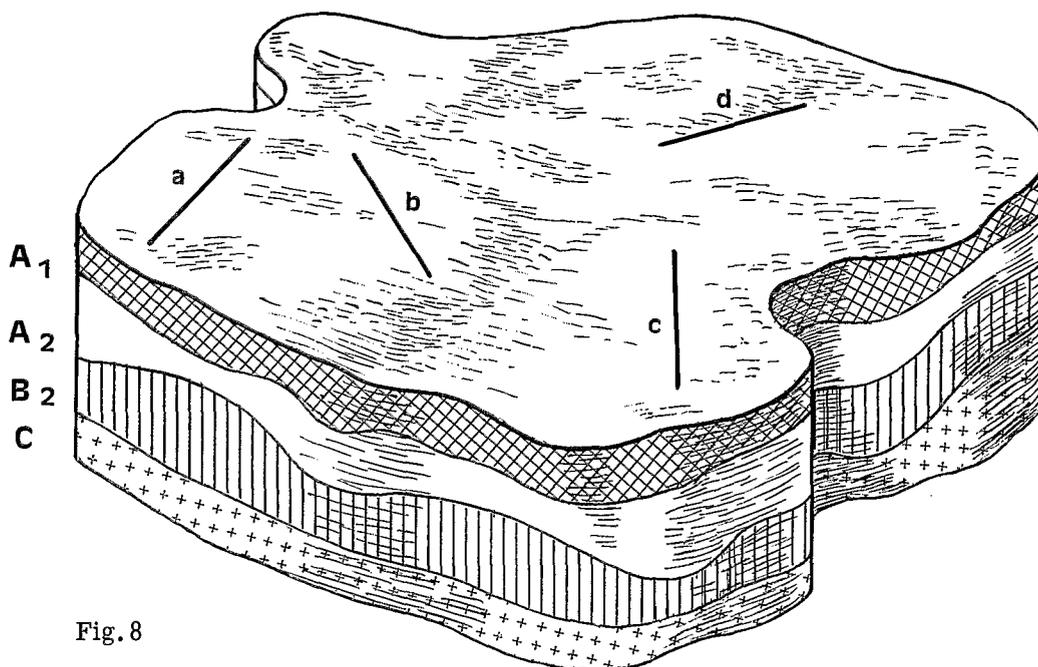


Fig. 8

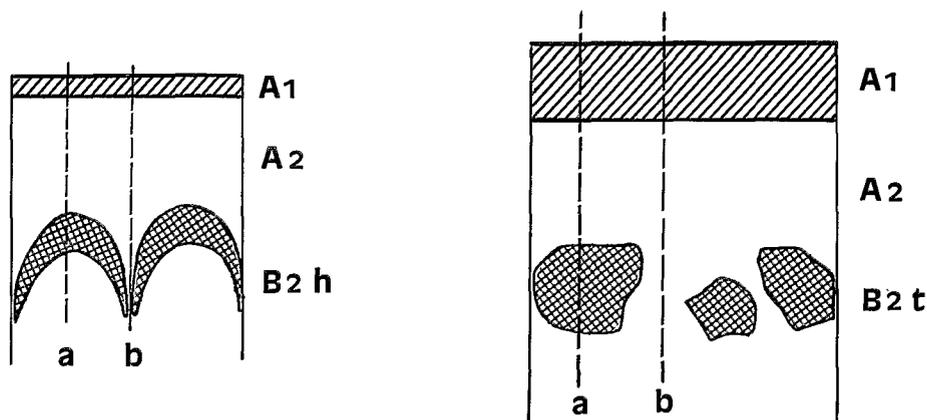


Fig. 9

Définir un sol en tant qu'unité cartographique paraît ainsi une opération assez simple. Cependant, elle se complique dans de nombreux cas.

— Certains sols (des podzols par exemple) présentent des horizons dont les limites sont plus ou moins régulièrement ondulées. Les variations de l'horizon B2h, en profondeur et en épaisseur, peuvent être très larges. Il en résulte que le profil examiné suivant une tranche perpendiculairement à (a) présente une morphologie différente de celui observé perpendiculairement à (b). Il est cependant absurde de considérer ces deux profils comme appartenant à deux sols différents, juxtaposés. Dans cette acception comment et où placer des limites ? Il est plus normal de considérer cet ensemble de profils comme appartenant à un même individu sol caractérisé par un horizon B2h ondulé.

— Prenons comme autre exemple un sol présentant dans son profil un horizon discontinu (cas de certains sols lessivés hydromorphes à fragipan). Le profil (a) est fondamentalement différent du profil (b) puisque le premier montre un horizon d'accumulation et l'autre pas. Là aussi on pourrait considérer l'ensemble comme une juxtaposition de types différents de sols, alors qu'il s'agit d'un même individu à horizon B2t discontinu.

Le problème se pose donc de l'extension minimum qui peut être qualifiée un sol. Les limites sont fonction :

- du choix des données retenues pour la caractérisation de ce sol ;
- des variations acceptables de ces données.

Ce sont là les principales difficultés de la cartographie pédologique qui ne peut être abordée que lorsque les objets à cartographier sont parfaitement définis, ce qui oblige à des recherches préliminaires. Il ne s'agit pas seulement de tracer des limites, mais aussi et surtout de décrire les caractéristiques d'unités de surface. "Ces obligations font que le prospecteur doit être aussi un excellent pédologue, la qualification de ce dernier étant un facteur déterminant de la valeur des inspections" (VINK A., 1963).

Sur quels critères repose le choix des données de caractérisation et leurs variations à l'intérieur d'une unité cartographique ? Théoriquement ce choix intervient lorsque les variations de un ou plusieurs faits pédologiques sont suffisamment marquées pour modifier de façon significative les propriétés du sol, et, le plus souvent, on se réfère à un facteur commun qui est la réaction du sol vis-à-vis des végétaux.

En fait, le choix et surtout la hiérarchie des critères et leurs écarts de variations dépendent étroitement du système de classification. Théoriquement, il ne devrait s'appuyer que sur des caractéristiques intrinsèques du sol considéré dans ses trois dimensions. Mais le prospecteur ne pouvant multiplier à l'excès les points d'observations doit rechercher dans l'aspect superficiel du terrain les données qui lui permettent d'extrapoler à une surface les résultats obtenus lors de l'étude des profils. Ces relations sont heureusement fréquentes. Cette extrapolation se trouve d'autant facilitée que l'aspect ponctuel de la définition des profils s'efface devant les relations qui lient les facteurs du milieu aux processus pédogénétiques.

Ainsi, le choix des caractéristiques et de leurs variations définissant un sol comme unité cartographique s'effectue en s'appuyant à la fois sur l'étude des profils, l'aspect superficiel du terrain et la connaissance des facteurs du milieu. Suivant que l'on donne plus ou moins d'importance à l'une ou l'autre de ces données les unités cartographiques présentent de légères variations. C'est ce qui différencie les écoles pédologiques, les différenciations ne portant généralement pas sur le choix des critères de reconnaissance mais plutôt sur leur hiérarchie. On peut donc penser que les cartes varient suivant les écoles. En fait, l'expérience montre qu'il n'en est rien. Si la classification des sols et leur terminologie varient, les limites entre unités pédologiques restent comparables et constantes.

Ainsi, l'école américaine appuie sa cartographie sur une unité pragmatique de surface correspondant à la plus petite unité de volume qui peut être qualifiée "un sol". Cette unité est appelée "pedon". Un pedon a une surface qui varie de 1 à 10 m² selon la variabilité des horizons. Si les horizons sont discontinus ou cycliques et se répètent à des intervalles compris entre 2 et 7 mètres, le pedon inclut la moitié du cycle et chaque pedon inclut les variations de l'horizon à l'intérieur de cette petite surface. Quand le cycle est inférieur à 2 mètres, ou quand tous les horizons sont continus et d'épaisseur constante, le pedon couvre une superficie de 1 m² et inclut donc la variabilité des caractéristiques à l'intérieur de cette petite surface (7ème Approximation USDA 1960). En pratique, il s'agit donc d'une notion à peu près équivalente à la notion d'espèce des sciences biologiques. "Mais les espèces ont des caractères bien définis, car elles traduisent des modes d'arrangement de molécules ou de schémas d'organisation d'êtres vivants. Au contraire, en Pédologie, ce n'est que l'expérience qui prouve que la définition de sols ordonnables en archétypes de différents ordres est possible" (BOULAIN).

A l'opposé, l'école russe s'appuie essentiellement sur les facteurs du milieu (climat, végétation, roche-mère, etc.) et prend comme caractéristiques pédologiques fondamentales les données communes à tous les sols regroupés dans chaque unité écologique délimitée à partir des critères ci-dessus.

Les pédologues français retiennent les aspects spécifiques des profils qui sont les reflets de processus pédogénétiques reconnus (développement du profil, lessivage, podzolisation, argilisation, hydromorphie, halomorphie, etc.). Ces processus sont les reflets des facteurs du milieu naturel (rôle important du couvert végétal, du climat, du matériau originel, du drainage, etc.). Ils ont des incidences importantes sur l'utilisation des sols et ils permettent de s'appuyer sur des aspects spécifiques de la surface du terrain.

Chacun de ces choix qui correspond à des dispositions différentes de l'esprit suivant les races et les civilisations, a ses avantages et ses inconvénients. Le concept américain facilite la cartographie à grande échelle ; le concept russe est surtout orienté vers les synthèses à petite échelle ; le concept français se situe à mi-chemin entre les précédentes et permet de passer aisément de l'une à l'autre.

2. Les limites d'un sol

Ayant reconnu et défini les unités sols à cartographier, il faut tracer leurs limites. Cette opération serait relativement simple si les sols étaient nettement séparés les uns des autres. Les limites avec un plan d'eau ou une roche n'offrent pas de grosses difficultés, bien qu'un problème se pose pour les zones de marnage. Par contre, les limites entre sols sont plus difficiles à saisir, les sols passant généralement graduellement de l'un à l'autre sur plusieurs mètres, voire plusieurs dizaines de mètres. Ces transitions se font de deux manières :

- l'horizon envisagé disparaît sur une certaine distance par son degré de développement ;
- l'horizon disparaît en se morcelant, sans diminution de son degré de développement.

On peut résoudre ce problème en considérant la transition comme une unité cartographique. Mais on arrive rapidement à des cartes couvertes presque uniquement d'unités de ce type. En fait, la transition ne prend d'importance qu'en relation avec l'ensemble des autres facteurs du milieu environnant :

Prenons l'exemple (VINK A., 1963) d'un sol argileux se terminant en biseau sur un sol sableux et se caractérisant par un horizon organique épais en surface et une nappe phréatique à faible profondeur. L'établissement de la limite dépend à la fois du contact argile-sable et de l'influence de l'horizon organique et de la nappe phréatique sur l'ensemble des autres caractéristiques du sol.

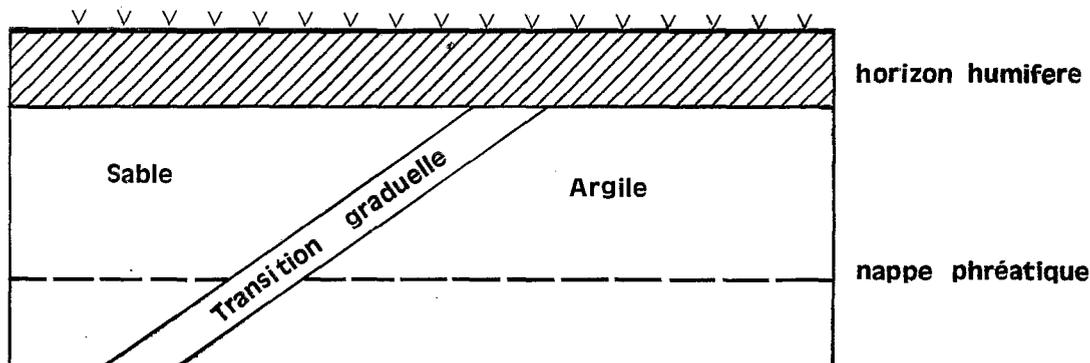


Fig. 10

Pour arriver à un maximum d'objectivité, on s'appuie sur les facteurs suivants (VINK A., 1963) :

- échelle de la carte ;
- caractéristiques de terrain facile à déterminer ;
- influence de l'ensemble des caractéristiques pédologiques sur la valeur de la transition ;
- importance agronomique de la limite ;
- importance de la surface couverte par les unités pédologiques voisines.

2.1. Echelle de la carte

L'épaisseur du trait qui limite deux unités pédologiques sur la carte définitive règle l'importance que l'on doit accorder aux transitions graduelles. En effet, suivant l'échelle de la carte, le trait couvre une surface de terrain plus ou moins large.

Largeur moyenne du trait sur la carte	0, 2 mm	0, 3 mm
Largeur correspondante sur le terrain		
échelle 1/1 000	2 m	3 m
échelle 1/10 000	20 m	30 m
échelle 1/20 000	40 m	60 m
échelle 1/50 000	100 m	150 m
échelle 1/100 000	200 m	300 m
échelle 1/200 000	400 m	600 m
échelle 1/500 000	1 000 m	1 500 m
échelle 1/1 000 000	2 000 m	3 000 m

Donc suivant son importance sur le terrain, une limite graduelle peut être parfaitement définie à certaine échelle de la carte et non à d'autre. En pratique, le problème des transitions entre deux sols ne se pose que pour les très grandes échelles (au moins égale au 1/5 000).

2.2. Caractéristiques de terrain

Il est important que deux prospecteurs se succédant sur un même terrain, puissent retrouver les mêmes limites, même dans le cas de transitions graduelles. Pour ce faire, on a intérêt à se rattacher à des faits que l'on reconnaît facilement à la surface du sol (type de végétation, microrelief, couleur, texture, structure, etc.).

2.3. Influence de l'ensemble des caractéristiques sur la valeur de la transition

C'est ici une question de bon sens. Certaines caractéristiques ont plus d'importance que d'autres ; certaines sont indépendantes ; d'autres sont subordonnées. Il ne faut donc tenir compte que de celles qui ont une importance fondamentale sur la valeur de la transition. Par exemple, un faible changement de couleur n'entre pas en ligne de compte si les autres caractéristiques restent semblables à elles-mêmes ; le travail du sol peut modifier l'aspect superficiel du sol sans qu'il en résulte un changement dans le type (changement de structure, de teneur en matière organique, de couleur, etc.).

En fait, le problème est relativement simple car le changement de l'une des variables simples interfère souvent sur les autres qui se modifient dans le même sens. Un changement de texture en milieu hydromorphe se répercute sur le type de l'intensité de la réduction : le gley s'accuse en sol argileux ; une texture sableuse favorise le lessivage, etc.

2.4. Importance agronomique

Des changements dans la valeur agronomique peuvent justifier le choix d'une limite. Là aussi il faut tenir compte des variations fondamentales liées aux caractéristiques intrinsèques du sol : profondeur, texture, structure, etc.

2.5. Importance de la surface couverte par les unités pédologiques voisines

Pour qu'un levé pédologique soit lisible, on admet que les distances séparant les limites d'un sol doivent être supérieures à 2 mm sur la carte. Donc à certaines échelles les unités couvrant des surfaces trop petites ne pourront être représentées. Il ne sera donc pas nécessaire de tracer leurs limites mêmes graduelles.

échelle	largeur minimale de l'unité
1/1 000	20 mètres
1/10 000	200 mètres
1/100 000	2 000 mètres
1/1 000 000	20 000 mètres

D'une façon générale, comme les unités reflètent les facteurs du milieu, leurs limites doivent tendre à dégager les lignes essentielles de la géographie du lieu étudié. On a intérêt à éviter les unités trop petites, faisant apparaître des discontinuités difficilement interprétables, et à passer à des unités plus générales qui explicitent mieux la répartition des sols. Cette donnée est importante car il existe une échelle optimale suivant les renseignements que l'on recherche, et les cartes pédologiques doivent rester essentiellement des cartes de synthèse.

3. La série unité cartographique de base

Il a déjà été signalé que ce ne sont pas les profils qui peuvent être classés et cartographiés mais des séries de profils groupés autour d'un archétype. La série représente donc la plus petite unité pouvant être cartographiée en tant que sol.

Définition de la série

"Une série de sols est l'ensemble des sols qui présentent sur un matériau originel de composition lithologique définie, et dans des positions comparables dans le paysage, le même type de profil. Les profils des sols d'une série sont semblables non seulement par la succession, l'aspect et la constitution générale de leurs divers horizons, mais aussi par l'ordre de grandeur de l'épaisseur de chacune de ces derniers. Cet ordre de grandeur est envisagé en fonction de l'influence possible de la présence de chacun d'eux sur les propriétés générales des sols. La série est dénommée d'après le lieu où elle a été caractérisée. La définition de la série constitue l'étape préalable à une interprétation génétique" (C.P.C.S., 1965).

En pratique donc, trois sortes de données définissent les séries :

- le profil caractéristique de la série ;
- l'aire de répartition des sols de la série ;
- le tableau des intervalles de variation des principaux paramètres à l'intérieur de l'aire de répartition.

Si la série est la plus petite unité qui peut être cartographiée en tant que sol, son étude doit être à la base de toute étude pédologique. Cependant, pour des buts utilitaires, il est parfois nécessaire d'aller plus loin dans la différenciation. Il est alors possible d'introduire des subdivisions inférieures qui font intervenir, pour la plupart, des données présentant un intérêt pratique pour l'utilisateur. Ainsi, on utilise parfois la notion de type (en sens français) qui fait apparaître les variations de texture de l'horizon supérieur et, à un niveau plus inférieur encore, la notion de phase qui met en évidence certains facteurs écologiques ou technologiques déterminés. Ces unités inférieures se traduisent souvent par des valeurs simples ou "single values", comme le degré de pente, la profondeur utile du sol, le pH, la teneur en éléments fertilisants, la richesse en humus, le degré d'érosion, la charge en pierres, etc. Il ne s'agit plus alors d'une cartographie pédologique, mais d'application en vue d'un but déterminé.

A l'opposé, l'aire de répartition des séries ne peut être représentée à n'importe quelle échelle. En pratique, seules les cartes à échelle au moins égale au 1/50 000 permettent le report des limites de séries. Aussi aux échelles plus petites, on est obligé de grouper les séries en unités supérieures. C'est ainsi que les séries sont assemblées en familles ; ces familles peuvent être à leur tour assemblées en sous-groupes et ces sous-groupes en groupes.

Séries et groupes représentent les deux niveaux les plus caractéristiques des classifications et cartographies pédologiques. Naturellement, la terminologie peut changer suivant les écoles mais ces notions restent à peu près comparables.

**

DEFINITION DES DIFFERENTS ECHELONS HIERARCHIQUES
DE LA CLASSIFICATION FRANÇAISE DES SOLS (ordre décroissant)

- *Classes* : définies d'après le mode et l'intensité de l'évolution résultant des différents processus qui ont amené à la formation du sol.
 - *Sous-classes* : conditions du pédoclimat qui influencent l'évolution.
 - *Groupes* : se définissent par les caractères morphologiques du profil qui sont la conséquence de processus spécifiques d'évolution (différenciation de certains horizons, lessivage d'éléments colloïdaux, etc.).
 - *Sous-groupes* : se différencient :
 - . soit par une intensité variable du processus définissant le groupe ;
 - . soit par la manifestation d'un processus secondaire qui se superpose au processus fondamental (intergrade).
 - *Familles* : se distinguent d'après les caractères pétrographiques du matériau originel et de la roche-mère.
 - *Séries* : définition générale donnée plus haut.
 - *Types* : texture de l'horizon de surface.
 - *Phases* : généralement gradian d'érosion lié aux actions humaines.
-

Tableau d'équivalence entre les niveaux repères de différentes classifications

Type de classification	Niveau supérieur	Niveau inférieur
AUSTRALIE (Stephens)	Grands groupes	Série
ALLEMAGNE	Types	Faciès
U.R.S.S.	Types	Espèces et variétés
FRANCE	Groupes	Série
ANGLETERRE	Groupes	Série
U.S.A.	Grands groupes	Série

4. Les différentes unités cartographiques

Il n'est pas traité ici de la hiérarchie des différentes unités de classification dont le problème a été partiellement abordé au chapitre précédent, à savoir les groupements en séries, familles, sous-groupes et groupes, etc., mais de l'aspect purement cartographique du groupement possible d'unités de classification dans une même unité thématique. En effet, dans la pratique il est parfois difficile, même à une échelle appropriée, de faire apparaître d'une façon homogène les différents groupements signalés. Le problème de la cartographie des zones de transition a déjà été traité. Mais il arrive aussi que les sols soient tellement imbriqués les uns dans les autres que leur représentation cartographique est impossible. Aussi, on est amené à distinguer des unités simples et des unités complexes suivant la plus ou moins grande hétérogénéité du milieu sol.

Les unités simples sont formées de sols homogènes et ne présentant que des variations minimales par rapport à un profil caractéristique. Ces unités simples comprennent des unités génétiques, des unités d'apparentement et des unités intergrades.

Les unités génétiques sont celles qui correspondent aux limites de la classification de référence. Les unités d'apparentement sont des unités dont la détermination est encore hypothétique et n'entrent pas strictement dans la classification de référence. Les unités intergrades sont les unités intermédiaires entre deux unités de classification.

Les unités complexes ne correspondent pas à des unités de classification, mais permettent de rendre compte de certains aspects de la distribution des sols. Elles ne doivent être employées comme catégorie d'une légende de carte pédologique que lorsque l'échelle utilisée ne permet pas de faire apparaître à sa place chacune des unités simples.

Les unités complexes comprennent :

- les juxtapositions de sols qui sont des ensembles de sols dont chacun d'eux ne comporte qu'une surface petite à l'échelle de la carte et dont la coexistence ne paraît dépendre d'aucune règle de répartition précise.
- les séquences de sols qui sont des ensembles de sols dont la succession se retrouve constamment dans un ordre déterminé sans qu'il y ait un lien génétique apparent entre eux. La raison de leur juxtaposition régulière est l'influence prédominante et régulièrement répétée d'un de leurs facteurs.
- les chaînes de sols qui sont des ensembles de sols liés génétiquement, chacun d'eux ayant reçu des autres certains de ses éléments constitutifs.

En pratique, sauf aux très grandes échelles, au moins égales au 1/5 000, on est amené à cartographier des unités hétérogènes, ce qui pose des problèmes ardues de définition et de représentation graphique. Pour tenter de résoudre ces difficultés, on admet souvent une certaine quantité d'impuretés dans les unités reconnues. Ainsi, les pédologues américains tolèrent 15% d'impuretés au niveau de la série et jusqu'à 30% au niveau de la famille. D'autres, les pédologues russes, en particulier, suivis par certains pays d'Europe Centrale comme la Roumanie, préfèrent faire apparaître la ligne pédogénétique fondamentale de l'unité, négligeant les aspects particuliers liés à des facteurs locaux. Cette voie a été reprise par MAIGNIEN (1965) pour l'établissement de la carte au 1/1 000 000 du Sénégal. Par exemple, en zone du Danube, on ne signale que les sols se développant en position d'excellent drainage, à savoir les sols Ferrugineux Tropicaux peu lessivés sur sables siliceux, qui définissent l'unité cartographique, bien que l'on observe dans les entre-dunes des bandes étroites de sols hydromorphes qui graphiquement ne sont pas cartographiables. Cette optique fait apparaître l'aspect synthétique et géographique de la cartographie pédologique.

Quoi qu'il en soit, on est parfois obligé d'utiliser des unités hétérogènes. Mais, dans la mesure du possible, il faut toujours chercher à en limiter le nombre et ne les utiliser que quand aucune autre solution n'est possible. Tout d'abord, il ne faut tenter de regrouper que des unités pédologiques de hiérarchie comparable (séries, familles, sous-groupes, etc.) et génétiquement voisines. Faute de quoi, les cartes apparaissent comme des mosaïques confuses d'où il est impossible de dégager des lignes directrices. Comme il a déjà été signalé, on a parfois intérêt, à une échelle donnée, à passer à des unités supérieures qui, bien que moins détaillées, fournissent des documents géographiquement beaucoup plus parlant que ceux faisant appel à des unités plus fines. Une carte pédologique doit obligatoirement faire apparaître l'aspect physiographique de la zone considérée.

REMARQUES

Les méthodes d'interprétation des photographies aériennes en cartographie pédologique orientent actuellement assez fortement la représentation graphique de la distribution des sols. Cet aspect sera étudié plus loin. On peut cependant déjà signaler que certaines d'entre elles tendent à représenter principalement des unités complexes en s'appuyant sur les seules données de la photo-interprétation. De telles unités informent uniquement des pourcentages d'unités simples regroupés dans ces ensembles cartographiques. Ces renseignements sont précieux lors de l'estimation globale des possibilités d'une région, d'autant qu'ils sont obtenus rapidement et à peu de frais. Cependant, ils ne résolvent pas le problème essentiel de l'utilisateur qui est de choisir à partir d'une carte les points d'application sur le terrain. Ces données risquent de faire apparaître des conclusions diamétralement opposées aux conditions réelles du terrain. En particulier, elles n'indiquent pas les surfaces minimales d'unités de terrain homogène, données fondamentales pour le choix des implantations. Enfin, la trop grande importance que l'on peut accorder à l'exploitation de ces documents amène parfois, dans un but purement économique, à modifier la définition de ce qu'il est convenu d'appeler un sol, en ne retenant que les faits photographiques et en négligeant l'aspect spécifique des profils.

II - LES DIFFÉRENTES CATÉGORIES DE CARTES

"Les actions de mise en valeur peuvent apparaître à certains niveaux de l'échelle cartographique et elles sont caractérisées par la définition de certaines options d'orientation : économie générale, infrastructure, productions agricoles, urbanisme, etc. Lorsque l'on veut passer à la réalisation, il est nécessaire de disposer de documents de plus en plus précis et adaptés aux buts poursuivis", (1966. C.R. - C.P.C.S.).

La cartographie pédologique se place, pour sa part, à tous les niveaux des différents stades du développement, car par son essence elle même synthétise l'influence des facteurs du milieu naturel et offre ainsi une garantie de précision et une masse de résultat que l'on ne peut atteindre par une autre approche.

Pour répondre aux différents problèmes posés, les cartes pédologiques doivent présenter certaines caractéristiques qui conditionnent leur utilisation. Ces caractéristiques sont fonction, d'une part, de l'échelle choisie, d'autre part, du but envisagé.

1. Les échelles et leurs relations avec l'objectif

Le choix de l'échelle d'une carte pédologique est imposé par l'objectif à atteindre. L'échelle fixe en premier lieu la plus petite surface que l'on veut faire apparaître. L'expérience prouve à ce sujet que la plus petite surface lisible sur une carte doit être au moins supérieure à 4 mm², ce qui représente aux différentes échelles les surfaces de terrain suivantes :

Correspondance entre les échelles et les surfaces de terrain cartographiées

échelle	surface de terrain, correspondance à 4 mm ² sur la carte
$\frac{1}{10.000}$	400 m ²
$\frac{1}{20.000}$	1 600 m ²
$\frac{1}{50.000}$	1 ha
$\frac{1}{200.000}$	16 ha
$\frac{1}{500.000}$	100 ha
$\frac{1}{1.000.000}$	400 ha

Mais l'échelle n'indique pas forcément un degré de précision, elle correspond plutôt à une facilité de lecture pour l'œil. Il ne s'agit donc pas seulement d'un problème de surface, mais aussi d'un problème de rapport entre unités cartographiées. A ces questions théoriques s'ajoute une série de problèmes pratiques qui orientent souvent impérativement le choix de l'échelle, problèmes dont les plus importants sont la valeur des documents topographiques disponibles et l'importance des masses budgétaires disponibles pour réaliser la cartographie.

1.1. Question d'expression pédologique

Ce problème a été traité précédemment. A l'aspect purement analytique de la carte s'ajoute un aspect interprétatif important. On conçoit mal, en effet, des cartes constituées uniquement de la juxtaposition d'unités de très petites surfaces. Il est indispensable de dégager des lignes maîtresses qui explicitent l'aspect géographique de la distribution des sols. Il en résulte pratiquement que la plus petite surface dont le pédologue ne peut négliger l'existence est de l'ordre de l'hectare pour une échelle au 1/20 000 et du kilomètre carré pour une échelle au 1/500 000.

On conçoit aussi que les préoccupations des utilisateurs implique immédiatement une certaine "fourchette" dans le choix de l'échelle :

- une planification régionale exige des documents dont l'échelle peut varier du 1/200 000 au 1/50 000 suivant l'état d'avancement des projets ;
- une étude sur les aptitudes culturales d'une zone de mise en valeur ne doit s'exécuter qu'à une échelle supérieure au 1/50 000, l'échelle la plus intéressante étant celle au 1/20 000.
- une implantation parcellaire exige une échelle au moins égale au 1/5 000. Pour les régions particulièrement homogènes, le 1/10 000 suffit parfois.

L'échelle adoptée fixe également le niveau hiérarchique des unités de classification pédologique cartographiées, c'est-à-dire, en fait, le nombre de renseignements fournis. Ces renseignements varient suivant les différents niveaux retenus et ne présentent pas tous la même importance pour les utilisateurs. Des préoccupations agricoles liées à la dimension des parcelles n'exigent pas la même masse de renseignements qu'une planification régionale :

- aux échelles au moins égales au 1/500 000, il est difficile de faire apparaître des unités inférieures aux sous-groupes ;
- pour des échelles au 1/200 000, au 1/100 000, le niveau de classification s'arrête au niveau des familles ;
- les séries ne peuvent pratiquement être étudiées qu'à des échelles égales ou supérieures au 1/50 000 ;
- les types et les phases n'apparaissent qu'à des échelles supérieures au 1/20 000, principalement au 1/10 000.

En fait, ces renseignements ne sont qu'indicatifs. Ils doivent être adaptés au degré d'hétérogénéité du terrain.

En se plaçant toujours du point de vue expression pédologique, existe-t-il une échelle optimum qui explicite le mieux l'ensemble des faits que l'on désire faire apparaître ? On peut définir cette échelle comme celle pour laquelle tous les éléments définissant le milieu s'accordent (BOULAINÉ). Il s'agit là d'un problème non encore résolu et qui se pose différemment suivant que l'on est intéressé par l'aspect analytique du problème ou par son aspect synthétique. Dans le premier cas, il semble que l'échelle la plus représentative est celle du 1/20 000 ; dans le second, les opinions varient du 1/100 000 au 1/200 000. En particulier, l'expérience montre qu'en régions tropicales sèches et semi-humides d'Afrique l'échelle qui explicite le mieux la répartition des sols est celle au 1/200 000. Par contre, il semble que le 1/100 000 soit mieux adaptés aux régions tempérées.

1.2. Question de nombre d'observations à effectuer sur le terrain

Cette donnée est importante car elle influe sur la précision et le prix de l'étude. Les différentes échelles règlent pratiquement la densité des observations de terrain. Cette densité n'est d'ailleurs pas proportionnelle aux échelles car il n'est pas nécessaire de rechercher toujours la même précision. D'autre part, le nombre d'observations peut varier suivant la méthode employée.

Pour le nombre d'observations de terrain à effectuer on se rapporte le plus souvent au cm^2 de carte dressée. Ainsi le "Soil Survey Manual" (1954) conseille neuf observations par cm^2 de carte dressée pour une étude détaillée. VINK (1963) s'appuyant sur des expériences pratiques conseille le chiffre 4. Les pédologues de l'ORSTOM signalent souvent deux observations par cm^2 de carte. En fait, il s'agit de chiffres moyens qui sont pour la plupart adaptés aux difficultés du terrain et à la valeur des documents topographiques et photographiques disponibles. De toute façon, sous cette forme, le problème est mal posé car il n'y a pas proportionnalité entre échelle et nombre d'observations.

Plus l'échelle est grande, plus le nombre d'observations par cm^2 de carte est élevé. Ainsi, si pour des échelles au 1/5 000 et au 1/10 000 le nombre de neuf observations par cm^2 de carte dressée paraît un minimum ; par contre, aux échelles de 1/200 000 et du 1/500 000 une à deux observations suffisent généralement. Ces variabilités, suivant l'échelle, sont à rapprocher du nombre de renseignements nécessaires pour définir une unité de classification à un niveau hiérarchique donné. Plus on se situe à un niveau inférieur, plus le nombre de renseignements que réclame la définition est élevé.

Le nombre d'observations à effectuer sur le terrain ne correspond d'ailleurs pas obligatoirement au nombre des observations de profils. Il peut s'agir de simples vérifications à la sonde, voire, lorsque l'on connaît particulièrement bien les facteurs de la pédogénèse d'une région donnée, du simple contrôle de l'aspect superficiel du terrain. A ce stade l'étude des photographies aériennes est particulièrement fructueuse.

**Relations entre l'échelle et le nombre d'observations à effectuer
par km² de terrain levé suivant diverses précisions**

échelle de la carte	Surface représentée par 1 cm ² de carte dressée	Nombre d'observations par km ² pour une densité au cm ² de carte de :		
		9	4	2
$\frac{1}{10\ 000}$	1 ha	900	400	200
$\frac{1}{20\ 000}$	4 ha	225	100	50
$\frac{1}{50\ 000}$	25 ha	36	16	8
$\frac{1}{200\ 000}$	4 km ²	2	0,8	0,5
$\frac{1}{500\ 000}$	25 km ²	0,35	0,15	0,1
$\frac{1}{1\ 000\ 000}$	100 km ²	0,1	0,05	0,03

Comme le coût d'un levé pédologique est, entre autres, fonction du nombre de profils étudiés et du degré de finesse de l'observation, la conséquence pratique la plus immédiate est que 1 cm² de carte est d'un prix de revient proportionnellement plus élevé à grandes qu'à petites échelles.

1.3. Question des documents de base disponibles

Pour cartographier les sols d'une région, il est nécessaire de disposer d'un minimum de documentation de base, à savoir : essentiellement des fonds topographiques et des photographies aériennes. Il est indispensable que ces documents soient à une échelle au moins double de l'échelle du document définitif. Ainsi pour une carte pédologique au 1/50 000, on travaille généralement sur un fond topographique au 1/20 000 ; pour le 1/100 000 et le 1/200 000 l'étude est généralement menée sur des cartes topographiques au 1/50 000. Cette donnée est importante car elle règle la précision de la carte. Les travaux exécutés pour établir une carte pédologique sont spécifiques de l'échelle demandée. Ils définissent sa précision. Il en découle qu'une carte pédologique ne doit jamais être agrandie. Inversement, il est parfaitement possible pour établir une carte pédologique à une échelle donnée de partir de documents topographiques d'échelles différentes, mais plus grandes d'au moins le double de celle recherchée. Ainsi, une carte au 1/200 000 peut parfaitement être établie à partir de documents au 1/20 000, au 1/50 000 ou au 1/100 000. Donc l'échelle des fonds topographiques disponibles limite l'échelle de la carte définitive. On ne doit pas établir des cartes au 1/50 000 à partir de documents au 1/200 000 comme cela a parfois été le cas. Même si un bon pédologue est obligé d'accepter de telles conditions, il est obligatoirement amené à établir un nouveau fond à partir de levés de terrain. Comme ce travail ne relève pas de sa spécialité, il en résulte une augmentation des délais d'exécution et une augmentation sensible du prix de revient pour une précision souvent discutable.

Les photographies aériennes permettent de résoudre nombre de ces difficultés. Si on les utilise comme cartes de base, pour l'identification et le report des faits de terrain, on leur applique les mêmes règles qu'aux cartes topographiques. Cependant, contrairement aux cartes topographiques, il est possible d'agrandir jusqu'à 3 et 4 fois les photographies aériennes à projection verticale et à grains d'émulsion suffisamment fins. Il est donc possible à partir de documents photographiques au 1/50 000 environ d'établir une carte pédologique au 1/20 000 en

les agrandissant. Mais la possibilité d'interpréter les photographies aériennes, grâce à la vision stéréoscopique, présente une importance particulière. En pédologie, l'expérience montre que l'échelle d'interprétation des photographies la plus favorable est le 1/20 000. Ces données restent cependant empiriques. Elles dépendent en partie du modelé du terrain et, plus particulièrement, du relief, de la physiographie du secteur étudié, de la qualité des clichés, de la saison de prise de vue et de l'heure de vol. Pour des relevés de reconnaissance, en particulier pour le 1/100 000 et le 1/200 000, les photographies au 1/50 000 environ sont suffisantes. Elles présentent l'avantage d'être d'un maniement plus facile par suite du nombre moins important de clichés.

REMARQUES. — Bien qu'il soit parfaitement possible d'établir un fond topographique à partir de photographies aériennes, ces dernières ne sont à utiliser par le pédologue qu'en vue d'une interprétation pédologique. On doit laisser aux spécialistes photogrammétristes le soin d'établir les cartes de travail indispensables.

1.4. Question d'échelle de publication et d'expression thématique

L'échelle de publication est imposée par le but poursuivi. Un levé pédologique réalisé en vue de l'établissement d'une carte d'aptitude culturale doit se faire au moins au 1/50 000, la meilleure échelle étant le 1/20 000. C'est donc un point important à préciser avant de lancer tous travaux de cartographie pédologique. L'échelle de publication détermine la consistance des études. Mais un autre aspect qui, a priori, peut paraître secondaire présente une importance certaine. Il s'agit de l'expression thématique des unités cartographiées. Il existe de nombreux procédés de représentation cartographique, allant des teintes plates de couleurs jusqu'aux signes "craftin", et le prix de revient de ces diverses techniques couvre une gamme de valeurs extrêmement large. Aussi le mode de représentation est souvent défini au départ, ce qui peut jouer parfois sur la représentation de certaines unités de surfaces très petites ou de formes très allongées. Ce fait est particulièrement important lorsque l'on utilise des représentations par baguettes ou signes "craftin". Les unités reportées sur la carte doivent avoir une surface suffisante pour que les signes puissent être représentés et lisibles. Dans le cas contraire, on a trop souvent tendance à utiliser des signes plus petits et plus serrés, ce qui alourdit et assombrit le dessin. Il y a là un aspect artistique qui n'est pas négligeable et qui est du domaine des cartographes. On passe dans ces cas particuliers à des unités complexes groupant plusieurs unités simples, ce qui peut modifier sensiblement l'aspect géographique de la répartition des sols. Une bonne carte doit être parfaitement lisible à l'œil nu. Si l'échelle choisie ne permet pas de représenter tous les renseignements souhaités, il faut obligatoirement passer à une échelle plus grande avec toutes les incidences financières que cela comporte.

2. Carte pédologique et cartes de classement des terres

Il y a de nombreux malentendus lorsque l'on parle de cartes de sols car très souvent les utilisateurs ne sont intéressés que par un aspect particulier du problème : l'ingénieur du Génie Rural par les classes de drainage ou les questions d'assainissement ; l'agronome par la profondeur utile de sol, sa texture, son niveau de fertilité chimique ; l'ingénieur du Génie Civil par la résistance des matériaux, etc. Il est donc important de préciser les rapports entre une carte pédologique et les cartes indispensables aux différentes applications. En particulier, certaines cartes pédologiques se traduisent par l'établissement de cartes utilisables pour l'agriculteur. Ces cartes portent des noms variés qui couvrent des préoccupations diverses, lesquelles sont la source de confusion et de litiges. A ces préoccupations qui, au départ, s'appuient sur des données pédologiques, s'ajoutent des préoccupations économiques, sociales, voire même politiques, qui posent la responsabilité de chaque spécialiste concerné. Ce n'est que lorsque les responsabilités respectives sont bien précisées que l'on a posé les bases d'un travail en équipe efficace.

Dans cet esprit, le Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée (G.E.P.P.A. 12ème réunion, 1965) a tenté de définir, aux trois échelles les plus fréquentes au niveau de l'application, ce qui appartient strictement au pédologue, ce qui n'est pas de son ressort et ce qui correspond normalement à une discussion avec d'autres spécialistes.

A - ÉCHELLE DE LEVÉ PÉDOLOGIQUE 1/100 000 à 1/200 000

Ces échelles correspondent à l'établissement d'un programme général de mise en valeur.

a - Domaine strictement pédologique (pédologie appliquée)

- Classification des sols en sols non intensifiables (non irrigables en particulier) par suite de leur pente, de leur épaisseur et sols intensifiables (irrigables en particulier) ;
- pour ces derniers : classification en fonction de niveaux discontinus de réserve en eau utilisable et de drainage naturel ;
 - . nature de l'hydromorphie
 - . sensibilité à l'érosion
 - . tous autres facteurs limitants cartographiables ou non, accessibles à cette échelle (ex. : salinité, Ca actif, toxicité)
 - . nécessité et type d'amendement
 - . possibilité d'aménagement des sols en vue de l'irrigation de surface
 - . relations sols/climat à partir des données climatologiques existantes.

b - Frange où la pédologie doit apporter une contribution

- éventail des types d'utilisation du sol (avec agronomes)
- comportement des nappes (avec agronomes et hydrogéologues)
- type d'irrigation et type de drainage (avec agronomes et ingénieurs du Génie Rural)
- tout ce qui, en général, tend à conclure sous l'angle de l'aménagement et de l'utilisation
- inventaire et ordre d'urgence des expérimentations et observations pouvant être nécessaires (objectif : financement et constitution des équipes).

c - Domaine hors pédologie

Notamment études socio-économiques ; Climatologie (dont zones gélives).

B - ÉCHELLE DU LEVÉ PÉDOLOGIQUE 1/20 000

Cette échelle correspond à la phase d'établissement de l'avant-projet et du projet.

a - Domaine strictement pédologique (Pédologie Appliquée)

Tous les éléments précédents avec plus de précisions des caractères et des limites.

b - Frange où la pédologie doit apporter une contribution

En plus des éléments précédents :

- type d'assolement (ex. nécessité de prairies)
- type de fertilisation
- définition précise des expérimentations et observations nécessaires et mise en place.

c - Domaine hors pédologie

En plus des éléments précédents :

Gamme des cultures possibles du point de vue climatologique et économique.

C - ÉCHELLE DU LEVÉ PÉDOLOGIQUE 1/5000

Niveau de l'exploitation

a - Domaine strictement pédologique (Pédologie Appliquée)

Mêmes observations que ci-dessus :

- à ce niveau, la carte pédologique appliquée se borne strictement aux facteurs pédologiques limitants,
- des cartes plus orientées sont possibles : cartes d'interprétation précise en vue du drainage et de l'irrigation.

b - Frange où la pédologie doit apporter une contribution

Ce niveau est celui où le dialogue interdisciplinaire devient une exigence absolue. Il correspond à celui des conseils globaux à l'agriculteur. Seul un groupe de travail peut donner une réponse valable sur les aptitudes (groupe comprenant notamment des agronomes, des conseillers agricoles, des agriculteurs avertis, etc.). L'idéal serait qu'un dossier commun soit établi sous la signature conjointe des pédologues, des agronomes, des économistes et des ingénieurs.

c - Domaine hors pédologie

Utilisation des documents par les conseillers agricoles.

D'une façon générale, le pédologue devrait être entendu à propos de toute question où ses documents font l'objet d'une utilisation (tout ne peut être écrit ou cartographié) ; d'autre part, il est indispensable que le pédologue puisse suivre l'évolution des sols après mise en valeur afin de donner des conseils en temps utile.

Ces généralités amènent à traiter des diverses cartes et légendes de classement des terres. Il est bon, tout d'abord, de rappeler que l'échelle de publication détermine la consistance, donc la précision des études, et qu'il y a d'étroites relations entre les échelles et la qualité des résultats exploitables. Classification des sols et classement des terres se concrétisent par des cartes sans que l'unité de classification soit toujours l'équivalente de l'unité cartographique. On a souvent recours à des associations et, si les associations de sols s'appuient généralement sur des critères pédogénétiques, les associations de terres font surtout appel à des données physiographiques, économiques, voire sociales. Il n'y a donc pas toujours concordance entre cartes des sols et cartes de classement des terres. Cependant, ces dernières ont toujours pour base une carte pédologique, laquelle intégrant l'action globale de tous les facteurs du milieu naturel, satisfait au mieux à tous les buts imaginables présents et futurs. Seule, la carte pédologique peut faire l'objet de nouvelles interprétations, que ce soit au cours du développement d'un projet ou lors de modifications ultérieures. Les cartes pédologiques ne doivent pas être des documents régionaux, utilisant des légendes régionales. Il faut que les éléments de classification se rattachent à un système universel, alors que le classement des terres peut être parfaitement adapté à des conditions locales. Il en résulte qu'il n'existe pas deux types de levés pédologiques, l'un scientifique et l'autre pratique. "Une étude pédologique ne reposant pas sur des fondements scientifiques valables a bien peu de chance de convenir à l'application pratique que leur destinent de nombreux utilisateurs" (KELLOG, 1955). Il y a une carte pédologique et des cartes de classement des terres.

Un autre aspect du problème concerne les échelles de ces différentes cartes. Si les cartes pédologiques peuvent couvrir une gamme variée d'échelles correspondant à des niveaux d'abstraction différents, les cartes de classement des terres sont beaucoup plus strictes dans ce domaine. Pour être efficaces, il faut qu'elles se placent au niveau du projet ou de l'avant-projet, ce qui implique que les cartes pédologiques d'où seront tirées les cartes de classements de terres soient établies au moins à ces mêmes échelles.

Le G.E.P.P.A. (réunion Mai 1964) recommande les échelles suivantes en ce qui concerne les études d'hydraulique agricole.

. Cas de l'irrigation, de l'assainissement agricole :

- Niveau programme d'aménagement
échelle du levé pédologique 1/200 000 ou 1/100 000 suivant les cas ;
- Niveau avant-projet ou projet
échelle du levé pédologique 1/20 000 ou 1/25 000 ; l'échelle du 1/50 000 n'est pas à retenir ;
- Niveau conseil aux agriculteurs
échelle du levé pédologique 1/5 000. Le 1/2 000 n'est pas souhaitable, ce levé devrait être précédé d'expérimentation de façon à ce que des conseils sûrs puissent être formulés.

. Cas de drainage :

Les échelles pédologiques recommandées sont le 1/20 000 ou le 1/25 000 pour le projet de réseau de collecteurs à ciel ouvert.

D'une façon générale l'échelle conseillée au niveau du projet ou de l'avant-projet est celle du 1/20 000 ou du 1/25 000. Quand les problèmes d'assainissement sont peu importants il est possible de descendre à l'échelle du 1/50 000, mais c'est là une limite à ne pas dépasser. Cette dernière échelle est particulièrement utile en pays tropicaux humide.

2.1. Les différentes cartes de classement des terres

Le sol ne prend une importance économique que lorsqu'il est utilisé par l'homme et on appelle terre la tranche de sol qui est exploitée dans des buts agricoles.

La production agricole est sous l'influence de nombreux facteurs : climat, sol, modelé, végétation, parasites végétaux, etc. Mais le revenu agricole repose aussi sur d'autres données liées aux difficultés de produire et d'écouler la production. Il en résulte que suivant l'optique sous laquelle on considère le problème, on peut concevoir de nombreux modes de classement des terres. On peut classer les terres d'après leur valeur vénale, d'après les difficultés de traitement pour arriver à une même production, d'après leur distance par rapport à un marché, etc. VINK (1965) distingue sept catégories de classement des terres :

- . Classification des sols en tant que corps naturels ;
- . Classement des terres selon leurs qualités (classification des propriétés techniques des sols ;
- . Classement des terres selon leur utilisation actuelle ;
- . Classement des terres selon leurs réponses aux cultures ou aux méthodes d'aménagement ;
- . Classement des terres selon leurs possibilités d'utilisation (classification d'aptitude culturale ou de vocation des sols).;
- . Classement des terres selon leur utilisation recommandée ;
- . Classement des terres selon un programme d'exécution.

Il constate que si "les cinq premières catégories relèvent de la recherche, la sixième se situe à la limite de la recherche et de l'administration et que la septième ne concerne que cette dernière". Il poursuit en indiquant ... "que les méthodes 6/ et 7/opèrent un choix s'appuyant sur des considérations administratives parmi les possibilités d'utilisation fournies par la méthode 5/. Cette dernière, qu'il préfère nommer classification d'aptitude des sols, repose à son tour principalement sur les méthodes 1/, 2/ et 4/. Si l'on se place dans le seul

domaine de la recherche, on remarque que seule la classe 1/ relève strictement de la pédologie ; la classe 2/ du pédologue, du chimiste, du physicien, du biologiste des sols ; la classe 3/ du statisticien et du géographe ; la classe 4/ de l'agronome et de l'ingénieur du Génie Rural ; la classe 5/ de la plupart des disciplines précédentes, auxquelles il faut adjoindre les économistes et les sociologues. Mais pour être efficace il faut que toutes ces cartes tiennent compte des limites pédologiques d'intérêt agricole. C'est pour cela que les cartes pédologiques ne doivent jamais se limiter à un objectif particulier. Elles doivent pouvoir satisfaire à toutes les solutions possibles, car si l'on veut connaître les éléments du développement de la production agricole il faut entre autres pouvoir apprécier l'influence des techniques agronomiques nouvelles sur la totalité des sols. Les cartes pédologiques considérant les sols en eux-mêmes comme des corps naturels, reflètent l'action des facteurs du milieu. Cette définition oblige à les décrire dans leur totalité et le plus complètement possible. C'est à partir de ces données que sont interprétées les différentes cartes d'utilisations des terres en ne retenant des définitions que les caractéristiques qui intéressent actuellement l'utilisateur. Cette marche du raisonnement est généralement très mal comprise. Souvent, l'utilisateur impose pour ses besoins l'établissement d'une carte dite "pédologique" mais qui, en fait, n'est que technologique, en fixant dès le départ les normes de classement, pensant ainsi faire une économie de temps et d'argent. Or, une telle carte n'est valable qu'en fonction d'un plan d'aménagement posé "a priori". C'est supposer que les sols et leurs possibilités d'utilisation sont parfaitement connus. Or, l'expérience prouve que les prospections amènent très souvent à modifier les plans d'aménagement ; que des données qui pouvaient paraître importantes en fonction du plan retenu n'ont qu'un intérêt réduit ; que l'évolution des techniques agronomiques permet l'utilisation économique des sols jugés peu intéressants au départ. Les besoins en renseignements changeant avec l'évolution de la conjoncture, on constate que les cartes technologiques deviennent rapidement insuffisantes et qu'il faut recommencer une nouvelle étude cartographique. Il eût été beaucoup plus facile et, en définitive, plus économique de dresser d'abord une véritable carte pédologique précisant l'aspect permanent de la connaissance et de la répartition des sols. Une telle carte, non orientée, peut être exploitée en vue de buts très divers, sans qu'il soit nécessaire de reprendre une étude complète du terrain. Tout au plus est-il parfois nécessaire de vérifier un point donné et connu pour obtenir un complément d'informations.

2.2. Exploitation des cartes pédologiques

Les cartes pédologiques informent uniquement de la nature et de la répartition des sols. Mais l'importance des renseignements fournis varient avec les échelles. Lorsque l'on utilise ces cartes en vue de regrouper des renseignements indispensables pour une mise en valeur, la règle fondamentale est que le document exploité soit au moins à la même échelle que le niveau de conception retenu. On peut naturellement exploiter des cartes pédologiques à plus grande échelle, mais en aucun cas des cartes à plus petite échelle. C'est dire que si l'échelle du projet est au 1/50 000, par exemple, les cartes pédologiques nécessaires doivent être établies au moins à la même échelle. Cette règle ne porte pas sur le nombre de résultats fournis pour la définition du profil caractérisant l'unité cartographique, mais sur le degré d'extrapolation des différentes données. En effet, quelle que soit l'échelle, les sols sont toujours étudiés au moins au niveau de la série, plus souvent encore à celui du type et même de la phase. Mais suivant les échelles le nombre de points d'observation varie, d'où une plus ou moins grande possibilité d'extrapolation des résultats acquis. Ces résultats n'ont pas tous la même valeur de généralisation, car la définition des unités cartographiées aux différents niveaux de la classification des sols ne fait pas appel aux mêmes séries de données.

Les possibilités d'exploitation des cartes pédologiques sont donc fonction du niveau de classification compatible lui-même avec l'échelle retenue.

Quels sont les résultats que peuvent fournir les cartes pédologiques aux différents niveaux de la classification française ? En allant des niveaux de plus grande généralisation aux niveaux inférieurs, ces données sont les suivantes : (AUBERT G., 1965) :

2.2.1. La classe assemble les sols marqués par le même mode et la même intensité d'évolution. Mode et intensité d'évolution résultent de conditions physiques ou climatiques, physico-chimiques, chimiques et secondairement biotiques spécifiques. Ils s'expriment dans les sols par certains caractères essentiels :

- degré d'évolution des minéraux et développement du profil ;
- mode d'altération défini par la nature des sesquioxides libérés et qui se maintiennent individualisés ou participent à la constitution de complexes caractéristiques, par la dominance de certains types d'argile, tous caractères qui s'expriment par des couleurs, par des types de structure ou par la morphologie du matériau originel ;
- présence et distribution de corps d'influence particulière sur cette évolution, comme le calcaire ;
- degré d'hydromorphie ou d'halomorphie reconnaissable par le développement et la répartition de taches, nodules et concrétions, horizons durcis, types de structure.

2.2.2. Les conditions du pédoclimat interviennent au niveau de la **sous-classe** Les données fournies concernent essentiellement la température et l'humidité du sol dans leurs valeurs moyennes et leurs variations à travers les différents horizons. Elles précisent le régime hydrothermique qui induit l'évolution générale.

2.2.3. Les groupes sont définis par des caractères morphologiques du profil correspondant aux processus d'évolution de ces sols : différenciations d'horizon spécifiques, lessivage du calcaire, des éléments colloïdaux, etc. Parfois, deux groupes voisins peuvent être caractérisés par un même processus pédologique général ; ils sont alors différenciés par une forte variation de son intensité correspondant à des profils nettement distincts.

A ce niveau, le nombre de données fournies est important. Il permet de faire un choix raisonné et d'orienter efficacement les problèmes de mise en valeur. Prenons quelques exemples :

— *Sols hydromorphes minéraux à gley*

Ce sont des sols dont l'évolution est dominée par un excès d'eau : **classe**. Ils contiennent moins de 5 à 2% de matière organique, à rapport C/N au moins égal à 17 = **sous-classe**. **GLEÏY (G) = groupe**, indique la présence dans le profil d'un horizon à engorgement relativement prolongé où la réduction l'emporte sur l'oxydation ; le fer est réduit à l'état de fer ferreux. Cet horizon est caractérisé par des teintes dominantes grises verdâtres ou bleutées de chroma égal ou inférieur à 2.

L'aménagement, dans un but agricole, d'un sol de ce groupe exige obligatoirement des travaux d'assainissement donc de drainage et d'aération. Mais les données fournies ne permettent pas de conseiller la profondeur et la densité de ces travaux. De plus, la valeur chimique n'est pas précisée.

— *Sols lessivés*

Ce sont des sols à "MULL", donc à humus évolué, présentant peu d'hydroxydes libérés, lesquels restent liés au complexe argilo-humique. Leur profil est du type A.B.C. **classe**.

Ils sont caractéristiques des pays tempérés, à pedoclimat frais toute l'année ou, au moins, pendant la saison des pluies : **sous-classe**. Ils présentent un horizon B illuvial enrichi en argile : **groupe**.

La seule dénomination "Sols lessivés" signale les propriétés suivante : "Ce sont des sols à "cycle biologique" rapide ; les éléments nutritifs qui, en forêt, retournent au sol, sont très rapidement remis en circulation grâce à la minéralisation rapide de "MULL" ;

ce cycle biologique très rapide permet le maintien d'une fertilité relative même sur les roches-mères assez pauvres en calcium. Cependant, une vitesse de minéralisation excessive de l'humus conduit à une dilapidation des réserves de cations échangeables et d'azote qui peut devenir dangereux".

"En outre, ces sols sont généralement favorables lorsqu'ils sont profonds ; en effet, la totalité des horizons est bien utilisée grâce à une répartition homogène des racines" ; ... "un lessivage modéré n'est pas défavorable"... "l'horizon B d'accumulation d'argile et de fer joue un rôle utile, tant au point de vue physique que chimique ; il conserve une réserve d'eau en saison sèche"... "en outre il arrête les cations Ca^{++} , Mg^+ , K^+ qui ont été entraînés depuis la surface, de sorte qu'il constitue aussi une "réserve" d'éléments échangeables. Par contre, si le lessivage augmente, il devient nettement défavorable ... : l'humus s'acidifie et évolue vers un "moder", puis un "Mor" à propriétés peu favorables ; les cations échangeables disparaissent peu à peu de tout le profil par entraînement profond. Enfin, l'horizon B prend une structure fondue et il a tendance à s'imperméabiliser ; une nappe stagnante peut même se former en certaines saisons, ce qui provoque l'asphyxie des racines profondes". (Ph. DUCHAUFOR, 1965). Ces renseignements sont purement indicatifs. Ils peuvent être précisés en se plaçant à des niveaux plus bas. Ainsi, la notion d'intensité de lessivage apparaît au niveau du sous-groupe ; l'importance des réserves chimiques utiles au niveau de la famille ; l'épaisseur de la tranche de terre utilisable au niveau de la série ; etc.

2.2.4. Les sous-groupes ont les mêmes caractères essentiels des profils que les groupes, mais sont différenciés soit par une intensité variable, d'une catégorie à l'autre, du processus fondamental d'évolution caractéristique du groupe, soit par la manifestation de processus secondaires, indiqués par certains éléments nouveaux du profil qui sont à rattacher à des processus d'autres groupes. Par exemple, de nombreux profils présentent en profondeur les marques d'actions d'hydromorphie sans que l'intensité de ces dernières fasse basculer le sol dans la classe des sols hydromorphes. On a alors un sol du groupe X, sous-groupe à hydromorphie de profondeur.

Ces notions précisent pour l'utilisateur les propriétés découlant du groupe.

2.2.5. A l'intérieur des sous-groupes, on distingue les **familles de sols** en fonction des caractères pétrographiques de leur roche-mère ou de leur matériau originel : dureté et résistance, décomposition, cohésion, perméabilité, richesse en bases, ... Dans une optique agronomique, les renseignements à ce niveau sont fondamentaux. Ils précisent le degré de fertilité physique et chimique.

2.2.6. Les séries correspondent, dans une même famille, à des différenciations de détail du profil : profondeur du sol, de l'horizon d'accumulation ou induré, épaisseur de certains horizons principaux, fortes teneurs en éléments grossiers et, le cas échéant, position dans le paysage. Ici, sont regroupés l'ensemble des résultats qui permettent d'apprécier les possibilités d'utilisation des sols.

2.2.7. Dans certains cas, les séries sont subdivisées à leur tour en **types de sols** en fonction des caractères précis de la texture de leurs horizons supérieurs, et en **phases** qui correspondent à de faibles variations des profils par suite de modifications temporaires ou d'actions de courte durée : mise en culture, érosion, etc. Ces données précisent les conditions d'aménagement des sols.

Si l'on se place du point de vue de l'utilisateur, l'échelle acceptable pour un planificateur doit faire apparaître au minimum les sous-groupes ; pour l'agronome : au moins les familles et surtout les séries ; pour une implantation : les types et les phases. En fait, pour l'étude d'un projet, les échelles les plus fréquemment demandées sont celles du 1/50 000 et du 1/20 000.

2.3. Cartes d'interprétation de la carte pédologique

2.3.1. Cartes des propriétés techniques des sols

Ces cartes s'appuient sur les propriétés intrinsèques des sols. Elles n'ont aucune attache économique, mais sont déjà interprétatives en ce sens que l'on ne retient que les données qui paraissent utiles au demandeur. On peut ainsi dresser des cartes de : texture, pH, de charge en calcaire, de teneur en éléments assimilables (potassium, acide phosphorique, azote), de perméabilité, de profondeur utile du sol, etc.

Ces cartes sont un moyen utile pour extraire, à partir des informations diverses que fournissent les cartes pédologiques, les données essentielles à certains projets. Ainsi à partir d'une même carte pédologique on peut tirer diverses cartes de propriétés techniques des terres, la carte pédologique restant toujours disponible pour de nouvelles références. Ces types de cartes peuvent grouper une même série de données ou combiner un ensemble de données différentes. On peut citer à ce sujet l'exemple des cartes du département de l'Aisne (France) au 1/20 000 qui fournissent à la fois la texture et la profondeur des principaux horizons, la charge en calcaire et le degré de drainage.

2.3.2. Cartes d'utilisation actuelle des terres

Ces cartes enregistrent ce que l'on observe au moment du levé pédologique. Elles sont souvent très utiles, non seulement dans le but d'élucider certains problèmes de statistiques agricoles, mais elles aident aussi à comprendre l'influence de certains aspects socio-économiques, voire historiques et même sanitaires sur l'exploitation des sols. Elles permettent aussi d'éclairer certains problèmes de tenure des terres et informent sur les paysages agricoles. De telles cartes ne résultent pas de l'interprétation des cartes pédologiques. Mais la comparaison avec ces dernières est très instructive. Dans les pays à agriculture évoluée, elles éclairent en particulier sur la valeur pratique de certaines limites pédologiques.

2.3.3. Cartes de réponses aux cultures et aux méthodes d'aménagement

Ces cartes informent de la réponse des différents sols à certains types de cultures. Ces réponses sont également fonction du type d'aménagement. On peut ainsi dresser des cartes d'après le rendement d'une plante donnée sur les différentes entités pédologiques reconnues avec ou sans engrais, avec ou sans irrigation, avant et après drainage. Certains sols par leur exposition sont plus favorables à des cultures précoces que d'autres ou, au contraire, à des cultures tardives, etc.

L'établissement de ces types de cartes est très ardu car il oblige à de nombreux essais. Les cartes pédologiques interviennent pour préciser et limiter le cadre de ces données et les possibilités d'extrapolation des résultats obtenus. Il s'agit d'étendre des résultats ponctuels à la superficie d'unités homogènes. La plupart des essais multilocaux devraient s'appuyer ainsi sur les cartes pédologiques établies au niveau de la série et du type. Ces cartes permettent, en effet, de planifier une politique d'engrais ou d'aménagements agronomiques.

2.3.4. Cartes d'aptitudes culturelles

Ces cartes s'appuient sur le classement des terres suivant leurs possibilités d'utilisation. Elles indiquent quels types d'agriculture, de rotation, de cultures, etc. conviennent le mieux aux conditions écologiques (climat, sols, hydrologie) et d'économie générale. Elles doivent donner une idée du potentiel des sols compte tenu des variations de niveaux économiques et techniques. Elles font apparaître les caractéristiques d'utilisation potentielle avec ou sans amélioration du sol. Ces cartes d'aptitudes culturelles sont les plus importantes de tous les groupes d'interprétation de cartes pédologiques. Elles permettent de définir non seulement

les possibilités d'utilisation actuelle, mais également celles découlant d'améliorations futures. Elles n'indiquent que diverses formules d'utilisation possible, sans préciser la mieux adaptée à un cas particulier, cette dernière découlant également de considérations économiques, voire politiques.

L'établissement de ces cartes s'appuient sur les fonds pédologiques. Mais elles font intervenir d'autres facteurs qui conditionnent la productivité, à savoir : le climat, l'hydrologie et la topographie.

L'utilisation d'un sol dépend bien sûr du type de sol, mais celui-ci défini, ce sont les possibilités d'aménagement qui orientent les données actuelles de la production. C'est ainsi que doivent entrer en ligne de compte les possibilités de drainage ou d'irrigation, de travail à plus ou moins grande profondeur du sol, les dangers possibles d'érosion, les possibilités d'intervention d'engins, etc.

Il est ainsi possible d'établir deux types de cartes d'aptitude :

- celle qui définit l'aptitude du sol dans son état naturel : aptitude d'emploi ;
- celle qui indique les possibilités d'amélioration.

Alors que la première s'appuie intégralement sur les données pédologiques, la seconde fait intervenir les conditions actuelles du milieu.

Mais il est également utile d'établir une troisième carte indiquant les aptitudes culturelles après amélioration.

C'est pour cela que très souvent les deux premières cartes sont groupées. Ainsi, par exemple, en Tunisie les cartes pédologiques à grandes échelles sont généralement complétées d'une carte d'utilisation des terres en cultures sèches et d'une carte d'utilisation en cultures irriguées.

De nombreuses formules sont utilisées pour définir les aptitudes culturelles des sols. Mais il ne semble pas que dans l'état actuel de nos connaissances aucune d'elles puisse être généralisée. En effet, les conditions locales rentrent trop souvent en ligne de compte. La principale difficulté vient que l'on veut regrouper trop de données sur un même document. Ainsi sur les cartes d'utilisation des terres préconisées par G. AUBERT et F. FOURNIER, et s'inspirant de formules (1954), apparaissent à la fois :

- une classification des terres selon leur valeur, leur possibilité d'utilisation et les travaux nécessaires pour leur utilisation et leur conservation ;
- l'utilisation actuelle des terres ;
- une caractérisation des terres à l'aide d'une série de données relatives :
 - . au sol lui-même (classification pédologique)
 - . à l'érosion subie
 - . à la pente topographique.

De même, DURAND (1965) décrit une méthode permettant de dresser des cartes des sols à buts agronomiques en tenant compte à la fois de l'évolution pédologique et des caractères permanents du sol, de la topographie et des travaux à réaliser. Quand se présentent des possibilités d'irrigation, cette carte est complétée par une estimation des besoins en eau des plantes et des dangers éventuels de salinisation des sols.

Il semble qu'il vaudrait beaucoup mieux dresser la liste des différents éléments de la mise en valeur d'une zone donnée, puis tirer des conclusions synthétiques par la confrontation des différents spécialistes intéressés (pédologues, hydrologues, agronomes, etc.).

VALEUR DE LA TERRE	TYPES DE TRAVAUX														
	Aucun travail d'aménagement	a - Apport d'engrais ou d'amendements à doses d'entretien ou modérées. Travaux d'assainissement ordinaires	b - Apport d'engrais ou d'amendements à fortes doses. Fréquente utilisation d'engrais verts ou de plantes de couverture.	c - Cultures en bandes alternées	d - Sous solage	e - Terrasses à lit en pente	f - Irrigation avec simple colature et quelques drains à faible profondeur	g - Importants travaux de drainage ou d'assainissement	h - Terrasses en banquettes	i - Travaux conjugués de drainage et d'irrigation	Aucun travail d'aménagement pour le pâturage ou quelques travaux simples	j - Réglementation stricte du pâturage	Aucune restriction à l'exploitation forestière	k - Réglementation stricte de l'exploitation forestière	l - Reboisement nécessaire
Terres de très bonne qualité	I	Ia		IIc		IIIe	IIIf	IIIg	IVh	IVi					
Terres de bonne qualité		IIa	IIb	IIIc		IVe	IVf	IVg	Vh	Vi					
Terres de qualité moyenne		IIIa	IIIb	IVc	Vd	Ve	Vf	Vg	VIh	Vii					
Terres de qualité médiocre						VI									
Terres de bonne qualité pour le pâturage											VII				
Terres d'assez bonne qualité pour le pâturage											VIII	VIIIj			
Terres couvertes de forêts d'exploitation													IX	IXk	
Terres à vocation forestière ne permettant qu'une faible exploitation														X	XI
Terres à laisser sous végétation naturelle	XI														

En fait les renseignements fournis par les cartes d'aptitudes culturales restent assez généraux. Ils ne précisent pas les possibilités d'utilisation au niveau de l'exploitation. En effet, l'aptitude d'un sol à une culture est pour le fermier la possibilité financièrement rentable d'effectuer cette culture pendant une assez longue période. Mais cette culture n'est pas seule en cause, elle entre dans le cadre d'un système d'agriculture, rotation en particulier, et d'aménagement, dont la somme doit être également rentable.

D'après VINK (1965), les facteurs physiques de l'aptitude culturale d'une terre vis-à-vis d'une production donnée sont les suivants :

- rendement en Kg/ha ;
- quantité d'heures de travail et d'engrais nécessaires à l'obtention des rendements ci-dessus ;
- qualité du produit ;
- risques inconnus (climatiques, physiologiques et sanitaires) ;
- superficie relative du terrain et forme de l'emblavure.

Mais les facteurs économiques influent fortement sur la rentabilité de cette production. Ce sont les prix des produits, de transport, d'emmagasinage, de protection des récoltes, les frais de labour et d'entretien, le prix des engrais, etc. Ces différents facteurs peuvent être mis sous forme de variables dont la somme permet de définir les différentes classes économiques de l'utilisation des terres.

2.3.5. Cartes des terres suivant les recommandations

S'appuyant sur les données précédentes et également sur les conditions socio-économiques, voire politiques, il appartient aux administrateurs de tirer les conclusions en établissant des cartes d'utilisation des terres suivant différentes recommandations. Il est, en effet, nécessaire que les aptitudes reconnues soient remplacées dans le contexte économique de la nation et pour ce faire une réunion des différents spécialistes intéressés est indispensable, où le pédologue a sa place mais seulement comme expert.

2.3.6. Cartes des terres selon un programme d'exécution

C'est là le domaine des planificateurs où interviennent des considérations d'économie générale et de développement. Le pédologue n'apparaît plus, sinon comme conseiller pour éviter certaines erreurs d'application.

III - RÉALISATION D'UNE CARTE PÉDOLOGIQUE

La réalisation d'une carte pédologique est une opération longue et complexe qui demande l'établissement préalable d'un programme de travail. Ce programme comprend une série d'opérations dont l'importance et l'ordre sont fonction du type de cartographie. Ces opérations sont les suivantes :

- bibliographie et analyse des connaissances acquises ;
- travaux de terrain ;
- études et déterminations en laboratoire ;
- interprétation des résultats de terrain et de laboratoire ;
- établissement de la minute de carte ; rédaction de la notice ;
- publication.

Un tel programme exige que le problème soit parfaitement posé et que les objectifs soient définis avec précision. De ces données dépendent, en effet, la complexité de l'entreprise et, par suite, l'importance des moyens à mettre en œuvre. Aussi, avant de traiter de méthodologie, il est nécessaire de préciser les points qui doivent servir de base à l'établissement d'un marché rédigé en vue de la réalisation d'une carte pédologique. Des termes de ce dernier dépend de la consistance des études et par suite la source, la valeur et la précision des résultats utilisables.

1. Définition de l'Étude

Les points à prendre en considération sont les suivants :

- objectifs et raisons de l'entreprise. Les utilisations prévues ;
- cadre de l'étude ;
- type de cartographie ;
- choix de l'échelle ;
- délais d'exécution ;
- nature, qualité et nombre des documents à publier (cartes, notices, rapports, etc.) ;
- moyens financiers disponibles.

Sans revenir sur les sujets traités précédemment, on peut cependant rappeler que ces différents points sont étroitement liés et qu'en particulier la définition même de l'objectif impose type et échelle de cartographie.

1.1. Objectifs et raisons de l'entreprise

Ces renseignements précisent la somme et la précision des données à recueillir sur le terrain. Ils permettent d'attirer l'attention du prospecteur sur certains aspects spécifiques importants pour l'utilisateur. Ces directives peuvent provoquer l'étude plus détaillée de certains sites présentant une importance particulière en rapport avec l'objectif à atteindre. Ils permettent enfin de signaler la valeur des renseignements pouvant être fournis par le pédologue et de préciser ainsi sa part de responsabilités.

1.2. Cadre de l'étude

Situation, étendue et limites du périmètre à étudier doivent être concrétisées sur un plan de situation à l'échelle de la conception de l'entreprise. Il importe, pour éviter tout malentendu, de donner le maximum de renseignements désirables à cet effet. L'absence de plan directeur peut parfois amener à reconnaître, avec les responsables du projet, les limites sur le terrain. De toute façon, cette reconnaissance est fortement recommandée, car elle permet de préciser, mieux que sur document, le cadre, l'objet et la complexité de l'étude ainsi que les possibilités d'intervention.

1.3. Type de cartographie

Théoriquement, le type de cartographie est fonction à la fois de l'objectif et de l'échelle.

Pour une planification nationale le niveau de conception se situe à l'échelle du 1/1 000 000 ou du 1/500 000 et oblige à une étude de reconnaissance générale.

Au niveau d'un plan d'aménagement régional, il est nécessaire de réaliser une reconnaissance détaillée aux échelles du 1/200.000 ou 1/100.000.

Au niveau de l'avant projet et du projet s'impose une cartographie pédologique détaillée au 1/20.000.

1.4. Choix de l'échelle

Le choix de l'échelle découle des préoccupations précédentes. Il faut distinguer entre échelle de prospection et échelle de publication. L'importance de ce problème a été traité au chapitre II.1. Rappelons seulement que l'échelle de prospection doit être au moins deux fois supérieure à l'échelle de publication. Certains impératifs pratiques, en particulier l'absence de fonds topographiques appropriés, peuvent donc parfois limiter les choix de l'échelle.

1.5. Délais d'exécution

A cet effet, doivent être fixées la durée totale de l'entreprise et les dates d'intervention sur le terrain et aux laboratoires, ainsi que les délais accordés pour la remise des rapports et des cartes définitives. Si la durée d'exécution de certains points du programme peut subir certaines variations suivant l'importance des moyens mis en œuvre, il faut cependant rappeler que d'autres sont peu compressibles. Il s'agit, dans une certaine mesure, des travaux de laboratoire, mais surtout des délais de transport, en particulier des échantillons et de la publication des cartes et rapports.

Il faut faire attention à ce que les dates d'intervention contractuelles correspondent à de réelles possibilités, soit climatiques en ce qui concerne les travaux de terrain, soit pratiques en ce qui concerne le déroulement des travaux de laboratoire, l'établissement des maquettes cartographiques et des rapports. La durée totale de l'opération est pratiquement fixée par les possibilités d'intervention dans ces trois domaines.

1.6. Nature des documents à fournir

Il est particulièrement important de préciser le type de présentation de la carte et du rapport, le mode d'impression et le nombre d'exemplaires à établir, car ces données interviennent sur les délais de remise des documents et sur le prix de revient.

Une enquête menée en 1958 auprès d'un grand nombre d'ateliers français d'impression de cartes avait permis de dresser un tableau des coûts en fonction du système de reproduction, du format, du nombre de couleurs et du nombre d'exemplaires.

Un sondage effectué récemment (1967) révèle une augmentation des prix voisine de 280% mais sans doute très inégale selon la société et le type de travail. Les chiffres donnés ci-après seront donc cités comme ordres de grandeur très approximatifs (TVA incluse mais port en sus). On observe d'autre part de très sensibles différences de prix d'une société à l'autre.

(GEPPA 1967)

Procédé et papier	Format	Nombre de couleurs (noir inclus)	Coût en francs pour un nombre d'exemplaires					Observations	
			25	30	50	100	500		
Gelatinographie 120 g 125 g	100 x 100	1	170	-	-	-	-	(1)	
	116 x 86	1	-	300	-	-	-	(1)	
		2	-	750	-	-	-	(1)	
		4	-	1600	-	-	-	(1)	
Zincographie Registre 112 g Registre 112 g Registre 125 g	116 x 86	3	-	-	1355	1453	-	(2)	
		5	-	-	2237	2377	-	(2)	
		7	-	-	3110	3301	-	(2)	
	46 x 61	3	-	-	717	739	-	(2)	
		5	-	-	1183	1217	-	(2)	
		7	-	-	1652	1695	-	(2)	
	116 x 86	1 (noir)	-	-	208	244	-	(2)	
					(+47)	(+76)		(3)	
	Zincographie ou offset 125 g	116 x 86	1	-	-	-	-	1300	(1)
			3	-	-	-	-	3000	(1)
		105 x 85	1	-	-	-	1450	2000	(1)
5			-	-	-	7500	10500	(1)	

(1) - coefficient majorateur

(2) - devis 1967

(3) - supplément pour pliage au format 21x31.

1.7. Moyens financiers disponibles ; coût de l'opération

Il s'agit là, en définitive, de la donnée qui règle le plus souvent la consistance des études. Il existe d'étroites relations entre l'objectif à atteindre, l'échelle, la surface étudiée, le mode de publication et les moyens financiers mis en œuvre. Il n'y a aucun miracle en la matière et on est souvent amené à choisir entre superficie et précision des résultats. Les éléments du prix de revient des études pédologiques seront traités dans un chapitre particulier.

2. Étude et analyse des données connues

Cette démarche préliminaire est normale à toute étude. Il s'agit de situer le problème dans le cadre des connaissances acquises.

Un premier point est de rappeler les caractéristiques géographiques, agricoles et techniques de la région. Il peut parfois arriver que l'absence de certaines données limite les possibilités de l'entreprise pédologique. C'est souvent le cas lorsque l'on manque de documents topographiques à l'échelle convenable ou de photographies aériennes. On verra comment l'absence ou la mise à disposition de tels documents peuvent modifier sensiblement la durée d'intervention sur le terrain.

Parfois aussi la compréhension de certains problèmes particuliers nécessite la connaissance de données générales. Ainsi l'étude d'une zone alluviale oblige à un minimum

de connaissances sur le bassin versant correspondant, en particulier sur sa géologie, son hydraullicité, son érodibilité, etc.

Il est également important de rappeler les caractéristiques pédologiques connues sur la région ou des régions écologiquement comparables. L'absence de renseignements peut obliger parfois à des développements de la recherche pédologique, difficile à mener dans le cadre d'obligations contractuelles.

L'ensemble des données regroupées permet de préciser l'importance et la valeur des connaissances que l'entreprise peut apporter.

3. Travaux de terrain

Il est pratiquement impossible de définir une méthodologie précise en cartographie pédologique. Les modes d'intervention sur le terrain dépendent des difficultés d'accès et de pénétration, de l'hétérogénéité de la distribution des sols, enfin des connaissances disponibles sur ces différents sujets. Les quelques ouvrages traitant de ces problèmes font abstraction de ces connaissances et posent le problème *a priori* dans le cadre d'une absence totale de données. Parfois même on va jusqu'à poser l'absence de fonds topographiques. C'est dire les difficultés à définir une méthodologie valable dans tous les cas.

Au départ, le problème essentiel est de tenir étroitement compte des faits de terrain, et plus particulièrement des relations entre facteurs du milieu, aspect de la surface et répartition des sols. C'est dire que l'expérience du prospecteur est le facteur fondamental de la qualité de l'étude. L'exécutant doit être un pédologue qualifié car il faut rappeler, une fois de plus, qu'en cartographie des sols on ne peut tracer des limites que lorsque les entités sont parfaitement caractérisées.

C'est pour tout cela qu'avant d'aborder une étude systématique du terrain il est important et nécessaire de procéder à une prospection de reconnaissance. Il est même recommandé d'effectuer cette étude préalablement à tout engagement définitif.

3.1. Prospection de reconnaissance

Cette opération a pour but de prendre connaissance du champ d'action et du degré de complexité de l'entreprise afin de préciser les moyens à mettre en œuvre. Cette prospection ne peut donc être effectuée que par le pédologue assurant la responsabilité de l'opération. Mais il est intéressant qu'il se fasse assister par des personnes qualifiées connaissant bien la région, voire même par un collègue travaillant ou ayant travaillé sur des régions voisines ou écologiquement comparables. Il peut également consulter tout spécialiste dont les connaissances sont utiles pour le développement de l'étude (géologues, botanistes, agronomes, etc.). Un point intéressant est de faire participer à cette opération un des demandeurs afin de préciser sur le terrain l'objet et la consistance de l'étude.

Cette tournée préliminaire n'a pas pour objet immédiat de commencer l'étude pédologique, mais de confronter les prévisions avec la réalité, d'apprécier la valeur et l'importance des connaissances déjà acquises sur le sujet, d'estimer les équipes et les moyens nécessaires au bon déroulement des travaux, en bref de déduire la méthodologie d'approche. Il peut, par exemple, apparaître que certains secteurs soient plus complexes que d'autres, nécessitent un examen plus fouillé, un réseau de sondages plus dense, ou telle particularité qui requiert l'avis d'un spécialiste (hydrologue, géomorphologue) etc.). On profite de cette mission pour prendre contact sur le terrain avec les personnalités locales intéressées : personnel d'encadrement, personnel d'exécution, souvent même paysans qui peuvent fournir des renseignements fort utiles (DUPUIS, 1959).

Le choix de l'itinéraire est orienté par quelques principes simples. Tout d'abord, on cherche à situer le périmètre à prospector dans son cadre géographique et, pour ce faire, on effectue une tournée générale sur les pourtours du ou des bassins versants qui encadrent la zone à étudier sur la base des documents topographiques et photographiques dont on apprécie la valeur. Les matériaux qui les constituent marquent l'évolution des sols des régions les plus basses qui sont souvent aussi les plus intéressantes. Cette prospection générale précise la nature des matériaux originels et certains facteurs de la répartition des sols. Ceci étant, on effectue quelques transversales afin d'apprécier l'influence de la topographie sur la distribution des sols. On s'appuie au maximum sur les coupes naturelles (tranchées de routes, carrières, puits, etc.) qui permettent de reconnaître, au moins sommairement, certains types de sols représentatifs du secteur. Ces données orientent utilement les recherches bibliographiques préalables ; elles permettent de préciser la nature du matériel de prospection à mettre en œuvre ; elles donnent des renseignements précieux sur les principaux types d'analyses qui seront demandées aux laboratoires.

Ce périple permet aussi d'apprécier les périodes les plus favorables à l'intervention sur le terrain. Ceci est particulièrement important pour l'étude de bas-fonds inondables et des sols couverts de peuplement herbacés denses. Dans ces cas particuliers, il faut souvent attendre soit la récolte lorsqu'il s'agit de culture, soit le passage du feu s'il s'agit de savanes graminéennes et fréquentes en Afrique. En certaines saisons, le terrain est difficilement pénétrables aux véhicules de tournées, parfois même les voies de communications sont coupées (en saison des pluies) ou impraticables (barrières de pluies). Il doit en être tenu compte pour l'établissement de l'échéancier.

Enfin, en région peu peuplée, il est utile de se renseigner des possibilités de ravitaillement et d'hébergement ainsi que des possibilités de recrutement de manœuvres.

En résumé, cette reconnaissance préalable permet de préciser la méthodologie, les moyens à mettre en œuvre, les dates d'intervention sur le terrain.

3.2. Levé systématique de la carte

L'exécution des travaux de terrain comprend théoriquement plusieurs phases successives :

- l'inventaire des unités pédologiques ;
- le tracé des limites de ces unités ;
- le prélèvement d'échantillons sur les profils les plus caractéristiques en vue de leur complément d'étude en laboratoire.

En fait, si la dernière phase trouve naturellement sa place à la fin des interventions sur le terrain, les deux précédentes ne peuvent pas toujours être aussi nettement séparées. En effet, l'individualisation d'une unité cartographique qui implique sa caractérisation oblige à l'étude des relations mutuelles entre deux sols voisins et, par suite, amène au choix d'une limite. Cependant, il convient de donner toujours la priorité à l'inventaire, de façon à préciser le plus rapidement possible le niveau de classification où va se placer l'étude. On sait, en effet, que le choix de l'échelle implique le plus souvent un regroupement d'unités simples. Il importe que ce regroupement se fasse dans le cadre pédologique qu'est la classification des sols. Faut de quoi, on se trouve dans l'obligation d'adapter et de corriger continuellement la légende au fur et à mesure de l'avancement des travaux, ce qui alourdit considérablement l'opération. On ne peut cependant jamais entièrement éliminer cet handicap. Mais il faut le réduire au maximum par l'emploi des méthodes les plus appropriées et, pour ce faire, on utilise actuellement de façon de plus en plus intensive les photographies aériennes.

3.2.1. Notions de photogrammétrie indispensables aux pédologues

A - Caractéristiques générales des photographies aériennes

a - Classification des photographies aériennes

Cette classification s'effectue d'après l'inclinaison de l'axe optique. On distingue :

- les photos verticales : axe optique vertical ou voisin de la verticale ;
- les photos verticales divisées : résultant du jumelage de divers appareils photographiques légèrement inclinés de part et d'autre de la verticale. Les champs latéraux des appareils se couvrent à peu près de 20°. L'inclinaison des appareils, inférieure à 8°, permet parfois de considérer ces photographies comme verticales. Elles ont pour avantage de couvrir un champ plus grand qu'avec un seul appareil ;
- les photos obliques : toute photographie dont l'axe optique fait avec la verticale un angle supérieur à 8°.

α - obliques bases : obliques sur lesquelles l'image de l'horizon ne figure pas ;

β - panoramiques : obliques sur lesquelles figure l'image de l'horizon.

REMARQUES . — En pédologie, on utilise presque exclusivement les photographies verticales et par la suite nous ne tiendrons compte que de ces documents.

b - Format des photographies

Variable avec les chambres utilisées. On distingue les formats suivants :

- . 13 x 18 = focale 200 ou 150
- . 18 x 18 = focale 125
- . 18 x 24 = armée de l'air - les chambres ne sont pas métriques
- . 24 x 24 = chambres américaines T 5.

c - Repères

Sur les photographies réalisées avec chambres métriques. Ces photos portent 4 repères situés respectivement au milieu de chaque côté et permettant d'en reconstituer le centre, pied de l'axe optique, appelé point principal.

d - Nomenclature

Sert à reconnaître les photographies car chacune d'elles appartient à une bande prise par le même appareil sur le même film et porte un numéro d'ordre dans cette bande. En plus du n° d'ordre dans le film, chaque photographie est livrée généralement avec une série d'indications fournissant les caractéristiques de la photographie et qui sont :

- le numéro de la mission ;
- la date de prise de vue ;
- l'heure, qui sert à l'orientation des photographies ;
- la distance focale de l'objectif utilisé ;
- éventuellement, l'altitude de prise de vue ou l'échelle ;
- parfois aussi la photographie d'un niveau à bulle ou l'enregistrement du soleil.

e - Nature des clichés

Plaques photographiques (rarement) : négatifs ou positifs, sur papier mat ou luisant, mince ou cartonné à la demande et suivant l'utilisation des documents.

En pédologie, le plus souvent positif, luisant et mince.

B - Étude élémentaire des photographies aériennes

a - Identification

A pour but de préciser quelle partie du terrain représente la photographie. On compare la photographie à la carte et, pour ce faire, on identifie simultanément les points de la carte et ceux du terrain. On recherche les détails caractéristiques : voies de communications, routes, carrefours, cours d'eau, agglomérations, etc.

REMARQUES. — Il faut toujours orienter la photographie de manière que les ombres soient dirigées vers l'observateur, ce qui donne l'impression du relief, sinon l'on s'expose à des inversions.

b - Orientation

C'est une opération qui consiste à tracer sur une photographie la direction du Nord ou plus simplement à déterminer le gisement d'une direction donnée.

Pour orienter une photographie verticale non identifiée, on étudie la direction des ombres en tenant compte de l'heure de la prise de vue. L'angle de la direction de ces ombres avec le Nord est une fonction de l'heure que l'on a par des graphiques. Pratiquement, ce procédé donne une orientation approchée, mais suffisante pour l'identification.

Si la photographie est identifiée, on compare deux points a et b de cette dernière à deux points A et B de la carte. On peut alors avoir une bonne orientation en mesurant le gisement de la droite AB avec le Nord.

c - Echelle élémentaire

L'échelle est donnée par le rapport entre les dimensions d'un objet et celles de son image photographique.

Dans le cas d'un terrain horizontal et d'une photographie rigoureusement verticale, la photo est une figure semblable du terrain et le rapport de longueurs homologues $\frac{ab}{AB} = \frac{1}{E}$ est l'échelle de la photo, d'où :

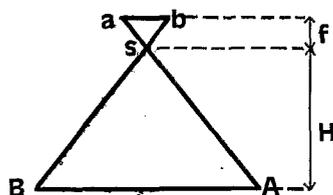


Fig. 11

$$\frac{1}{E} = \frac{f}{H} \quad \frac{\text{focale}}{\text{Hauteur du vol}}$$

Dans le cas général, l'axe optique n'est pas rigoureusement vertical et le terrain n'est jamais plat. La photo n'est donc plus une figure semblable du terrain. L'échelle est variable d'un point à l'autre de la photo. Le rapport $\frac{f}{H}$ ne définit plus qu'une échelle moyenne.

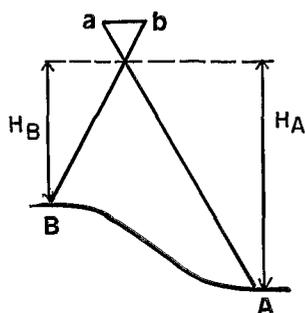


Fig. 12

$$H_A > H_B$$

$$\frac{f}{H_B} > \frac{f}{H_A} \quad \text{l'échelle est plus grande pour les zones élevées du terrain.}$$

Suivant le rôle que l'on compte faire jouer à la photographie la prise de vue se fera à une certaine échelle. Il faudra donc jouer et sur la hauteur de vol et sur la focale.

Les échelles retenues sont généralement légèrement inférieures à l'échelle adoptée à la restitution photogrammétrique.

Les échelles les plus fréquentes en pédologie sont les suivantes :

1/10 000 1/25 000 1/40 000 à 1/60 000

L'échelle moyenne donne les meilleurs résultats.

d - Surface couverte par les photographies aériennes

On appelle surface couverte la surface de tout le terrain dont on a l'image. La valeur de cette surface dépend de l'échelle et du format de la photographie. Par exemple :

13 x 18	à l'échelle de	1/25 000	couvre un rectangle de	3 km x 4,5 km
18 x 18	"	1/40 000	"	7 km x 7 km
23 x 23	"	1/40 000	"	9 km x 9 km

Pour déterminer la surface couverte par une photographie, on reporte sur une carte le contour de la surface du terrain dont la photographie donne l'image. Ceci ne peut se faire qu'après l'identification, l'orientation et la mesure de l'échelle moyenne de la photographie. On peut utiliser trois méthodes différentes :

- méthode d'identification des bords de la photographie ;
- méthode d'identification des coins de la photographie par le compas réducteur ;
- méthode de l'équerre articulée.

La première méthode est la plus précise.

En portant sur une même carte les surfaces couvertes par toutes les photographies d'une même mission, on détermine la surface couverte par la mission. Pratiquement, toute mission photo doit être livrée munie d'une indication de la surface couverte, appelée tableau d'assemblage.

Pour être exploitables, les missions aériennes ne sont pas exécutées au hasard. Le terrain est couvert d'une façon systématique par photos constituant des bandes et par bandes successives, et il faut que ces photographies et ces bandes se chevauchent. Le chevauchement des photographies n'est pas quelconque. Pour permettre l'examen stéréoscopique, il est indispensable que chaque point d'une zone étudiée appartienne à deux photographies. Un recouvrement de 50% est donc théoriquement suffisant, mais par sécurité on le porte à 60% et on le fixe à 15/20% entre deux bandes successives.

e - Observation des photographies isolées

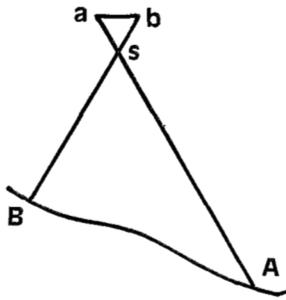


Fig. 13

La photographie aérienne est une perspective obtenue en coupant le faisceau perspectif de sommet S par le plan de l'émulsion. A l'œil, la meilleure observation d'une photographie isolée sera celle faite dans des conditions telles que le faisceau perspectif soit approximativement reconstitué. Pour cela on place l'œil au droit de la normale au centre de la photo et à la focale de la chambre de prise de vue. Mais l'œil impose sa distance d'observation : distance minimum de vision distincte 250 mm ; différentes focales utilisées 125, 150, 200 mm.

On est donc obligé, pour tirer le maximum de l'examen à l'œil :

- . d'opérer sur des épreuves agrandies dans le rapport $\frac{250}{f}$ ou
- . d'observer derrière une loupe.

Comme l'examen se fait avec les deux yeux, il se produit simultanément une accommodation maximum (celle correspondant au minimum de vision distincte) et une convergence des axes de fixation des deux yeux, ce qui élimine la sensation du relief. Cependant, certains phénomènes permettent de donner une impression de relief.

- la disposition des ombres, mais avec les ombres toujours entre l'observateur et l'objet ;
- les détails planimétriques, réseaux hydrographiques, végétation, etc.

Mais l'étude du relief est très nettement facilitée par l'examen stéréoscopique.

C - Théorie mathématique des photographies aériennes

a - Généralités

Le négatif d'une photographie aérienne est la projection centrale, sur un plan, du sol et des objets qui s'y trouvent. Le centre de projection est le centre optique de l'objectif ; le plan de projection, le plan focal. Le positif peut être considéré comme le symétrique du négatif par rapport à ce centre optique. C'est donc une projection centrale du sol, sur ce plan, appelé plan de l'image.

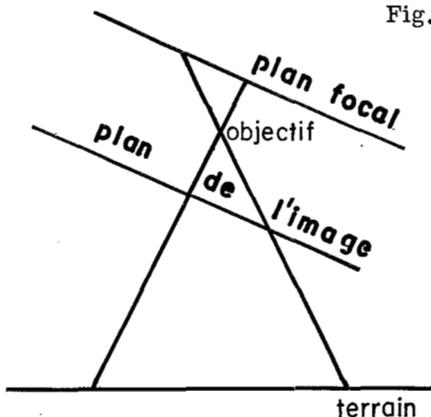


Fig. 14

Du point de vue géométrique, une photographie a donc toutes les propriétés des projections centrales sur un plan ; à savoir :

- l'image d'une droite est une droite ;
- l'image de plusieurs droites concourantes est formée de plusieurs droites concourantes ;
- le rapport anharmonique des images de quatre points alignés est égal à celui de ces quatre points ;
- le rapport anharmonique des images de quatre droites concourantes situées dans un même plan est égal à celui de ces quatre droites

$$(A, B, C, D) \frac{AC}{AD} = \frac{BC}{BD}$$

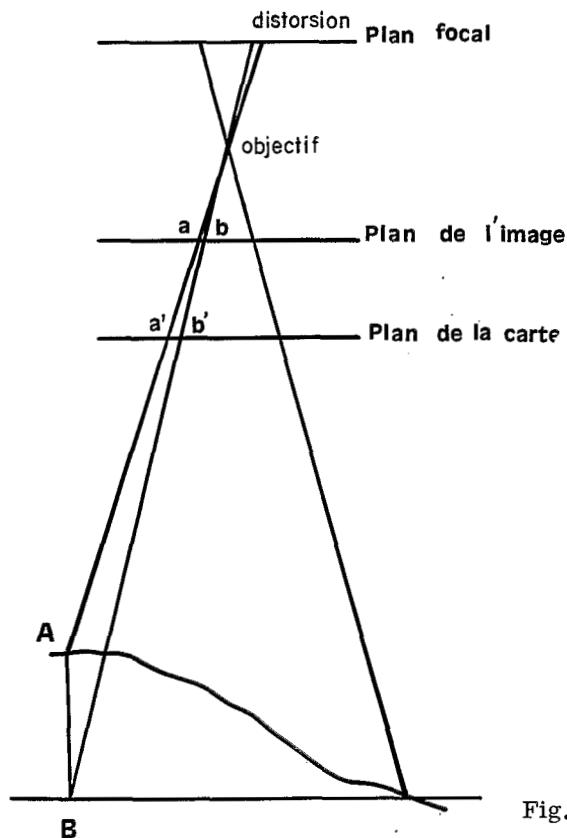


Fig. 15

La carte peut être également considérée comme la projection centrale sur un plan de la projection orthogonale des points du terrain sur un plan horizontal de référence. Il peut arriver que la photographie soit une figure géométrique semblable à la carte. Mais la plupart du temps une photographie présente par rapport à cette figure semblable à la carte des déformations. Ces déformations s'appellent *distorsions*, chaque point étant déplacé de la position qu'il occuperait dans un cas idéal. En pratique, les distorsions proviennent du relief du terrain ou de l'inclinaison de l'appareil. On les appelle **distorsions géométriques**.

b - Etude de la photographie verticale d'un terrain plan horizontal

Dans ce cas, le plan de l'image est parallèle au plan du terrain. La photographie est alors la projection centrale d'un plan parallèle : c'est une homothétie. Elle ne présente aucune distorsion. Elle est une réduction strictement semblable au terrain lui-même. Elle est analogue à une carte. L'échelle est constante en tous les points de la photographie et est égale au rapport d'homothétie entre la photographie et le terrain. Elle est donc le rapport entre la distance focale et l'altitude.

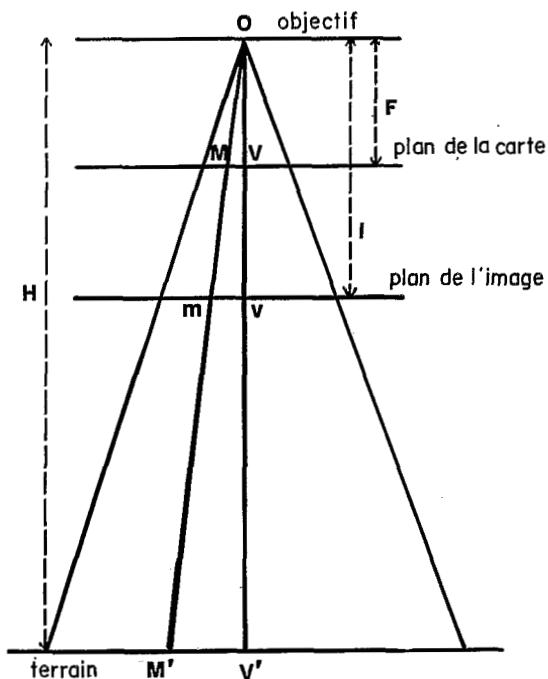


Fig. 16

Une carte à une échelle E d'un terrain plan horizontal peut être considérée comme la projection centrale du terrain à partir du centre optique sur un plan horizontal placé à une distance $OV = F$, telle que $E = \frac{F}{H}$.

Ainsi la photographie peut être considérée comme une homothétie de la carte à partir du centre optique, le rapport de cette homothétie étant : $\frac{e}{E} = \frac{f}{F}$.

Si l'on met en superposition la carte et la photographie de manière que v vienne en V , l'image photographique m d'un point M porté sur la carte est sur la droite VM . La photographie et la carte sont alors des figures homothétiques ayant comme centre d'homothétie V , et comme rapport d'homothétie $\frac{e}{E}$.

Ainsi les images photographiques m et cartographique M d'un même point du terrain M' sont toujours alignées avec V et on a toujours : $\frac{Vm}{VM} = \frac{e}{E}$.

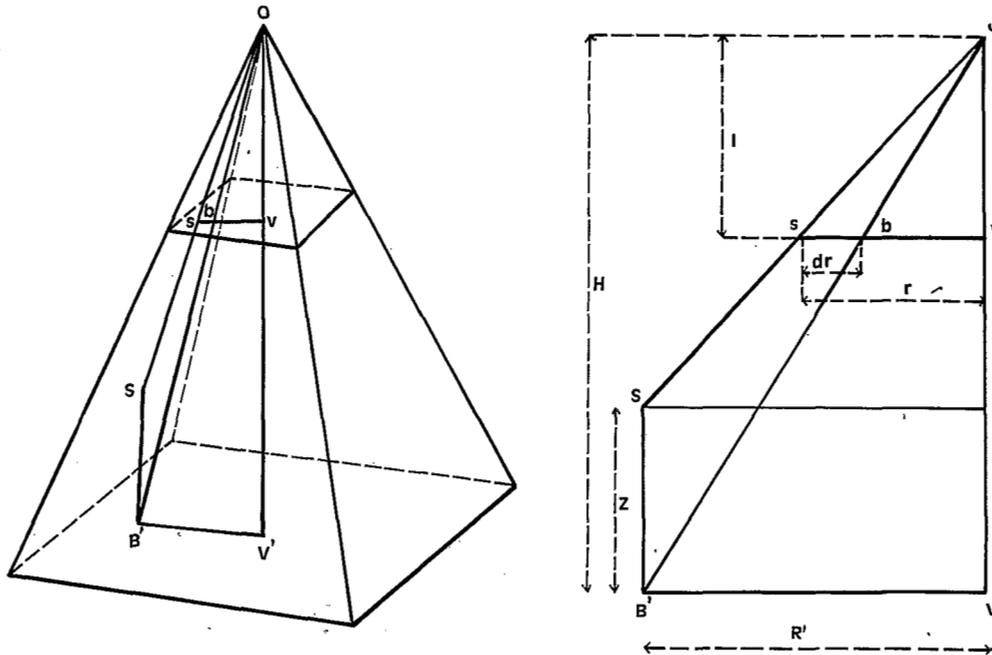
Donc, pour passer de la carte à la photographie, on ne fait subir des déformations que le long des droites passant par V . Toutes les distorsions sont radiales au point vertical de la photographie.

Théoriquement, ce cas simple est très peu fréquent. Pourtant on s'en rapproche assez souvent dans le cas de pays plats.

c - Etude de la photographie verticale d'un terrain accidenté

Pour simplifier le problème on suppose le cas d'un terrain se composant simplement d'un plan horizontal, dit plan de référence, et d'un point unique situé au-dessus de ce plan à la cote z . Il faut déterminer les relations existant entre l'image de ce point et les images des points du plan horizontal.

Fig. 17



Soient : O , le centre optique ; v , le point de rencontre de l'axe optique avec le plan de l'image ; f , la distance focale ; V' , le point de rencontre de l'axe optique avec le plan horizontal de référence ; S , un point situé au-dessus du plan de référence à la cote z ; B' , le

pied de la verticale abaissée de S sur le plan de référence ; A, l'image de S ; b, l'image de B' On pose également $V'B' = R'$; $vs = r$ et $bs = dr$.

L'image de la droite indéfinie B'S est une droite. L'image du point à l'infini de cette droite est le point v de la photographie. Il en résulte que sur une photographie verticale, l'image d'une droite verticale est une droite passant par le point vertical et, par conséquent, que les images b et s sont alignées avec v.

Ainsi, sur une photographie verticale, une variation de cote d'un point du terrain entraîne une déformation radiale au point O.

La distorsion dr entraînée par une variation de cote Z peut être assurée. En effet :

$$\frac{R'}{H} = \frac{r - dr}{f} \quad \text{et} \quad \frac{R'}{H - Z} = \frac{r}{f}$$

donc
$$\frac{H(r - dr)}{f} = \frac{r(H - Z)}{f}$$

$$H dr = Zr$$

et
$$\boxed{dr = Z \frac{r}{H}}$$

Cette formule définit la relation entre la déformation, la différence de cote des points au sol et l'éloignement de ces points à partir du point vertical.

En supposant une altitude de vue fixe, on peut établir un tableau à double entrée donnant les valeurs de dr en fonction de r et de Z.

Z \ r	5 cm	10 cm	15 cm
50 m	0 mm, 2	0, 4	0, 6
100 m	0 mm, 4	0, 8	1, 2
150 m	0 mm, 6	1, 2	1, 8
200 m	0 mm, 8	1, 6	2, 4

H = 10 000 m -

D - Restitutions élémentaires

a - Définitions et généralités

Restituer un point reconnu sur une photographie, c'est donner ses coordonnées dans un système choisi ou, si l'on préfère, c'est placer son image cartographique sur une carte ou sur une grille de coordonnées. Le système peut être celui des cartes de la région. Mais il peut arriver qu'on fasse des restitutions dans un système arbitrairement choisi sur place lorsque l'on ne possède pas de cartes ou lorsque celles-ci sont mal faites.

Lorsque l'on dispose de très bonnes cartes, la restitution est un problème très simple ; elle se réduit à une identification :

- . ou bien l'objet reconnu est confondu avec un détail planimétrique porté sur la carte ;
- . ou bien cet objet est très près de détails portés sur la carte et on peut reporter "à vue" avec une précision suffisante.

Cependant, bien souvent, on a besoin de méthodes plus précises.

b - Restitution de la photographie verticale d'un terrain plan horizontal

Cette photographie est une figure semblable à la carte. Aussi la condition nécessaire et suffisante, pour qu'on puisse restituer tous les points d'une telle photographie, est qu'on connaisse les images cartographiques A et B de deux points a et b de la photographie. Pour restituer un point m il suffira de construire sur la carte un triangle A B M semblable au triangle abm de la photographie.

c - Restitution des photographies verticales d'un terrain quelconque

. Procédé du relèvement photographique

La propriété fondamentale d'une photographie verticale est que toutes ses distorsions sont radiales au centre de la photographie.

Considérons une photographie P1 dont V1 est le centre. V1 est le point de la carte dont v1 est l'image. Prenons une seconde photographie P2 avec son centre V2 - V2 est le point de la carte dont v2 est l'image - v'1 est l'image de v1 sur P2 et v'2 l'image de v2 sur P1.

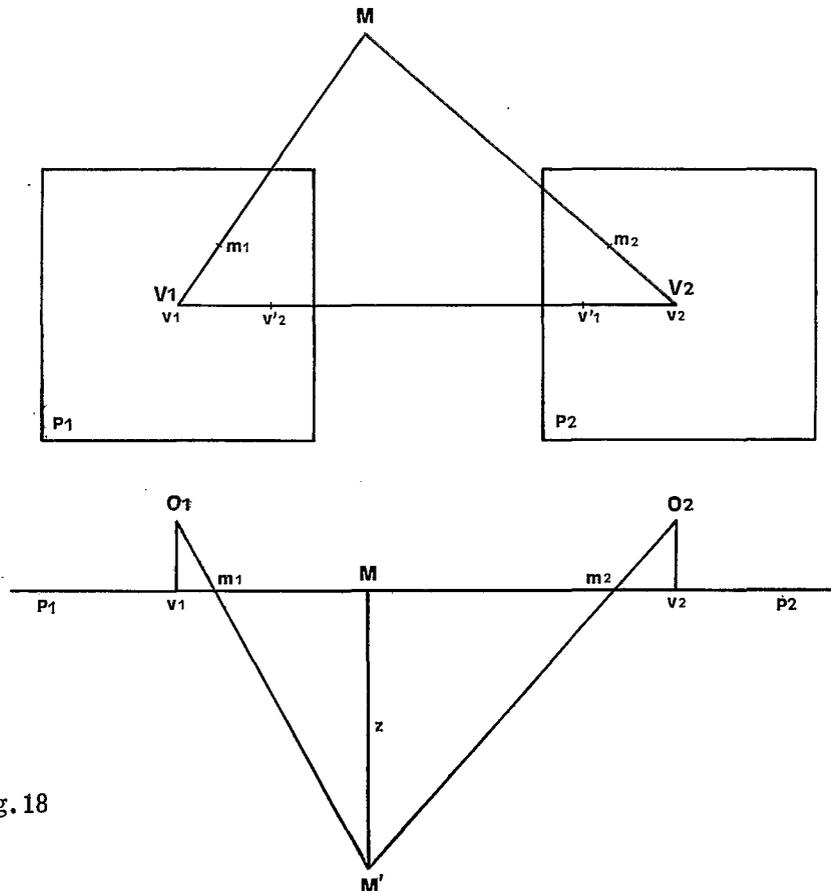
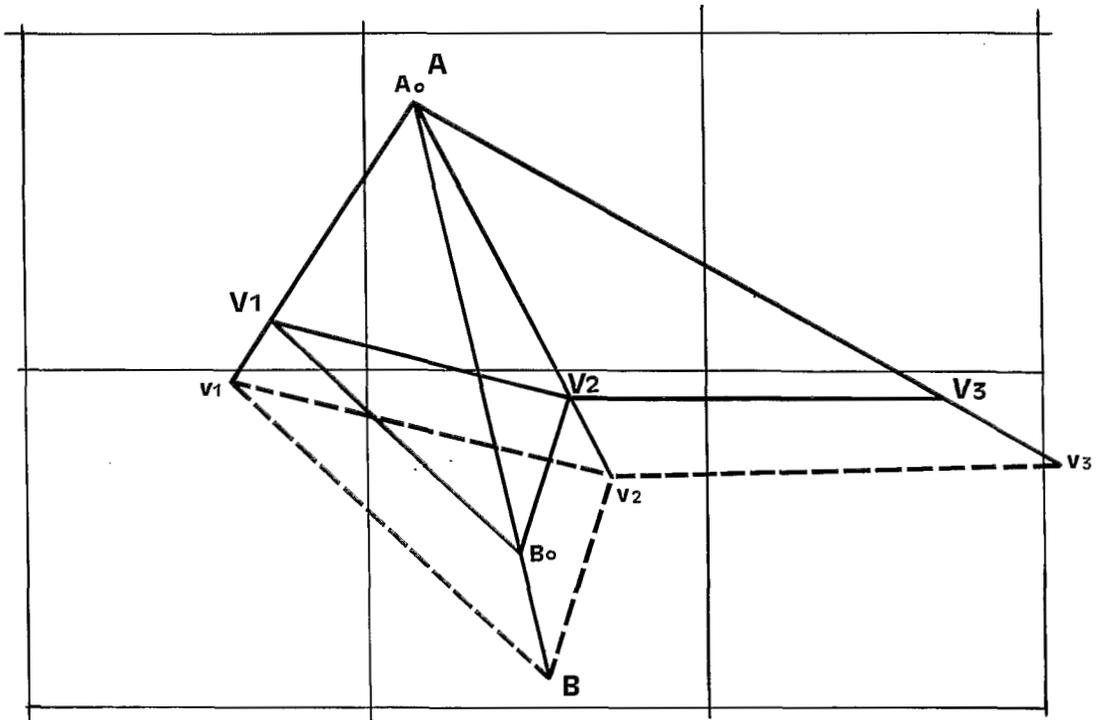


Fig. 18

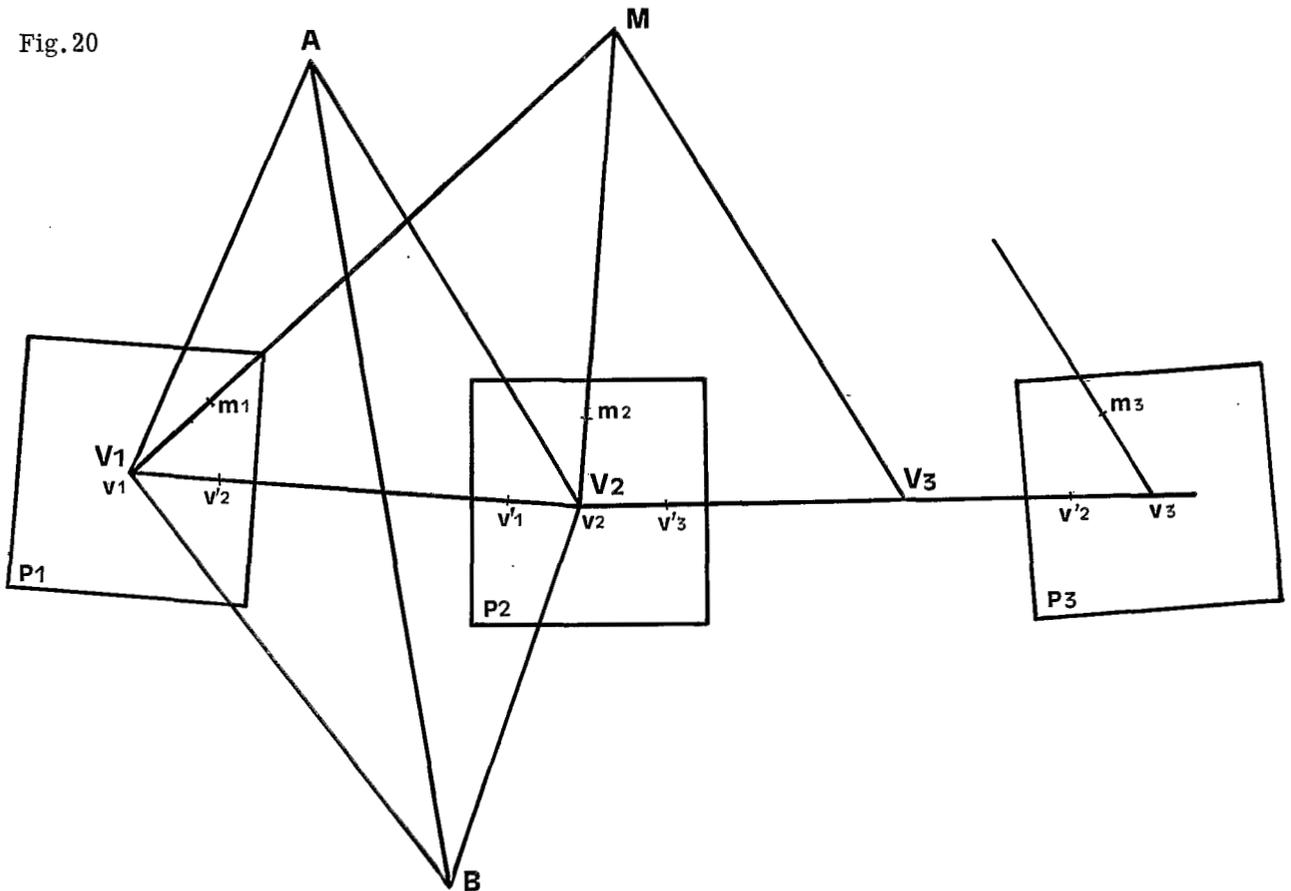
Plaçons P1 sur la carte de manière que v1 vienne sur V1 et que v'2 vienne sur la droite V1 V2, P1 est ainsi orienté. Si m1 est l'image photographique sur P1 d'un point du terrain, l'image cartographique de ce point M sera sur la droite V1 m1. Plaçons maintenant P2 de manière que v2 vienne sur V2 et que v'1 vienne sur V1 - V2, P2 est également orienté.

Fig. 19



PASSAGE AU SYSTEME DEFINITIF

Fig. 20



Si m_2 est l'image sur P2 du point du terrain dont m_1 est l'image sur P1, l'image cartographique M de ce point sera sur la droite V2 m_2 . D'où le procédé restitution - On place P1 et P2 comme indiqué ci-dessus, On trace V1 m_1 et V2 m_2 . La restitution M du point cherché est à l'intersection de ces deux droites.

Pour avoir plus de précision, on opérera sur trois photos consécutives :

$$P_{n-1}, P_n \text{ et } P_{n+1}$$

Un cas exceptionnel est celui où m_1 se situe sur la droite V1 v'_2 et, par conséquent, m_2 sur la droite V2 v'_1 . Dans ce cas, on raisonne dans un plan vertical passant par les axes des deux appareils de prise de vue. L'altitude restant pratiquement la même, on a :

$$\frac{v_1 M}{v_1 m_1} = \frac{f + z}{f} = \frac{v_2 M}{v_2 m_2}$$

donc M divise le segment V1 V2 dans le rapport $\frac{v_1 m_1}{v_2 m_2}$, ce qui définit sa position.

Une propriété analogue peut d'ailleurs être établie pour tous les points même situés hors du plan vertical des deux centres, car on a toujours :

$$\frac{v_1 M}{v_1 m_2} = \frac{f + z}{f} = \frac{v_2 M}{v_2 m_2} \text{ ou encore } \frac{V_1 M}{v_2 M} = \frac{v_1 m_1}{v_2 m_2}$$

Ceci donne comme lieu du point M la perpendiculaire au segment V1 V2 menée par le point le divisant dans le rapport $\frac{v_1 m_1}{v_2 m_2}$.

Tout le procédé est basé sur la connaissance des restitutions V1 V2 et des centres des photographies successives.

Parfois, le problème est résolu, les centres des photographies étant marqués sur les cartes et sur un carroyage et l'on applique le procédé schématisé ci-dessus.

Mais il faut très souvent aussi déterminer avec précision la restitution des centres des photographies successives de terrains inconnus, sans carte ni canevas d'aucune sorte.

Pour ce faire, on prend une première photographie et on pique arbitrairement sur un papier le point V1 que l'on considère comme la restitution du point principal. On fixe alors une direction quelconque à partir de V1, sur laquelle on fixe arbitrairement V2. On a ainsi déterminé une échelle et une orientation pour la restitution. Il reste alors à placer V3, V4, etc. dans ce système.

On place P1 sur le papier de façon que v_1 soit sur V1 et v'_2 sur la droite V1 V2. On fait de même pour P2.

La direction V2 v'_3 définit alors la droite V2 V3 que l'on trace. A partir de P1 et de P2, on restitue un point quelconque M qui a une image m_1 sur P1 et m_2 sur P2. Si l'on place P3 de manière que V3 soit sur la droite V2 V3 et que v'_2 soit aussi sur cette droite, le point M a son image en m_3 sur P3. On trace $m_3 V_3$ et le point V3 est exactement placé si cette droite passe par M. Il est donc nécessaire de tracer à partir de M une droite parallèle à $m_3 v_3$ et son intersection avec la droite V2 v_3 donne la position du point V3.

On aura naturellement une plus grande précision en faisant la même construction à partir de plusieurs points.

Après avoir placé V3, on continuera par la même méthode pour fixer V4, V5, etc. On arrive ainsi à avoir un schéma des positions successives des centres photographiques avec une échelle et une orientation arbitraire. Pour passer à un système choisi, il suffit de connaître sur le terrain une base AB dont on connaît les coordonnées des extrémités dans un système

quelconque et dont on a les images sur la bande de photographies considérées. On a ainsi les éléments de similitude qui permettent de passer du système arbitraire au système choisi.

Lorsque l'on ne dispose pas de bases précises, mais que l'on possède une carte, on effectue la similitude des lignes des centres à partir de deux points reconnus simultanément sur la carte et les photographies.

Avec des photographies au 1/20 000 et un quadrillage de restitution également au 1/20 000, la précision est inférieure à 50 m.

E - Vision stéréoscopique

Quand on étudie un objet, il est important de concevoir sa forme exacte, donc de le définir dans ses trois dimensions, à savoir, les deux dimensions dans un plan perpendiculaire au plan visuel et une dimension de profondeur.

Les deux premières dimensions sont du ressort de la vision monoculaire, ce qui correspond à une photographie unique d'un objet. L'impression de profondeur de champ est difficile à obtenir par cette méthode (interprétation des ombres, des accidents planimétriques, etc.). Par contre, la vision binoculaire nous offre cette possibilité, l'impression du relief résultant du fait que chaque œil saisit un même objet sous un angle différent. Aussi a-t-on cherché à avoir sur des photographies une vision binoculaire réelle. Pour ce faire, on examine simultanément deux photographies du même objet précis de deux points différents, l'une avec un œil et l'autre avec l'autre œil, à travers un instrument appelé "stéréoscope". La vision permettant de décélérer ainsi les différences de profondeurs s'appelle "vision stéréoscopique".

a - Analyse du phénomène de la vision binoculaire

Lorsqu'un observateur regarde à l'œil un des objets placés à des distances raisonnables, il a une notion de la distance relative des différents objets. Il se fait une idée d'une dimension en profondeur de l'espace qu'occupaient ces objets.

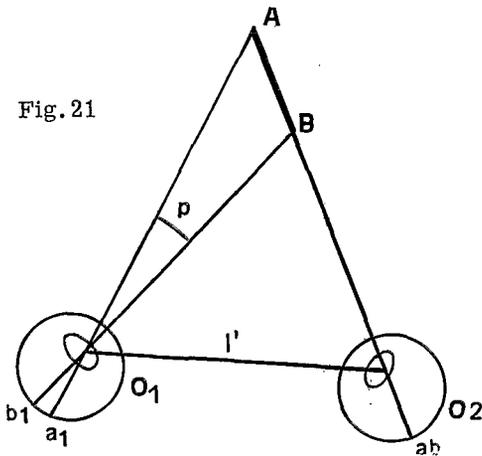
Ce phénomène de perception de la profondeur est complexe. Il se compose parallèlement :

- de l'accommodation des cristallins ;
- de la convergence des axes optiques des deux yeux ;
- de la perception des différences de brillance des divers objets, cette brillance diminuant rapidement avec la distance ;
- de la perception des sites et de leurs perspectives ;
- enfin, d'un mécanisme psychologique du cerveau qui permet de concevoir la dimension "profondeur" (comme dans le cas d'une vision monoculaire).

En fait, il est possible, lors du raisonnement d'éliminer certains de ces phénomènes. On suppose, en particulier, que l'accommodation et la convergence sont toujours liées l'une à l'autre ; que les différences de brillance n'existent pas (réalisable matériellement par un éclairage convenable) ; que les autres causes de perception de la profondeur sont nulles (objets tous au même site, défaut de perceptive) ; enfin, que l'observateur a la faculté de percevoir psychologiquement la profondeur.

Dans ces conditions, dans la vision binoculaire normale, l'impression du relief résulte du fait que chaque œil saisit un même objet sous un angle différent. L'image donnée par l'œil gauche diffère de celle donnée par l'œil droit, mais ces deux images sont perçues comme une seule par le cerveau. Il y a fusionnement binoculaire, ce qui donne l'impression de la profondeur.

Fig. 21



Dans le cas simple de la figure A B, la différence entre les deux images se traduit par l'image a1 b1 sous tendue par l'angle p. (parallaxe stéréoscopique) entre les deux points A et B. Lorsqu'elle devient trop faible, l'observateur ne fait plus de différence entre A et B. Cette limite est appelée acuité visuelle stéréoscopique. Elle est de 50'' pour un individu normal.

Analysons plus en détails ce phénomène.

Pour que l'on ait une sensation de profondeur entre un point A et un point B, il faut que les images de A et B soient distinctes au moins sur l'une des rétines. On peut donc raisonner en supposant que les images sont confondues sur l'une des rétines, c'est-à-dire que les points A et B sont alignés sur le centre optique d'un des cristallins.

Pour que A et B apparaissent différents, il faut qu'ils soient dissociés sur l'autre œil. Il faut donc que ces points soient vus sous un angle supérieur à son pouvoir séparateur s

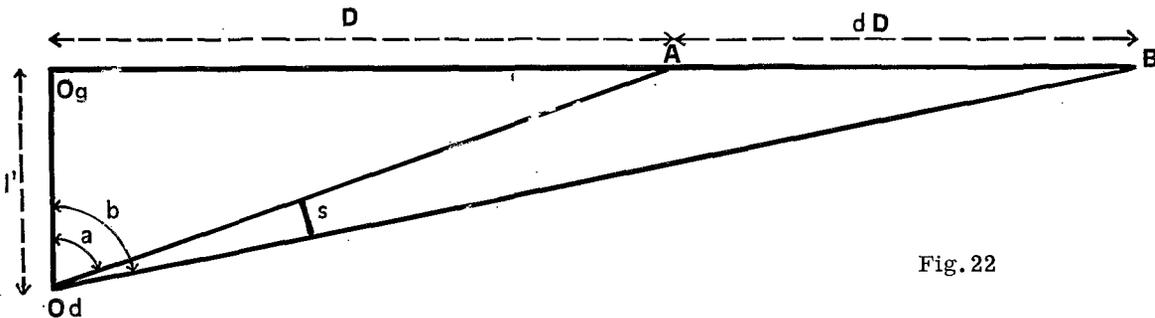


Fig. 22

soit : s le pouvoir séparateur de l'œil (en radians)

Og et Od les deux yeux de l'observateur

a l'angle $\widehat{Og Od A}$

b " $\widehat{Og Od B}$

l' l'écartement des yeux de l'observateur

D la distance du point A

D + dD " " B

On a $\text{tga} = \frac{D}{l'}$ et $\text{tgb} = \frac{D + dD}{l'}$

L'œil droit voit les points A et B séparés par un angle $(a - b) = p$. Cet angle est appelé parallaxe des points A et B par rapport à l'œil droit. Ce dernier distingue A et B si $p > s$.

$$p = \text{tg}(a - b) = \frac{\text{tga} - \text{tgb}}{1 + \text{tga} \text{tgb}} = \frac{l' dD}{l'^2 + D^2 + D dD}$$

donc
$$p = \frac{l' dD}{l'^2 + D^2 + D dD} \quad 1$$

et

$$dD = p \frac{l'^2 + D^2}{l' - p \cdot D} \quad 2$$

Si B est à l'infini, on a $\text{tg } b = \text{infini}$ et par suite $p = \text{cotg } a$. Le point A sera dissocié de B, si $p > s$ d'où $\text{cotg } a > s$ et $\frac{1'}{D} > s$ ou $D < \frac{1'}{s}$.

Sinon les 2 points sont indissociables.

L'observateur ne peut donc avoir la vision stéréoscopique que jusqu'à cette distance D, qui, pour un homme normal dont $l' = 6,5 \text{ cm}$ et $s = 3/10\,000$, est de 200 mètres environ.

Mettons A au "punctum proximum", c'est-à-dire $D = 12 \text{ cm}$ environ, $dD = 0 \text{ mm}$. Donc à cette distance, on peut percevoir des différences de distances de l'ordre de $1/10$ de mm.

b - Vision binoculaire des images à l'aide d'un stéréoscope

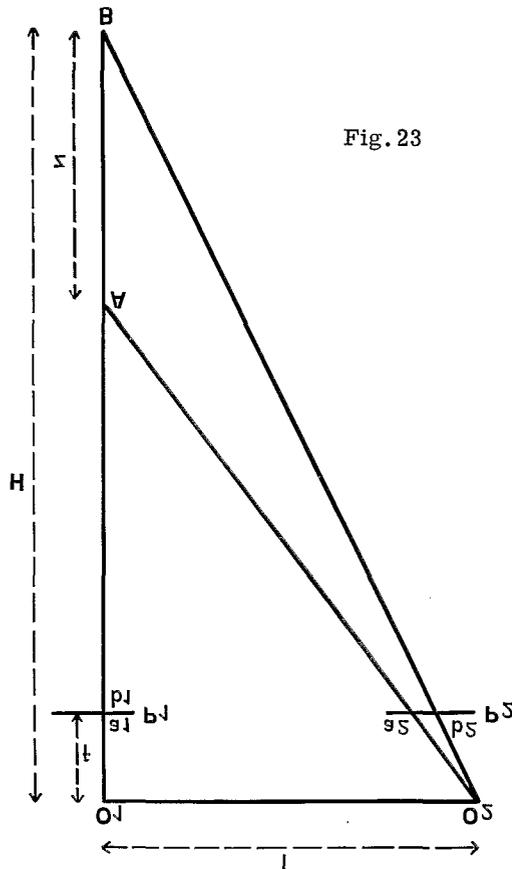


Fig. 23

Soit un objet vertical A B. On prend deux photographies aériennes de cet objet P1 et P2 dont l'une d'elles est rigoureusement verticale et dont l'autre, de la même hauteur, est prise avec le même appareil mais dans une position légèrement écartée. Soient O1 et O2 les deux positions du centre optique ; f la distance focale ; H l'altitude de prise de vue ; z la hauteur AB et l la distance O1 et O2 . Sur P1 les images de A et B sont confondues en a1 et b1 ; sur P2 les images de A et B sont distinctes en a2 et b2.

On a

$$a_2 b_2 = 1 \frac{f z}{H^2}$$

Si l'on regarde P1 avec l'œil gauche et à travers une lentille de manière que l'image apparaisse à l'infini, ce qui est le cas si la lentille est à une distance de P2 égale à sa distance focale f' et que l'on regarde P2 de la même façon avec le même type de lentille mais avec l'œil droit. Tous les points des deux photographies sont rejetés à l'infini et l'on se trouve dans le cas décrit à la fin du paragraphe précédent.

Pour voir distinctement B, il faut voir simultanément son image sur P1 avec l'œil gauche et sur P2 avec l'œil droit, et pour cela il faut réaliser une certaine convergence ; de même pour A. On a introduit ainsi une différence de sensation qui commande justement l'impression de profondeur par la vision stéréoscopique.

Les deux images a2 et b2 sont vues par l'œil droit sur un angle $s' = \frac{a_2 b_2}{f'}$.

Si cet angle s' est suffisamment faible, on verra distinctement avec l'œil droit les deux points a2 et b2, et avec les deux yeux on verra simultanément les images fusionnées A et B.

Ceci est le cas général des photographies aériennes.

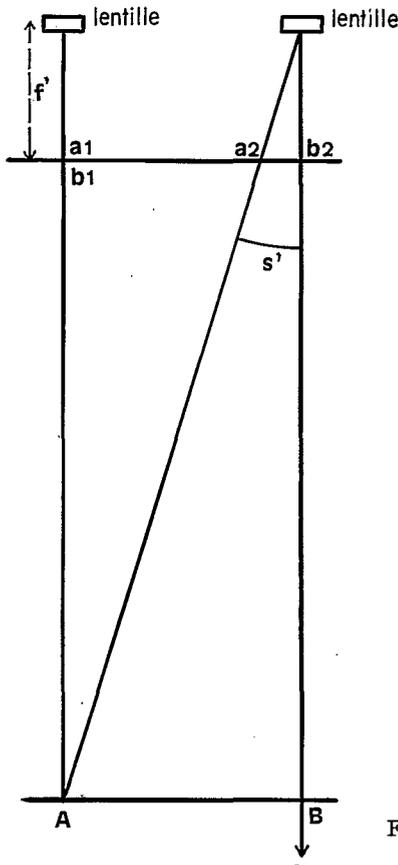


Fig. 24

Si on prend deux photographies successives P1 et P2 que nous plaçons avec leur orientation exacte mais de façon que leurs points principaux soient à une distance égale à l'écartement des yeux l' ; que l'on regarde P1 avec l'œil gauche, à travers une lentille de distance focale f placée à une distance f' du cliché et de même pour P2 avec l'œil droit, l'assemblage ainsi réalisé porte le nom de stéréoscope. On verra tous les points de chaque photographie respectivement avec chaque œil comme s'ils étaient à l'infini.

Ceci limite le facteur accommodation et évite considérablement la fatigue des yeux. Pour fusionner les images des divers points, il faudra réaliser des petites différences de convergence qui donneront la conception du relief.

On peut exprimer s' en fonction des caractéristiques des photographies et du stéréoscope.

$$s' = \frac{ab}{f'} = \frac{1.2.f}{H_2 f'} = z \frac{1}{f'} \frac{1}{H} \frac{f}{H}$$

$$\frac{f}{H} = e \text{ échelle des photographies}$$

$$\frac{1}{H} = \text{convergence de la paire stéréoscopique, la même pour toutes les paires d'une même bande} = C.$$

$$\text{donc } s' = z \frac{1}{f'} . C . e$$

$$\text{L'impression du relief dépend du rapport } \frac{s'}{e} = z \frac{1}{f'} . C$$

Elle sera donc d'autant plus forte que la convergence sera grande. C'est pourquoi les photographies à petite échelle donnent des impressions de relief supérieure à celle des photographies à grande échelle.

Par ce procédé, on peut chercher la limite perceptible du relief pour un format 24 x 24 avec un stéréoscope courant dont f' = 12 cm, 1 x e étant égal à 60% du format, soit 14 cm ou à

$$s' = \frac{14}{12} - \frac{z}{H} \neq \frac{z}{H}$$

$$\text{Le relief est perçu si } \frac{z}{H} > s \text{ ou } \frac{z}{H} > 3/10\,000$$

$$\text{dont pour } H = 10\,000 \text{ m, } z = 3 \text{ m}$$

$$H = 5\,000 \text{ m, } z = 1,5 \text{ m.}$$

Donc, en moyenne, la vision stéréoscopique permet de déceler des différences de relief de 1 à 3 mètres.

c - Montage d'un stéréogramme

Il faut que les deux photographies P1 et P2 soient des images très proches l'une de l'autre ; donc prises avec le même appareil, à la même altitude et de deux points rapprochés. Deux photographies remplissant ces conditions forment une paire stéréoscopique et leur assemblage s'appelle stéréogramme.

- Conditions géométriques et optiques

Le montage du stéréogramme, d'une part, la position du stéréoscope par rapport au stéréogramme, d'autre part, doivent remplir certaines conditions :

α - à la prise de vue, toutes les droites joignant les points homologues des deux photographies sont parallèles à la base de prise de vue. Cette propriété doit être respectée sur le stéréogramme ;

β - les images virtuelles données par les lentilles doivent être rejetées à quelques mètres de façon à permettre une observation sans fatigue. D'où deux conditions :

- . le stéréogramme est voisin du plan focal des lentilles ;
- . la longueur des droites joignant les points homologues est inférieure ou égale à l'écartement des lentilles - lequel est voisin de l'écartement des yeux.

γ - la ligne joignant les centres optiques des lentilles doit être parallèle à la base de prise de vue, c'est-à-dire à la droite joignant les points principaux du stéréogramme.

- Montage pratique

Soient P1 et P2 deux photographies successives d'un couple stéréoscopique. On joint le centre V1 de la photo P1 et V2. On cherche sur P1 l'image de V2 soit v2 et sur P2 l'image de V1 soit v'1. Sur une planchette on aligne les quatre points V1 v2 v'1 et V2 puis on dispose les photographes de telle façon que les points homologues de P1 sur P2 se situent à distance voisine de l'écartement des yeux.

R1. Les photographies doivent toujours être bien planes, sinon on risque des déformations.

Le stéréogramme ainsi construit, on procède à son examen à l'aide d'un stéréoscope dont l'écartement des oculaires est égal ou légèrement supérieur à l'écartement des yeux. Il faut aussi faire très attention à ce que la droite joignant les axes optiques soit parallèle aux droites joignant les points homologues.

On observe alors à travers les oculaires en adaptant les yeux à l'infini ce qui demande un certain entraînement.

Pour examiner l'ensemble de la surface de terrain commune aux deux photographies, on déplace le stéréoscope par translation pour bien l'amener au-dessus des zones successives à étudier.

R2. Il ne faut jamais faire des montages à l'estime qui ne sont qu'approchés, qui fatiguent l'observation et déforment parfois le relief.

- . si une partie de la photographie P1 recouvre une partie de P2, il suffit pour étudier cette zone de faire passer P2 par dessus P1 ;
- . il faut toujours éclairer fortement le stéréogramme ou se mettre face à la lumière.

d - Différents types de stéréoscopes

On peut les classer en deux grandes catégories :

- les stéréoscopes à simple réfraction, souvent appelés plaquettes stéréoscopiques,

- servant à l'examen des photos de petits formats, ou à l'examen sur le terrain ;
 - les stéréoscopes à réfraction - réflexion, ou stéréoscopes à miroirs, permettant l'examen des photos de tous formats.

e - Examen stéréoscopique sans stéréoscope

Il est parfois utile de pouvoir se passer de stéréoscope. Pour cela, il est nécessaire par une gymnastique oculaire et un entraînement progressif, de séparer l'accommodation de la convergence. L'exercice préliminaire est le suivant : placer un doigt devant les yeux à la limite de vision distincte, soit en général 25 cm ; accommoder successivement sur le doigt puis sur le fond du paysage. Quand on regarde à l'infini, le doigt paraît se dédoubler et devient flou. L'exercice consiste à réussir à accommoder de nouveau sur les deux images, sans qu'elles fusionnent. Quand on a réussi cet exercice, on peut passer à l'examen stéréoscopique direct d'un couple.

On constitue son stéréogramme comme précédemment, mais avec une distance de 5 cm au lieu de 6, 6,5 entre les points homologues. On place les yeux comme on placerait les oculaires du stéréoscope mais à la distance minimum de vision distincte (25 cm). On repère deux détails homologues parfaitement nets. On laisse alors les yeux se remettre en parallélisme à l'infini. On a l'impression que chacune des photographies se dédoublent (l'une restant fixe, l'autre étant mobile). Au moment où les deux images mobiles se rejoignent, le fusionnement se produit. On cherche alors à accommoder sur cette image sans qu'elle se dédouble. On peut parvenir ainsi à une excellente vision stéréoscopique, mais il faut souvent un très long entraînement et parfois on n'y parvient jamais.

F - Mesures

a - Mesures des longueurs et des angles

Ce sont les seules mesures que l'on peut faire sur une photographie. Mais c'est à partir d'elles qu'on pourra calculer des hauteurs, des pentes, des vitesses et même des temps.

La mesure des longueurs se fait comme toutes les mesures de longueur :

- . au double décimètre
- . à la loupe micrométrique
- . à la vis micrométrique.

On se sert du double décimètre pour des longueurs supérieures à 10 cm ; l'erreur absolue ne dépasse généralement pas 0,25 cm.

Pour des longueurs inférieures à 1,5 cm, on se sert de la loupe micrométrique en faisant généralement quatre mesures dont on tire la moyenne. L'erreur absolue peut être inférieure à 1/10 de cm.

Enfin, pour plus de précisions, on utilise une vis micrométrique (généralement partie droite d'une barre parallaxe). L'erreur absolue peut alors atteindre 1/100 de cm.

Les mesures d'angles se font tout simplement par rapporteur.

b - Mesure des échelles

$$\text{p.p.m.} \quad \frac{1}{e} = \text{échelle photo}$$

$$\text{Echelle réelle} \quad \frac{dl}{dD} \quad \text{quand } dl \text{ zero}$$

$$\text{Approximatif} \quad d = \frac{f}{H} \quad e = E \frac{ab}{AB} \quad \text{à partir de deux détails cotés.}$$

c - Mesure des hauteurs par la méthode des ombres

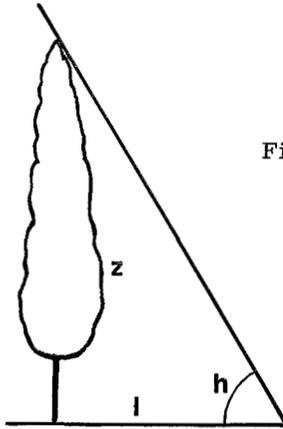


Fig. 25

La hauteur d'un objet vertical et la longueur de son ombre sur un plan horizontal sont liées par une relation faisant intervenir l'inclinaison des rayons solaires sur l'horizon.

z = hauteur d'un objet
 l = longueur de son ombre
 h = hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon

$$z = l \operatorname{tg} h.$$

l = longueur de l'image $\times \frac{1}{e}$ (e = échelle photographie).

Mesure micrométrique

La hauteur angulaire h dépend de la latitude, de la date, de l'heure.

L = latitude : déclinaison du soleil à la date de prise de vue ;
 AH = l'angle horaire du soleil.

$$\text{On a } \sin h = \sin D. \sin L + \cos D. \cos L \cos AH.$$

Pratiquement on se sert d'abaques donnant directement : $\operatorname{tg} h$.

L'erreur relative, variable avec les dimensions de l'objet peut être $\ll 1/50$.

R. Choisir des objets à ombres bien tranchées.

d - Mesure des hauteurs à l'aide de la barre parallaxe

Cette mesure s'appuie sur l'effet stéréoscopique. On sait, en effet, que la différence de cote z entre deux points A et B est liée à la disposition des images de A et de B ; a1, b1, a2, b2 sur deux photographies verticales P1 et P2 formant paires stéréoscopiques. Si l est la distance qui sépare les deux positions du centre optique au moment de la prise de vue, f la distance focale et H l'altitude, on a :

$$a_1 a_2 - b_1 b_2 = p \text{ (parallaxe)} = \frac{l \cdot f \cdot z}{H^2}$$

On peut exprimer p différemment en ne faisant intervenir que les mesures que l'on peut faire sur les photographies ; soit O1 et O2 les centres de P1 et P2 ; O'1 et O'2 leurs images sur les photographies correspondantes.

On mesure la moyenne des longueurs O1 O2 et O'1 O2 doit l''

Si e est l'échelle de la photographie, on a l'' = le

$$f = He$$

$$\text{et par suite et } \frac{H}{l''} = \frac{f}{e \cdot l''}$$

$$\text{D'autre part, } \frac{f}{l''} = \frac{e}{l''}$$

$$\text{donc } p = \frac{l'' \cdot fz}{eH^2} = \frac{l'' \cdot z}{H} = \frac{l''ze}{f}$$

et enfin

$$z = \frac{p \cdot f}{l'' \cdot e}$$

On connaît toujours f avec précision. On sait mesurer e .

On mesure $1''$ au double décimètre (précision suffisante) et p . à la vis micrométrique (très grande précision), ce qui permet de calculer z . La mesure de p se fait à l'aide d'un instrument appelé **barre parallaxe**.

La barre parallaxe se compose d'un stéréoscope et de deux index rigoureusement identiques situés dans le plan focal des lentilles du stéréoscope, pouvant être mis en contact avec les photographies et se déplaçant l'un par rapport à l'autre parallèlement à la ligne des oculaires du stéréoscope à l'aide d'une vis micrométrique. Lorsque l'on place chaque index à peu près dans l'axe de chaque oculaire et qu'on regarde dans le stéréoscope, on fusionne les images de ces deux index et on a l'impression d'un seul index qui se déplace en hauteur lorsqu'on agit sur la vis micrométrique.

Il s'agit d'amener l'écartement des index de telle façon que l'image fusionnée donne l'impression d'être à la même hauteur que l'objet observé. On fait alors une lecture sur le tambour de la vis micrométrique. On refait ensuite la même opération sur un autre point. On obtient une deuxième lecture et la différence des lectures donne la parallaxe p relative aux deux points choisis. En pratique, les mesures à la barre parallaxe sont très difficiles. Elles exigent un très grand entraînement et de toute façon il faut faire une dizaine de mesures sur chaque point pour obtenir un résultat satisfaisant.

L'utilisation ne peut être faite que sur des photographies verticales et sur des stéréogrammes montés avec beaucoup de soins.

L'erreur est proportionnelle à l'altitude de prise de vue. On ne doit donc l'utiliser que sur des photographies à grande échelle. Pour $1'' = 10$ cm, il ne faut pas que $H > 5\,000$ m si l'on veut obtenir une précision sur $z < 1$ m.

3.2.2. Inventaire des unités pédologiques

Cette opération consiste à dresser une liste exhaustive de tous les sols couvrant le secteur. Deux méthodes sont possibles :

- tracer un réseau rigide d'observations dont la densité est fonction à la fois de l'échelle et de la précision recherchée (méthode par intraopulation) ;
- s'appuyer sur les faits de terrain qui explicitent les relations entre les facteurs du milieu et l'individualisation des sols (méthode par extrapolation).

Alors que la première approche relève des enquêtes statistiques, la seconde peut seule être qualifiée de pédologique car elle traite les sols comme des entités géographiques suivant les définitions données précédemment.

La méthode par réseau rigide d'observations est extrêmement simple. On dessine sur document un canevas régulier qui matérialise les points à étudier sur le terrain. La précision est donc fonction de la densité des observations. Pour une étude détaillée le Soil Survey Manual (1954) conseille neuf points d'étude par cm^2 de carte levée. Mais comme on estime généralement que la plus petite surface représentable et repérable sur une carte est de $1/4$ de cm^2 , et que pour définir chaque surface élémentaire il faut au moins étudier un profil, on retient le plus souvent le chiffre de 4 observations par cm^2 de carte dressée.

Densité d'observation pédologique pour un degré d'analyse optimum	
1/5 000	16 observations à 1'ha
1/10 000	4 observations à 1'ha
1/20 000	1 observation à 1'ha
1/50 000	4 observations par 25 ha

La méthode cartographique par réseau rigide d'observations est une méthode longue, fastidieuse, et par suite très coûteuse. Elle apporte peu de résultats quant à la compréhension des phénomènes naturels. Malheureusement, il est parfois impossible de l'éviter. C'est le cas particulier des études de sols en milieu forestiers des régions tropicales et équatoriales humides. Les difficultés de pénétration, l'absence de visibilité latérale, obligent à tracer des layons parallèles, plus ou moins rapprochés, le long desquels sont effectuées les observations. Par cette méthode, il est difficile à un layonneur d'ouvrir plus de 800 mètres par jour et à un pédologue entraîné de lever plus de 2 à 4 km de layons dans le même temps, et cela par la seule méthode des sondages.

Pour les études à grande échelle (1/5 000 et au-dessus) cette technique prend une importance certaine, car l'influence des facteurs du milieu n'est plus assez sensible pour faire apparaître toutes les variations de détails qui peuvent présenter un intérêt pour l'utilisateur. A ce niveau de conception on est alors obligé de passer par un réseau dense d'observations.

o Dans la deuxième méthode, qui part du principe que les profils synthétisent l'action des facteurs du milieu, le pédologue tente de dégager les facteurs de différenciation des sols. Pour ce faire, il cherche à préciser quelles sont les données de terrain qui lient un type de sol donné à son environnement. Il tient compte de l'aspect de la surface du terrain et des différentes caractéristiques physiographiques du milieu, plus particulièrement de la topographie, de la nature des roches, de la forme du modelé, du couvert végétal et du mode d'utilisation par l'homme. Chaque fois qu'une de ces données varie, il vérifie s'il observe un changement dans la morphologie du sol concerné. Il reconnaît ainsi des zones homogènes tant par leurs sols que par leurs caractéristiques géographiques et détermine les lois locales de la répartition des sols.

Les méthodes pédologiques modernes permettent à la fois une cartographie plus rapide et une meilleure précision grâce à la connaissance de ces facteurs de différenciation. De plus, cette connaissance permet un dessin des contours et une meilleure définition des unités cartographiques à l'aide de documents annexes comme les photographies aériennes et les plans à grande échelle en courbe de niveau. Ces possibilités varient cependant en fonction de la valeur des documents disponibles, de la nature du terrain, de la couverture du sol, des possibilités de pénétration, etc. Il semble actuellement possible de les chiffrer. BOULAINÉ (1966) donne un certain nombre de définitions qui permettent de calculer le degré d'analyse d'une carte de sol et par suite de définir son échelle virtuelle.

A. Densité idéale d'observation : correspond à 4 observations par cm² de carte dressée

Si A est le coefficient de 10 000 dans l'expression de l'échelle, la densité idéale d'observation pédologique pour une échelle considérée est égale à $A^2/4$ ha. Pour une échelle au 1/20 000, A = 2 ; donc il faut une observation par ha.

Mais cette densité idéale n'est pas la densité nécessaire. Les méthodes de la pédologie moderne permettent de réduire sensiblement le nombre de trous d'observation.

B. Efficience pédologique K

C'est le nombre qui traduit les économies d'observations dues à l'emploi d'une bonne méthodologie pédologique. Ce nombre K varie suivant les conditions de terrain et la nature des documents disponibles. BOULAINÉ avance les chiffres extrêmes de 1 en zone forestière tropicale sans carte topographique précise et de 20 en zone non couverte de végétation avec des photographies aériennes à échelle convenable ou des plans très détaillés en courbe de niveau. Dans les zones cultivées des régions tempérées, l'efficience pédologique varierait de 5 à 10. Ces chiffres sont des ordres de grandeur tirés des expériences personnelles de l'auteur. Ils mériteraient d'être précisés par des études systématiques.

En résumé, la densité idéale peut être affecté d'un coefficient qui est égale à 1/K
densité nécessaire = 1/K densité idéale.

C. Degré d'analyse

Très souvent pour des raisons diverses, le plus souvent financières, le pédologue ne peut effectuer le nombre d'observations nécessaires. Il existe donc une densité réelle.

Le rapport entre la densité réelle et la densité nécessaire est le degré d'analyse de la carte à l'échelle considérée soit D.A.

$$\begin{aligned} \text{à l'échelle } 1/N &= 1/A \times 10\,000 \\ \text{ou D.A.} &= \frac{K \times A^2}{4 \times H} \end{aligned}$$

H = nombre d'ha pour 1 trou.

Exemple : on étudie une zone de 15 000 ha en faisant 500 points d'observations et on dresse une carte au 1/20 000, l'efficacité pédologique étant de 5 :

$$\text{D.A.} = \frac{5 \times 5 \times 4}{150 \times 4} = 1/6$$

D. Echelle virtuelle de la carte

C'est l'échelle de la carte pour laquelle la densité nécessaire est respectée. C'est donc l'échelle de la carte qu'il faudrait obtenir par réduction de la carte réalisée pour qu'elle soit à l'échelle optima.

$$\text{Echelle virtuelle} = \frac{1}{N \times \sqrt{\text{D.A.}}}$$

Dans l'exemple précédent, la densité d'observation correspond à une échelle de 1/20 000 \times 6 \neq 1/50 000.

On constate immédiatement que la pierre d'achoppement lors d'une étude pédologique est l'efficacité pédologique K. Elle dépend de plusieurs données dont les principales sont :

- . les documents accessoires (D) = photographies aériennes, cartes topographiques détaillées, prospections pédologiques antérieures ;
- . l'équation personnelle du prospecteur (H) : un pédologue confirmé aura besoin de moins de points d'étude qu'un débutant ;
- . le type de paysage (N) : degré de mise en culture, couverture végétale, érosion, caractères géologiques du substratum, histoires géomorphologiques de la surface..

On peut donc écrire $K = N \times H \times D$

N est une des données du problème sur lequel on ne peut opérer.

H dépend du pédologue et de ses connaissances. Ces dernières sont en perpétuelle évolution.

De nombreux progrès ont été faits ces dernières décades et on peut espérer que dans les années à venir les progrès seront aussi très sensibles.

D correspond à la valeur des documents disponibles. S'ils n'existent pas, il faut prévoir leur réalisation, d'où du temps et de l'argent.

En résumé, pour réaliser de bonnes cartes pédologiques, il y a essentiellement deux atouts à mettre en jeu : de bons pédologues et des documents graphiques appropriés.

3.2.3. Tracé des limites

On délimite une entité pédologique lorsqu'on détermine sur le terrain les points à partir desquels une ou plusieurs caractéristiques du sol varient de façon suffisamment significative pour en changer la définition. Pour cartographier ce sol il faut donc en suivre ses limites.

Dans le cas de la méthode par réseau rigide d'observation, le pédologue pointe le long des axes d'observation les limites reconnues. Il intrapole ensuite les résultats en tentant de relier ces points par des lignes continues qui sont supposées correspondre à des limites de sols. La précision de ces dernières est donc fonction du nombre de points reconnus sur le terrain (l'efficacité pédologique étant égale à 1) et aussi de l'orientation des rayons d'observation. Cette orientation doit être telle qu'elle permette de recouper le maximum de limites, ce qui n'est pas toujours facile de déterminer *a priori*, d'où la nécessité fréquente de recouplements supplémentaires dans les zones les plus hétérogènes.

Mais comme il est pratiquement impossible de multiplier à l'infini les sondages de contrôle, le pédologue cherche à les limiter en s'appuyant sur les documents disponibles (cartes topographiques, géologiques ; photographies aériennes) qui permettent d'orienter l'intrapolation par les relations reconnues entre les faits apparaissant sur les documents et les limites observées *in situ*. Il est facile par cette voie de "filer" les limites de sols hydromorphes ou des rebords de plateaux.

Mais le tracé des limites est grandement facilité si l'on applique la deuxième méthode. Celle-ci découle naturellement des données précédemment recueillies. En étudiant sur le terrain l'extension des unités reconnues, on est amené à reporter le long des axes de parcours les limites recoupées. Celles-ci sont marquées avec précision sur les documents topographiques et (ou) photographiques. Pour chaque limite, on prend soin de noter minutieusement, et le plus complètement possible, les facteurs de différenciation sur le terrain et sur documents entre les deux unités cartographiques. C'est là un point extrêmement important qui donne toute sa valeur à l'interprétation des différents documents disponibles en vue de l'extrapolation des limites en bureau d'étude.

On sait que ces facteurs de différenciation sont de trois ordres, à savoir :

- . les données propres aux profils ;
- . les aspects spécifiques de la surface du terrain ;
- . les facteurs du milieu qui agissent sur la différenciation.

Le tracé des limites va s'appuyer essentiellement sur les deux derniers points. Cette méthode est parfaitement justifiée dans la mesure où les caractéristiques propres aux profils sont les causes ou (et) les conséquences de la différenciation du milieu, ce qui a été démontré précédemment. Ces aspects peuvent être souvent déduits de cartes topographiques et surtout de l'analyse de photographies aériennes. Si cela est impossible, on est obligé de "filer" les limites sur le terrain en multipliant les sondages de contrôle. C'est heureusement l'exception.

En résumé, la marche à suivre est la suivante :

. Sur documents (cartes topographiques détaillées, photographies aériennes à échelles convenables, cartes thématiques, etc.) on cherche à reconnaître les ensembles physiographiques représentatifs de la zone étudiée : vallées alluviales, terrasses, régions de collines, bassins versants, unités géomorphologiques diverses, etc.). L'établissement de ce premier schéma permet de choisir des itinéraires représentatifs et, sur ceux-ci, l'emplacement des profils pédologiques qui seront observés. Cette étude permet de confronter les regroupements matérialisés avec les connaissances diverses que l'on possède sur la région et de dégager ainsi, en première approche, les principaux facteurs du milieu qui paraissent orienter les distributions de ces unités. Ces relations peuvent être en rapport avec :

- la nature lithologique des roches-mères ou des matériaux originels, données pouvant être fournies par des cartes géologiques ;
- les formes du modelé dans ces associations avec les conditions du drainage et du ruissellement par consultation et analyse des cartes topographiques et des photographies aériennes ;

- la nature et la répartition des associations végétales ainsi que les modes d'utilisation des terres par examen des cartes phytosociologiques et des photographies aériennes.

On détermine des zones homogènes aussi bien par l'aspect superficiel du terrain tel qu'il apparaît sur les photographies aériennes que par les facteurs du milieu déduits des différentes cartes consultées et que l'on suppose avoir une action certaine sur la pédogénèse.

On possède ainsi deux des ensembles de données qui permettent de définir des unités sols. La caractérisation des profils se fait alors sur le terrain.

. Sur le terrain, on vérifie si aux secteurs apparemment homogènes reconnus sur document, correspondent des types de profils spécifiques. Il peut, en effet, arriver que des changements dans la nature du sol n'amènent aucune modification visible à la surface, ce qui oblige à des contrôles. Mais heureusement ceci est assez exceptionnel sauf aux très grandes échelles ($> 5\ 000$). L'étude sur le terrain a pour but non seulement de caractériser et de définir les sols observés, mais aussi de dégager les principaux critères de différenciation entre sols appartenant à deux unités voisines, ce qui amène au choix d'une limite. Il est alors très important de dégager les données de terrain qui vont permettre de suivre cette limite. Ce pourra être une courbe de niveau, un décrochement du relief, un changement dans le matériau originel, dans la végétation, dans le drainage, etc. Généralement, plusieurs de ces critères sont liés, ce qui facilite le travail. On précise ainsi les relations dégagées lors de l'étude sur document.

A ce stade, il est fondamental de vérifier si ces critères de terrain peuvent être observés ou déduits sur photographies aériennes. Dans l'affirmative, ces éléments de différenciations sont notés soigneusement et classés. Mais il faut toujours pointer avec précision sur les photographies aériennes l'emplacement des profils observés et sur les itinéraires effectués, les limites retenues.

. Au bureau, à partir de ces données : (classement des critères de différenciation visibles sur les photographies aériennes, limites pointées sur les documents), le pédologue, ou plus simplement un technicien spécialisé en photogrammétrie, cerne par un tracé définitif les unités vérifiées sur le terrain, limites qui sont redressées, puis portées à l'échelle définitive.

Actuellement, la plupart des levés pédologiques font appel à la photo-interprétation. En effet, l'image aérienne procure une vue instantanée, synthétique et globale d'une partie du paysage. La vision stéréoscopique y ajoute la perception du relief. L'examen des photographies aériennes renseigne ainsi sur deux séries d'éléments d'information :

- . les formes superficielles du terrain ;
- . les objets qui meublent cette surface.

Or, ces données sont justement celles sur lesquelles s'appuie le pédologue pour reconnaître l'homogénéité ou la différenciation d'unités cartographiques. Ce sont donc les rapports entre le sol, élément du paysage, et les divers aspects visibles du terrain apparaissant sur les photographies aériennes qui déterminent l'intérêt de leur interprétation.

**

PHOTO-INTERPRÉTATION PÉDOLOGIQUE

Les photographies aériennes verticales sont des documents de travail extrêmement précieux pour le pédologue. Lorsque l'on observe des clichés, on constate qu'ils présentent des différences de teintes, des variations dans la texture, des contrastes qui paraissent plus ou moins liés aux variations des formations superficielles de la terre. Suivant l'échelle et la qualité des photographies apparaissent des détails spécifiques qui ont l'avantage d'être toujours liés à leur environnement. On a une vision directe et globale du sujet d'étude. Et s'il est possible de faire des montages stéréoscopiques, la perception du relief permet non seulement des examens qualitatifs plus poussés, mais aussi et surtout l'application de certains calculs et mesures précis groupés sur le nom de photogrammétrie.

Ainsi, une grande quantité de renseignements peuvent être tirés de l'étude des photographies aériennes. Dans quelle mesure sont-ils utiles pour le pédologue ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire de préciser les relations spécifiques que l'on peut constater entre les données fournies par ces documents et ceux indispensables en cartographie pédologique. En effet, le pédologue définit et étudie les sols dans ses trois dimensions. Il précise ces données par la recherche de caractéristiques physiques, chimiques et biologiques qui obligent à des études intensives tant de terrain que de laboratoire. Le sol ne s'étudie pas seulement par sa surface mais également par son profil.

Il apparaît donc que le pédologue a besoin de renseignements qui n'apparaissent pas sur les photographies aériennes, d'une part, et qui ne peuvent pas non plus être déduites de celles-ci par un raisonnement logique, d'autre part. Même lorsque le sol n'est pas couvert par un tapis végétal, les photographies ne font apparaître que la réflexion de la lumière sur la surface du sol et cette réflexion dépend de facteurs qui ne sont pas tous caractéristiques du sol. En particulier, les conditions climatiques à la date de la prise de vue peuvent influencer considérablement les caractéristiques des clichés. Il est donc essentiel de comprendre que l'objet de l'étude, le sol, n'apparaît pas directement sur les photographies aériennes.

Il importe néanmoins que celles-ci puissent fournir des informations relatives aux caractéristiques physiques et culturelles de la surface de la terre, caractéristiques qui sont importantes pour le pédologue. Par exemple, on peut étudier les formes de relief qui sont un des facteurs de formation important du sol. Mais il est impossible, en général, de déduire à quel groupe génétique le sol appartient, même si la végétation est parfaitement interprétée et les principales caractéristiques climatiques connues. Ceci découle en particulier de l'influence de facteurs historiques locaux ou de changements climatiques récents.

En résumé, les photographies aériennes révèlent seulement les conditions générales du terrain au moment de la prise de vue.

Mais ces données sont justement celles sur lesquelles s'appuie le pédologue lorsqu'il extrapole les renseignements obtenus sur les profils à des surfaces cartographiables. L'efficacité de telles études dépend alors essentiellement de l'expérience et de la technicité du prospecteur. Elle est fonction de la façon dont ce dernier synthétise les données des profils et celles de l'environnement. Le rendement dépend donc des relations entre les faits physiographiques, la connaissance des facteurs du milieu et les sols. Ces relations définissent le principe d'utilisation des photos aériennes. Ces dernières permettent une approche systématique du pro-

**EXEMPLE DE CARTOGRAPHIE PEDOLOGIQUE
PAR PHOTO-INTERPRETATION**

Photo aérienne : photo 346 I.G.N., mission A.O.F. 55-56

Carte : fragment de la carte pédologique à 1.100 000 de BOCQUIER (G.)
et GAVAUD (M.) ; feuille Ader Doutchi (Niger).

SOLS MINÉRAUX BRUTS

- Sols minéraux bruts non climatiques
- Sols minéraux bruts d'érosion
- Lithosols
- 1 Famille sur grès ferrugineux de l'Ader Douchi (Continental terminal)
- Séries des corniches et talus d'éboulis

Régosols

- 2 Famille sur calcaires et marno-calcaires (Eocène)
- Séries des corniches et talus d'éboulis à pavage de grès
- 3 Pavage continu
- 3 Pavage discontinu
- 4 Séries des buttes-témoins
- Sans pavage, en association avec des sols calcimorphes

Association Régosols-Lithosols

- 5 Lithosols, sols d'éboulis, sols à pavage sur :
 - Grès ferrugineux à oolithes
 - Grès fins ferruginisés (Crétacé)
 - Cuirasses ferrugineuses conglomératiques

SOLS PEU ÉVOLUÉS

- Sols peu évolués non climatiques
- Sols peu évolués d'érosion
- Sols régosoliques
- 6 Famille sur argiles schisteuses gypsifères
- Séries vertisoliques avec pavage de grès
- Sols peu évolués d'apport
- Sols peu évolués d'apport bien drainés
- 7 Famille sur produits meubles issus des calcaires et marno-calcaires
- Séries à tendance subaride brun, sur atterrissements et épandages
- 8 Famille sur produits meubles issus de grès fins, pélites, argiles
- Série non humifère, rubéfiée
- 9 Série à horizon humifère
- 10 Famille sur sables éoliens remaniés par ruissellement
- Série à tendance subaride brun-rouge, des pieds de dunes
- 11 Autres séries
- 12 Famille sur alluvions des cours d'eaux temporaires
- Séries sableuses
- Sols peu évolués d'apport mal drainés
- 13 Famille sur alluvions des cours d'eaux temporaires
- Autres séries

VERTISOLS

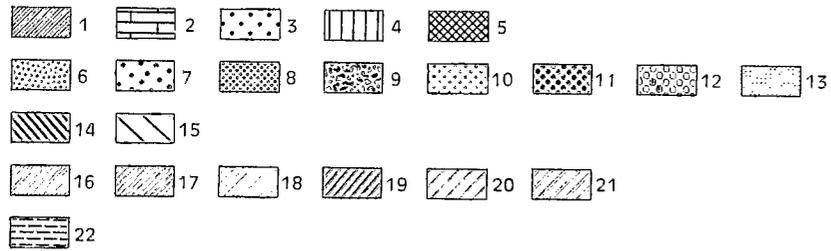
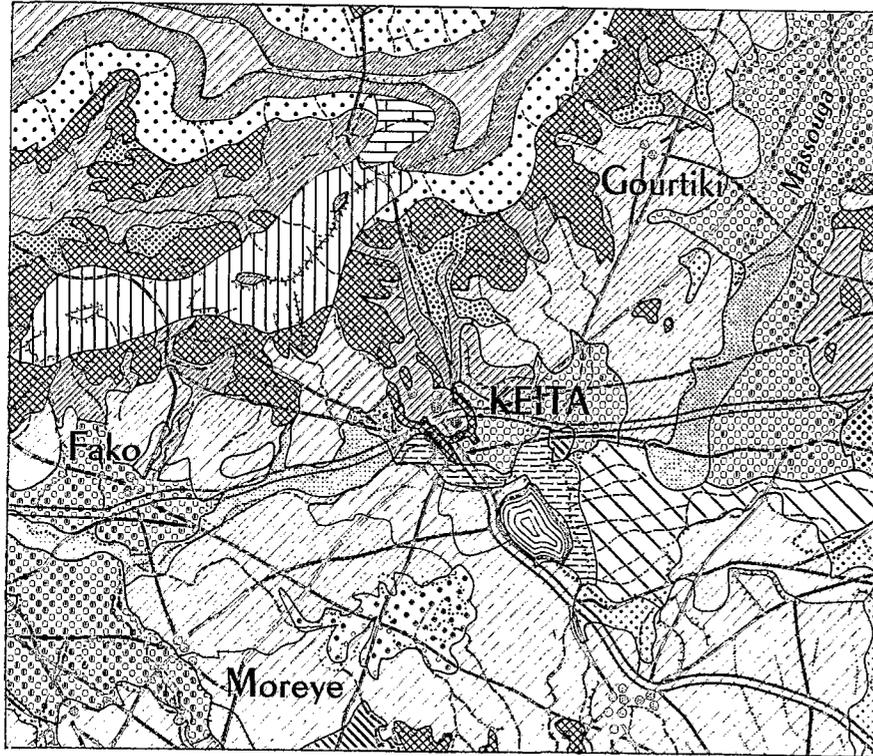
- Vertisols topomorphes largement structurés dès la surface
- 14 Famille sur dépôts de remplissage ancien des vallées
- 15 Famille sur alluvions des cours d'eaux temporaires
- Série de Kefta

SOLS STEPPIQUES

- Sols steppiques à profil saturé
- Sols tropicaux subarides
- Sols bruns
- 16 Famille sur dépôts de remplissage ancien des vallées
- Association des sols bruns, sols bruns à concrétions, sols bruns calcaires, sols bruns tirsifiés
- Sols brun-rouge
- Sols brun-rouge à concrétions
- 17 Famille sur dépôts de remplissage ancien des vallées
- Série très foncée
- Association des sols brun-rouge et sols brun-rouge à marbrures
- 18 Famille sur dépôts anciens sableux remaniés par le vent
- Séries à profil bien développé
- 19 Séries à profil tronqué sur sables fins
- Sols brun-rouge
- 20 Famille sur sables éoliens
- Séries peu rubéfiées des ensablements de vallée
- Association lithosols, sols héritiers de caractères de sols ferrugineux tropicaux lessivés, sols brun-rouge
- Famille sur grès ferrugineux du Continental Terminal
- 21 Sols brun-rouge dominants

SOLS HYDROMORPHES

- Sols à hydromorphie partielle de surface
- Sols à pseudo-gley de surface
- Sols à taches et concrétions
- 22 Famille sur alluvions des cours d'eaux temporaires.



blème que le prospecteur aurait eu normalement à faire sur le terrain. Mais l'utilisation de la photo-interprétation présente de nombreux autres avantages :

- il est possible d'analyser systématiquement les éléments du milieu sur toute la zone étudiée ;
- l'observation des objets est la même partout ;
- on dispose d'une vue générale de toute la région à étudier ;
- on peut reconnaître des unités physiographiques homogènes qui permettent de planifier le travail de terrain.

Il reste cependant qu'il est toujours indispensable de reconnaître les sols "in situ".

La photo-interprétation ne sert donc pas à reconnaître les sols, mais à en dessiner les limites. La recherche de ces limites s'appuie sur la recherche des corrélations entre les faits apparaissant sur les photos aériennes et les faits observés sur le terrain. Il vaut donc mieux un pédologue expérimenté en photogrammétrie qu'un photogrammétriste ayant quelques notions de pédologie. La photo-interprétation n'est qu'une technique de recherche complémentaire. Le prospecteur tenant compte des facteurs de formation du sol et de l'aspect de surface du terrain, peut, à partir des renseignements recueillis sur les photos aériennes, tracer les lignes nécessaires à sa prospection. Menée de la sorte, la cartographie pédologique est réalisée avec plus de précisions et avec des gains de temps considérables.

En photo-interprétation pédologique, deux attitudes sont possibles :

- . la photo-interprétation confirme et précise ce que l'on a déjà observé sur le terrain. On identifie. Elle remplace l'étude des cartes topographiques détaillées. C'est un complément à la prospection.
- . la photo-interprétation sert d'argument de recherche. Elle prend la première place dans l'échelonnement des opérations.

La plupart des services de photo-interprétation s'orientent vers la deuxième solution sur la base que peu de faits sont connus. Les différentes phases d'un travail cartographique sont (REY P., 1962) :

- "1 — Sur photographie, étudier la région sans aller sur le terrain. Il faut chercher en observant les photographies au stéréoscope. C'est d'abord un dégrossissage, une première exploitation destinée à poser le problème. La photographie ne donne pas des résultats immédiats. Elle va faire apparaître des zones. On pourra distinguer des variations, divers phénomènes apparaîtront, et il faudra repérer ce qui a l'air d'être analogue et ce qui a l'air d'être différent. Cette première phase permet de déterminer a priori le réseau à suivre sur le terrain. Au lieu de faire des sondages systématiques n'importe où, on les fera là où il faut les faire.
- "2 — On guide ainsi la deuxième phase du travail. Il faut vérifier au sol les observations faites sur les photos en des points bien déterminés.
- "3 — La troisième phase redevient une phase détaillée et consiste en l'exploitation systématique et très poussée de la collection des photos aériennes, à la lumière des observations faites sur le terrain, et l'on procède ensuite à la cartographie.

En bref, l'utilisation des photographies aériennes est faite au départ en tant qu'argument de recherche sur le terrain ; le système est fondamentalement défini par l'interprétation de la photo préalablement à l'observation sur place".

Ainsi, dans la première phase des travaux, les photographies remplacent les cartes topographiques. Mais elles présentent de nombreux avantages :

- . on est en contact direct avec l'objet à étudier ;
- . l'examen stéréoscopique permet la perception du relief ;
- . on a une reproduction concrète et objective de la réalité à un moment donné.

La première attitude n'est cependant pas à rejeter systématiquement. Elle est parfaitement valable lorsque l'inventaire des sols est très avancé et que l'on possède des cartes dressées par les méthodes conventionnelles. Elle permet d'extrapoler avec plus de sûreté. Par contre, la deuxième solution présente des développements dangereux. C'est ainsi que certains spécialistes ont préconisé de modifier la définition de la notion "sol", en ne tenant compte que des renseignements fournis par les photographies. Par cette voie, l'utilisation intensive de la photo-interprétation revient plutôt à cartographier des associations de sols que les sols eux-mêmes. Ceci peut être utile pour les cartographies à petites échelles, mais devient très grave pour les cartographies à grande échelle.

Lorsque sur une zone donnée, on effectue une étude pédologique, il faut en premier lieu, ainsi qu'il a été indiqué, dresser l'inventaire des sols au niveau le plus compatible avec l'échelle retenue. Ces unités sont groupées en entités cartographiables, ce qui implique une classification, laquelle classification ne peut être tirée des photos aériennes et doit reposer sur des critères pédogénétiques.

Il est ensuite nécessaire de localiser les unités et de marquer leurs limites sur la carte. Les photos aériennes ont alors un rôle important, comme carte de terrain et de travail et aussi parce que les images révèlent des conditions de terrain qui sont souvent en relation avec des unités spécifiques de sols.

Il faut ensuite vérifier la conformité entre les unités reconnues et les possibilités d'utilisation. Là encore les photos aériennes n'ont qu'une utilité réduite.

On doit donc considérer les photographies aériennes uniquement comme une source nouvelle d'information. Il s'agit de recueillir sur les clichés les données requises en vue du but poursuivi. Ces données doivent être précises, mesurables et reproductibles, et les méthodes doivent être scientifiques au même titre que celles utilisées sur le terrain et au laboratoire.

Méthodes d'exploitation des photographies aériennes

Les photographies aériennes peuvent être exploitées plus ou moins intensément suivant les documents et le matériel disponibles, les connaissances acquises et la technicité du spécialiste. Il est ainsi possible de distinguer quatre méthodes qui correspondent grosso modo aux différentes étapes du développement de la photo-interprétation.

A — Les photographies aériennes sont utilisées comme cartes de base

La méthode consiste à reconnaître et identifier sur les clichés les données observées sur le terrain.

Les photos aériennes, les assemblages contrôlés ou semi-contrôlés (mosaïques) peuvent parfaitement remplacer les cartes topographiques. Si elles ne sont pas toujours à l'échelle désirée, elles ont par contre l'avantage de montrer plus de détails, ce qui permet de pointer avec précision les emplacements des profils et les limites reconnues sur le terrain. Même si les positions géodésiques, par suite des déformations des clichés, ne sont pas parfaites, les positions relatives par rapport aux accidents locaux sont bien meilleures. Les faits re-

connus aident à l'orientation sur le terrain. Ils permettent de préciser les parcours, les transversales, les obstacles.

Cette méthode a deux applications générales, identiques à l'emploi des cartes topographiques :

- . les photographies sont utilisées comme cartes de terrain et de travail ;
- . les photographies sont utilisées comme cartes de report.

Pour cette méthode, il y a toujours avantage à consulter les photographies avant les prospections au sol pour faciliter les photo-identifications.

B – Les photos aériennes sont analysées systématiquement en éléments individuels

Il est possible d'analyser stéréoscopiquement de nombreux éléments. Tous ne sont pas indispensables aux études pédologiques. Leur choix et la manière dont ils sont utilisés dépendent des corrélations supposées avec les formes des paysages et les limites de sols. Les éléments ainsi définis peuvent être analysés individuellement ou en combinaison.

L'analyse des éléments individuels peut être pratiquée sans une connaissance détaillée du terrain. Elle nécessite cependant, au préalable, une classification qui requiert la compréhension, la connaissance des sols et de facteurs de leur formation, ainsi que des possibilités cartographiques. Ainsi, par exemple, si l'on analyse différentes classes de pentes, cette étude n'aura de valeur que dans la mesure où ces classes correspondent à des réalités pédologiques. Il en découle qu'une analyse sera d'autant meilleure que la photo-interprétation sera exécutée par un prospecteur expérimenté.

Chaque élément est caractérisé par les variations suivantes :

- . grade ou densité (degré de pente par exemple) ;
- . type ou forme ;
- . dimensions ;
- . régularité ou irrégularité ;
- . situation ou position géographique.

Ces éléments s'identifient sur les clichés par les critères suivants :

- 1 - contraste
- 2 - ombres
- 3 - tonalité de la couleur
- 4 - texture de la couleur.

P. BURINCH (1961), VINK (1962), DUPUIS (1965) distinguent les éléments d'identifications suivants :

. Eléments en relation avec la morphologie proprement dite

- Type de paysage, vaste "unité d'interprétation" associant des formes topographiques élémentaires selon certaines combinaisons caractéristiques.
- Formes individuelles de relief : unités géomorphologiques de base.
- Pente : forme, longueur, exposition, gradient.

. Eléments en relation avec les facteurs de la morphologie

- Dispositif du réseau hydrographique : forme, densité, importance des cours d'eau.

- Dispositif des interfluves
- Particularités individuelles des cours d'eau (cônes alluviaux, dépôts de crues, méandres, canyons, terrasses, ...)
- Eléments en relation avec les facteurs de morphologie glaciaire, littorale ou éolienne et dont le classement est à préciser.
- . Eléments en relation avec certains aspects spécifiques du terrain
 - Stratigraphie
 - Tectonique
 - Erosion accélérée : dispositif et forme des rigoles ou ravines.
- . Eléments en relation avec certains détails visibles des sols eux-mêmes
 - Submersion
 - Détails superficiels caractéristiques : sols "polygonaux", sols réticulés, sols à croûte, sols tourbeux, gilgai, etc.
 - Tonalité du sol nu : variation de couleur, humidité, salinité, érosion en nappe.
- . Eléments en relation avec le couvert végétal
 - Végétation naturelle : dense, clairsemée, herbacée, arborescente.
 - Arbres spécifiques : peuplement de feuillus ou de conifères, plantations diverses.
 - Utilisation culturelle du sol : nature des cultures.
- . Eléments en relation avec les activités humaines
 - Fossés et canaux
 - Dignes
 - Parcellaire : forme, dimension, orientation des parcelles, évolution historique du parcellaire, affectation culturelle.
 - Routes et chemins
 - Site et forme des agglomérations - Habitat
 - Sites et objets archéologiques
- . Eléments déduits de recoupements ou de la convergence de certains phénomènes visibles
 - Conditions hydriques
 - Cas particuliers de stratigraphie
 - Lithologie
 - Microrelief

Naturellement, tous ces éléments ne sont pas systématiquement utilisables. Pour une zone donnée, on choisit ceux qui sont spécifiquement liés aux entités pédologiques. La valeur de la photo-interprétation dépend surtout de ce choix.

C – Les photos aériennes sont analysées physiographiquement

Cette méthode consiste en une analyse plus cohérente des unités de terrains qui sont connus être, ou supposés être, en corrélation avec des limites de sol, par exemple : terrasses de rivières - plateaux - glacis - vallées - deltas - etc.

Ces unités peuvent être analysées et classées suivant leurs caractéristiques spécifiques, généralement en termes de géomorphologie. Ce type de photo-interprétation requiert des connaissances détaillées en géomorphologie et aucune règle générale en dehors de ces connaissances ne peut être formulée. Ici encore l'expérience est d'une importance primordiale. On utilise les mêmes techniques que pour l'analyse des éléments individuels.

D – Les photos aériennes fournissent des résultats par déduction

*Les renseignements recueillis par les méthodes précédentes sont reproductibles et précis. Ils peuvent être combinés entre eux ou avec des informations d'autres sources et ces combinaisons peuvent produire d'autres informations. Il s'agit ordinairement de clefs, de recettes, qui n'ont souvent qu'une valeur locale et il y a de graves dangers à les généraliser. Pourtant cette méthode est certainement la plus employée actuellement. Réalisée par de bons spécialistes, elle fournit d'excellents résultats. Par exemple, sous climat soudanien, en position plane, légèrement déprimée, un cliché de couleur foncé, à texture fine, piqué de petites taches blanches bien individualisées, et portant des peuplements lâches de *Terminalia laxiflora* (bien reconnaissables sur les photos aériennes) caractérise généralement des sols d'argiles noires tropicales (vertisols).*

Pratiquement, cette méthode est associée aux techniques précédentes. Elle n'est qu'une donnée du problème. Elle permet de poser des hypothèses à vérifier sur le terrain.

Si l'on considère l'une ou l'autre de ces approches, on constate qu'elles consistent, à un moment donné, à tracer des limites que l'on suppose caractériser des limites de sols. Mais à quel stade des études faut-il tracer ces limites ? L'expérience montre que cette opération doit venir après les travaux de terrain en s'appuyant sur les limites reconnues "in situ". En effet, un dessin influence toujours le tracé des lignes définitives. Il vaut mieux éviter cet obstacle et dessiner les lignes qui concrétisent et synthétisent les données recueillies en fin de prospection. Travailler sur un dessin préalable oblige à effacer des limites et à en reporter d'autres. Or, on hésite souvent à en supprimer, ce qui oblige ou à descendre trop bas dans la précision recherchée, ou, inversement, à grouper des sols différents dans des associations ou même parfois dans des complexes de sols. Naturellement, l'échelle de la carte et l'hétérogénéité du terrain peuvent imposer de tels artifices, mais il faut toujours essayer de les éviter.

Tenant compte de ces données, on peut préconiser les opérations suivantes :

- avant tout travail sur le terrain, chercher et reconnaître sur les clichés les plages homogènes. Classer ces plages par degrés de ressemblance ou de différenciation. En fonction des résultats acquis, dresser un planning des prospections. Dans la recherche de ces différentes zones, il est utile d'analyser certains éléments importants en pédologie : densité et forme des réseaux de drainages ou du réseau hydrographique : types de végétation ; formations géologiques ; formes du modelé, etc. D'ailleurs ces éléments sont fréquemment liés. Mais on donne la préférence aux données analytiques, plutôt qu'aux données synthétiques trop souvent orientées.*
- les travaux de terrain sont exécutés sur la base du canevas précédent. On vérifie si aux zones homogènes délimitées correspondent des entités sols compatibles avec la précision recherchée. Dans l'affirmative, on contrôle si les résultats obtenus sont reproductibles à travers les autres clichés et on décrit les degrés de variation. Cette étape amène au choix définitif des éléments photographiques corrélatifs des entités pédologiques retenues, ce qui oblige*

à analyser et identifier ces éléments. L'opération la plus délicate est alors le report précis sur le cliché des points d'observation et des limites le long des parcours d'observation qui sont décrits minutieusement. Naturellement, il n'est pas question de vérifier toutes les surfaces homogènes mais seulement un certain nombre d'entre elles compatibles avec la précision recherchée. A ce stade, certains conseillent le lever détaillé de "zones témoins".

- *au bureau, en possession de ces données, le pédologue prospecteur dessine, sous stéréoscope les limites qu'il a définies sur le terrain, cela pour les zones le plus délicates. Un technicien entraîné peut alors extrapoler le dessin général en s'appuyant sur les éléments analytiques classés par le prospecteur. Pour ce faire, il maquille une photographie sur deux, ou la partie centrale correspondant à la vision stéréoscopique de chaque cliché. Le report se fait alors à l'échelle sur un fond topographique par le canal d'une chambre claire.*

* * *

3.2.4. Prélèvement et conditionnement des échantillons

Lors de l'inventaire des unités cartographiques et de l'étude des critères de différenciations de sols, le pédologue et ses aides décrivent les profils observés. En principe, il est indispensable que chaque unité cartographique soit définie par un profil caractéristique. Mais dans les faits, il est souvent nécessaire de compléter cette définition par la description de quelques profils de transition qui précisent la valeur de la différenciation. A la fin des travaux de terrain, le prospecteur se trouve en possession d'un grand nombre de descriptions qui ne sont pas toutes indispensables. Il est donc amené à faire un choix raisonné basé sur l'inventaire cartographique. Mais il peut arriver aussi qu'il soit obligé d'effectuer quelques observations complémentaires.

Pour chaque profil définissant les unités cartographiques, les données morphologiques sont complétées par des données analytiques. Pour ce faire, les profils retenus font l'objet de prélèvement d'échantillons portant sur les principaux horizons, suivant les techniques décrites dans la première partie.

Dans les faits : inventaire des unités cartographiques, tracé des limites, description des profils et prélèvement d'échantillons correspondent à un ensemble d'opérations étroitement liées. Pour des raisons purement matérielles, il est difficile de les dissocier de façon stricte. En effet, les travaux de terrain sont coûteux ; il faut donc tirer le maximum des faits (observations et prélèvements) pour ne pas avoir à revenir sur des points déjà étudiés.

On dispose donc d'un excès de descriptions et d'échantillons que l'on sélectionne ensuite pour l'établissement du rapport. Les échantillons retenus sont expédiés le plus rapidement possible au laboratoire en vue de différents traitements analytiques. Quelques précautions simples s'imposent :

- les échantillons mouillés doivent être soumis à un premier séchage grossier, afin d'éviter le développement de moisissures ;

- les échantillons à matériaux grossiers ne seront jamais rangés les uns à côté des autres. Les frottements en cours de transport provoquent l'usure rapide des sacs d'où des dangers de contamination ;

- les sacs sont groupés par petites caisses de 20 à 30 échantillons pour faciliter les manipulations à éviter les bris qui s'accusent rapidement avec le poids ;

- les caisses sont numérotées avec soin et l'on ajoute à l'intérieur un double de la liste des échantillons transportés.

4. Travaux de laboratoire

Arrivés au laboratoire, les échantillons sont enregistrés, puis mis à sécher à l'air libre et à l'abri de la lumière avant de subir tout autre traitement.

Les types d'analyses que l'on peut effectuer sur un échantillon de terre sont nombreux. Il faut donc préciser les déterminations que l'on désire voir être réalisées. Comme ces opérations sont longues, délicates et coûteuses, cette liste doit être établie avec soin en tenant compte des besoins en renseignements analytiques, des moyens financiers disponibles, des délais et des possibilités d'exécution. C'est pour tout cela que le demandeur doit être en relations étroites, bien avant l'envoi des échantillons, avec le Chef de laboratoire. De plus, certaines caractéristiques des sols peuvent obliger à l'emploi de méthodes appropriées qui nécessitent des mises au point. Il importe donc que le pédologue ait aussi une bonne expérience des possibilités des laboratoires avec lesquels il collabore, afin de les informer éventuellement des difficultés qui peuvent se poser lors du traitement des échantillons : cas des sols calcaires, des sols halomorphes, des sols à allophanes, etc.

De toute façon, il est recommandé que le pédologue suive le déroulement des analyses. Le comportement des échantillons aux différents traitements est une source précieuse de renseignements qui peuvent orienter utilement les opérations ultérieures et préciser certaines conclusions.

Quelle est la valeur des données obtenues en laboratoire ? Il est tout d'abord important de signaler que ces déterminations analytiques n'ont de valeur que dans la mesure où l'échantillon traité est représentatif. Il est bon aussi de rappeler qu'elles ne définissent pas à elles seules l'échantillon, mais complètent et précisent les observations recueillies " *in situ*". On tente, en effet, trop souvent de masquer le manque de données de terrain en multipliant les déterminations de laboratoire. Cette tendance est d'autant plus marquée que l'expérience montre qu'un rapport illustré de chiffres a souvent plus d'audience qu'un rapport s'appuyant d'abord sur l'observation des faits. Il faut donc préciser ce qu'apportent les données de laboratoire en regard de celles recueillies lors des prospections.

Le but fondamental de la Pédologie est de fournir, par la seule observation des sols en place, le maximum de données indispensables à leur compréhension et, par suite, à leur utilisation. La pédologie étant une science jeune, il était et il est encore normal que l'on demande aux laboratoires des renseignements qui ne peuvent être tirés de la simple observation. Mais ces renseignements ne font que préciser les précédents. Des résultats de laboratoire, sans données d'observation, sont sans intérêt ni valeur. Au fur et à mesure que les observations de terrain deviennent plus fines, plus objectives, les besoins en analyses se modifient. Dans la mesure où les faits d'observation peuvent être chiffrés, il devient possible de les traiter de la même façon que ceux de laboratoire, en particulier par les méthodes statistiques. La multitude des données ainsi recueillies pose un problème ardu d'interprétation qu'il était difficile de résoudre il y a encore quelques années, mais les possibilités qu'offrent les ordinateurs permettent maintenant une telle approche. Au Gabon, on a pu mettre ainsi en évidence des relations étroites entre le jaunissement des sols ferrallitiques et l'abaissement du pH. Aussi, d'une simple observation morphologique : la couleur (déterminée à l'aide d'un code), il est possible de déduire l'acidité du sol et, par voie de conséquence, ses tendances à la désaturation et au lessivage. Comme ces caractéristiques marquent fondamentalement l'évolution de la matière organique, on peut conclure de l'importance pour l'utilisateur d'une telle observation. Il apparaît donc que les rapprochements de plus en plus nombreux entre données de terrain et résultats de laboratoire informent de corrélations qui limitent le traitement conventionnel des échantillons.

4.1. Nombre d'échantillons à prélever et à analyser

Si la cartographie est bien faite, il n'est nécessaire que d'un profil échantillonné par unité cartographique reconnue. Mais il est souvent utile, lorsque la transition entre deux unités cartographiques est peu tranchée, de prélever quelques profils "intergrades" qui précisent les variations à l'intérieur d'une même unité. Le nombre de profils à prélever est donc fonction de l'hétérogénéité du terrain. Comme le nombre d'horizons par profil est fonction du degré de développement des sols, on constate que la quantité d'échantillons à traiter peut varier dans d'assez larges proportions. A titre d'exemple, pour une coupure au 1/200 000, couvrant 1 degré carré, ce nombre se situe entre 200 et 500. Mais l'expérience du pédologue peut limiter ces besoins. Actuellement, la moyenne se place vers 250 - 300.

4.2. Types d'analyses à effectuer

- Les différentes analyses à effectuer sont fonction du type de sol. Par exemple, pour un sol isohumique, à profil AC, l'accent est mis sur l'étude de la matière organique et sur le degré de saturation - pour un sol lessivé, à profil ABC, les analyses portent sur le lessivage des cations, de l'argile et sur le degré de désaturation, etc. C'est donc la reconnaissance du sol "in situ" qui oriente les déterminations en laboratoire.
- Il faut éviter les déterminations partielles et rechercher les données complémentaires. Ainsi la somme des bases échangeables doit être obligatoirement associée à la détermination de la capacité d'échange ; les mesures des teneurs en carbone à celles en azote, etc. Plus que les valeurs en teneurs absolues, se sont les rapports entre les principaux résultats qui ont une importance fondamentale pour la compréhension et, par suite, l'interprétation des phénomènes pédologiques.
- Les données les plus fréquemment déterminées sont les suivantes :
 - . % de terre fine
 - . analyse mécanique
 - . pH eau - pH KCl
 - . Carbone total
 - . Azote total
 - . Bases échangeables
 - . Capacité d'échange

Mais il est bien d'autres caractéristiques importantes pour l'interprétation : humus - formes du phosphore - éléments totaux - nature minéralogique du complexe absorbant - charge en calcaire - teneurs en sols solubles, etc., sans parler de déterminations physiques et biologiques. Ces différents résultats ne sont à rechercher que si l'observation des sols et les problèmes soulevés le justifient.

- En règle générale, plus l'échelle est grande, plus le nombre de déterminations augmente, sans qu'il y ait réellement proportionnalité. Pour la recherche du niveau de fertilité d'une unité cartographique, cette augmentation touche non seulement le nombre de déterminations, mais aussi le nombre de prélèvements dit "agronomiques".

4.3. Valeur des résultats analytiques

Il a été indiqué que les déterminations n'avaient pas toutes la même valeur d'extrapolation et que la plupart ne faisaient que définir le profil observé. Les valeurs les plus généralisables concernent la texture, le pH, la capacité d'échange, le degré de saturation, le rapport C/N. Par contre, les teneurs en éléments dits "assimilables" (azote, potassium, aci-

de phosphorique) peuvent varier dans des proportions sensibles (du simple au double dans les meilleures conditions). Mais en fertilité, il est surtout important de connaître certains seuils. Par exemple, il n'y a pas de différences agronomiques sensibles lorsque les teneurs en potassium échangeables passent de 0,1 à 0,2 mé. Par contre, lorsqu'elles atteignent 0,4 mé, puis 1 mé, les conséquences pratiques sont considérables.

Il est indispensable de connaître aussi la précision des données analytiques. Les causes d'erreurs se placent à trois niveaux : du prélèvement, de la préparation de l'échantillon, des analyses.

- *Au niveau du prélèvement.* Dans les meilleures conditions et avec les précautions d'usage, il est pratiquement impossible de descendre au-dessous d'une erreur de 5%.
- *Au niveau de la préparation de l'échantillon.* C'est là un poste d'erreur souvent insoupçonné. La plupart des déterminations analytiques sont effectuées sur la "terre fine" dont les éléments granulométriques sont de tailles variées. Il arrive fréquemment qu'il se produise une ségrégation lorsque l'on passe d'un poste analytique à l'autre. Par vibrations, les particules grossières se concentrent en surface. Si le laborantin ne prend aucune précaution, on constate des erreurs considérables entre les différentes prises d'essais. Les résultats obtenus peuvent, pour certains éléments, varier de un à quatre. Ces possibilités d'erreurs sont d'ailleurs accusées par la distribution hétérogène des éléments analysés entre les agrégats. C'est pourquoi il est parfois nécessaire aussi de traiter la terre fine au mortier d'agate puis de la passer au tamis 100 (pour le carbone, par exemple) afin d'homogénéiser le matériau.
- *Au niveau des analyses.* Ce problème est beaucoup mieux connu. En analyses de routine, on ne peut guère espérer une erreur inférieure à 1 et même plus souvent 2% ; les sources d'erreurs portant plus sur les modes d'extraction que sur les dosages proprement dits. Pour les mesures de la capacité d'échange des erreurs de 10% à 20% ne sont pas rares.

Enfin, il est un dernier point à signaler qui concerne la valeur des méthodes analytiques en regard des problèmes soulevés. Ce problème se pose en particulier pour les sols à allophanes, les sols halomorphes et les sols calcaires. Pour ces derniers, et dans certaines mesures les seconds, la méthodologie est assez bien connue, mais l'étude des premiers soulève encore de nombreuses difficultés, et il est difficile de s'appuyer avec certitude sur les résultats actuellement obtenus. Ceci concerne plus particulièrement les analyses mécaniques, les dosages de la matière organique, les mesures de la capacité d'échange. De même, les dosages des sols halomorphes calcaires doivent être considérés avec réserves.

Des problèmes comparables se posent également pour certaines analyses qui font appel à des méthodes d'extraction fractionnées. C'est le cas plus particulier des dosages de l'acide phosphorique assimilable. Ainsi, la généralisation de la "méthode TRUOG" aux sols ferrallitiques acides ne peut apporter que des résultats négatifs puisque seules les formes liées au calcium sont extraites. Par contre, il existe d'autres formes probablement assimilables, liées en particulier à l'aluminium, qui exigent des formes d'extractions différentes. La plupart de ces méthodes sont connues, mais il faut être parfaitement conscient que la valeur interprétative des chiffres obtenus est avant tout fonction des techniques analytiques.

4.4. Interprétation des résultats analytiques

Un prélèvement pédologique n'est pas un prélèvement agronomique. Il ne concerne que le profil et ne se rapporte pas à une surface. Pour définir analytiquement celle-ci, il est indispensable d'indiquer l'écart-type des principales données de la caractérisation et c'est à l'intérieur de ces "fourchettes" que se fait l'interprétation. Les résultats concernant les échantillons n'ont donc qu'une faible valeur d'extrapolation. Ils signalent seulement des ordres de

grandeur. Par contre, la comparaison des éléments analytiques des horizons d'un même profil permet de reconnaître le type d'évolution et, par suite, caractérise le sol. Chacune des données particulières ne peut être considérée en elle-même. Elle doit être confrontée à l'ensemble de toutes les données caractérisant l'horizon. Ce n'est que la connaissance des inter-réactions liant les différents résultats qui permet de conclure sur les qualifications et les propriétés du sol.

Considérons deux sols fort éloignés génétiquement l'un de l'autre - un vertisol et un sol ferrugineux tropical ; et comparons deux valeurs fondamentales : la somme des bases échangeables et la capacité d'échange. Le vertisol présente des valeurs de S et T beaucoup plus élevées qu'un sol ferrugineux tropical.

Ordres de grandeur	Vertisol	S. F. T.
S	25 mé	2 mé
T	27 mé	5 mé

Il peut sembler, *a priori*, que le premier est plus fertile chimiquement que le second. Il contient plus de bases échangeables et il est mieux saturé. Mais ces conclusions doivent être tempérées si on les rapporte à leur état structural. Le vertisol se caractérise par des argiles montmorillonitiques qui orientent une structure cubique, massive, à faible porosité d'agrégats ; le sol ferrugineux tropical, par ces argiles kaolinitiques donnant des structures grumeleuses à subangulaires (nuciformes) beaucoup plus fines et poreuses. Il en résulte que, dans le premier cas, les racines ont beaucoup de difficultés à prospecter l'ensemble des horizons (elles se plaquent sur les agrégats), alors que dans le second, elles exploitent une masse de terre beaucoup plus grande. Ce dernier est plus facilement accessible aux racines. Les bases échangeables d'un sol ferrugineux tropical sont ainsi plus disponibles physiquement que celles d'un vertisol, même si les quantités en valeurs absolues sont plus faibles. L'épaisseur, la porosité, la consistance, le régime hydrique, etc. sont autant de données qui interviennent pour corriger, en plus ou en moins, l'importance des résultats analytiques.

En conclusion, données morphologiques et analytiques sont à considérer globalement au niveau de chaque horizon et dans leurs variations entre les horizons d'un même profil. Les études pédologiques amènent à reconnaître les différents processus génétiques. C'est en tenant compte de ces données et à partir de l'ensemble des éléments de la caractérisation des profils qu'il est possible de prévoir les réactions du sol à des interventions données et pour cela l'interprétation des résultats requiert une grande expérience qui est strictement du domaine du pédologue.

IV - MOYENS A METTRE EN ŒUVRE

Remarque préliminaire : Ce chapitre est rédigé en tenant compte des conditions rencontrées en Afrique Noire où l'infrastructure est peu développée. Certains détails pourront donc paraître superflus aux pédologues travaillant en pays industrialisés. Il a semblé cependant préférable de traiter le problème des moyens à mettre en œuvre dans l'optique la plus défavorable, de façon à laisser à chacun le choix des moyens indispensables.

1. Personnel de terrain

1.1. Composition des équipes de travail

A l'expérience, il semble que la formule la plus rentable soit la suivante :

- un pédologue
- un à trois prospecteurs techniciens
- un à trois équipes de manœuvres.

A la tête se trouve le pédologue responsable de l'opération. Selon les besoins, il peut se faire assister d'un géologue, d'un botaniste, d'un agronome ou de tout autre spécialiste intéressé. Ce rôle d'assistance est intéressant en début des travaux afin de préciser certains points particuliers du problème et, également, à la fin des opérations, lorsqu'il est nécessaire de tirer des conclusions orientées vers l'utilisation. De toute façon, un tel conseil doit être limité en nombre pour lui conserver une certaine souplesse.

— Le pédologue doit être rompu aux techniques de prospection. Il doit posséder une connaissance approfondie des types de sols, être à même d'identifier et d'interpréter sur place les horizons d'un profil, avoir un esprit critique orienté en permanence vers la recherche des corrélations qui lient les faits au milieu, être parfaitement au courant de la limite des connaissances pédologiques actuelles. Ces responsabilités sont telles qu'elles obligent les pédologues débutants à participer aux opérations comme adjoint d'un "ancien" plus expérimenté. Il est d'ailleurs souvent souhaitable que les pédologues travaillent en "pool", car les études de sols sont fondamentalement des problèmes d'équipes.

— Le prospecteur technicien n'a pas de formation aussi poussée. Ce doit être avant tout un bon observateur et un bon organisateur de chantier. Il doit être capable de remplir les fiches signalétiques des profils d'une façon objective en appliquant strictement les normes imposées ; être à même de lire parfaitement des cartes topographiques et posséder quelques notions de photogrammétrie. Son esprit critique doit être suffisamment poussé pour être en mesure de reconnaître les incidents de terrain auxquels il a à faire face, mais dans aucun cas il ne doit faire de l'interprétation. Naturellement, il sait mener un jallonnement et pointer les emplacements d'étude sur les documents.

— Les manœuvres sont ordinairement recrutés sur place. Il ne paraît pas souhaitable de les déplacer sur de trop longues distances parce qu'il y a perte de temps, parce que cela oblige à payer des frais de déplacement et, surtout, pour éviter le dépaysement et parfois certaines hostilités avec les agriculteurs. Ces derniers points sont particulièrement importants en Afrique Noire. Par suite du nombre varié de tribus à dialectes différents, les manœuvres ne peuvent plus se faire comprendre lorsqu'ils sortent de leur milieu traditionnel, ils trouvent difficilement à se nourrir et à se loger, ce qui oblige à prévoir des moyens de subsistance sur le terrain avec tout l'alourdissement et les frais que cela comporte pour le fonctionnement des équipes.

Le nombre, la composition des équipes de manœuvres sont fonction des difficultés de terrain et des moyens financiers disponibles. Ainsi, en forêt dense africaine, la couverture du sol oblige à disposer, en plus des équipes de foreurs qui creusent les fosses ou manient la sonde, d'équipes de layonneurs qui ouvrent des voies d'accès.

Pour obtenir un rendement optimum, il convient que le nombre de manœuvres corresponde à l'ouverture de points d'étude dont la quantité est compatible avec les possibilités d'observation du pédologue et du prospecteur technicien. Or, il faut compter en moyenne 1 à 2 h pour observer et prélever un profil. Compte tenu des distances qui les séparent et des observations de la surface au terrain, il est difficile à un pédologue et à un prospecteur travaillant de concert d'étudier plus de 8 à 10 profils par jour.

Pour l'ouverture des fosses, le rendement moyen est de 1 à 2 profils par jour pour deux ouvriers. Il est donc nécessaire de prévoir de 8 à 20 foreurs, suivant les cas, auxquels il faut ajouter deux équipes de deux ouvriers pour les forages à la sonde, plus éventuellement des layonneurs et des chaineurs, sans compter les chauffeurs des véhicules.

En forêt ombrophile équatoriale, deux layonneurs ouvrent 600 à 800 mètres par jour. Sur terrains moyennement accidentés, deux chaineurs arrivent à lever 5 à 6 km par jour. Ainsi, pour lever 50 ha par jour dans un tel milieu, avec un layon tous les 250 mètres, il faut compter en supplément des foreurs, huit layonneurs, deux chaineurs plus un boussolier qui fait généralement fonction de chef d'équipe.

Ceci représente des équipes nombreuses qu'il faut souvent diriger par le canal d'interprètes qui font généralement aussi fonction de chefs d'équipes. Le plus simple est de prendre ceux choisis par les manœuvres eux-mêmes et dont l'autorité est traditionnellement reconnue.

La composition de ces équipes présente une grande souplesse d'emploi et permet d'utiliser au maximum le temps passé sur le terrain. Comme ce dernier n'est pas accessible toute l'année et que les distances par rapport aux bases sont parfois considérables, il faut profiter au maximum du temps compté dont on dispose. Ceci ne veut pas dire qu'il faille passer rapidement. Il est indispensable de prendre le temps nécessaire aux observations et aux prélèvements car il est souvent difficile et, de toute façon, onéreux d'y revenir par la suite pour faire des travaux complémentaires.

1.2. Organisation du travail sur le terrain

Le rôle du pédologue, chef de mission, est en tout premier lieu d'établir le plan du travail, de désigner à ses aides les axes et les points d'observations à étudier, de "battre" le terrain dans plusieurs directions à partir de la zone où les aides sont en train d'opérer, afin de procéder à des vérifications, détecter des changements pédologiques éventuels, pointer les limites et choisir les points d'observations et de prélèvements complémentaires. Pour ce travail il s'appuie intensément sur l'étude des photographies aériennes.

Chaque soir, le pédologue contrôle et regroupe les observations obtenues au cours de la journée. Il en profite pour tenter de synthétiser l'ensemble des résultats à la fois par un résumé qui peut éventuellement servir par la suite à la rédaction du rapport, et par un schéma cartographique. Il doit tenter de dégager peu à peu les corrélations qui lient les faits pédologiques aux facteurs du milieu et confronter ces données aux documents disponibles, en particulier aux photographies aériennes. Cette phase est fondamentale pour un bon déroulement des travaux ultérieurs de bureau.

Le pédologue vérifie également que les points d'observations et les lieux de prélèvement sont bien "pointés" sur la carte et classés, que les échantillons de sols humides sont mis à sécher, qu'il en est de même pour tous autres échantillons : roches, plantes, etc.

L'aide pédologue doit être capable d'effectuer ces vérifications mais, à l'expérience, il apparaît important que le chef de mission supervise et coordonne l'ensemble de ces travaux pour éviter des oublis, voire des doubles emplois. Le technicien-pédologue ayant reçu les directives pour la journée met les équipes en place sur le terrain. Ce travail achevé, il procède à l'étude des profils ouverts la veille. Suivant la difficulté des problèmes posés il fait appel ou non aux conseils de son chef de mission. Ayant à charge les équipes de manœuvres, il assure le pointage du personnel, surveille ses activités et le bon déroulement des travaux. Il assure également l'entretien des véhicules et du matériel ainsi que le ravitaillement en carburant et lubrifiants.

Concernant le personnel d'exécution les données développées précédemment permettent la constitution des équipes de terrain. En fait, ce problème se place à deux niveaux :

- au niveau de centre pour le personnel spécialisé ;
- sur place en ce qui concerne les manœuvres.

Il peut exister, en effet, de longues distances entre la base de départ et le lieu de travail. Il est donc sans intérêt d'alourdir la mission au départ en recrutant des manœuvres qui, généralement, vivent à proximité d'une ville et sont mal adaptés aux problèmes de terrain. De plus, il en résulte des charges financières assez lourdes. Il est donc préférable, ainsi qu'il a été déjà indiqué, de les recruter sur place.

Par contre, le problème peut être différent en ce qui concerne les chauffeurs. Ceux-ci doivent être habitués à leur véhicule et ils sont fréquemment obligés de convoier le matériel de la base au lieu de travail. Il est conseillé que chaque chauffeur soit responsable d'un véhicule qui ne doit pas passer de mains en mains. Il faut donc choisir des chauffeurs permanents, ayant l'habitude du terrain et possédant un petit bagage de mécanicien. Il faut surtout que ces chauffeurs soient de santé robuste et, si possible, parlent plusieurs dialectes.

Enfin, il est un dernier point qui mérite quelques commentaires et qui concerne les prises de contact préalables avec les "personnalités utiles" des régions où l'on travaille. Par "personnes utiles", il faut entendre non seulement les spécialistes dont le concours peut s'avérer nécessaire, ou les conseillers connaissant particulièrement bien les secteurs à étudier, mais aussi les notabilités locales et les paysans. Une prospection suppose un séjour plus ou moins prolongé sur le terrain et il faut tenir compte de la mentalité paysanne généralement pointilleuse. Deux écueils sont à éviter :

- . susciter l'hostilité des agriculteurs ;
- . ou, au contraire, être accaparé par ceux qui veulent attirer l'attention sur leurs problèmes particuliers.

Il est important que l'équipe se consacre uniquement à son travail. Le rôle de contact est dévolu au responsable de la mission qui, de toute façon, assure les rapports administratifs avec les autorités compétentes.

2. Matériel de prospection

Par matériel de prospection, il faut entendre non seulement celui qui concerne l'étude des sols et le lever de la carte, mais également les moyens de transport et tout le matériel qui permet de séjourner sur le terrain.

2.1. Matériel d'étude et de lever de carte

Ces besoins ont déjà été traités par ailleurs (cf. chapitre "Etude des profils"). Si le matériel d'observation comprend un ensemble de petits instruments facilement transportables, par contre le matériel de forage, d'ouverture de tranchées, de prélèvements, est généralement plus encombrant, en particulier tout ce qui concerne le prélèvement de monolithes ou de profils plastifiés, ainsi que les sacs et caisses pour le conditionnement et le transport des échantillons.

Comme on l'a vu précédemment : une équipe de terrain doit être mobile et rapide dans ses interventions. Il importe donc d'orienter le choix du matériel vers des outils ni trop pesants, ni trop perfectionnés. Il doit pouvoir être rapidement mis en œuvre et facilement réparable.

2.2. Matériel et problème du transport

Personnel et matériel sont transportés sur les lieux de travail par des véhicules robustes. D'une façon générale, on compte un véhicule pour chaque prospecteur (pédologue et - ou - technicien) afin de laisser une grande souplesse aux possibilités d'intervention sur le terrain. Ces véhicules, du moins en ce qui concerne le travail en Afrique Noire, sont de type tout terrain, avec deux ponts et réducteur de vitesse. Un châssis long paraît généralement plus intéressant qu'un châssis court. Il est plus confortable et, surtout, il permet de transporter plus de matériel. C'est d'ailleurs surtout une question d'encombrement. Naturellement, ce choix est fonction de l'état et de la densité des voies de communication.

Si le lieu de travail est fort éloigné de la base de départ, il faut prévoir les délais de transport nécessaires. Il n'est pas utile, en effet, que les chercheurs perdent du temps à convoyer les véhicules qu'ils peuvent rejoindre par des voies plus rapides. Pour certaines opérations menées en Afrique, ces délais peuvent atteindre un à deux mois. C'est donc un point important à considérer.

Toujours en Afrique, les véhicules sont équipés pour avoir la plus grande autonomie possible. Il faut donc parfois prévoir des réservoirs d'essence supplémentaires. A l'expérience, il semble qu'une autonomie de 500km est suffisante. Cette réserve de carburant est complétée par une réserve de lubrifiants (huile à moteur, de boîte à vitesse, de pont, et huile hydraulique pour les freins).

Il est également recommandé de munir le tableau de bord d'un compteur hectométrique, d'un thermomètre et d'un appareil à mesure de pression d'huile. Le véhicule est équipé d'une trousse à réparations complète avec clefs à tubes et clefs plates, d'un vulcanisateur portatif, de pneus et de chambres à air de rechange, de petit matériel de remplacement tel que durite, courroie de ventilateur, bougies, bobines, vis platinées, etc. Ce matériel est groupé dans une caisse facilement accessible.

Enfin, si l'état du terrain l'oblige, l'équipement du véhicule se complète de chemins de roulement, de pelles, de pioches, de haches, d'une corde et d'un palan pour désensabler ou désembourber. En cas d'approche difficile (absence de chemins suffisamment longs, de points), il est parfois nécessaire de se munir de bicyclettes. Dans les cas les plus défavorables il faut se résoudre à transporter le matériel par porteurs.

2.3. Matériel de campement et organisation du séjour sur le terrain

Si le matériel d'observation est relativement simple, le matériel nécessaire à la prospection est beaucoup plus complexe. Ce dernier comprend, non seulement les moyens de transport, traités précédemment, mais aussi tout le matériel indispensable pour vivre sur le terrain, c'est-à-dire tout le matériel de campement, ceci naturellement pour les pays ne bénéficiant pas d'une infrastructure hôtelière suffisante.

Le matériel de campement se groupe en deux catégories :

- . le matériel de couchage ;
- . le matériel de ravitaillement.

Cette différenciation est par certains côtés assez artificielle ; elle est, par contre, très pratique car elle s'appuie sur son rythme d'utilisation. On a donc intérêt à le regrouper dans des caisses séparées. A tous points de vue les caisses en bois sont préférables aux bagages métalliques car on évite les frottements métal sur métal qui dégradent rapidement le matériel. De plus, elles sont d'un prix de revient intéressant. Ces caisses doivent être robustes et d'un encombrement réduit. Leurs dimensions doivent être calculées en fonction du matériel à transporter et des possibilités d'encombrement de la plate forme arrière du véhicule. Il est nécessaire qu'elles aient approximativement la même hauteur et qu'elles puissent être disposées suivant un assemblage compacte pour éviter les heurts lorsque les routes sont en mauvais état. Ces dispositions obligent les manœuvres à ranger le matériel toujours à la même façon, ce qui facilite le chargement et permet un contrôle rapide. Il est donc fortement conseillé de regrouper le matériel par caisses en fonction de son utilisation.

Lorsque l'on travaille en région peu habitée, on doit disposer :

- d'une caisse literie où sont regroupés lits pliants, matelas, draps et couvertures, et éventuellement une tente ;

- d'une caisse ravitaillement ;
- d'une caisse pour réserve d'eau ;
- d'une caisse pour les lampes ;
- parfois d'une caisse documents, plus les bagages personnels auxquels s'ajoutent naturellement la caisse réparations, les réserves en carburant et lubrifiants, le matériel de creusement et de prélèvement (pelles, pioches, sondes, haches, etc.), une caisse pour transporter les échantillons, éventuellement une table pliante et des chaises.

A côté du problème d'encombrement se pose le problème de la stabilité du chargement. Il faut éviter les chargements en hauteur et répartir les caisses les plus lourdes contre la cabine avant. Ce ne sont que des règles générales car, en fait, le chargement doit être aussi étudié en fonction de l'utilisation du matériel. Ce point reste cependant important car de nombreux accidents sont dus à un mauvais chargement. Tout ceci est affaire de bon sens, de l'importance et de la durée de la prospection, de la place disponible dans les véhicules.

Sur le matériel de campement il y aurait beaucoup à dire ; rien n'est définitif et le matériel s'améliore sans cesse. Quelques conseils peuvent cependant être avancés :

- il est préférable de disposer de lits légers et de faible encombrement. Ils doivent malgré tout être assez élevés pour éviter l'humidité du sol et l'attaque de certains insectes (termites, par exemple) ;
- les matelas sont légers, pliants et peu encombrants. Ils sont très utiles car ils protègent du froid et servent à border les moustiquaires ;
- les moustiquaires sont de bonne qualité, de la dimension des lits et suffisamment fines pour protéger efficacement contre les insectes. Ne pas oublier de prévoir les dispositifs d'attaches au-dessus des lits ;
- rien à dire sur les draps, couvertures, sacs de couchage. On doit cependant rappeler que certaines régions d'Afrique ont des nuits très froides en saison sèche ;
- de nombreux prospecteurs complètent cet équipement par une tente. C'est parfois nécessaire en régions humides, peu peuplées, mais il est souvent plus simple de louer une case. En saison sèche, il est possible de s'installer en plein air. Mais il faut se méfier de la rosée qui est parfois abondante. Dans ce cas, on peut disposer d'une simple bache que l'on tend au-dessus des lits.

Les lieux d'implantation du campement sont très différents suivant que l'on réalise une carte détaillée à très grande échelle ou une carte de reconnaissance à échelle réduite. Dans le premier cas (1/20 000), le campement est pratiquement permanent. La théorie voudrait que l'on s'installe au centre de la zone à étudier pour limiter les transports. Mais les secteurs à prospecter ne sont pas toujours viables (plaines d'inondation insalubres, par exemple). Aussi est-il plutôt favorable de se mettre à proximité d'un gros village pouvant fournir les manœuvres nécessaires, lesquels ne posent alors ni problème de logement, ni problème de ravitaillement. Il faut veiller également à ce que l'on puisse avoir un accès facile à un point d'eau.

Lorsque le travail de prospection s'exécute à une échelle plus petite ($\leq 1/50\ 000$), il est nécessaire de changer l'emplacement du campement tous les 3 ou 4 jours, de façon à couvrir peu à peu le périmètre à étudier. Dans ces conditions, qui sont aussi les plus fréquentes, se pose avec acuité le problème de la souplesse dans le transport. Il faut limiter l'encombrement et le poids, et rationaliser le chargement de façon à perdre le moins de temps possible. En tout état de cause, il est difficile de réduire le temps de chargement ou de déchargement à moins d'une heure. Le choix des emplacements découle des mêmes considérations que précédemment : possibilité de recrutement de manœuvres et possibilité de ravitaillement, plus particulièrement en eau.

3. Matériel cartographique, graphique et de photo-interprétation

3.1. Matériel cartographique et graphique

Aucune prospection ne se conçoit sans carte topographique ou, à défaut, levés provisoires, photographies aériennes, extrait de plans ou extrait de cartes géologiques. Ce matériel n'est à utiliser que par les prospecteurs (pédologues et aide-techniques).

Selon les conditions de travail, on emploie soit des documents ramenés à format réduit par pliage ou découpage, soit des documents de grand format (surtout quand l'échelle l'exige). Dans ce domaine, deux questions se posent : **commodité de maniement et protection**. Des cartes ou plans de grandes dimensions sont incommodes à manier sur le terrain. Ils se dégradent rapidement, par le vent, par les intempéries, par la boue, à moins de s'astreindre au transport d'une planchette topographique encombrante. En régions arides, l'extrême sécheresse rend le papier cassant et les documents se fragmentent en débris fins. D'une façon générale, il n'est pas recommandé d'emporter sur le terrain des documents rares et coûteux. Ceux indispensables restent au campement. D'ailleurs, le temps passé sur le terrain est suffisamment rempli par les travaux d'observations. Cependant, le problème peut se poser pour les photographies aériennes. Le plus simple est de constituer des mosaïques semi-contrôlées, couvrant la zone journalière à prospecter, punaisée sur une plaque de contreplaqué d'un format suffisant.

Le pliage permet de conserver le document entier, mais l'usure intervient rapidement aux pliures, à moins d'avoir préalablement procédé à un entoilage (prix de revient assez élevé) ou à une plastification. Aussi, est-il souvent préférable de découper les documents d'une trop grande dimension au format d'un carton-planchette 21/27. Il faut faire attention à ce que le découpage soit fait à travers des secteurs posant peu de problèmes. Le carton-planchette est le plus souvent une simple plaquette en plastique stratifié rigide, léger et imperméable. A défaut, on peut se contenter d'un morceau de contreplaqué.

Il peut arriver qu'au lieu de porter les annotations directement sur la carte, on préfère utiliser un transparent. Cette méthode reste cependant d'un maniement peu pratique sur le terrain et plutôt réservée au regroupement des données le soir au campement et au travail de bureau. Elle permet toutefois de conserver les documents topographiques et surtout photographiques en bon état. Ces transparents sont de diverses qualités :

- le papier calque végétal, très économique, se détériore rapidement. Il est sensible à l'eau et même à l'humidité. Il devient très cassant à l'état sec ;
- le calque cuir, plus intéressant, présente le défaut de jaunir à la lumière ;

Les plastiques transparents ont l'avantage d'être très robustes :

- le Kodatrace sur une faible épaisseur (9/100 de mm) résiste parfaitement à l'eau. Il est d'une transparence bien supérieure à celle des meilleurs papiers calques. Même une photo aérienne en tirage pâle reste parfaitement visible. Malheureusement, il tient mal l'encre qui s'écaille facilement et surtout il se distend à la chaleur ;
- l'astralon, plus épais, ne se déforme pratiquement pas ; son principal défaut est d'être cassant ;
- l'herculène est bien transparent, ne bouge pas, ne craint pas l'humidité ni la chaleur. Il prend bien l'encre et la couleur et est à utiliser de préférence.

On retrouve l'utilisation de ces différents transparents aux divers stades de la cartographie.

Pour dessiner les limites ou reporter sur les documents les observations, le prospecteur dispose de crayons noirs et de crayons de couleur. L'emploi des crayons à bille est à éviter, surtout sur les plastiques transparents.

Les crayons dermographes sont employés pour annoter les photographies aériennes. Il est recommandé toutefois de protéger les tracés des frottements, sinon ils s'étalent facilement. On peut les effacer avec une gomme mie de pain. La mine présente le défaut de s'amollir avec la chaleur. Il est alors impossible de reporter un tracé fin.

3.2. Matériel et documents pour photo-interprétation

— Photos aériennes

Pour être utilisables dans les meilleures conditions, les photographies aériennes doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- . elles doivent être prises avec un objectif à grand angulaire à une altitude constante. Les variations d'altitude tolérées doivent être inférieures à 10 - 15 % ;
- . elles doivent couvrir toute la zone à étudier, les lignes de vol doivent être de préférence orientées E - W ;
- . elles sont verticales ($< 1\%$, mais on peut tolérer $< 3\%$). Le recouvrement longitudinal est de 57 - 60 % avec un maximum toléré de 65 % et un minimum de 55 %.
- . le recouvrement des lignes de vol est de 15 % avec un maximum toléré de 25 % et un minimum de 10 %.

Naturellement, les photographies sont prises par temps clair ($< 2\%$ de nuage), de préférence en milieu de matinée ou en milieu d'après-midi pour accuser les contrastes et faire apparaître les ombres.

Pour l'étude stéréoscopique, les clichés brillants sont préférés aux clichés mats qui eux peuvent être utilisés pour les reports. Il faut préciser si les photographies doivent être livrées sur papier à une seule épaisseur ou sur papier double.

La meilleure échelle pour les études pédologiques se situe entre le 1/15 000 et le 1/25 000. Les échelles au 1/50 000 servent surtout pour les prospections de reconnaissance.

Les photographies sont numérotées et livrées avec un index de vol sur fond topographique.

— Matériel

- . Loupe
- . Stéréoscope : préférence pour des grossissements 2 ou 4
 - stéréoscope de poche : pour le terrain
 - stéréoscope à miroir : avec barre parallaxe pour le bureau
- différents modèles :
 - Wilde
 - stéréoscope suspendu de Koningh
 - Stéréosketh, etc.
- . Pantographe
- . Chambre claire
- . Tables planes de grande dimension pour monter les mosaïques
- . Tables à dessin

- . Petit matériel :
 - compas réducteur
 - curvimètre
 - planimètre
 - crayons dermographes
 - gomme mie de pain
 - pinceaux fins ; gouache
- . Papeterie
- . Divers : classeur ; boîtes métalliques pour photographies, meubles cartes, etc.

Remarque. — L'étude stéréoscopique doit se réaliser face à la lumière du jour ou à l'aide d'une forte source lumineuse.

V - ÉLÉMENTS DU PRIX DE REVIENT D'UNE CARTE PÉDOLOGIQUE

Le prix de revient d'une opération pédologique est une donnée fondamentale qui limite pratiquement la consistance des études. C'est pourquoi le pédologue doit être suffisamment au courant du montant des moyens à mettre en œuvre afin de pouvoir discuter éventuellement de la somme des résultats à atteindre en fonction des moyens accordés. Inversement, il peut être amené à établir un devis en fonction d'un objectif et d'un programme fixé à l'avance.

Les dépenses peuvent varier assez fortement d'un pays à l'autre et même d'une région à l'autre du fait de l'éloignement de la base de départ et des difficultés plus ou moins grandes de pénétration. Dans les cas les plus défavorables, on peut parfois être amené à percer des voies d'accès, ce qui grève fortement le budget.

Dans le mode d'évaluation et de rémunération des marchés, il faut distinguer plusieurs parties (GEPPA 1965) :

- a — les dépenses correspondant au travail pédologique proprement dit sur le terrain et au bureau ;
- b — les frais de terrain : manœuvres, matériel pour le terrassement, transports, déplacements, approvisionnement, etc. ;
- c — les frais d'analyses en laboratoire ;
- d — les frais d'édition des cartes et des rapports ;
- e — la part des frais généraux de l'entreprise majorant les frais directs de pédologie.

Les dépenses correspondant au travail pédologique couvrent le prix de revient du personnel spécialisé (pédologue, technicien, aide-pédologue). Cette ligne budgétaire est généralement à forfaiter. Elle est justifiée par un sous-détail estimatif qui tient compte de la durée de l'entreprise (travaux de terrain, d'interprétation et de rédaction).

L'estimation des frais de terrain doit également être forfaitée et justifiée par un sous-détail estimatif. Pour se faire, il est indispensable d'être informé du prix de la main d'œuvre locale, des frais annexes : assurances, sécurité sociale, etc. ; des tarifs pour frais de déplacement ; du prix de l'essence et des lubrifiants ; du taux d'amortissement des véhicules et du matériel ; des frais éventuels de réparation. Il s'agit d'un ensemble de données locales qui exige une étude sérieuse.

Les frais d'analyses sont souvent à payer sur bordereau précis annexé en fonction des quantités traitées. Le prix moyen de traitement peut être estimé avec une relative précision

en ce qui concerne les analyses courantes. Cette estimation est plus délicate lorsqu'il s'agit d'analyses particulières, spécifiques à un problème qui se dégage en cours d'étude. Certains besoins méthodologiques s'imposent et qui sont difficilement prévisibles. Aussi, est-il conseillé de pondérer avec réserve ce poste de dépenses. Il peut être intéressant de fournir, à titre indicatif, une "fourchette" sur le nombre d'échantillons à traiter. Si des raisons impérieuses obligent à dépasser les prévisions d'analyses, la justification de cette augmentation de dépenses doit être discutée.

Les frais d'édition des cartes et rapports sont à payer sur bordereau annexe d'après le nombre demandé, en tenant compte des procédés de tirage précisés par entente mutuelle.

A titre indicatif, il est possible et parfois utile d'en déduire un prix de revient prévisible à l'hectare ; mais il n'est pas conseillé de le retenir comme élément de base du paiement, ce dernier étant surtout fonction de l'importance de l'opération. De même, sans que cela soit un élément comptable, il peut être intéressant de donner, à titre indicatif, la densité probable des tranchées d'observation et le nombre de sondages à la tarière.

Eléments d'un devis programme :

- Personnel

Cadre	Pédologue	x mois à tant
	Technicien	" "
Subalterne	Aide-pédologue	" "
	Chauffeur	" "
	Chef d'équipe	" "
	Manceuvre	" "

Indemnités de déplacement.

- Frais de terrain

Amortissement	x km
Réparation (matériel roulant, matériel prospection)	
Carburant et lubrifiant	x km
Achat matériel de terrain	
" photographies aériennes	
Fournitures de bureau et cartes	
Amortissement matériel photo interprétation	

- Frais de laboratoire x échantillons x tant

- Impression cartes et rapports : x cartes et rapports (de caractéristiques connues)

- Frais généraux x %

Ordre de grandeur du prix de revient ha calculé pour la France en francs (C.P.C.S. 1965)	
1/25 000	30,0
1/100 000	4,0
1/250 000	0,2

VI - DÉLAIS D'EXÉCUTION - RENDEMENT

Plus on cherche le détail pédologique, plus les facteurs locaux de la pédogénèse sont importants et plus l'étude pédologique sur le terrain augmente. Donc le rendement d'une étude pédologique avec photo-interprétation par rapport à la même étude exécutée suivant les méthodes conventionnelles, varie suivant l'échelle de la carte à fournir.

BURINGH P. donne le tableau suivant :

échelle de la carte	quantité d'observations au sol par km ² sans photo-interprétation	gain de temps avec photo-interprétation	aires minima cartographiées en ha
1 000 000	± 0,4	75%	1 600
250 000	± 1	80%	100
50 000	12-25	70%	4
20 000	± 100	20%	0,64
10 000	100 à 500	10%	0,16

En pratique, la photo-interprétation est surtout rentable en pédologie pour des échelles égales ou plus petites que celles du 1/50 000. Pour les échelles plus grandes, le gain diminue rapidement. Cependant, le travail fourni est toujours plus fouillé et plus précis.

Pour des travaux de cartographies pédologiques par les méthodes conventionnelles, on considère que 20% du temps passé sur le terrain est utilisé à l'observation et l'étude des profils, et 80% au tracé des limites. Par la photo-interprétation, pour des échelles avoisinant 1/50 000, il est possible de réduire le temps consacré au tracé des limites de 80% à 10%, le temps passé à étudier les profils ne variant pas. Il en résulte que le temps consacré au terrain est de 30% du temps passé avec les méthodes conventionnelles. La vitesse d'exécution est donc multipliée par 3. Mais cela amène, pour un même temps, à multiplier les échantillons prélevés en vue de leurs analyses par 3. Il faut donc augmenter d'autant les possibilités des laboratoires.

Une équipe de prospection composée de 1 pédologue, de 1 technicien, du nombre indispensable de foreurs, lève avec l'aide de la photo-interprétation, pour une efficacité pédologique K = 10 (paysage de steppe, de savane ouverte) :

- pour une étude au 1/10 000 au 1/20 000, 50 à 100 ha levés par journée de terrain, ou 1 000 à 3 000 ha cartographiés par mois, suivant l'hétérogénéité du terrain ;
- pour une étude semi-détaillée au 1/50 000, de 500 à 2 000 ha par jour, soit 10 000 à 40 000 ha par mois ;
- pour une étude de reconnaissance au 1/200 000, de 5 000 à 20 000 ha par jour, soit 100 000 à 400 000 ha par mois.

A ces délais, il faut ajouter le temps nécessaire aux travaux de laboratoire, à l'interprétation de l'ensemble des données, à l'établissement de la minute cartographique et du rapport, à l'impression et la diffusion de ces documents.

Durée totale pour l'exécution d'une carte pédologique
 au 1/200 000 pour 1 degré carré, ou 1/50 000
 pour 1/16 de degré carré

Préparation de la mission	1 mois
Travaux de terrain	4 mois
Travaux de laboratoire	6 mois
Etablissement et publication de cartes et notices (offset et ronéo)	6 mois
Délais de transport	1 mois
	18 mois

Bibliographie

- AUBERT (G.), FOURNIER (F.) - 1964 - Les cartes d'utilisation des terres. *African Soils* III, 1, pp. 76-109.
- AUBERT (G.) - 1964 - La Classification des Sols utilisée par les pédologues français en zone tropicale ou aride.
- AUBERT (G.), BOULAINÉ (J.) - 1967 - La pédologie. *Coll. "Que sais-je" n° 352*. P.U.F. Paris, 128 p.
- BOULAINÉ (J.) - La Cartographie des Sols et la Pédologie. *Cahier Agro.*, 5 p.
- BOULAINÉ (J.) - 1966 - Sur la précision des cartes pédologiques. *Cah. ORSTOM*, série Pédol., IV, 1, pp. 3-7.
- BURINGH (P.) - 1960 - The application of aerial photograph in soil surveys. *Manual of photographic interpretation*, Washington D.C., pp. 633-66.
- DEMOLON (A.) - 1960 - La Dynamique du Sol. 5ème éd., *Dunod*, Paris, XXII, 520 p.
- Description des Profils de Sols sur Fiche de Prospection - 1966 - Centre ORSTOM, Hann Dakar. *Bull. bibliogr. Pédol. ORSTOM*, XV, 1, pp. 8-17.
- DUCHAUFOR (Ph.) - Méthode de description des profils de sols. *Ecole Nat. Eaux Forêts. Labo Pédol.* Nancy.
- DUCHAUFOR (Ph.) - 1965 - Précis de Pédologie. 2ème éd. *Masson*, Paris, 482 p.

- DUPUIS (J.) - 1959 à 1963 - Directives pour la Prospection et l'Etude des Sols sur le terrain et au laboratoire. *Bull. A.F.E.S.*, Paris, n° 10, 1959, pp. 438-455 ; n° 6 et 7, 1960, pp. 327-344 ; n° 3, 1962, pp. 127-168 ; n° 3, 1963, pp. 117-147 ; n° 4, 1963, pp. 169-209.
- DUPUIS (P.), CALLOT (M.) - 1965 - De l'utilisation de la photographie aérienne en cartographie pédologique. *Bull. A.F.E.S.* Paris, 12, pp. 424-46.
- DURAND (J.H.) - 1965 - Prospection pédologique à but agronomique : Techniques utilisables pour dresser les cartes de mise en valeur des sols. *Agro. Trop.* XX, 12, p.1270 - P3.
- HENIN (S.) - 1957 - Note sur la description et la Classification des éléments minéraux. *Bull. Bibliogr. Pédol. ORSTOM*, Paris.
- INEAC - 1961 - La cartographie des Sols du Congo. Ses techniques. Ses méthodes. Série Techn., n° 66.
- MAIGNIEN (R.) - 1962 - Caractérisation des profils de sol. *Bull. bibliogr. pédol., ORSTOM*, Paris, XI, 2, pp. 5-17.
- MAIGNIEN (R.) - 1963 - La photo-interprétation en pédologie. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, I, 3, pp. 8-16.
- MANIL (G.) - 1956 - Rapport général sur le problème de la Classification des Sols. C.R. 4ème Cong. Intern. Sc. Sol Paris, vol. A, pp. 166-84.
- REY (P.) - 1957 - L'interprétation des photographies aériennes. *Bull. Service Carte Phytogéographie*, A, I, pp. 81-120.
- Schéma pour la description d'un profil I.R.S.I.A. Gand, Belgique.
- SEGALEN (P.) - 1962 - Manuel de Prospection Pédologique. Centre ORSTOM Yaoundé, 3 vol.
- Soil classification - 1960 - A comprehensive systeme 7è Approx. Soil Survey Staff. *Soil Conservation Service U.S.D.A.*, 258 p.
- Soil Survey Manual - 1951 - U.S.D.A. Handbook, n° 18, 503 p.
- VINK (A.) - 1963 - Aspects de Pédologie Appliquée. *A la Bacconnière*, Neuchâtel, 174 p.



O. R. S. T. O. M.

Direction générale :

24, rue Bayard, PARIS 8^e

Services Scientifiques Centraux :

Service Central de Documentation :

70-74, route d'Aulnay - 93 - BONDY

IMP. S. S. C. Bondy
O. R. S. T. O. M. Éditeur
Dépôt légal : 4^e trim. 1969