

**OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER**
Centre de LOMÉ

**LA GRANULOMÉTRIE DES SABLES
APPROCHE DU PROBLÈME ET PREMIERS RÉSULTATS
POUR LES SOLS REMANIÉS DU SOCLE GRANITO-GNEISSIQUE
AU TOGO**

A. LÉVÊQUE

P L A N

1. INTRODUCTION	P	1
2. METHOLOGIE ET TECHNIQUE		
2.1. Méthologie		
2.1.1. Exposé de la méthode	P	3
2.1.2. Inconvénients et avantages	P	5
2.1.2.1. Inconvénients	P	5
2.1.2.2. Avantages	P	5
2.2. Technique	P	5
3. LES FAITS		
3.1. Remarques préliminaires	P	6
3.2. Les profils granulométriques	P	9
3.2.1. Traits généraux	P	9
3.2.2. "Individualité granulométrique de sols très rapprochés sur un même versant"	P	0
3.2.3. Les coefficients granulométriques	P	0
3.2.3.1. Présentation générale des faits	P	00
3.2.3.2. Les types de variations du coefficient granulométrique entre les niveaux remaniés et le sommet des horizons en place	P	3
4. LES RESULTATS		
4.1. Les directions de recherche	P	6
4.2. Les facteurs pédogénétiques	P	6
4.2.1. Rôle des hydroxydes ou oxydes de fer	P	6
4.2.2. Rôle de l'appauvrissement des profils en silice	P	6
4.2.3. Conclusion sur le rôle des facteurs pédogénétiques	P	18
4.3. Les facteurs topographiques	P	19
4.3.1. Déclivité du terrain	P	19
4.3.2. Situation topographique	P	0
4.3.3. Influence du modelé.....	P	22
4.3.4. Puissance de l'ensemble des niveaux I + II, remaniés ...	P	3
4.3.5. Conclusion sur l'influence des facteurs topographiques	P	25
4.4. Le rôle du matériau du niveau en place	P	25
4.4.1. Parenté granulométrique entre horizons en place et horizons remaniés	P	6
4.4.2. L'influence de la taille des sables	P	7
5. CONCLUSION		
5.1. Récapitulation des faits	P	28
5.1.1. Facteurs topographiques	P	28
5.1.2. Influence du type de pédogenèse	P	48
5.2. Caractéristiques de la redistribution granulométrique	P	28
5.3. Hypothèse retenue	P	29
Résumé	P	30
BIBLIOGRAPHIE	P	31

LA GRANULOMETRIE DES SABLES - APPROCHE DU PROBLEME ET PREMIERS RESULTATS POUR LES SOLS REMANIES DU SOCLE GRANITO-GNEISSIQUE AU TOGO

1. INTRODUCTION

La plupart des travaux relatifs à la granulométrie des sables sont basés dans leur grande majorité sur l'interprétation de courbes cumulatives des pourcentages des classes retenues. A partir des résultats obtenus, sont définis des indices numériques : médiano, quartiles, déciles, centiles ... etc, destinés à traduire d'une façon plus ou moins synthétique, la grossièreté d'une formation. Des indices plus élaborés, tels que q d phi de KRUMBEIN, hétérométrie de CAILLEUX, Sorting Index de TRASK (So) permettent de préciser la pente des courbes cumulatives et, notamment, la dominance d'une ou de plusieurs classes granulométriques (CAILLEUX et TRICART, 1959). On retire de toutes ces données des indications précieuses quant au degré de triage du matériau considéré, ainsi qu'à son origine, par méthode comparative. Tous ces calculs sont pratiqués couramment en sédimentologie.

De nombreuses recherches pédologiques ont tenté de les utiliser, non pas tant pour déterminer l'origine des matériaux originels des sols, que pour tenter de s'assurer de l'homogénéité du matériau de la base au sommet des profils, ou à l'inverse pour apprécier son hétérogénéité et l'ampleur des remaniements superficiels dus à des transports latéraux dans le paysage ou le long de versants.

Cette méthode fut également employée dans le travail en cours sur la pédogenèse du socle granito-gneissique au Togo pour tenter de s'assurer de l'autochtonie ou de l'allochtonie des horizons supérieurs des sols. Ceux-ci sont, en effet, excessivement remaniés par rapport aux horizons profonds (BC, C et D). La très grande majorité de ces derniers révèlent la présence de zones de roche mère ameublie par l'altération mais encore structurée, ou/et de filons et filonnets de quartz non ou très peu disloqués. Ils sont, avec une certitude absolue, bien en place et dérivés directement de la roche mère sous-jacente.

La morphologie des horizons supérieurs (A et B, le plus souvent) traduit donc de profonds remaniements et leur parenté avec ceux qui leur sont sous-jacents est très loin de se révéler certaine. En particulier, la présence, à une profondeur plus ou moins importante, d'une nappe de gravats, surmontée d'un ou de plusieurs horizons de terre fine, autorise largement à penser qu'il y eut apport des matériaux constituant cette partie très distincte du profil. D'autre part, certains des quartz de cette nappe de gravats présentent parfois de fines stries d'usure mécanique. Enfin, même la morphologie, dans tous ses aspects, de la matrice (ou remplissage de terre fine) est très fréquemment affectée d'une modification profonde et rapide, voire brutale quand on passe des horizons en place à ceux de surface. Adoptant la terminologie de LAPORTE (1962), nous rappellerons que nous pouvons grouper les horizons constitutifs des profils en 3 niveaux. Ceux-ci sont du sommet à la base :

- le niveau I, superficiel, de terre fine, pratiquement dépourvu d'éléments grossiers.
- le niveau II réalisant une concentration, parfois importante, aussi bien en puissance qu'en intensité, de ce que nous appellerons ici, d' "individus granulométriques" de taille plus ou moins grande (pouvant atteindre plusieurs décimètres) et

parfois usés mécaniquement (et/ou chimiquement ?) : quartz, nodules et concrétions ferrugineux.

- le niveau III, enfin, parfaitement en place et ne comprenant, en fait de granulométrie grossière que des filons et filonnets de quartz, des zones de roche mère encore structurée (dont la fréquence croît, bien entendu, en profondeur) et parfois, des nodules et concrétions ferrugineux, ces derniers, en réalité, relativement peu fréquents.

Le passage vertical de ces niveaux les uns aux autres est très souvent extrêmement rapide, ce qui renforce l'impression d'allochtonie des niveaux I et II. Signalons que ces derniers correspondent, en gros, le plus souvent, respectivement aux horizons A et B. Remarquons d'autre part, que le niveau II peut être constitué uniquement, dans ses fractions grossières, de nodules et concrétions ferrugineux, sans aucun quartz grossier, mais ce fait est rare.

Enfin cette distribution d'ordre granulométrique affecte pratiquement tous les profils de la région naturelle étudiée : aussi bien dans toutes les classes de sols qu'en n'importe quelle position topographique ou géomorphologique. C'est un phénomène général, qui n'est d'ailleurs pas particulier au Togo, mais visible pratiquement dans tout le continent et, certaines observations que nous avons effectuées en France, qui l'ont été, également, aux Etats-Unis, en Amérique du Sud ... etc, permettent de penser qu'il est mondial.

Les présomptions d'allochtonie qu'entraîne la constatation de cette redistribution granulométrique à l'échelle de chaque profil, sont donc très fortes. L'étude en cours de la pédogenèse de ce socle togolais, dans sa tentative de préciser au mieux les bilans géochimiques, devait en tenir compte en toute priorité. En ce sens, le travail ici présenté, ne réalise que la tentative d'exploration d'une direction de recherche non pour elle-même, mais pour les indications qu'on peut en retirer quant à la formation, la constitution des profils.

Pour revenir aux méthodes basées sur les indices de triage dont il est fait état au début de cette note, il s'est rapidement avéré que leur application était bien souvent très difficile pour le domaine d'étude envisagé. La raison en est dans le fait que nous avons à faire à des roches mères, le plus souvent gneiss et micaschistes (c'est-à-dire dérivées après métamorphisme, de matériaux sédimentaires anciens), dont la granulométrie des quartz reflète leur origine partiellement détritique. Le calcul des différents indices mentionnés plus haut, montre, en effet, que dès la base des profils, dans les horizons autochtones prouvés avec certitude absolue, le matériau originel des sols présente un triage certain de sa fraction quartzeuse. C'est ainsi que la moyenne des indices de mauvais triage de TRASK (So) est de 1,97 pour les gneiss ; 1,96 pour les micaschistes et seulement de 2,17 pour les roches mères à caractère plutoniques les plus marqués. Si nous nous en référons à TRASK, nous avons, dans tous ces cas, des matériaux bien triés.

D'autre part, les différences entre indices de divers horizons d'un même profil sont généralement faibles. Leur signification quant à d'éventuels transports est alors bien difficile à concrétiser. Par ailleurs, et ce fait semble assez important, il arrive que le triage de l'ensemble des horizons remaniés de certains profils soit moins poussé que celui de ses horizons en place : ce phénomène se produit dans 23 % des cas et ce, en toute position géomorphologique ou topographique. Un

exemple de toutes ces caractéristiques est donné par la figure 1. Toutes ces méthodes basées sur les écarts interquartiles (interdéciles ou intercentiles) des pourcentages cumulés sont par trop synthétiques et arbitraires, du moins pour les matériaux concernés.

Elles introduisent une solution de continuité trop grossière et non justifiée dans la suite granulométrique. Enfin elles ont été, à l'origine, définies pour des alluvions. Il est donc très délicat de les transposer au domaine très différent des interfluves sur lesquels les possibilités de transport sont évidemment tout autres.

Devant tous ces aléas, une autre méthode a donc été mise au point. Elle est certainement plus longue dans son application, mais tient compte du maximum de particularités de la distribution granulométrique des profils. Elle permet, d'autre part, de toujours se référer, sur des bases numériques non arbitrairement choisies, aux caractéristiques du matériau originel offert à la pédogenèse.

2. METHODOLOGIE ET TECHNIQUE

2.1. Méthodologie

2.1.1. Exposé de la méthode

En cette approche du problème, les résultats des analyses granulométriques (de 50 à 2000 microns) des sables des différents horizons d'un même profil ont été regroupés niveau par niveau. Ceci permet d'établir la composition granulométrique sableuse de chaque niveau pris dans son ensemble, c'est-à-dire de chaque partie du profil morphologiquement et "sédimentologiquement" différente des autres.

Il a, en effet, semblé illusoire de vouloir travailler sur la granulométrie de chacun des horizons séparément, ceci pour plusieurs raisons. La première en est que le matériau des différents horizons de chaque niveau semble pour le moins, procéder du même mode ou de la même phase de mise en place. On ne peut, en effet, de la base au sommet d'un même niveau déceler de discontinuité significative dans la section du profil granulométrique intéressée.

La seconde en est que les profils de sols étudiés comportent le plus souvent de nombreux sous-horizons, entraînant la nécessité d'un grand nombre de prélèvements. Par conséquent l'analyse des résultats granulométriques sous-horizon par sous-horizon, ou même simplement horizon par horizon aurait été matériellement impossible.

En bref, la granulométrie globale de chacun des niveaux remaniés, I et II a été calculée en tenant compte d'une part, de l'épaisseur de la tranche de profil intéressée par chaque prélèvement ainsi que de sa densité apparente. Les résultats granulométriques fournis par le laboratoire pour chaque prélèvement, exprimés en pourcentage de chacune des fractions par rapport à la seule masse des sables, ont donc été multipliés par 3 coefficients pondérateurs : le pourcentage de sables par rapport à la terre fine : P ; l'épaisseur en décimètres du sous-horizon dans lequel fut effectué le prélèvement: E ; enfin, par la densité apparente de ce même horizon ou plus précisément, par la quantité de terre fine par unité de volume : T, puisque l'on doit écarter les fractions plus grossières constituant la nappe de gravats.

**COURBES GRANULOMETRIQUES CUMULATIVES
ET INDICE DE MAUVAIS TRIAGE DE TRASK**

TOPOSEQUENCE de DJEMEGNI

TOPOSEQUENCE de BATCHANG

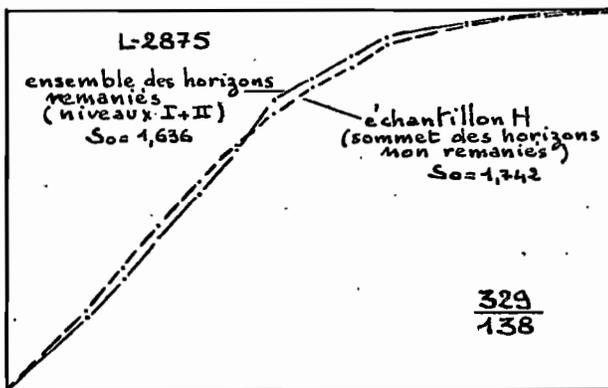
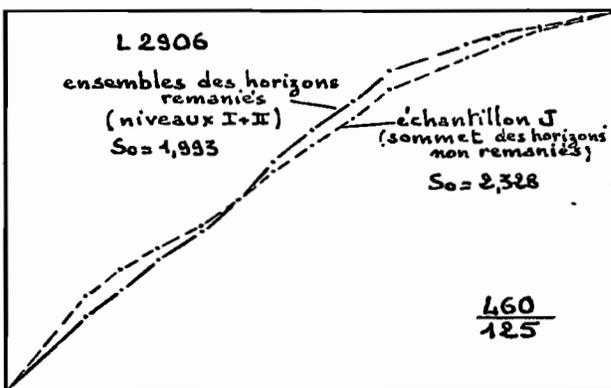
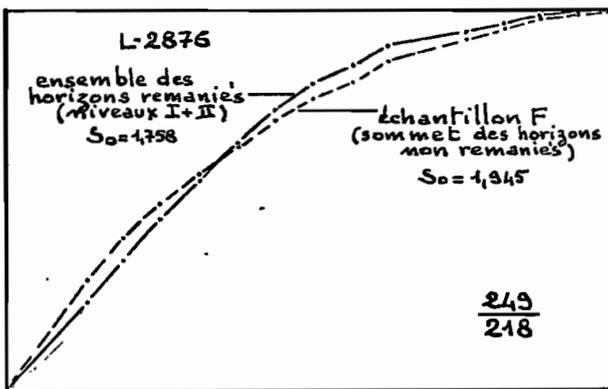
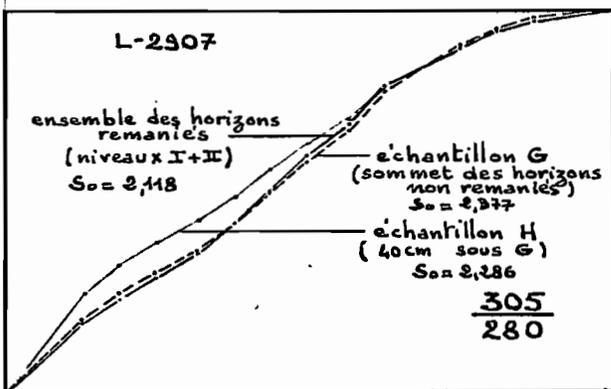
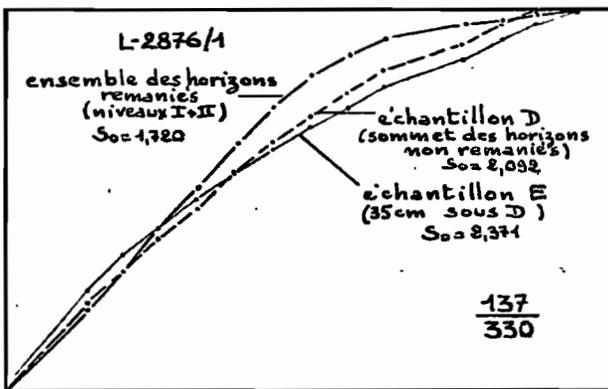
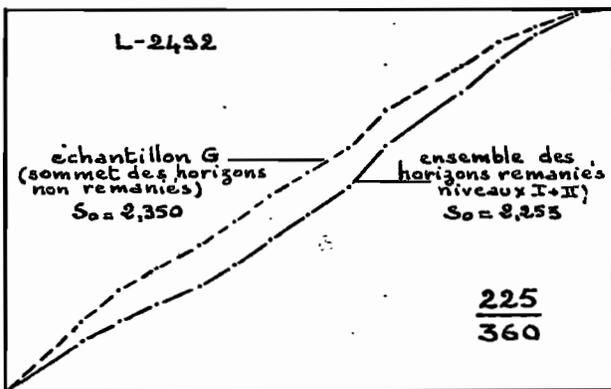
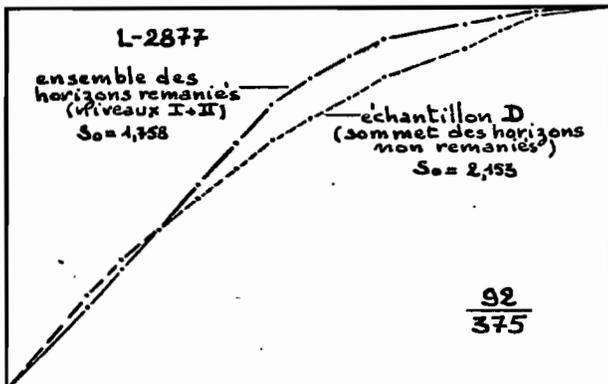
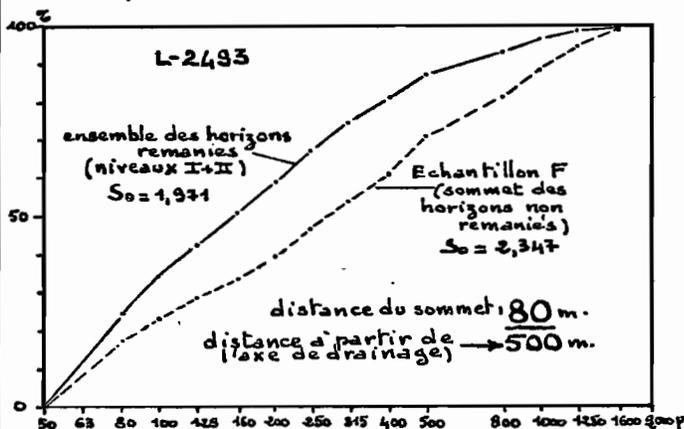


Figure 1

En symbolisant par Q_a la quantité de sable de chaque fraction granulométrique retenue, par sous-horizon, l'indice a précisant les limites en microns de celle-ci, et par p_a son pourcentage absolu donné par le laboratoire nous aboutissons à la formule suivante :

$$Q_a = P_a \times p \times E \times T.$$

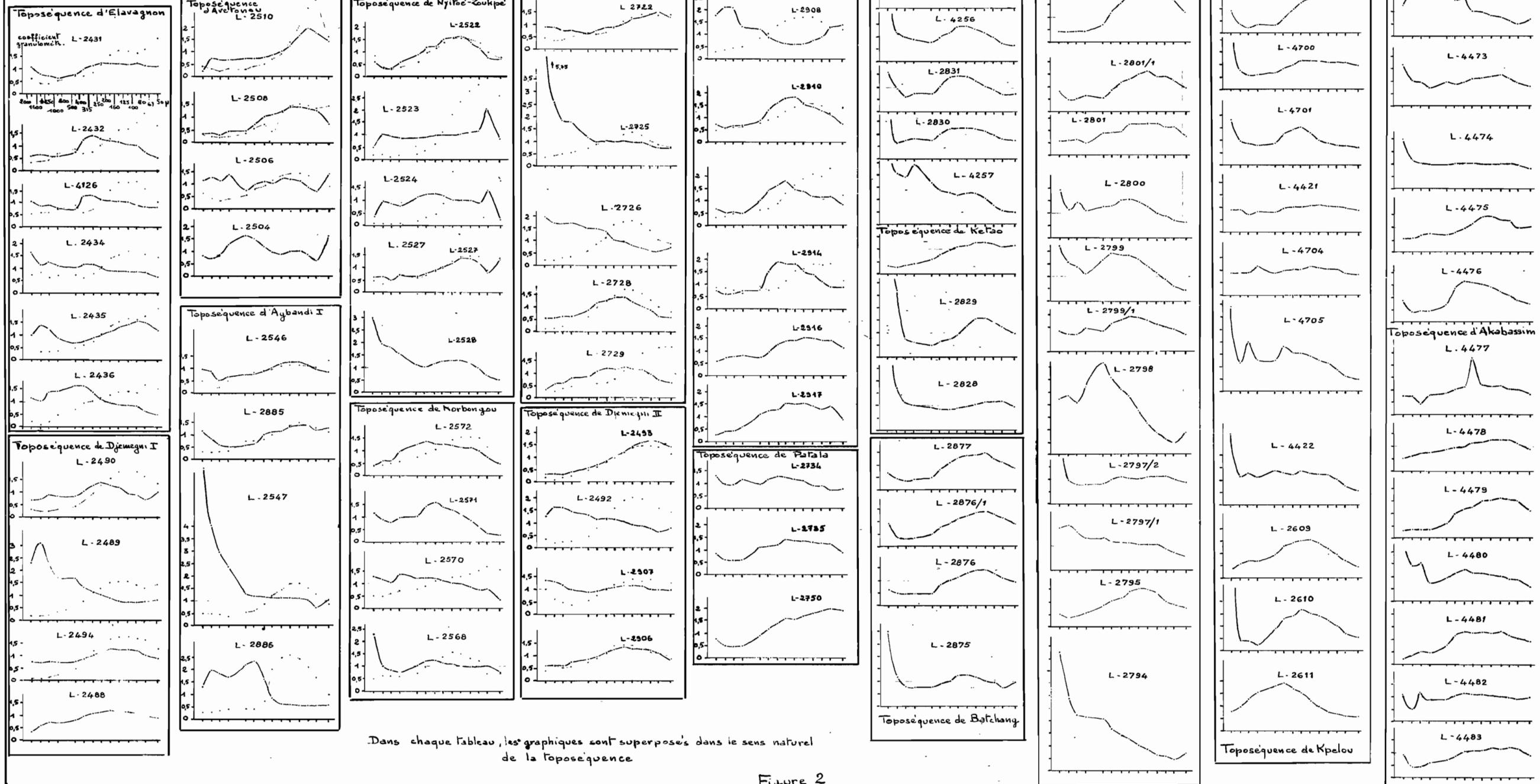
On effectue, pour chaque classe granulométrique, la sommation des résultats ainsi obtenus puis on calcule en regroupant toutes les classes granulométriques, la quantité totale des sables d'un même niveau. On peut donc exprimer pour l'ensemble de ce dernier, le pourcentage représenté par chaque classe granulométrique. La même méthode est applicable à l'ensemble des niveaux I + II remaniés, ou bien à l'inverse, à une tranche de chacun d'eux si besoin est.

Par ailleurs, nous connaissons (sans avoir à les pondérer puisque nous ne retenons ici qu'un seul prélèvement) les pourcentages de chacune des classes granulométriques de celui des sous-horizons du niveau III (rigoureusement autochtone) qui est le plus élevé dans le profil. Nous pouvons alors, établir le rapport, toujours pour chaque classe granulométrique, de ses pourcentages entre les niveaux I et II, I et III, II et III, I + II et III. En fait, ce sont surtout les rapports calculés entre l'ensemble des niveaux I + II remaniés et le niveau III qui ont fait l'objet de l'analyse la plus complète pour le présent travail. Il est apparu assez convenable de regrouper les niveaux I + II, c'est-à-dire ceux qui sont remaniés, par rapport au niveau III, qui ne l'est pas. Certains sols, en effet, ne présentent pas de niveau II, le niveau I de terre fine remaniée reposant directement sur le niveau III, absolument en place. D'autres, à l'inverse, ne présentent pas de niveau I, les horizons grossiers affleurant en surface. Une question peut se poser : pourquoi ne prendre en considération que le sommet du niveau III et ne pas calculer la granulométrie de l'ensemble de ses sous-horizons ? Plusieurs raisons font écarter cette dernière procédure. La première en est que la limite inférieure du niveau III est très imprécise, et d'autre part bien difficile à atteindre dans nombre de profils très profonds. La seconde est que, très rapidement en profondeur, sous la discontinuité morphologique marquée séparant les niveaux II et III, nous trouvons des zones de minéraux primaires tels que ferromagnésiens, muscovite et surtout feldspaths. Or la prise en compte dans les analyses granulométriques de ces minéraux disparaissant par altération dans les horizons supérieurs des profils, risque de fausser gravement l'interprétation de celles-ci. Il a donc paru préférable de s'en tenir au sous-horizon supérieur du niveau III afin de se baser sur le même point de référence morphologique et bien souvent pédogénétique des profils.

Tous ces rapports, établis entre les pourcentages de chaque classe granulométrique, d'un niveau ou d'un ensemble de niveaux à l'autre ont été dénommés : coefficients granulométriques.

Enfin, en portant en abscisses : les limites des classes de sables et en ordonnées : les valeurs des coefficients granulométriques, nous aboutissons à l'établissement d'une courbe de coefficients granulométriques. Elle nous fournit une appréciation graphique, rapide et synthétique de l'évolution granulométrique des sables d'un niveau à un autre des profils (voir figure 2).

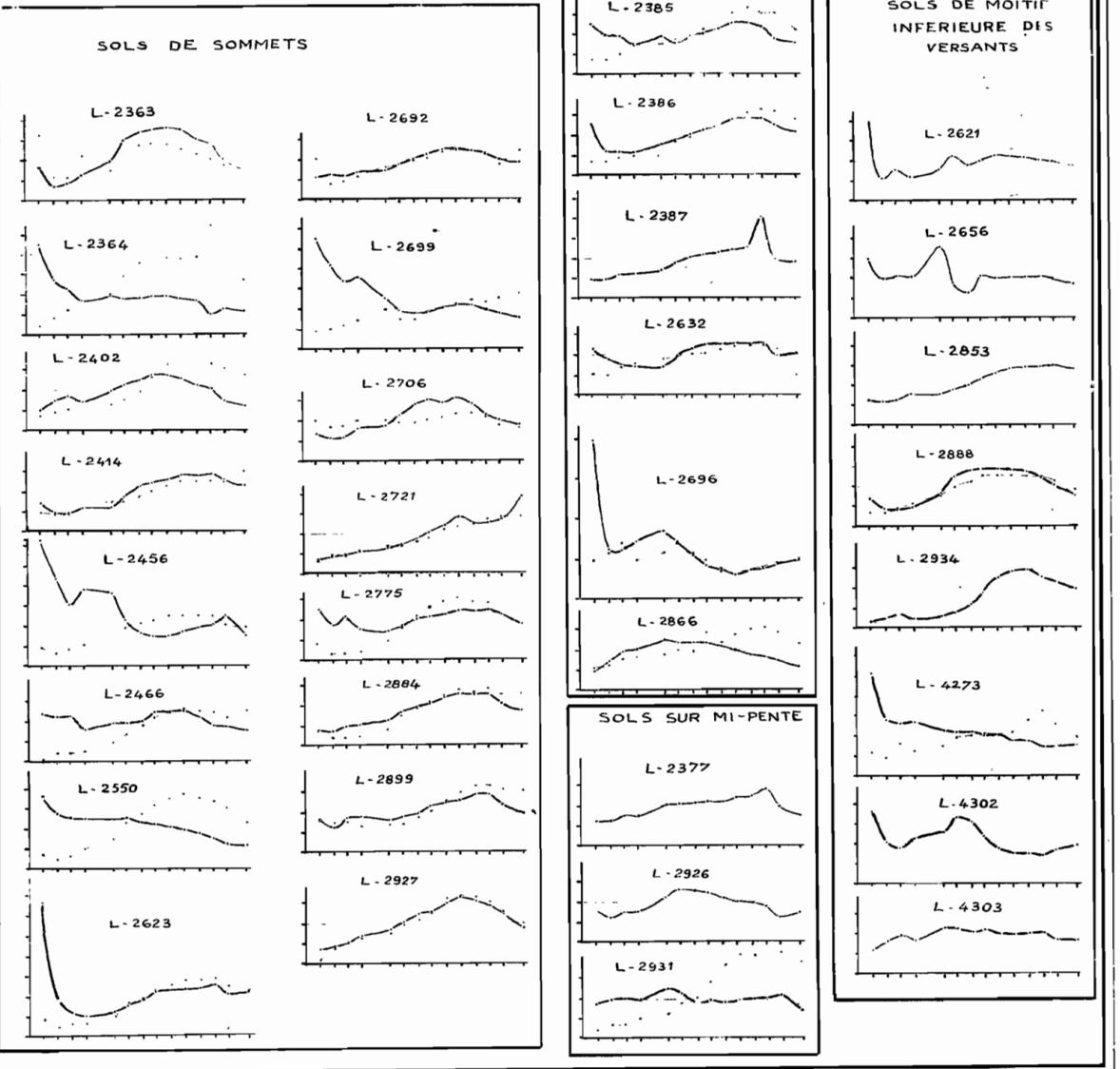
COURBES DES COEFFICIENTS GRANULOMÉTRIQUES
(en traits foncés niv I + II / sommet horizon en place)
en traits clairs niv I / niv II



Dans chaque tableau, les graphiques sont superposés dans le sens naturel de la toposequence

Figure 2

EXEMPLES PRIS DANS DIVERSES AUTRES TOPOSEQUENCES



Les classes granulométriques retenues sont au nombre de 15 selon une échelle logarithmique, leurs limites étant : 2000, 1000, 1250, 1000, 300, 500, 400, 315, 250, 200, 160, 125, 100, 80, 63 et 50 microns. La régularité de cette échelle est mise en défaut par l'absence de la limite 630 par indisponibilité du tamis correspondant au moment où fut entrepris ce travail. Pour de nombreux calculs, les deux classes de 50 à 80 microns ont été regroupés en une seule étant donné l'allure quelque peu erratique des résultats aux granulométries très fines, prouvée en travaillant sur le même échantillon et avec le même tamis.

2.1.2. Inconvénients et avantages

2.1.2.1. Inconvénients

L'un des principaux est entraîné par les calculs innombrables, longs, voire fastidieux. Cette méthode suppose également la connaissance de la densité apparente de chaque sous-horizon échantillonné dans les niveaux I et II, mais il faut bien retenir que cette donnée est nécessaire pour tout établissement de bilan d'un profil et n'est donc pas requise uniquement pour la granulométrie. Un troisième inconvénient réside enfin dans le fait que seul est retenu le sommet du niveau III en place. Etant donné l'hétérogénéité verticale et latérale, en détail comme à large échelle, du socle granito-gneissique, il existe, sur ce point, un grave danger : celui de se trouver, en ce sommet de niveau en place, en présence d'une passée ou d'un filonnet qui bouleverse profondément la représentativité de l'ensemble du matériau. Mais après avoir exploré bien d'autres modes d'approche, il s'est avéré que le plus grand danger résidait dans la prise en compte, systématique dès une faible profondeur dans le niveau III de minéraux altérables (et altérés complètement le plus souvent dans les niveaux I et II). Dans le travail ici présenté, cet inconvénient est éliminé au maximum par l'analyse d'un grand nombre de profils, cette voie statistique réduisant fortement l'importance des accidents locaux.

2.1.2.2. Avantages

Cette méthode permet de neutraliser les défauts de construction des tamis puisqu'ils s'annulent dans l'établissement des rapports conduisant au calcul des coefficients granulométriques.

Ceux-ci, d'autre part, obligent à se référer constamment pour chaque niveau, au matériau sous-jacent. En prenant donc en compte systématiquement les caractéristiques granulométriques de celui-ci, les influences dues en particulier à la pédogénèse des horizons supérieurs ainsi qu'aux éventuels transports latéraux en ressortent plus directement et même exclusivement.

Enfin ce procédé de travail classe par classe granulométrique écarte le danger, dans le domaine pédogénétique, des synthétisations présenté par les indices couramment employés en sédimentologie.

2.2. Technique

Cette étude a porté uniquement sur les sables les plus difficilement altérables : quartz et minéraux lourds tels que rutile, zircon, grenat ... etc. En fait,

c'est pratiquement sur le ^{sables} quartzeux que portent les résultats car le pourcentage des autres minéraux venant d'être énumérés partiellement est pratiquement négligeable dans la masse totale.

Pour ce faire, ont donc dû être éliminées toutes les autres particules, qu'elles soient constituées de minéraux altérables ou d'éléments de néoformation : petits nodules ou concrétions ferrugineuses (ou, très rarement, calcaires).

En ce qui concerne les feldspaths, la séparation n'a pu être effectuée par manque du matériel de flottation requis. Les profils en conservant notablement, tant dans leurs niveaux I et II, qu'au sommet du niveau III ont donc dû être éliminés. En fait, cette nécessité ne s'est imposée que dans à peine 10 % des cas.

La muscovite assez fréquente, et parfois abondante dans les profils sur micaschistes en particulier, a été éliminée par méthode électrostatique en faisant glisser selon un mouvement rotatoire, un grand nombre de fois, les échantillons en contenant le long de la paroi intérieure d'un bûcher très propre. De cette façon, les paillettes de muscovite s'éliminent progressivement en adhérant à la paroi de ce récipient. Il est nécessaire, bien entendu, de contrôler que les particules quartzieuses les plus fines ne sont pas retenues au même titre que les muscovites. La méthode d'élimination de ce mica par élutriation n'a pu être adoptée par manque de matériel.

Enfin pour les nodules et concrétions ferrugineux ainsi que pour les minéraux ferromagnésiens, le problème est beaucoup moins ardu étant donné qu'ils peuvent être séparés magnétiquement grâce à un électro-aimant utilisé couramment en minéralogie. Cette méthode a été retenue pour une partie de ce travail. En fait, devant l'impossibilité de disposer de ce matériel assez longtemps, fut mise au point une autre méthode d'élimination de ces particules ferrugineuses.

Les ferromagnésiens furent séparés par densimétrie au bromoforme.

L'élimination reste plus délicate pour les concrétions et nodules ferrugineux dont la densité est passablement variable, oscillant le plus souvent entre 2,5 et 3,2.

* Nous tenons ici, à remercier vivement MM. les Directeurs et Directeur-adjoint de la Compagnie Togolaise des Mines du Bénin qui voulurent bien, pour un temps, nous prêter le séparateur magnétique de leur laboratoire.

Ils furent donc éliminés en deux temps : par attaque avec acide chlorhydrique dilué au demi qui laisse subsister de chaque nodule ou concrétion une rame squelettique siliceuse * qui s'est avérée toujours moins dense que le quartz, puis par séparation dans une liqueur constituée d'un mélange de bromoforme et de benzène, de densité d'environ 2,59. Un opérateur exercé peut ainsi traiter en une journée de travail, environ 40 à 45 échantillons de sables de 30 à 35 grammes chacun.

Il est évident que le traitement à l'acide chlorhydrique aussi concentré, risque de fragiliser les quartz comme le signalent certains auteurs. Plusieurs contrôles de l'action de ce traitement furent donc effectués selon deux méthodes : l'une par comptage de particules, l'autre par répétition de tamisage sur des échantillons uniquement quartzeux, préalablement débarassés par séparateur magnétique de leurs ferromagnésiens et de leurs nodules ferrugineux. Tous ces échantillons furent choisis parmi les différents profils de sols les plus marqués par la ferruginisation. Enfin le traitement retenu pour ce contrôle fut "aggravé" : en utilisant une solution de moitié moins diluée, en répétant l'attaque chlorhydrique plusieurs fois et en amenant dans les intervalles, à sec, à une température élevée (250°). Enfin fut également pratiqué un traitement à chaud à l'eau oxygénée dont la détente gazeuse paraît susceptible de profiter d'éventuels plans de fragilisation à l'intérieur des particules de quartz.

Toutes les opérations de comptage (une trentaine pour chacune des 3 classes granulométriques fines, moyennes et grossières retenues) ont révélé l'inocuité de tous ces traitements, sauf dans 3 cas où, sur 100 grains de taille comprise entre 200 et 250 microns, il en a été trouvé 102 après traitement, ce qui est négligeable.

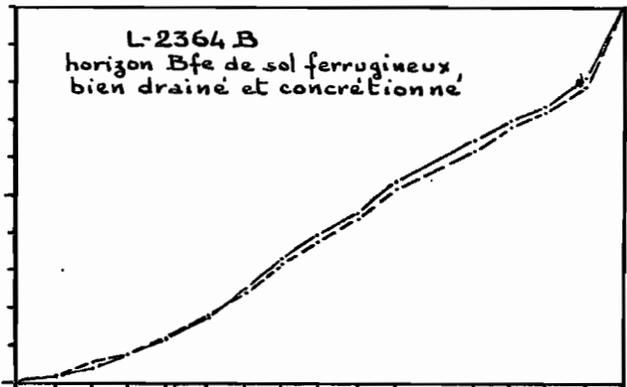
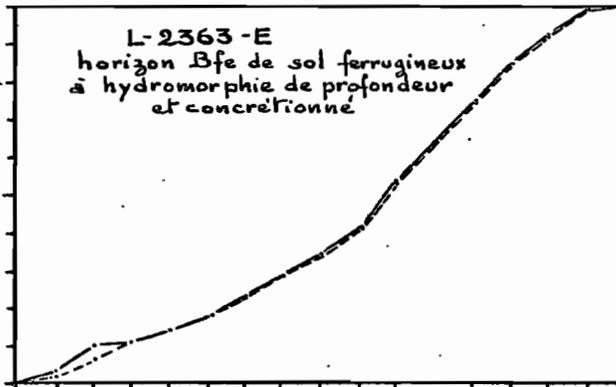
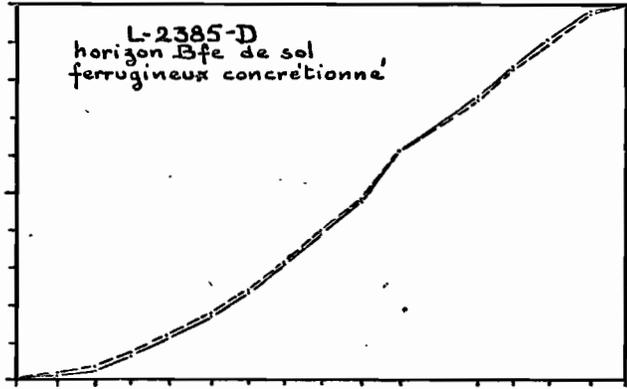
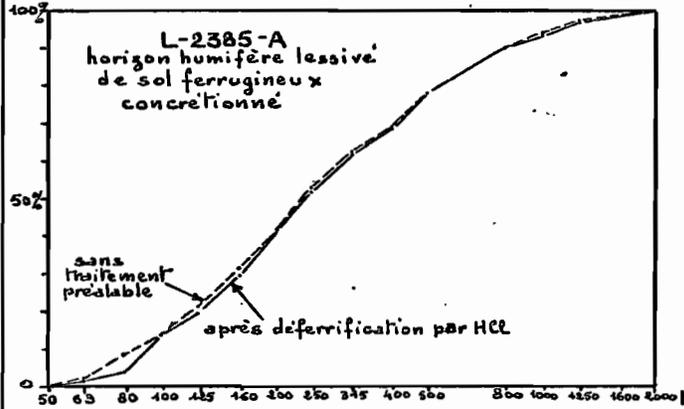
Quant à la méthode par tamisage répété après traitement acide, les résultats consignés sous forme des courbes cumulatives comparées, dans la figure 3 nous montrent que les écarts trouvés sont nullement significatifs et très identiques aux déviations inhérentes à la technique du tamisage elle-même comme le prouve les deux séries de courbes portées à la partie inférieure de la figure **. Ces deux dernières séries ne portent en effet que sur la seule répétition du tamisage, sans traitement acide.

Un traitement acide drastique s'est donc révélé sans effet sensible sur la granulométrie des quartz.

* Cette trame est essentiellement siliceuse mais non quartzeuse : elle se dissout facilement après attaque triacide dans une solution de soude diluée semblant présenter par là, les mêmes caractéristiques de la silice combinée des argiles, alors que le quartz reste, lui, pratiquement intact. Cette trame squelettique siliceuse est associée naturellement à des grains de quartz.

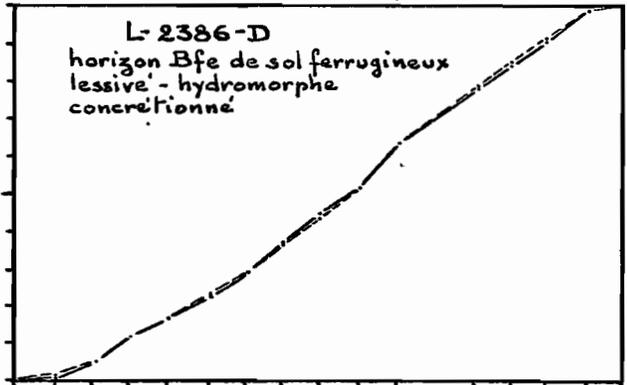
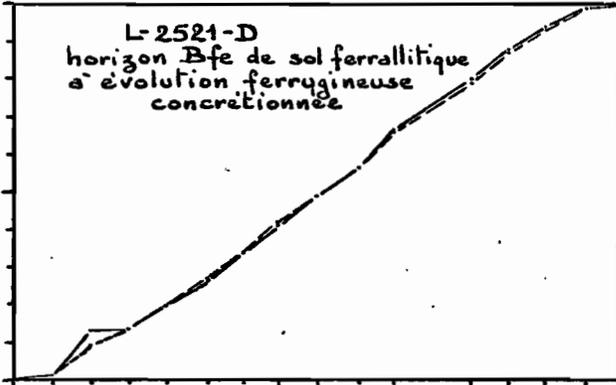
** Certaines courbes cumulatives montrent un écart à 80 microns : il ne s'agit en réalité que d'un défaut d'usinage des tamis employés puisque cette déviation se retrouve tout aussi bien sur certaines des courbes établies d'après la granulométrie sans traitement préalable.

COMPARAISON DES COURBES
 GRANULOMETRIQUES DE SABLES
 UNIQUEMENT QUARTZEUX AVEC ET SANS TRAITEMENT
 A HCl PREALABLE



en traits pleins : après deferrification par HCl au 1/2

en traits tirés : sans traitement préalable



COMPARAISON DES COURBES GRANULOME-
 TRIQUES DES SABLES PAR SEULE
 REPETITION DU TAMISAGE

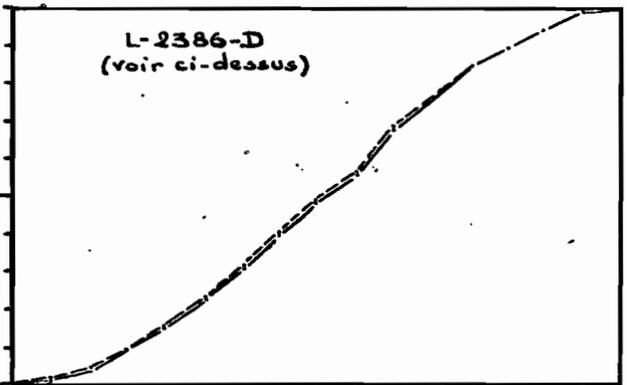
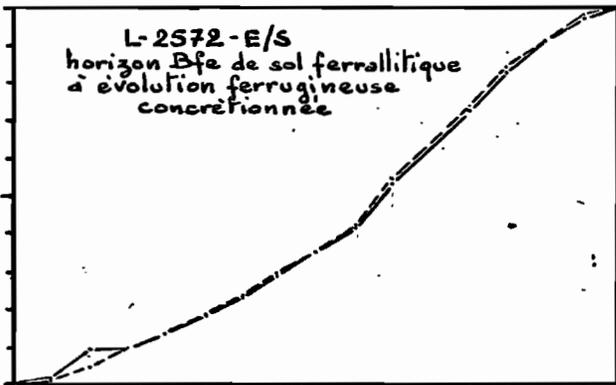


Figure 3

3. LES FAITS

3.1. Remarques préliminaires

- La présente étude porte sur l'analyse granulométrique complète de 124 profils de sols des principales classes pédogénétiques inventoriées au Togo, en toutes positions topogéomorphologiques. Ces profils sont groupés le plus souvent en toposéquences. A raison d'une moyenne de 6,5 échantillons par profil et de 15 classes granulométriques, la masse de données primaires (environ 12 000) ne permet, en raison des faibles moyens de calcul disponibles sur place, de ne présenter ici, qu'une exploitation relativement sommaire. Il faut donc ne considérer cette note que comme une présentation forcément limitée des voies offertes à l'interprétation des faits.

L'inconvénient du maniement fastidieux de ce nombre de données est certainement non négligeable. Cependant toutes les hétérogénéités, à petite comme à grande échelle, de ce socle granito-gneissique rend absolument nécessaire que l'on se base sur un nombre important de mesures. Les phénomènes qui ont présidé à la mise en place des matériaux constitutifs des profils ont pu varier au cours du temps et dans l'espace. En ce sens, l'étude même très complète de seulement une ou quelques toposéquences ne pourrait nous fournir qu'une vue très partielle et probablement fautive du problème, d'autant qu'il est ici, abordé un domaine ayant déjà nourri nombre de polémiques. Les accidents locaux peuvent, en effet, se manifester à l'échelle d'un versant, d'une toposéquence.

- D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que d'autres techniques que la granulométrie des sables sont indispensables pour résoudre le problème de ces sols très remaniés. L'étude de la minéralogie et de la morphoscopie des sables est également nécessaire. Ces voies sont en cours d'exploration, mais les données disponibles jusqu'à ce jour sont insuffisantes pour en donner un aperçu sinon définitif, du moins digne de confiance.

Notons simplement que les résultats obtenus à ce jour par l'emploi de ces deux techniques sont en assez étroite conformité avec les enseignements tirés de cette étude de la granulométrie pour qu'il soit utile de le mentionner. La morphoscopie des sables n'a guère révélé de traces d'usure, présente seulement dans les classes les plus grossières de certains profils. Les résultats retirés de l'étude minéralogique des fractions denses ne permettent pas, d'autre part, d'écarter l'hypothèse d'une étroite parenté entre les niveaux remaniés et les horizons sous-jacents rigoureusement en place.

- Enfin, n'est pas compris dans cette étude, tout un ensemble de sols (hydromorphes en général) observés sur une partie inférieure plus ou moins importante de certains versants et qui se distinguent nettement des autres. Ils ne comprennent qu'assez rarement un niveau grossier. Celui-ci est d'autre part, quand il existe, relativement réduit en puissance. Leurs horizons meubles reposent directement, pratiquement sans transition, sur la roche mère qui, altérée profondément, n'en garde pas moins une consistance nettement élevée dès son sommet. Enfin, nous retrouvons, très souvent, assez haut dans leurs profils, des feldspaths ou autres minéraux altérables en pourcentages fréquemment sensibles. Tous leurs traits morphologiques autorisent à penser que ces sols sont développés dans un complexe

alluvio-colluvial déposé après décapage de formations meubles antérieures, décapage ayant trouvé sa limite d'action à un degré donné de résistance de la roche mère altérée.

Il faut noter que la présence très fréquente de feldspaths dans les niveaux I, II et surtout dans le sommet du niveau III où ils sont très abondants, empêche l'application de la méthode exposée précédemment puisque la possibilité d'éliminer ces minéraux n'a pu être envisagée.

Sur les quatorze toposéquences étudiées, entre autres, pour cette étude, cinq seulement sont couvertes dans leur partie inférieure, par ce complexe alluvio-colluvial sur plus de 10 % de leur longueur, deux seulement sur plus de 20 %, une seule atteignant un pourcentage de 36. A l'échelle de la région naturelle étudiée, une fraction moyenne de 8,5 % de la longueur des versants est couverte par ces formations que l'on peut raisonnablement supposer allochtones.

3.2. Les profils granulométriques

3.2.1. Traits généraux

Avant d'aborder les résultats que l'on peut retirer de l'exploitation des données à l'aide des valeurs des coefficients granulométriques, il n'est pas inutile d'observer l'allure de profils granulométriques types de divers sols.

Les figures 4 et 5 nous donnent l'exemple de 5 profils dans lesquels le passage des différents niveaux les uns aux autres est très tranché : une concentration très intense de gravats et de nodules ferrugineux délimite très nettement le niveau II.

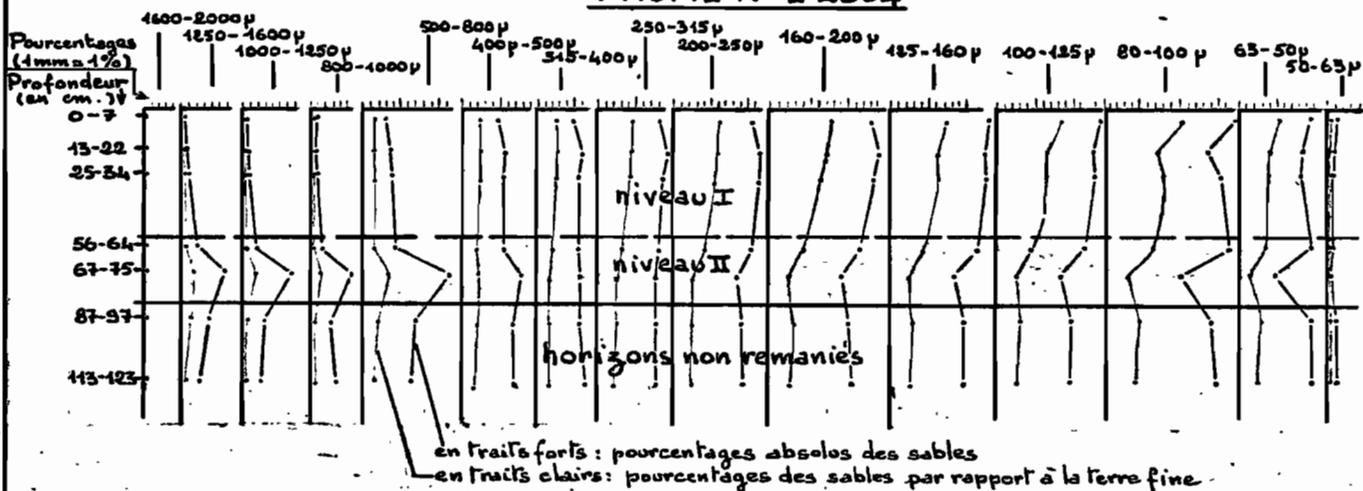
Nous pouvons voir que plusieurs cas peuvent se présenter :

- Quand le niveau II (grossier) est peu puissant (mais de concentration intense), (profils L 2 384 et L 4 303, figure 4), les courbes des pourcentages absolus de chacune des classes granulométriques en fonction de la profondeur, accusent un écart important dans cette partie du profil. Le pourcentage des sables des fractions grossières s'accroît, et, bien entendu, le contraire se produit pour les sables fins. Néanmoins, et ceci est pratiquement général, si nous faisons abstraction de ces écarts dans le niveau II, nous pouvons, du sommet du niveau III jusqu'à celui du niveau I, c'est-à-dire jusqu'à la surface du sol, observer une continuité souvent remarquable dans le profil granulométrique de chaque classe. Tout se passe, alors, comme si ce niveau II grossier avait été incorporé au profil du sol, à une certaine profondeur, sans bouleverser nettement la granulométrie des horizons sus-jacents.

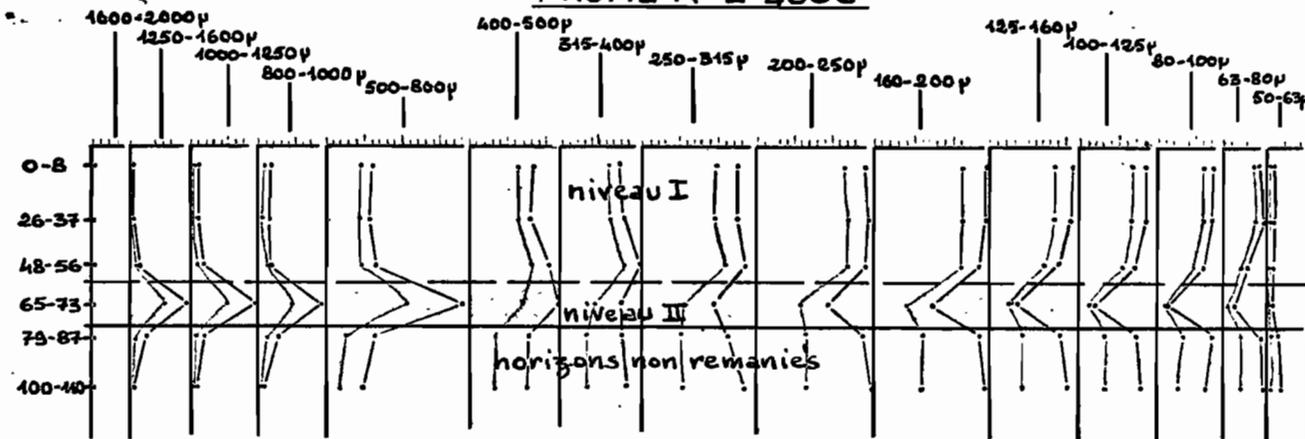
Nous pouvons voir, d'autre part, en suivant les courbes établies non pas en pourcentages absolus (par rapport aux seuls sables de 50 à 2000 microns) mais par rapport à la terre fine entière (0 - 2000 microns) que les écarts peuvent complètement disparaître pour les classes granulométriques fines (profil L 2 550).

EXEMPLES de PROFILS GRANULOMETRIQUES

PROFIL N° L-2884



PROFIL N° L-4303



PROFIL N° L-2550

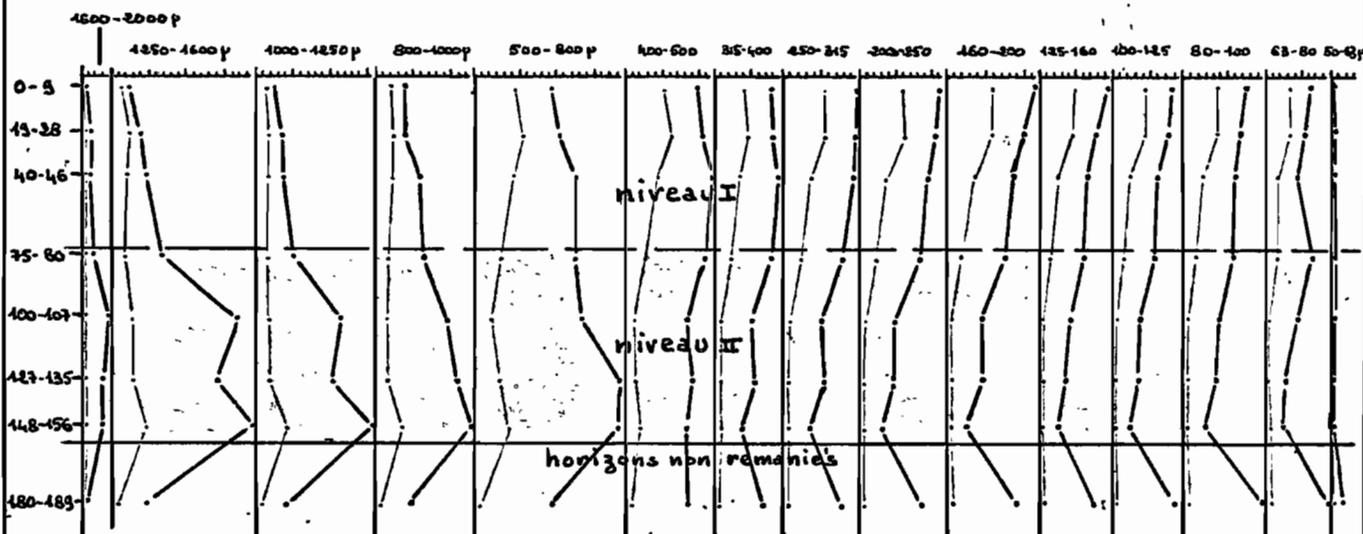


Figure 4

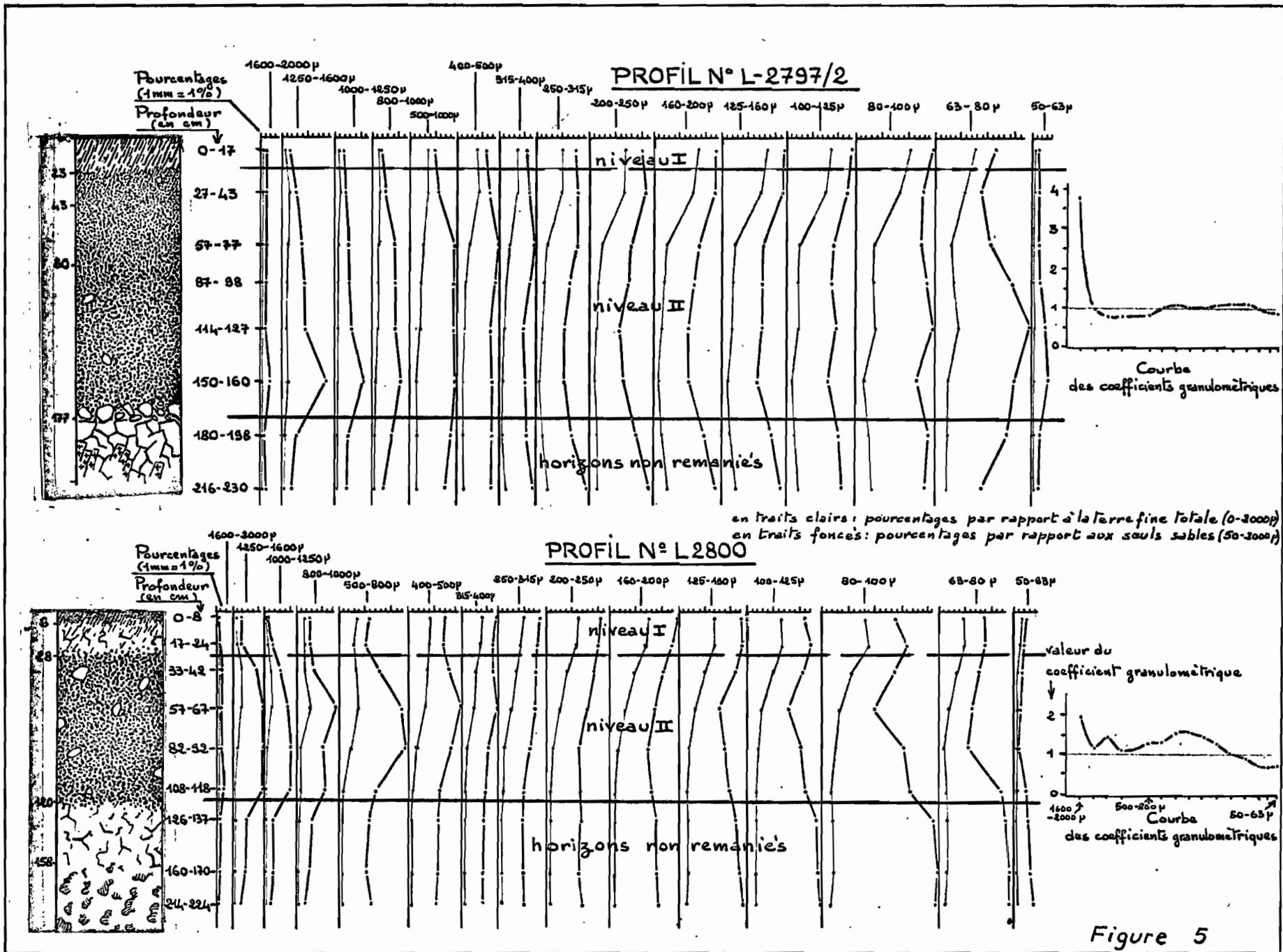


Figure 5

Le passage du niveau II grossier au niveau I sus-jacent affecte beaucoup moins la continuité des profils granulométriques que ne fait celui du niveau III au niveau II. Les écarts maxima par rapport à cette continuité semblent, d'autre part, se "concentrer" vers la base du niveau II.

- Enfin, malgré les discontinuités importantes présentées par les sols, le passage, souvent morphologiquement très tranché de leurs différents niveaux les uns aux autres, n'affecte pas obligatoirement d'une façon sensible la continuité des profils granulométriques des différentes classes de sables. La figure 5, reproduisant les schémas de deux sols comportant un niveau II très bien individualisé, comportant, en outre, des quartz grossiers émoussés, nous en donne un exemple. C'est le cas le plus fréquent.

3.2.2. "Individualité granulométrique" de sols très rapprochés sur un même versant

Les figures 6, 7 et 8 mettent en parallèle les profils granulométriques, aux passages des différents niveaux, de chacun des sols de trois couples dont l'un est situé en amont de l'autre sur trois toposéquences différentes. Sur la figure 6, le profil L 2 799/1 est à 25 mètres en amont du L 2 798, sur la figure 7, le profil L 4 478 est à 33 mètres en amont du L 4 480, enfin sur la figure 8, le L 4 701 est à 20 mètres en amont du L 4 421.

Nous pouvons observer que, très généralement, pour la grande majorité des fractions sableuses, les profils granulométriques ne se recoupent pas, au passage des différents niveaux. Chacun des deux sols dans un même couple garde donc son "individualité granulométrique" du bas en haut de son profil à partir de ses horizons en place. Autrement dit, le sens des différences granulométriques observées entre les matériaux rigoureusement autochtones, des deux sols de chaque couple, est respecté jusqu'au sommet des profils. On peut retirer de cette observation graphique que les apports latéraux de matériau ont certainement été, pour le moins très réduits. Sinon, cette "individualité granulométrique" aurait eu bien peu de chances de subsister.

3.2.3. Les coefficients granulométriques

3.2.3.1. Présentation générale des faits

La figure 2 présente les courbes établies en fonction des classes granulométriques retenues et des valeurs des coefficients pour chacune d'elles, ceci pour l'ensemble des niveaux I + II, remaniés par rapport au sommet des horizons en place (sommet du niveau III). Sur certains graphiques, a été portée (en traits plus clairs) la même courbe obtenue entre les niveaux I et II.

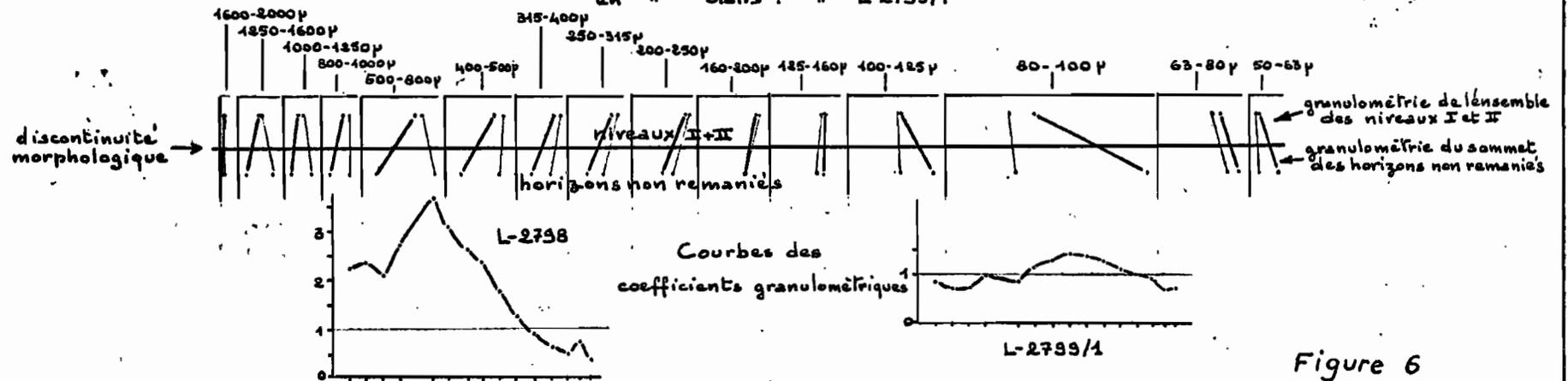
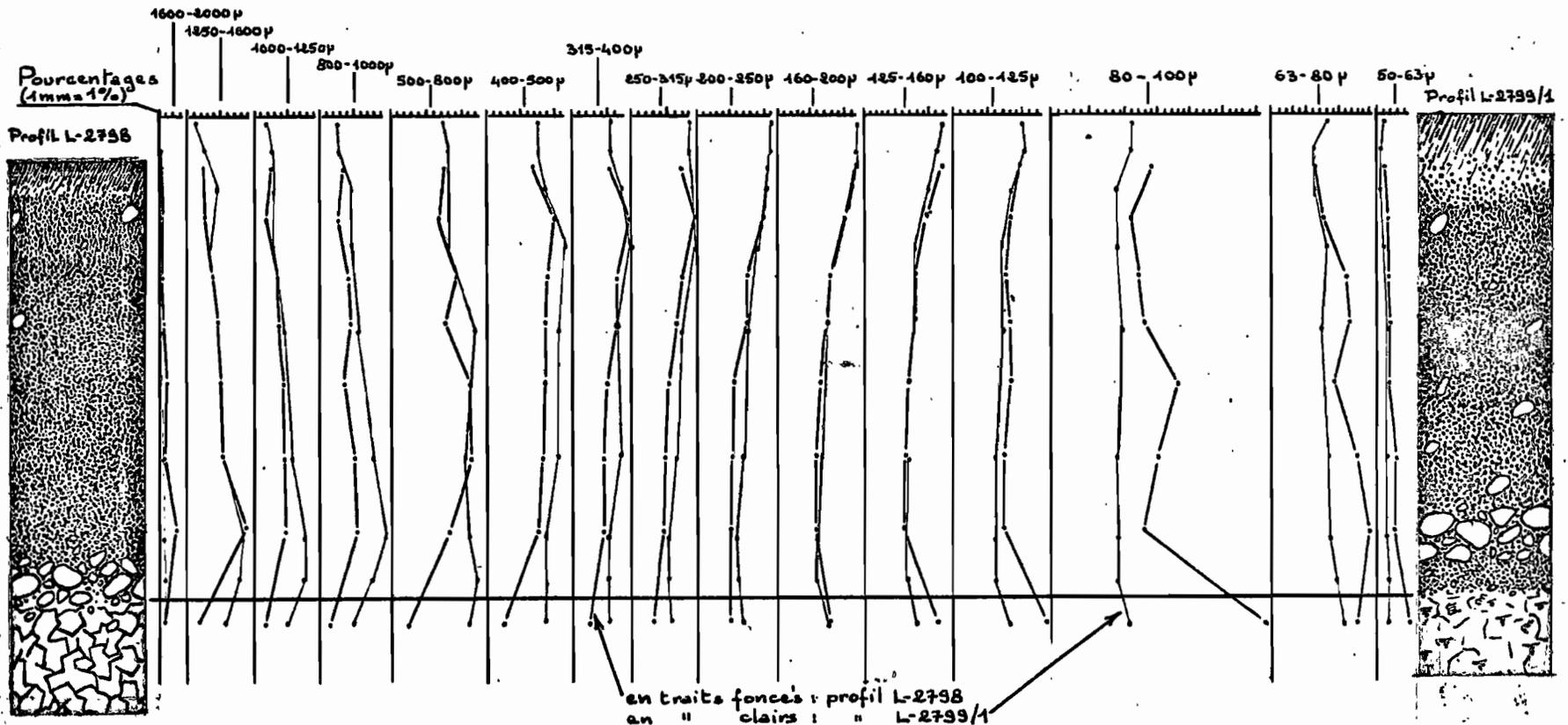
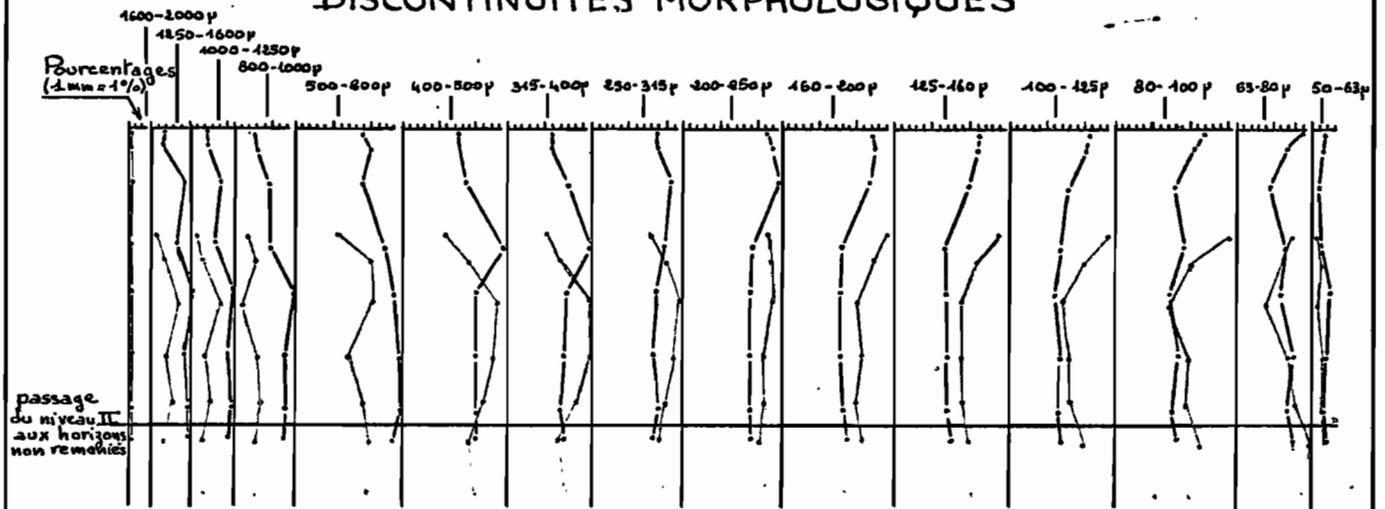


Figure 6

PROFILS GRANULOMETRIQUES et PASSAGE des DIFFERENTES DISCONTINUITES MORPHOLOGIQUES



en traits forts : granulométrie du profil L4478
en " clairs : " " " " L4480

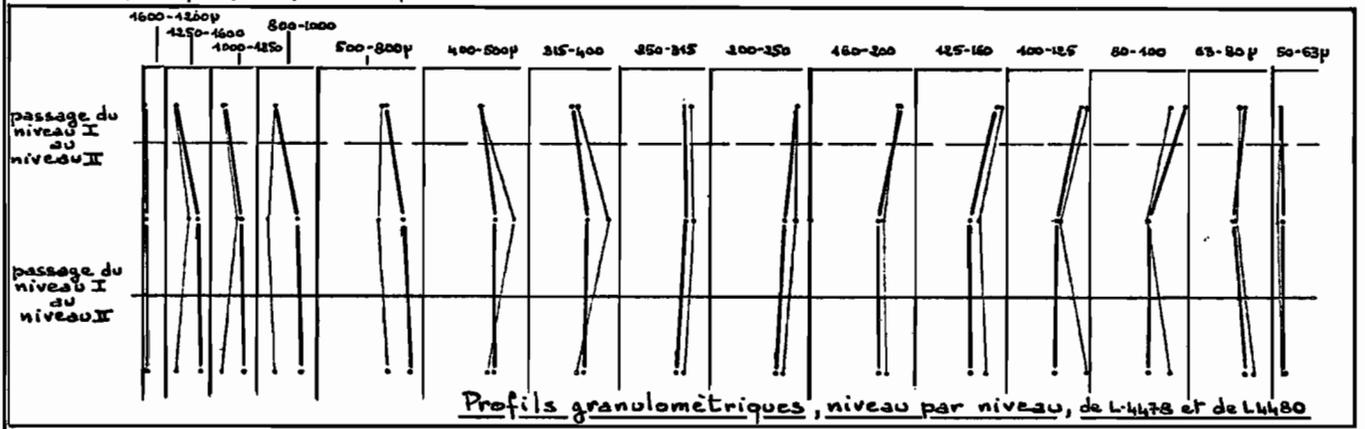
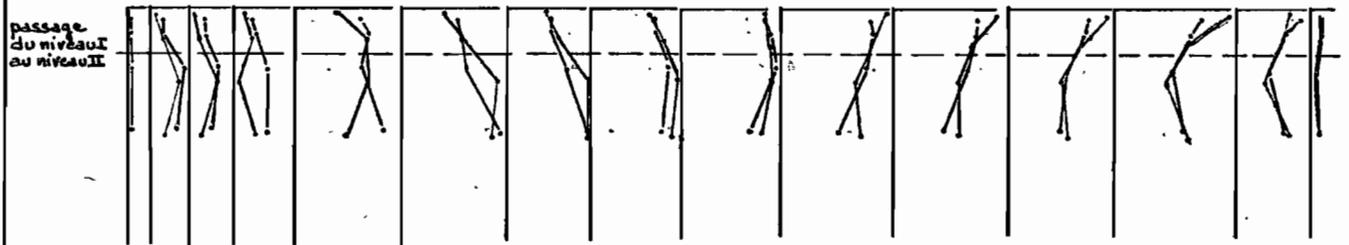


Figure 7

D'autre part, la figure 9 traduit, pour chaque classe granulométrique, la moyenne de tous les résultats obtenus pour divers coefficients que nous pouvons calculer au sein des profils : niveaux I + II/horizons en place ; niveau I / niveau II ; niveau I / horizons en place ; et, enfin, niveau II/horizons en place.

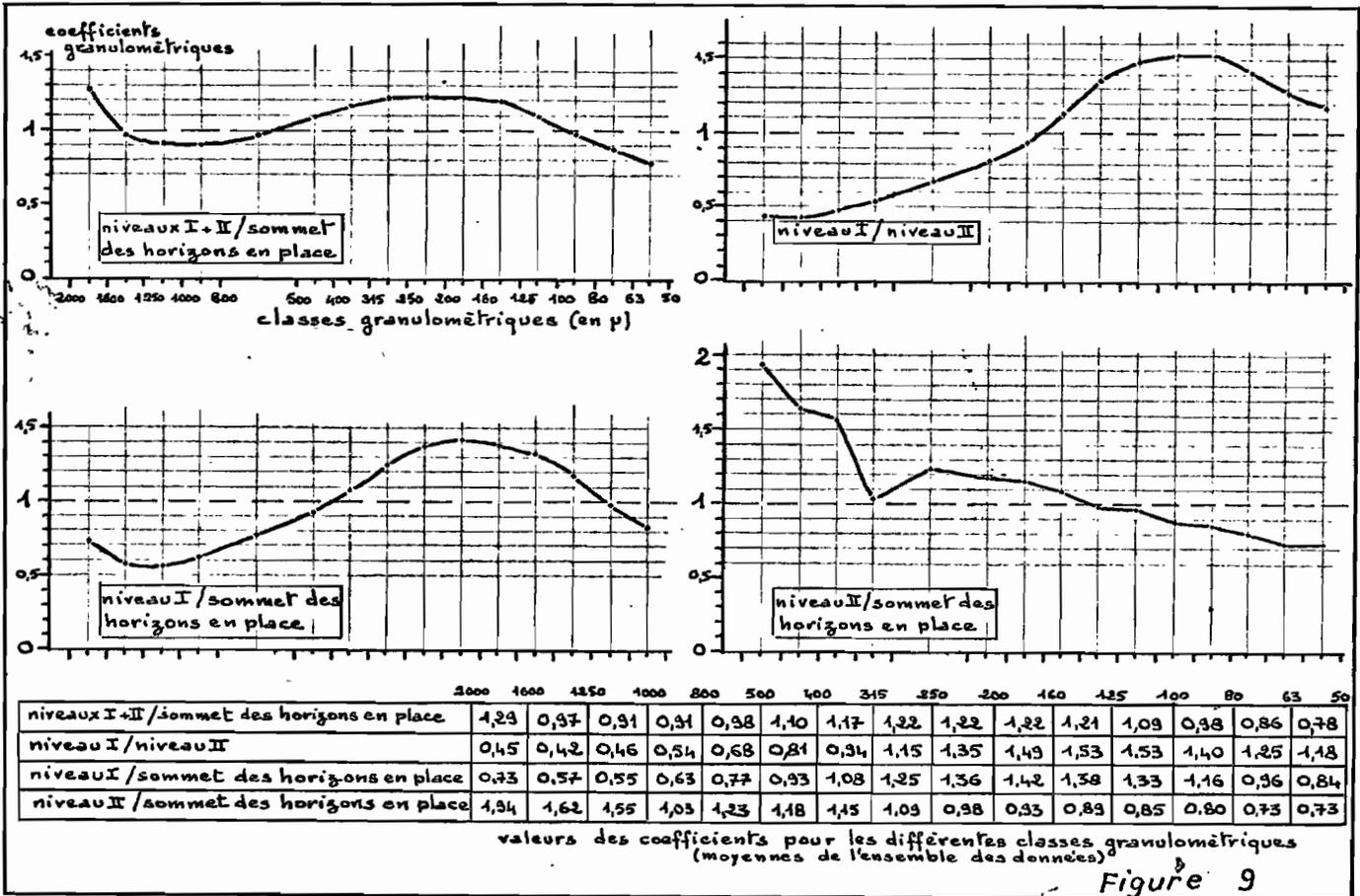


Figure 9

Plusieurs constatations s'imposent quand on compare les graphiques des 2 figures.

- On observe, certes, de fortes variations dans la valeur des coefficients granulométriques d'un profil à l'autre et de grands écarts pour certaines classes granulométriques au sein d'une même courbe, d'un même profil. Il n'en existe pas moins très généralement une progression assez remarquable dans un sens tantôt croissant tantôt décroissant, des valeurs des coefficients granulométriques établis d'un niveau à l'autre.

Analysons chacune des courbes de la figure 9 :

Granulométrie de l'ensemble des niveaux I + II (partie remaniée du profil) par rapport à celle du sommet des horizons en place : après une décroissance du coefficient des granulométries grossières, de 2000 à environ 800 microns, nous assistons à un accroissement de ses valeurs jusqu'en moyenne 200-250 microns pour, de nouveau

décroître, toujours régulièrement, jusqu'à 50 microns. Il existe donc en général, dans les niveaux remaniés, par rapport au niveau III, un déficit de sables grossiers et des plus fins. Nous assistons, corrélativement, à un assez net accroissement de la proportion des sables de taille moyenne. Les coefficients dépassant l'unité, affectant les sables supérieurs à 1250 microns, ne doivent faire aucune illusion : les pourcentages de sables mis en jeu sont pratiquement toujours extrêmement faibles.

Granulométrie du niveau I, superficiel, par rapport à celle du niveau II, grossier, sous-jacent : ici, la courbe des coefficients croît régulièrement à partir des granulométries les plus grossières jusqu'à environ 125 microns pour ensuite décroître non moins régulièrement jusqu'à 50 microns, mais en restant cependant dans des valeurs supérieures à 1. Les sables des fractions les plus fines du niveau I sont donc en pourcentages généralement supérieurs à ceux du niveau II, alors que dans les fractions grossières, ils sont en net déficit par rapport au niveau II.

Granulométrie du niveau I par rapport à celle du sommet des horizons en place : ses caractéristiques se situent entre celles des deux courbes précédentes.

Granulométrie du niveau II par rapport à celle du sommet des horizons en place : nous assistons ici, à une décroissance pratiquement régulière des valeurs du coefficient, des granulométries grossières vers les plus fines. Autrement dit, il existe dans ce niveau II, une concentration de sables grossiers par rapport aux horizons en place.

On peut tirer de ces observations, une conclusion générale : d'un niveau à l'autre, la granulométrie des sables semble traduire une redistribution remarquable. La courbe la plus intéressante, en définitive, est celle établie entre, d'une part, l'ensemble des niveaux I + II et, d'autre part, le sommet des horizons en place. Elle intègre, en effet, tous les phénomènes de remaniements et de redistribution.

Cette évolution granulométrique des sables vers le sommet des profils est comparable à ce que mentionne R. FAUCK (1971) dans son étude des sols rouges. Cet auteur souligne, entre autres, les points suivants :

- "diminution progressive des fractions grossières, de la profondeur vers la surface, quelque soit les caractéristiques de la roche mère et diminution relative, également de la fraction des sables très fins, ces deux phénomènes se traduisant en bilan, dans les horizons supérieurs par une augmentation relative des sables moyens".
- "granulométries extrêmement voisines pour les 10 premiers centimètres superficiels des sols malgré la différence des matériaux offerts à la pédogenèse, ce phénomène pouvant être d'ordre pédologique mais n'excluant pas l'éventualité de recouvrements".

R. FAUCK, se basant principalement sur des études morphoscopiques des sables, conclut en invoquant la prédominance, dans cette redistribution granulométrique, de phénomènes pédogénétiques et en particulier du rôle "fragilisant" des imprégnations d'hydroxydes de fer dans les fissures et canalicules des grains de quartz. Cet Auteur se fondant sur l'aspect des caries des quartz, invoque également l'hypothèse d'une perte de silice.

3.2.3.2. Les types de variations du coefficient granulométrique établi entre les niveaux remaniés et le sommet des horizons en place.

Se reportant toujours à la figure 2, et surtout à la figure 10 (page suivante), on peut constater que les variations des caractéristiques des courbes des coefficients granulométriques, d'un profil à l'autre, sont importantes.

Les plus notables sont les suivantes :

- a) les courbes montrent une première section décroissante relativement importante dans les fractions granulométriques les plus grossières, avant un accroissement dans les granulométries moyennes : dans à peu près 50 % des cas (types B, C, E, E₁, G₁ et H). La signification de ce phénomène sera traitée plus loin, mais il faut dès maintenant, remarquer que, malgré des coefficients parfois élevés, les pourcentages de sables mis en cause sont, dans leur très grande majorité, faibles et même parfois négligeables. Nous pouvons, comme cela se produit assez souvent, obtenir un coefficient infini pour seulement quelques dixièmes de pour cent dans l'ensemble des niveaux I + II alors que le sommet des horizons en place ne contient pas de sables de la fraction envisagée : la fréquence relative de ce phénomène est d'environ 10 % pour la classe supérieure (1600 - 2000 microns) et pour celle-ci seulement. Dans les classes immédiatement inférieures, les coefficients ne dépassent que dans quelques cas seulement la valeur de 6 et ce, il faut le signaler, toujours pour de faibles quantités.
- b) en fin de courbe, pour les granulométries inférieures à 80 microns, il y a remontée plus ou moins importante du coefficient. La fréquence relative en est de 14 % environ (types D, E, F₁).

Ici, également, il faut remarquer que les pourcentages de sables intéressés, sont souvent faibles comme le montre, d'ailleurs l'allure générale des courbes cumulatives reproduites en exemple au début de cette note. On pourrait porter ce phénomène au compte d'un léger recouvrement allochtone de sables très fins, les plus mobiles dans le paysage. Il faut toutefois noter que les coefficients calculés entre des sous-horizons successifs pris à toutes profondeurs dans les profils, montrent parfois une telle remontée à ces fines granulométries. Il ne faut donc pas écarter la possibilité d'accidents locaux dus à l'hétérogénéité entraînée par la roche mère, ou peut être d'une pulvérisation physique ou/et chimique des quartz les plus fins. Notons enfin que cette remontée de la valeur du coefficient peut s'effectuer (dans le sens des fractions de taille décroissante), dès 160 microns. Ceci dans seulement 2 profils sur les 124 étudiés.

- c) la valeur des coefficients granulométriques, vers les fractions de plus en plus fines peut être pratiquement régulièrement décroissante (types F et F₁) ou régulièrement croissante (types G et G₁). La fréquence respective de ces 2 éventualités est de 11,3 % et 3,2 %. L'existence exclusive pour certains profils, de chacun de ces deux phénomènes est à souligner. Elle pourrait étayer l'hypothèse que la forme générale des courbes des coefficients, avec prédominance relative des fractions sableuses moyennes, est la résultante de deux actions antagonistes : apport puis exportation, deux phénomènes s'exerçant d'autant plus facilement que les granulométries sont fines.

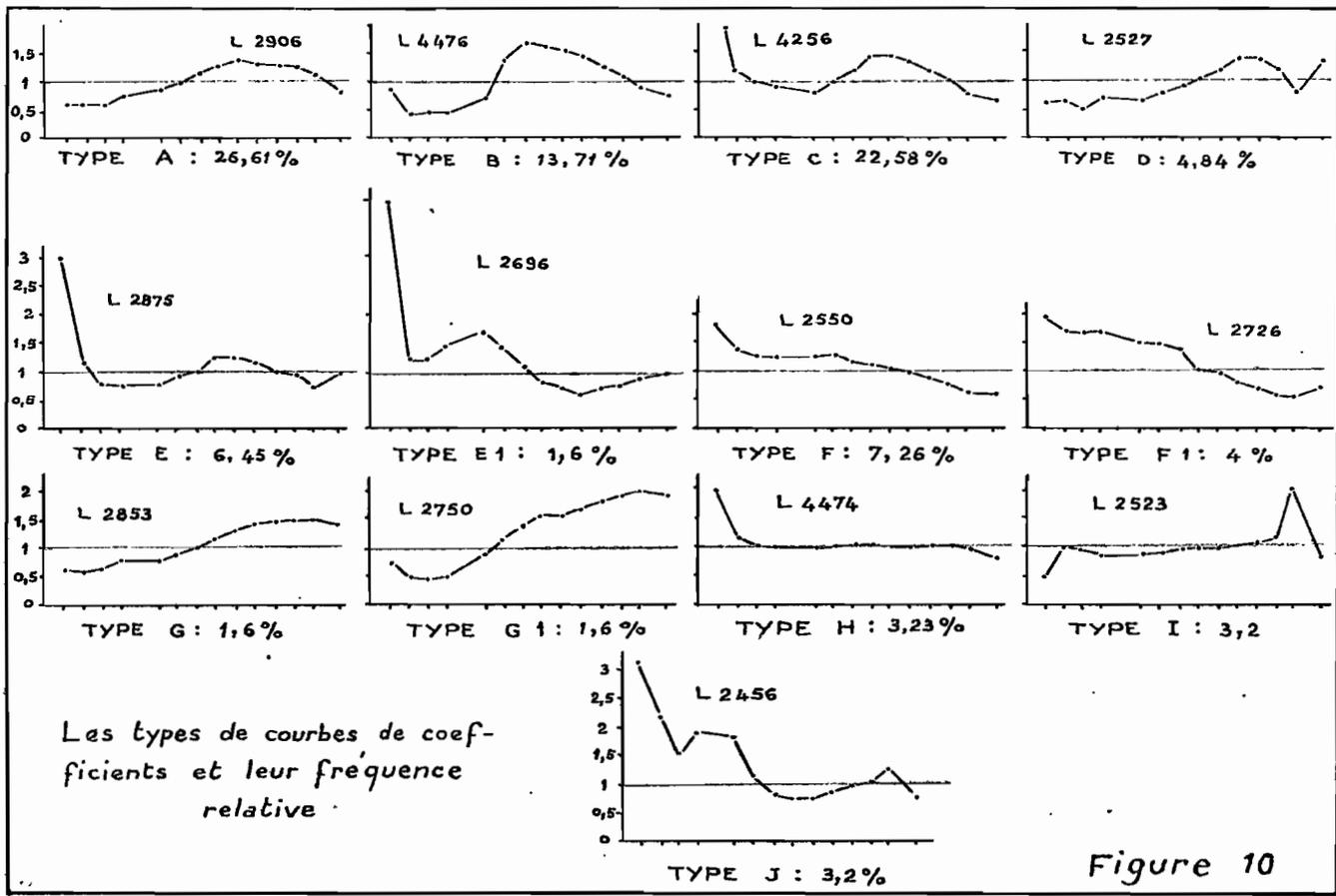
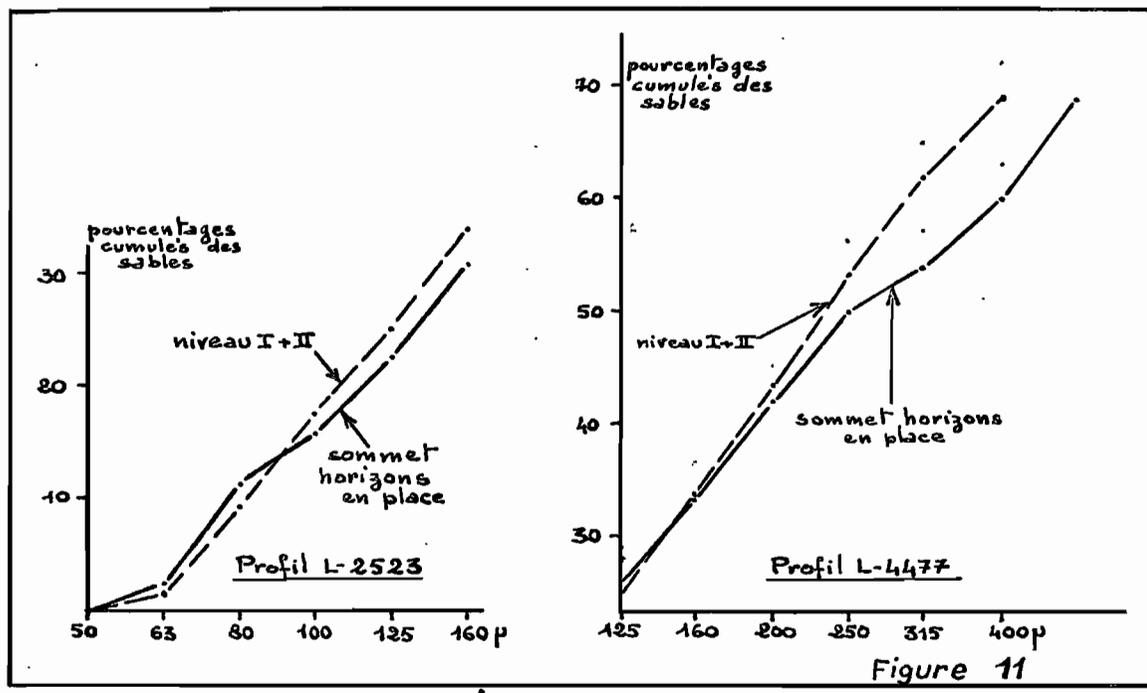


Figure 10

- d) les coefficients granulométriques peuvent être, pratiquement dans toutes les fractions sableuses, constants et (nécessairement) égaux à 1 (fréquence relative : 2,2 %). Nous avons, ici, à faire à des profils peut être très peu remaniés, dont la parenté entre les niveaux I et II d'une part et les niveaux rigoureusement en place, est très étroite.
- e) le coefficient granulométrique de certaines fractions montre un brusque accroissement (fréquence relative : 3,2 %). Deux possibilités peuvent être envisagées pour expliquer ce phénomène : hétérogénéité due à la roche mère, ou bien apport allochtone.

Parmi ces deux cas possibles, ne semble devoir être retenu que celui d'une hétérogénéité (vraisemblablement due à la roche mère) du sommet des horizons en place. En effet, la figure 11 reproduit, en les agrandissant, les détails des courbes cumulatives comparées de l'ensemble des niveaux I + II et du sommet des horizons en place.



Nous pouvons observer que le brusque accroissement du coefficient granulométrique (respectivement entre 80 et 100 microns pour le profil L 2 523 et entre 250 et 315 microns pour le L 4 477) est bien entraîné par une déviation, à ces granulométries, de la courbe cumulative du sommet de l'horizon en place.

Aucun de ces accidents n'est donc entraîné par des caractéristiques granulométriques particulières des niveaux remaniés.

Nous verrons d'ailleurs, un peu plus loin, que les écarts entre courbes cumulatives d'horizons en place de différents profils sont plus importants qu'entre celles établies pour les niveaux remaniés.

- f) enfin, dans 3,2 % des cas, la courbe des coefficients granulométriques présente, ou bien une allure inverse de celle de l'ensemble des profils étudiés, avec minimum dans les fractions moyennes, ou bien un palier en dessous d'une certaine granulométrie après des déviations erratiques dans les sables plus grossiers. Aucune explication n'a pu être retenue pour expliquer ces cas, mais il faut remarquer, toujours, qu'une certaine section de ces courbes suit une allure régulière dans sa croissance ou dans sa décroissance.

Tous ces cas exposés, il convient d'effectuer les remarques suivantes:

- a) les types A, B, et C, en réalité voisins les uns des autres, représentent près des deux tiers des cas étudiés (63 %) avec une courbe caractérisée par la régularité de la croissance ou de la décroissance de la valeur des coefficients dans chacune de ses deux sections principales.
- b) mis à part pour les fractions les plus grossières, les valeurs des coefficients granulométriques n'atteignent pratiquement jamais des valeurs extrêmement éloignées de 1.

Ces deux caractéristiques permettent de mettre en doute la possibilité d'apports latéraux sensibles le long des versants, du type colluvionnement ou même creep. On voit en effet, difficilement comment de tels phénomènes auraient pu s'effectuer en respectant ces deux conditions.

- c) la figure 12, avec la série de ses tableaux à double entrée, établis pour chacun des types de courbe, montre qu'aucun de ceux-ci n'est spécial à une position topographique ou à une classe de sol donnée.
- d) enfin, au delà de toutes les variations présentées par les types de courbes de coefficients, il apparaît que la granulométrie de l'ensemble des niveaux remaniés tend à se rapprocher, pour toute classe de sols ou position topographique, d'une même distribution. La figure 13 illustre cette tendance pour quelques profils représentant un éventail des principales conditions. Chaque groupe de courbes a trait à des sols très différents les uns des autres tant par leur pédogenèse que par leur situation topogéomorphologique. Nous pouvons observer que l'enveloppe des courbes cumulatives est plus étroite quand il s'agit de l'ensemble des niveaux I et II (remaniés) que pour le sommet des horizons en place.

Un autre argument nous est fourni de cette tendance, par la comparaison des écarts types des pourcentages absolus de sables, dans diverses classes granulométriques, pour l'ensemble des niveaux I et II d'une part et pour le sommet des horizons en place, d'autre part. Faute de moyens suffisants de calculs, cette analyse de variances a dû être arrêtée, mais les résultats déjà obtenus confirment ce phénomène :

FREQUENCE DES DIFFERENTS TYPES DE COURBES DE COEFFICIENTS GRANULOMETRIQUES EN FONCTION DE LA SITUATION TOPOGRAPHIQUE ET DE LA PEDOGENESE

TYPE de COURBES de COEFFICIENTS GRANULOMETRIQUES: A

Situation sur le versant

Catégories de sols	(a) Sommet	(b) Quart Supérieur	(c) Entre Quart Supérieur et Mi - Pente	(d) Entre Mi - Pente et Quart Inférieur	(e) Quart Inférieur
Ferrallitiques ①	5	1	1		
Ferrugineux bien drainés ②	1	3	2	1	1
Ferrugineux plus ou moins hydromorphes ou/et à montmorillonite dominante dans le C ③	2		3	5	3
Sols peu évolués ou/et hydromorphes à montmorillonite dominante dans le profil ④	1				3

Catégories de sols

situation sur les versants

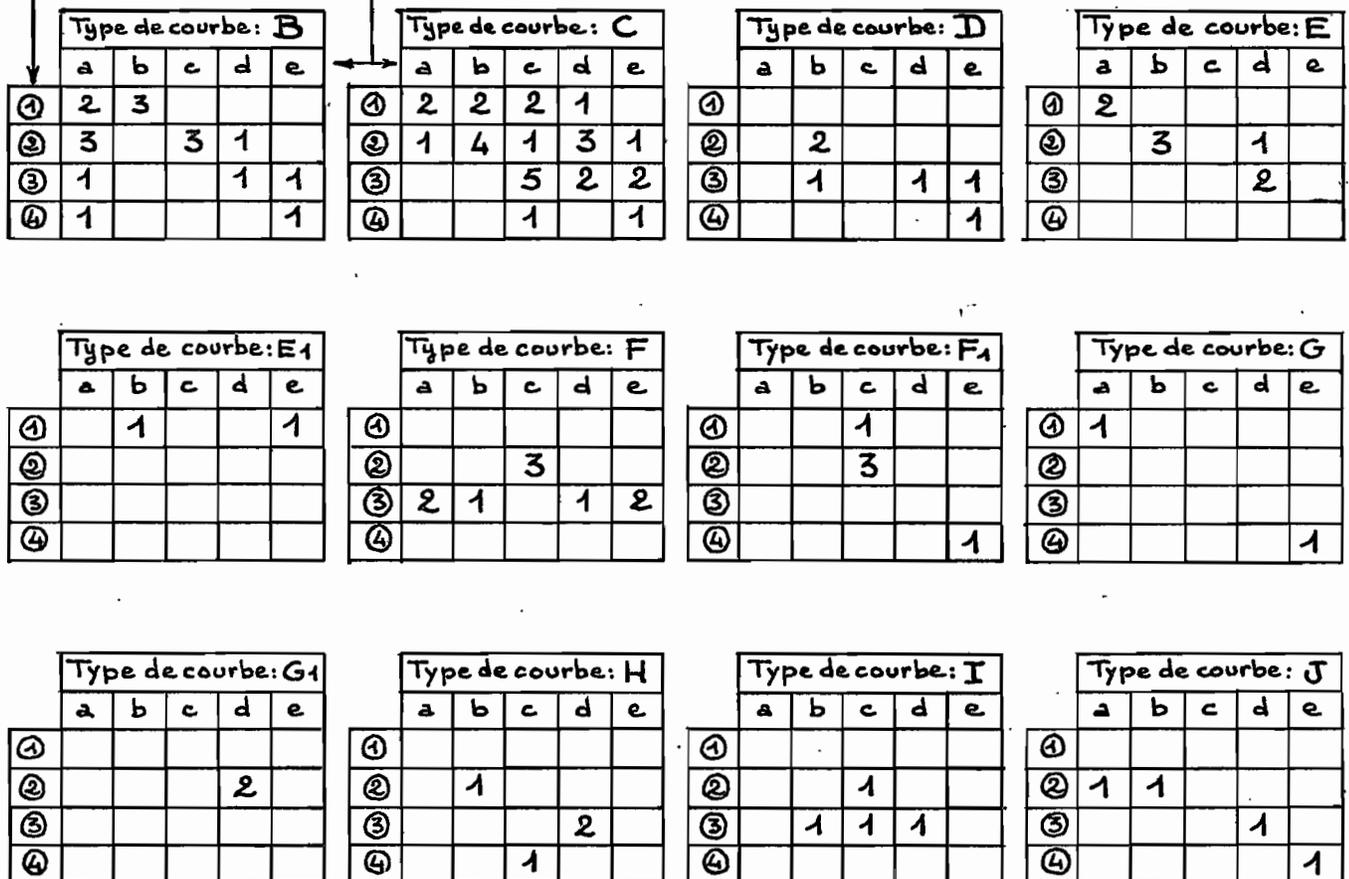
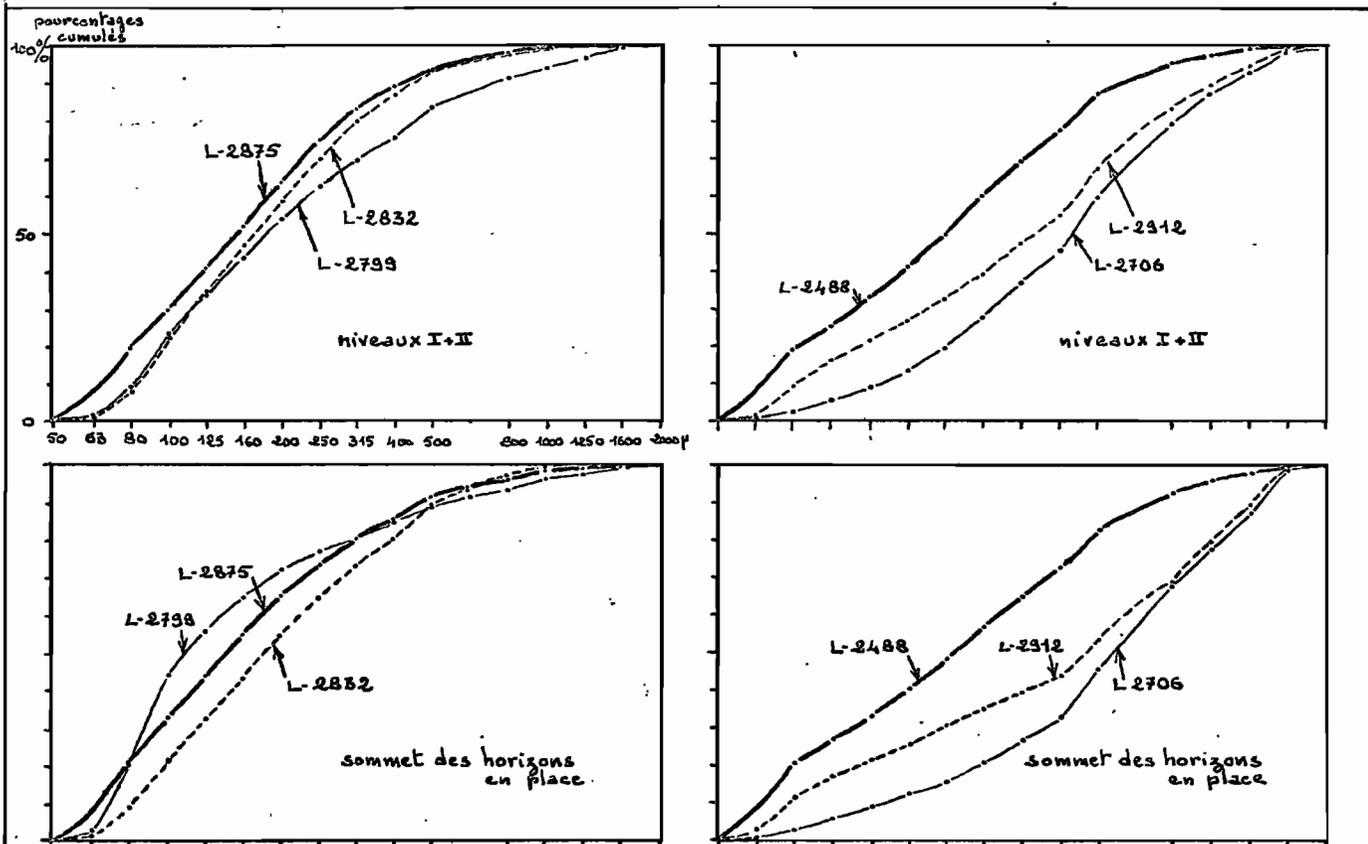


Figure 12



Courbes granulométriques cumulatives comparées de l'ensemble des niveaux I+II et du sommet d'horizons en place de divers sols

- L-2799 : sol ferrugineux à hydromorphie de profondeur sur mi-pente
- L-2832 : sol ferrallitique très bien drainé pratiquement au sommet d'un versant
- L-2875 : sol ferrugineux hydromorphe de bas de versant
- L-2488 : sol peu évolué régalique sur argile d'altération montmorillonitique - bas de versant
- L-2706 : sol ferrallitique très bien drainé sur sommet
- L-2912 : sol ferrugineux assez hydromorphe - à mi-pente

Figure 13

- pour la fraction 50 - 80 microns, l'écart-type est de 5,74 pour le sommet des horizons en place alors qu'il n'est que de 4,56 pour l'ensemble des horizons remaniés.
- pour la fraction 250 - 315 microns, les valeurs sont respectivement de 2,36 et de 1,92.

4. LES RESULTATS

4.1. Les directions de recherche

Il existe donc une redistribution granulométrique indiscutable à partir des horizons en place jusqu'à ceux de surface de tous les sols de ce socle. D'autre part, ses caractéristiques générales paraissent souvent très semblables d'un type de sol ou d'une position topographique à l'autre, à la lumière des quelques observations déjà mentionnées. Encore faut-il s'assurer que c'est bien le cas en exploitant plus complètement les données, en fonction de la pédogenèse ainsi que de la situation des sols dans le paysage. Les connaissances actuelles semblent contredire cette première impression et nombre de travaux accordent au contraire à ces deux facteurs, pédogénétique et topographique, un rôle déterminant dans les phénomènes de redistribution granulométrique.

4.2. Les facteurs pédogénétiques

A la suite de travaux portant sur le même sujet, réalisés par plusieurs auteurs, et en particulier par R. FAUCK, deux voies peuvent être explorées : l'action éventuellement fragilisante des concentrations d'hydroxydes de fer, et la désaturation en silice combinée des profils. L'appauvrissement poussé en ce dernier oxyde peut, en effet, conduire à la mise en solution de quartz, d'où bouleversement éventuel de la distribution granulométrique des sables.

4.2.1. Rôle des hydroxydes ou oxydes de fer

Le figure 14 illustre la recherche de liaisons éventuelles entre le taux de Fe_2O_3 total (dosé sur terre fine + nodules ou concrétions) de l'ensemble des horizons remaniés (niveaux I + II) et les valeurs des coefficients granulométriques. Elle consigne les résultats obtenus pour six classes granulométriques réparties sur toute la gamme des sables. Il n'apparaît aucune relation. Toutefois, pour la classe granulométrique 50 - 80 microns où pouvait planer un doute, une recherche statistique de corrélation a été tentée. Elle s'est révélée pratiquement nulle, le coefficient de corrélation ($r = - 0,083$) n'offrant guère de signification avec une probabilité comprise entre 0,60 et 0,70 pour une population de 27.

Les données pour les sables les plus grossiers, en particulier, les plus susceptibles de fragilisation, ne montrent aucune réduction de leur abondance relative.

4.2.2. Rôle de l'appauvrissement des profils en silice

La figure 15 illustre les valeurs des coefficients granulométriques de chacune des fractions sableuses pour les quatre principaux grands groupes de sols.

RICHESSSE en Fe_2O_3 et GRANULOMETRIE des SABLES

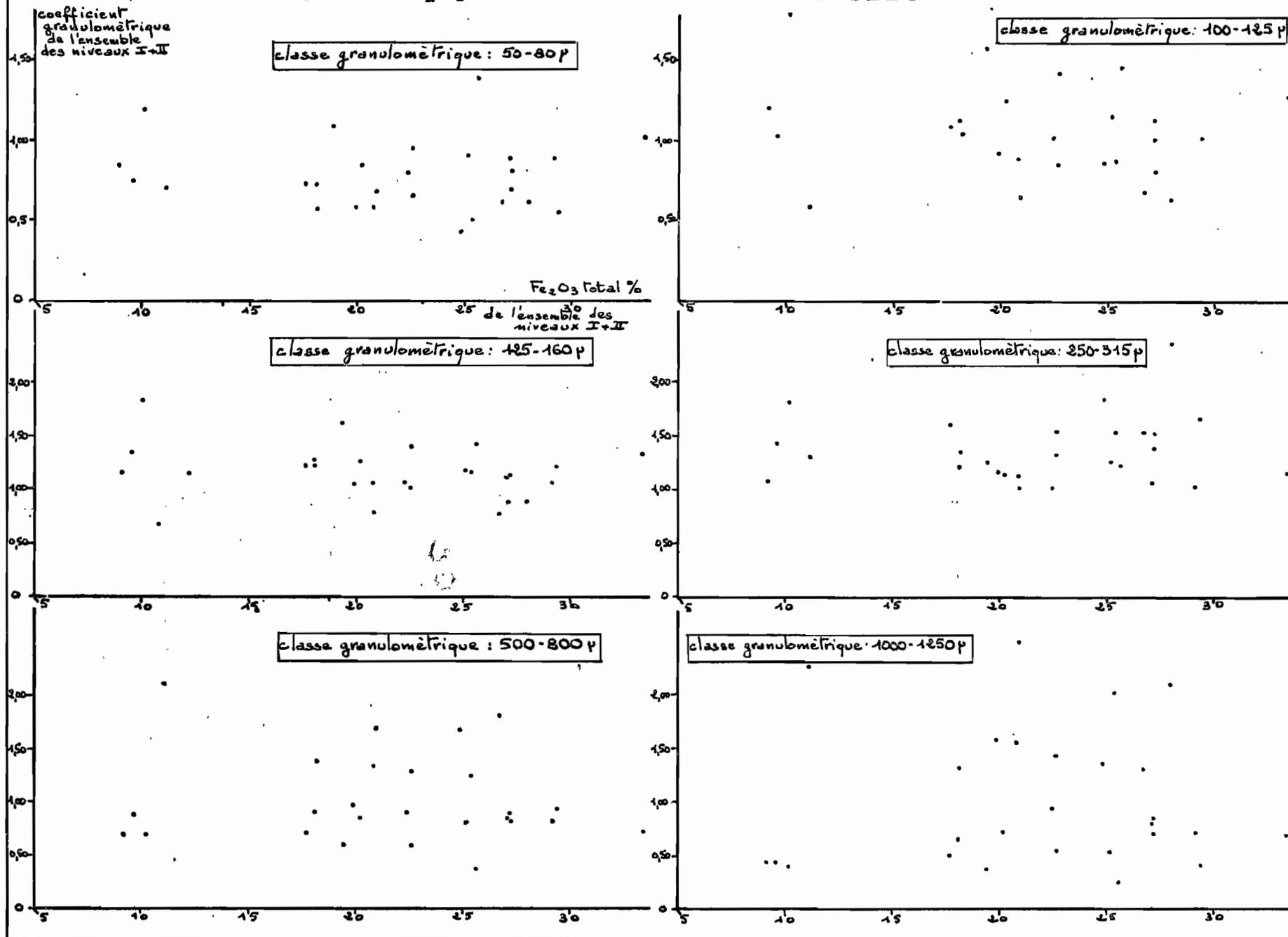
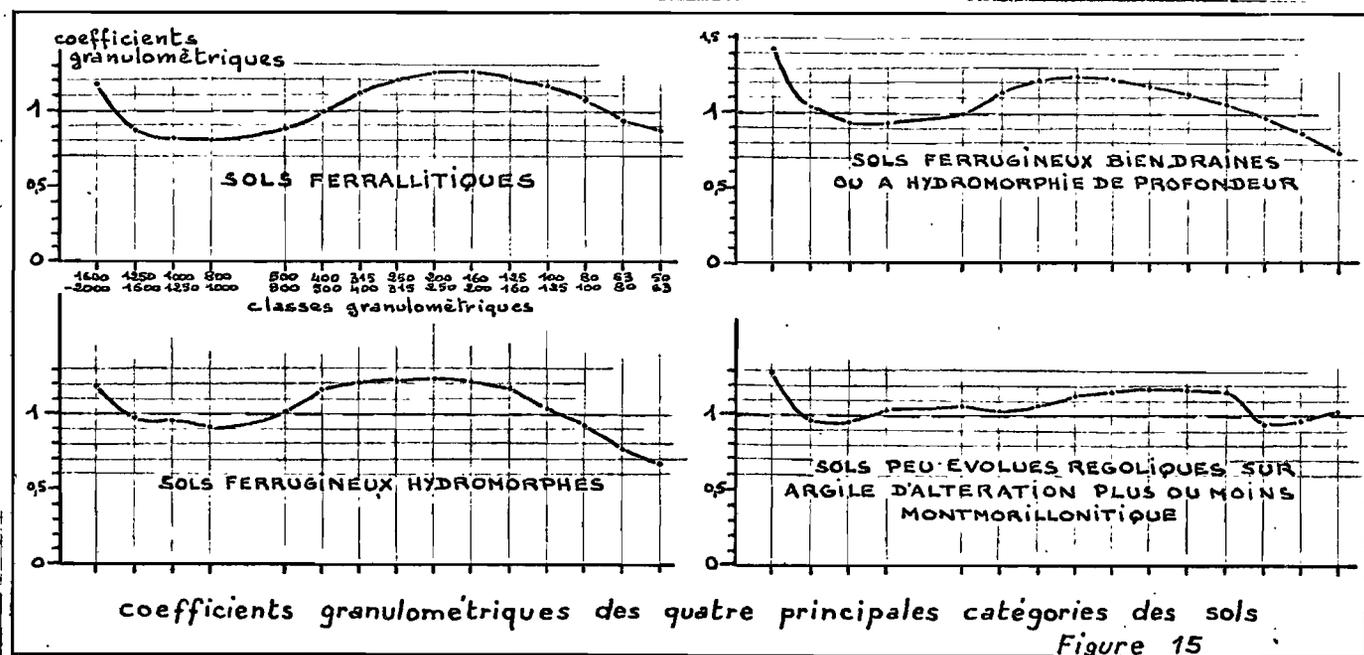


Figure 14

Il apparaît, à première vue, une certaine différence entre ceux-ci, principalement entre les sols peu évolués à dominance montmorillonitique et ceux dans lesquels la kaolinite et hydroxydes dominant, dans les niveaux I et II du moins.

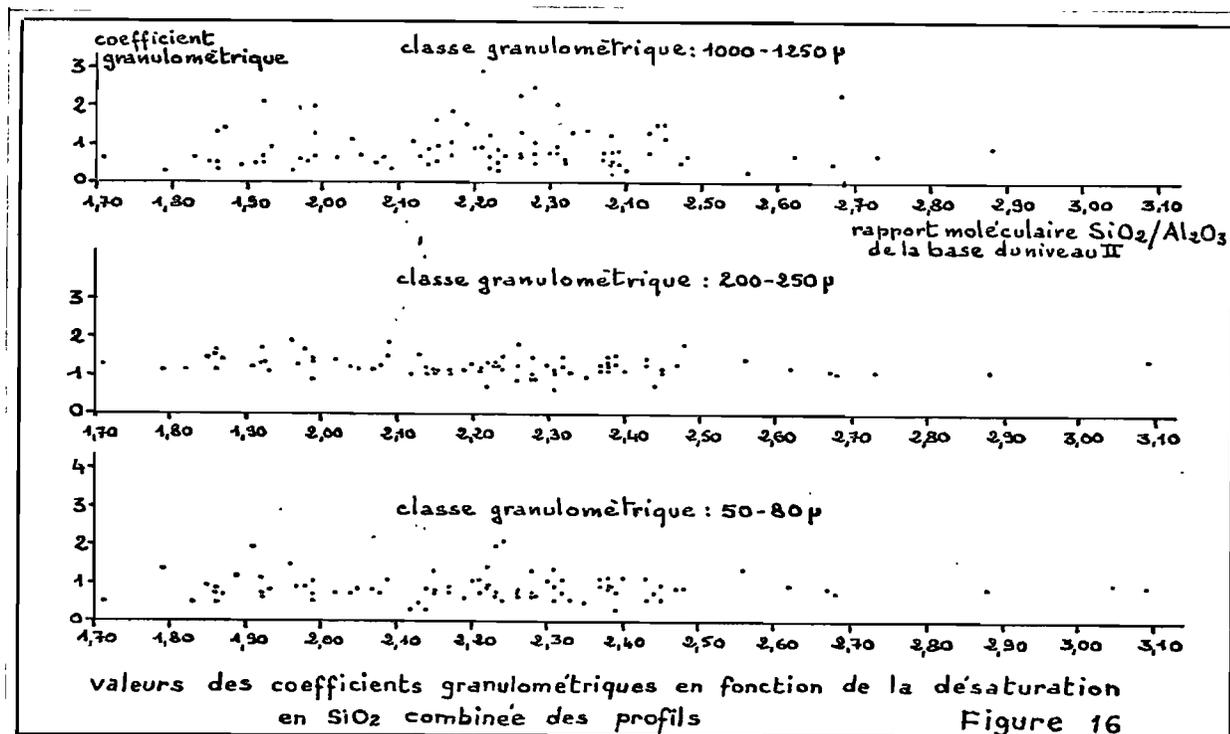
Pour s'en assurer, une comparaison statistique des moyennes de coefficients fut effectuée pour diverses classes granulométriques. Les conclusions de cette analyse sont les suivantes : homogénéité parfaite des résultats entre les divers grands groupes de sols pour toutes les classes granulométriques supérieures à 125 microns, homogénéité plausible pour les fractions de 80 à 125 microns, enfin différence significative pour les fractions de 50 à 80 microns entre sols peu évolués à dominance montmorillonitique et sols à hydroxydes (ferrallitiques et ferrugineux).



C'est la seule différence significative observée : des sols ferrallitiques, très bien drainés, aux sols ferrugineux hydromorphes, l'analyse statistique rend plausible l'hypothèse d'une seule et même évolution granulométrique indépendamment de leur pédogenèse et du degré de leur évolution.

Cette mise en parallèle des grands groupes de sols entraîne toutefois trop d'imprécisions quand il s'agit d'apprécier le rôle d'un facteur bien déterminé, en l'occurrence la désaturation en silice. Bien des facteurs concourent, en effet, à l'individualisation de ces grands groupes pédogénétiques les uns par rapport aux autres. Aussi ne retiendrons nous que le rapport moléculaire SiO_2 / Al_2O_3 des horizons B des sols en question.

La figure 16, ci-dessous, consigne la recherche de corrélation entre ce rapport et les valeurs des coefficients granulométriques pour diverses fractions sableuses échelonnées sur la gamme allant de 50 à 2000 microns.



Nous ne pouvons, ici encore, mettre en évidence aucune liaison.

4.2.3. Conclusion sur le rôle des facteurs pédogénétiques

Si donc les deux grands facteurs pédogénétiques, richesse en fer et appauvrissement en silice, ont quelque influence sur la redistribution (respectivement par fragilisation des sables quartzeux les plus grossiers et dissolution partielle des plus fins), cette action pourrait, semble-t-il, s'effectuer assez profondément dans les horizons C ou/et D, en place. Cette éventualité a été recherchée pour les profils sur lesquels l'analyse granulométrique pouvait être effectuée sans la gêne entraînée par la présence de feldspaths : les sols ferrallitiques les plus profonds, en particulier. Une évolution très progressive des pourcentages de sables quartzeux a, en effet, été remarquée du contact avec la roche-mère vers le sommet des horizons en place. Toutefois elle se révèle être en sens inverse de celui auquel on pouvait s'attendre : les sables les plus grossiers voyant leur pourcentage s'élever quelque peu à mesure qu'on approche du sommet du niveau III, et vice-versa pour les sables fins. On ne peut guère invoquer, pour expliquer ces faits, une modification du faciès de la roche-mère puisqu'elle devrait s'effectuer dans la majorité des cas, non seulement avec une progressivité assez remarquable, mais également dans le même sens.

On peut retirer, au passage de cette dernière observation qu'une certaine redistribution granulométrique s'effectue dans les horizons sédentaires, bien qu'elle soit beaucoup moins nette que dans les niveaux remaniés. On pourrait peut être invoquer une certaine dissolution des quartz les plus fins pour expliquer leur diminution progressive vers le sommet, mais les données chiffrées sont trop fragmentaires pour s'en assurer. De toute façon, cet aspect du problème ne rentre pas exactement dans le cadre de la présente étude, centrée sur le remaniement manifeste des horizons supérieurs des sols.

Quant à l'accroissement du pourcentage des sables grossiers, il écarte bien entendu, pour les sols étudiés, l'éventualité de l'action fragilisante des hydroxydes de fer.

En définitive, et pour revenir aux résultats consignés précédemment, aucune action sensible, tant des hydroxydes de fer que de la désaturation en silice, ne se manifeste dans la redistribution granulométrique des niveaux remaniés des sols étudiés.

Il existe bien entendu, certainement une cause des différences observées, dans les fractions sableuses les plus fines, entre les sols régoïques à montmorillonite dominante et les sols à sesquioxydes (ferrallitiques et ferrugineux). Peut être est-elle d'un autre ordre, topographique par exemple, comme permettrait de le penser la situation particulière (en bas de pente) du premier de ces grands groupes de sols. Cet aspect sera traité au cours des paragraphes ultérieurs.

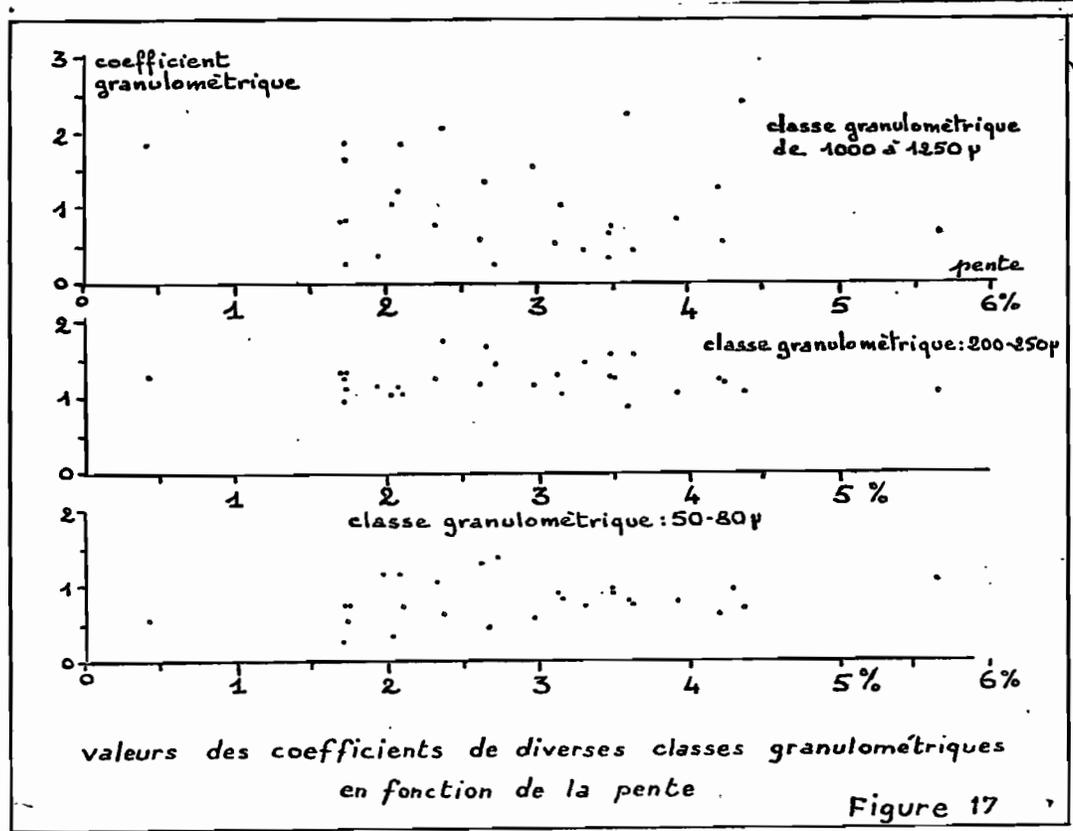
4.3. Les facteurs topographiques

Les principaux facteurs pédogénétiques chiffrables tels que la richesse en hydroxydes de fer et l'appauvrissement en silice se révélant assez étrangers à cette redistribution granulométrique restent les facteurs topographiques et la position géomorphologique.

4.3.1. Déclivité du terrain

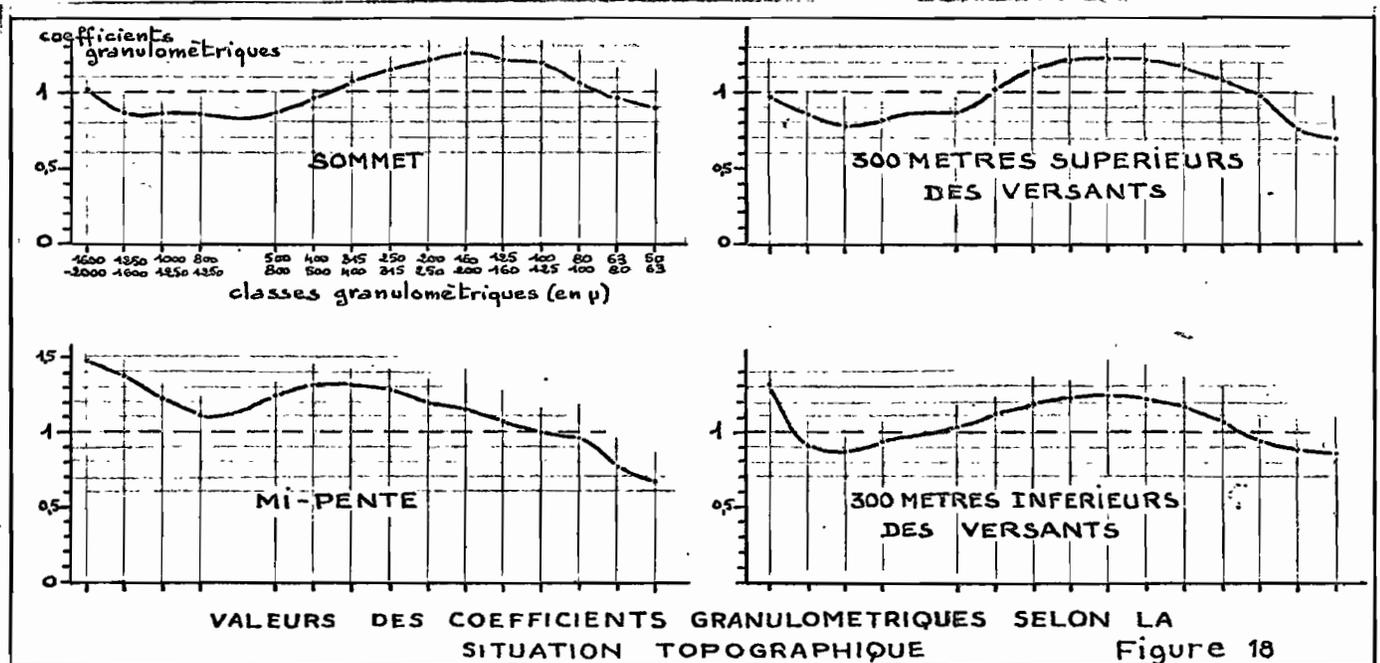
La figure 17 traduit dans ses trois graphiques, pour diverses fractions sableuses, l'influence du pourcentage de pente sur la valeur des coefficients granulométriques établis entre niveaux remaniés et sommet des horizons en place.

Nous pouvons voir que, du moins pour l'éventail (assez réduit) de déclivités présentées par le terrain étudié, nous n'observons aucune corrélation.



4.3.2. Situation topographique

La figure 18 donne pour quatre ensembles de positions topographiques très différentes les unes des autres, la moyenne des coefficients granulométriques pour chacune des fractions sableuses. Un seul groupe de sols semble d'emblée, se distinguer : celui qui occupe les positions de mi-pente. L'analyse statistique des



données confirme ce fait en montrant que pour les fractions supérieures à 400 microns, cet ensemble de profils s'écarte des trois autres. Il n'en reste pas moins que dans les classes de sables plus fins, son rattachement avec les autres sols, en une seule population, reste statistiquement plausible. D'autre part, aucune différenciation sensible ne sépare les trois autres groupes entre eux, notamment ceux sur spmnet et les sols des situations déprimées du paysage. Les graphiques de la figure 19 permettent de confirmer cette tendance, en reproduisant, pour chacune des toposéquences étudiées dans le cadre de ce travail, les valeurs des coefficients granulométriques de diverses fractions sableuses, en fonction de la position sur les versants. Nous pouvons voir qu'aucune variation systématique de ces valeurs ne ressort, dans quelque fraction que ce soit, de cette analyse naturellement plus détaillée que l'établissement des moyennes qui ont conduit aux graphiques de la figure 18. La figure 20 regroupe pour certaines fractions sableuses, les données utilisées pour chacune des toposéquences étudiées (*). Ici, non plus, la situation topographique ne paraît avoir d'influence sensible.

Tout ce qui précède laisse en suspens la question dans les sols de mi-pente de l'accroissement du pourcentage relatif de leurs sables les plus grossiers (avec, corrélativement, influence sur celui des sables plus fins) dans les niveaux remaniés. Ce fait n'a pu être mis en parallèle qu'avec un seul : la présence généralement observée dans les profils situés à mi-versant de très nombreux quartz grossiers dans le niveau II. Des recherches de corrélation ont été tentées d'une part avec la quantité totale de quartz anguleux grossiers (supérieurs à 2 mm) et, d'autre part, avec celle des quartz émoussés (des mêmes fractions supérieures à 2 mm). Aucune liaison avec la présence des premiers n'a pu être mise en évidence. Ce fait pourrait s'expliquer par celui que de tels quartz peuvent être incorporés aux horizons supérieurs à mesure de leur développement aux dépens du matériau originel qui les hérite des filons toujours présents au sein de la roche mère. Mais il semble bien que l'élévation du pourcentage des sables de la fraction 800 - 2000 microns soit liée à l'abondance de quartz émoussés grossiers, comme l'indique la figure 21 illustrant l'analyse statistique de cette liaison. Bien que les résultats soient très dispersés de part et d'autre de la droite de régression, le coefficient, avec une probabilité comprise entre 0,03 et 0,04, peut être considéré comme significatif.

(*) Il a été jugé bon d'établir cette recherche de liaison en partant, premièrement des sommets, deuxièmement des axes de drainage, pour deux raisons. La première en est que les longueurs de versants sont variables et qu'une même distance à partir du sommet (ou de l'axe de drainage) peut correspondre à une situation relative, très différente d'une toposéquence à l'autre. La seconde réside dans la prise en considération de la possibilité de dominance d'un des deux phénomènes suivants : "ennoyage des zones déprimées du paysage par érosion (ou tout simplement creep) des topographies hautes ou bien érosion régressive à partir d'un creusement actif des axes de drainage qui décape les bas de pente.

COEFFICIENTS GRANULOMETRIQUES ET SITUATIONS TOPOGRAPHIQUES
DANS LES TOPOSEQUENCES ETUDIEES

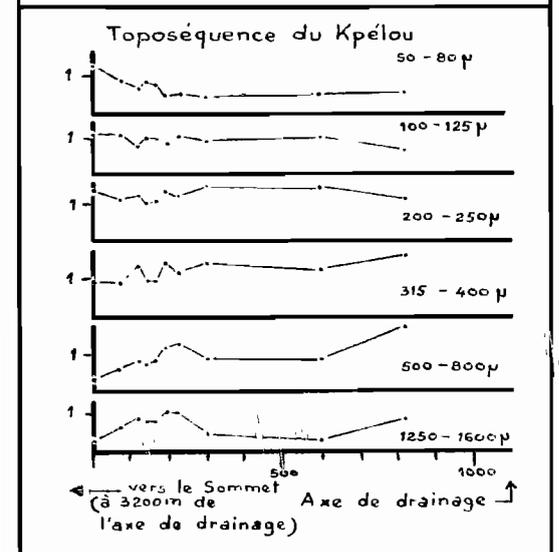
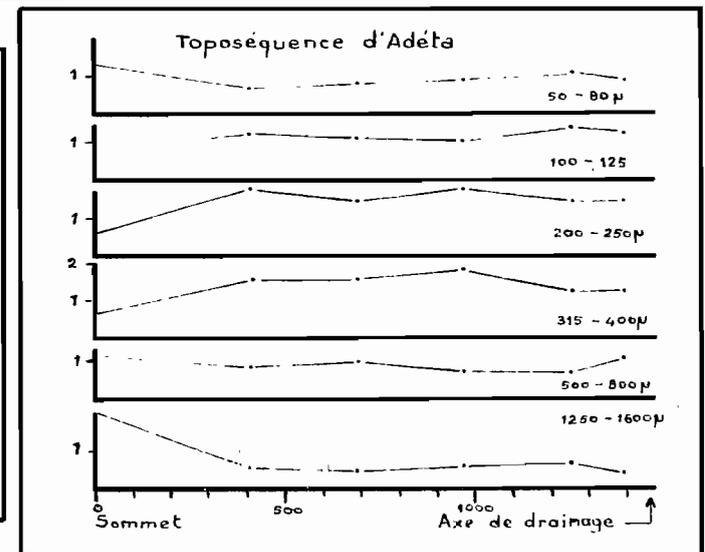
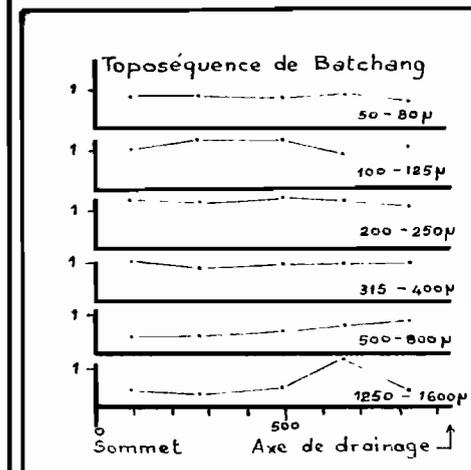
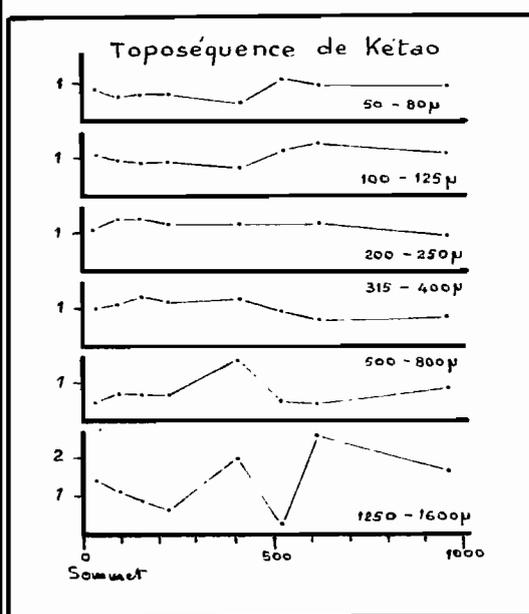
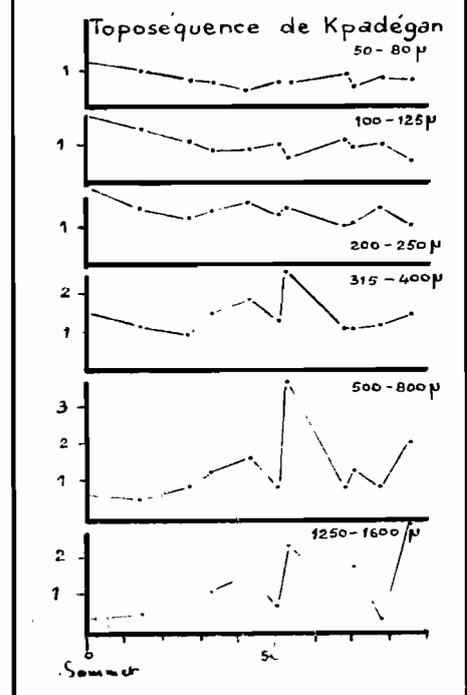
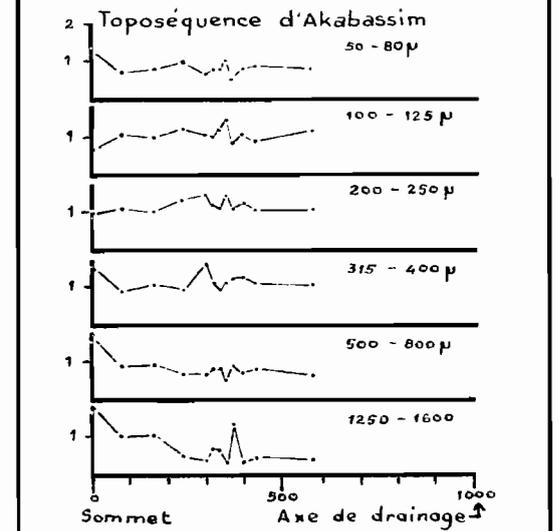
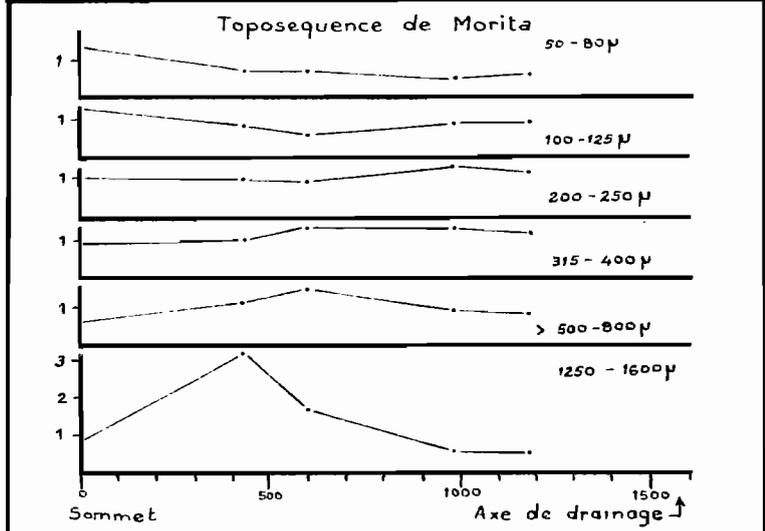
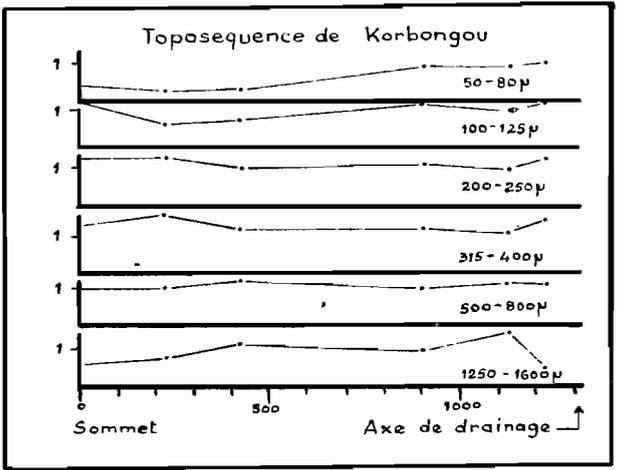
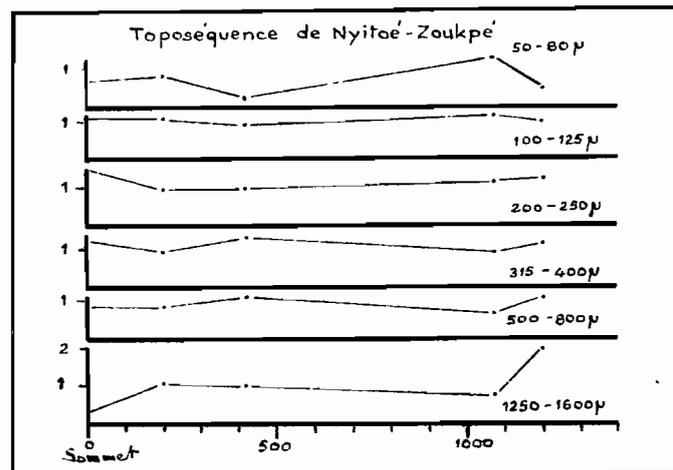
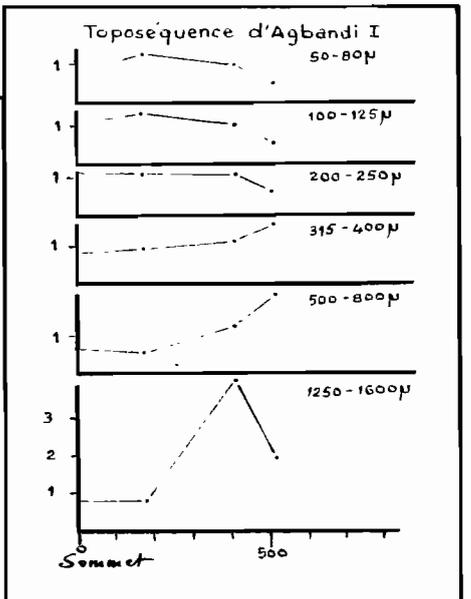
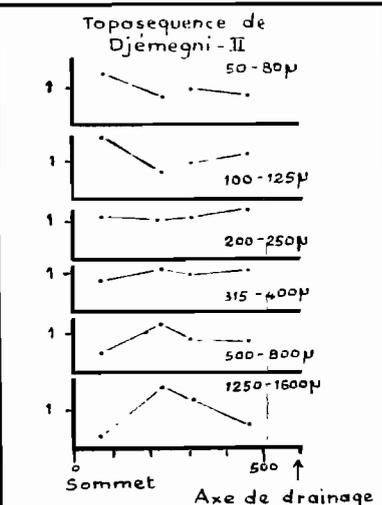
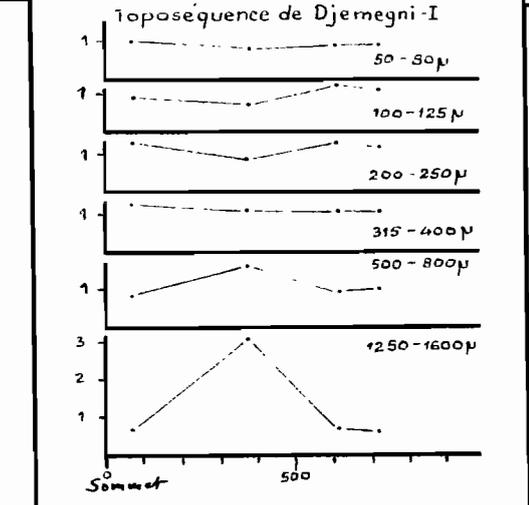
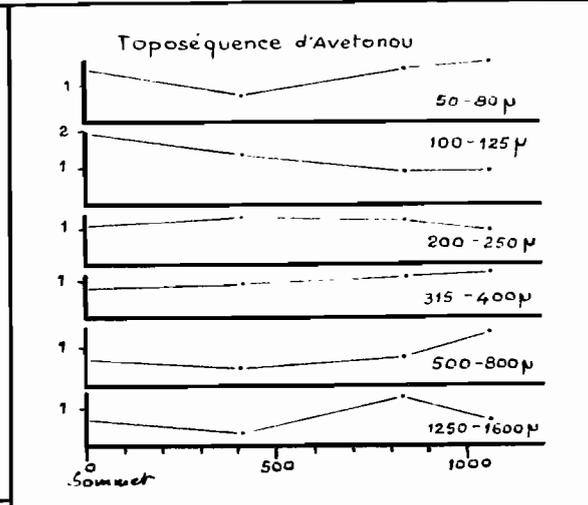
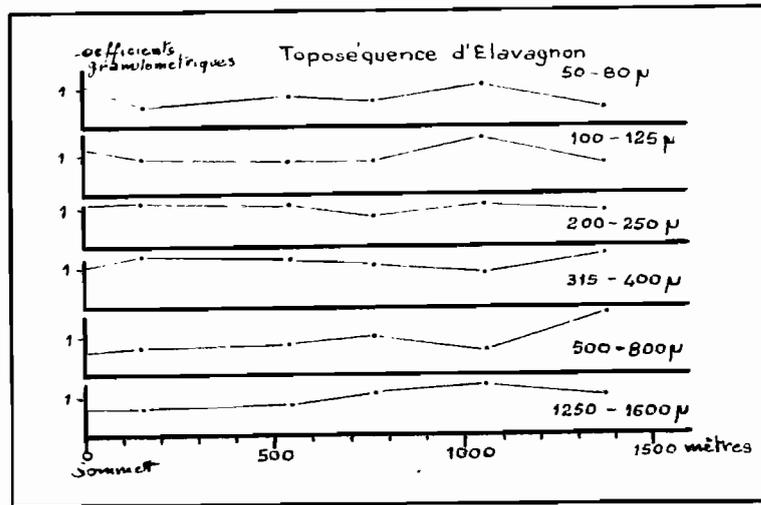


Figure 19

VALEURS DES COEFFICIENTS GRANULOMETRIQUES ET SITUATION TOPOGRAPHIQUE

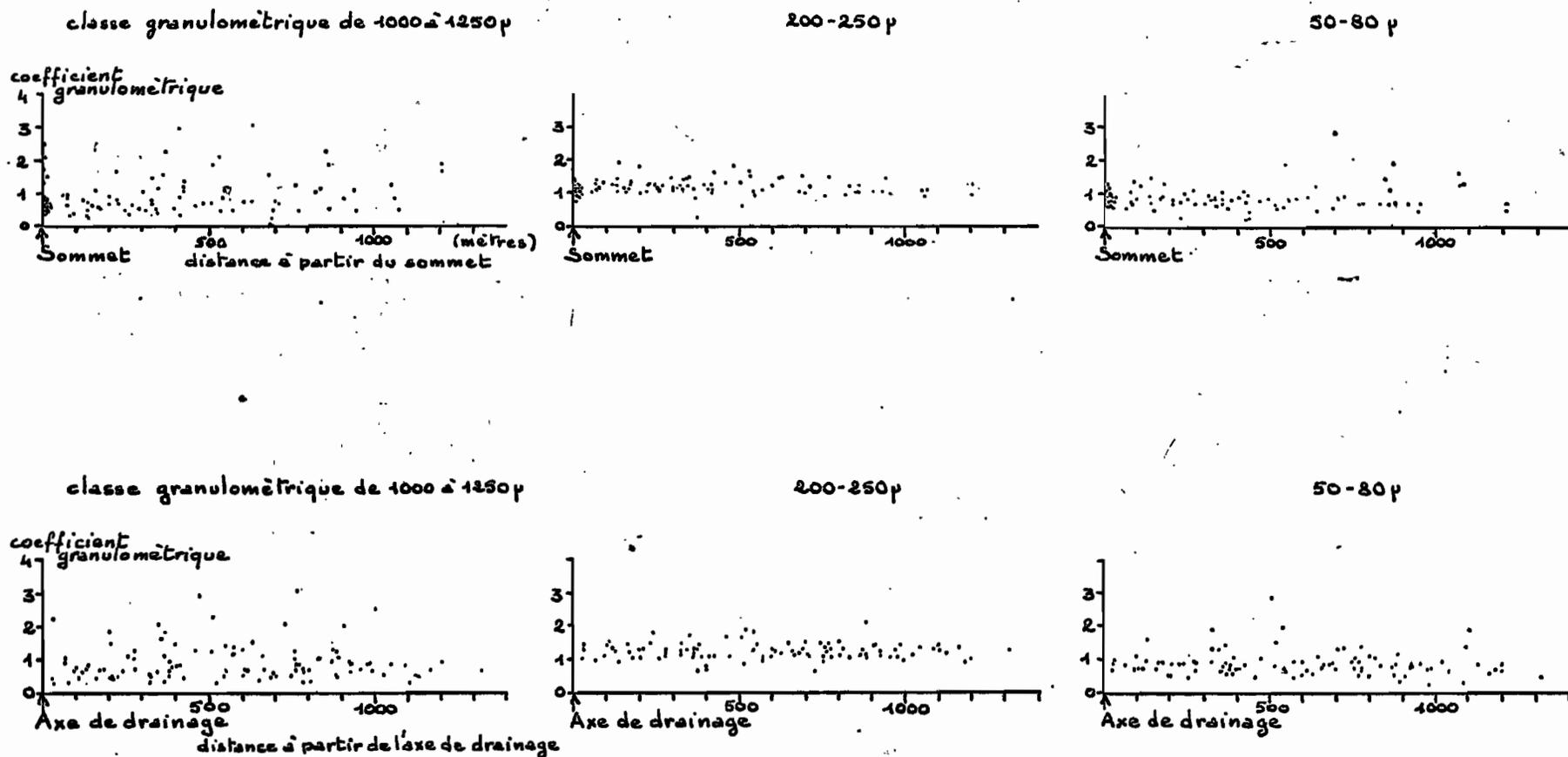
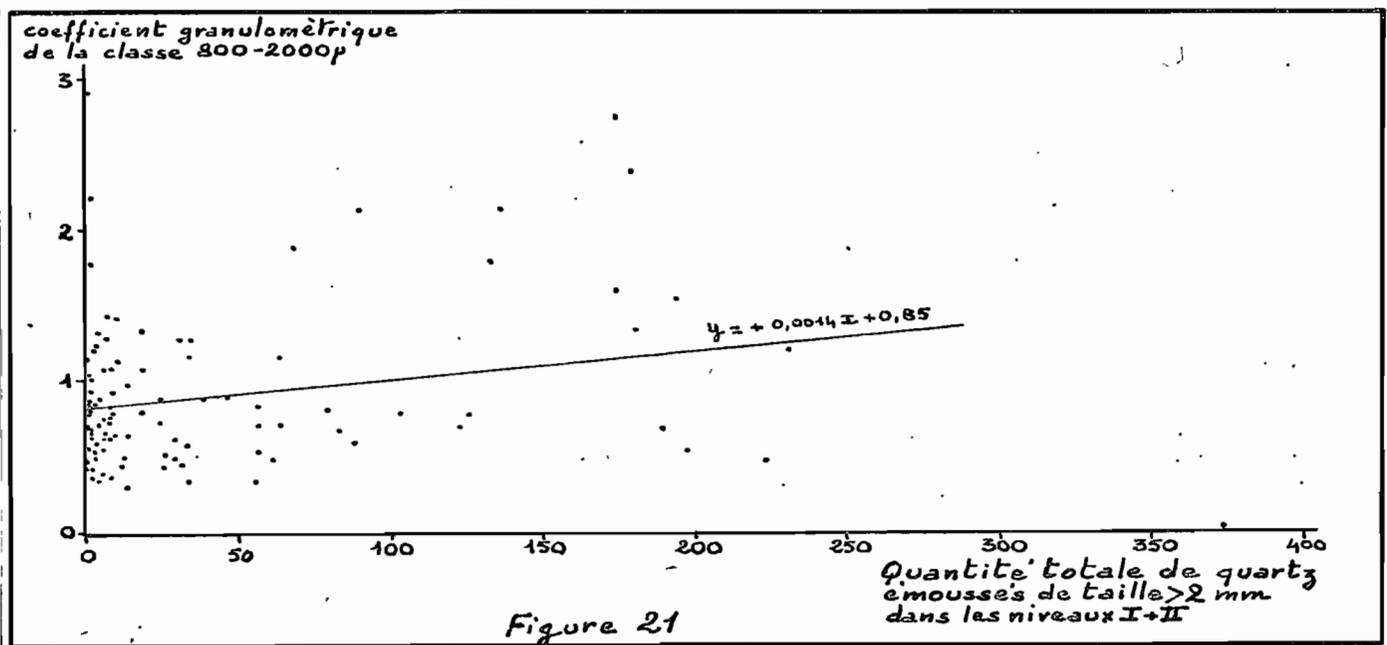


Figure 20



On ne peut évidemment statuer sur le caractère de cette liaison qui peut ne traduire qu'une simple concomitance. Il semble bien, en effet, qu'il n'y ait pas de rapport de causalité dans ce phénomène. L'examen morphoscopique des sables grossiers de tous ces profils de mi-pente ne révèle, en effet, d'une façon aucunement systématique, pas de grains émoussés plus nombreux qu'ailleurs (de toute façon toujours en très faible proportion, sinon absents).

On pourrait donc, revenant à l'hypothèse d'une concomitance d'effets, penser que quartz émoussés grossiers et une partie des sables les plus grossiers proviennent d'une période ancienne d'érosion les ayant concentrés à la surface du paysage. La situation de mi-versant à laquelle ces gros quartz émoussés se révèlent être les plus fréquents, correspondrait peut être, dans une majorité des cas, à la limite qu'atteignaient, à l'époque, les bas-fonds, les niveaux de base locaux, dans un paysage au modelé beaucoup plus "adouci" qu'actuellement. L'idée de cette phase érosive ancienne des éléments plus fins ne semble pas devoir être écartée puisque, précisément, nous pouvons observer dans nombre de courbes de coefficients, une première section dans laquelle, de 2000 à 800 microns en général, les valeurs de ces derniers décroissent assez régulièrement, reflétant donc une disparition inversement proportionnelle à leur taille.

4.3.3. Influence du modelé

Enfin, pour, sinon compléter, du moins poursuivre l'investigation de l'influence des facteurs topographiques, ont été réunis les sols dont les situations topogéomorphologiques s'y prêtaient, en 2 groupes : le premier présentant des profils de pente concave, le second sur des sections convexes.

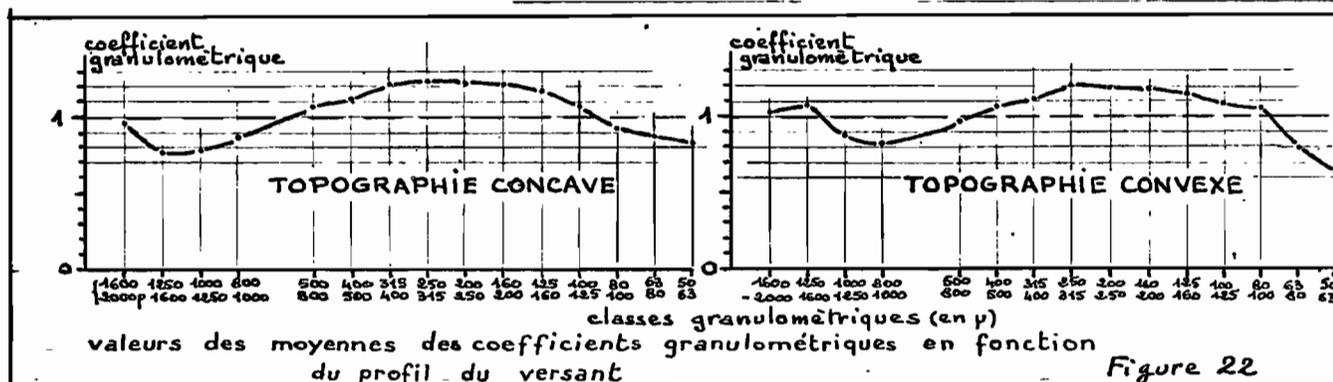


Figure 22

La figure 22 illustre les différences des moyennes des coefficients dans l'un et l'autre cas.

Ici, également, une analyse statistique, fut effectuée pour tenter de confirmer la signification des quelques différences observées d'un groupe de données à l'autre. Les valeurs de l'écart-réduit conduisent à des probabilités supérieures dans tous les cas à 0,27, sauf pour la fraction 1250-1600 microns où fut trouvée une valeur de P égale à 0,07 environ. Il faut en conclure que les valeurs des coefficients granulométriques ne se révèlent pas significativement différentes des profils de versants concaves aux convexes.

Si une interprétation plus poussée pouvait être entreprise, il est possible que les différences révélées entre les deux graphiques de la figure 22 soient alors confirmées, ceci pour les fractions les plus grossières ainsi que pour les plus fines. Si tel était le cas, il serait alors à remarquer qu'un profil convexe de la pente semble favoriser l'érosion des sables les plus fins avec, par voie de conséquence, accroissement du pourcentage des sables plus grossiers, dans les niveaux remaniés. A l'inverse, nous pourrions penser que les concavités favorisent l'atterrissement d'un colluvionnement éventuel : tel ne paraît pas être du tout le cas si nous comparons le graphique donné pour l'ensemble des sols sur portions concaves à celui des sols sur sommets, par exemple, (figure 18) : les divers coefficients sont extrêmement voisins.

4.3.4. Puissance de l'ensemble des niveaux I + II, remaniés

Enfin, un autre élément d'appréciation de transport éventuel de matériau est susceptible, a priori, de nous fournir quelque renseignement utile. Il s'agit de la puissance des niveaux remaniés.

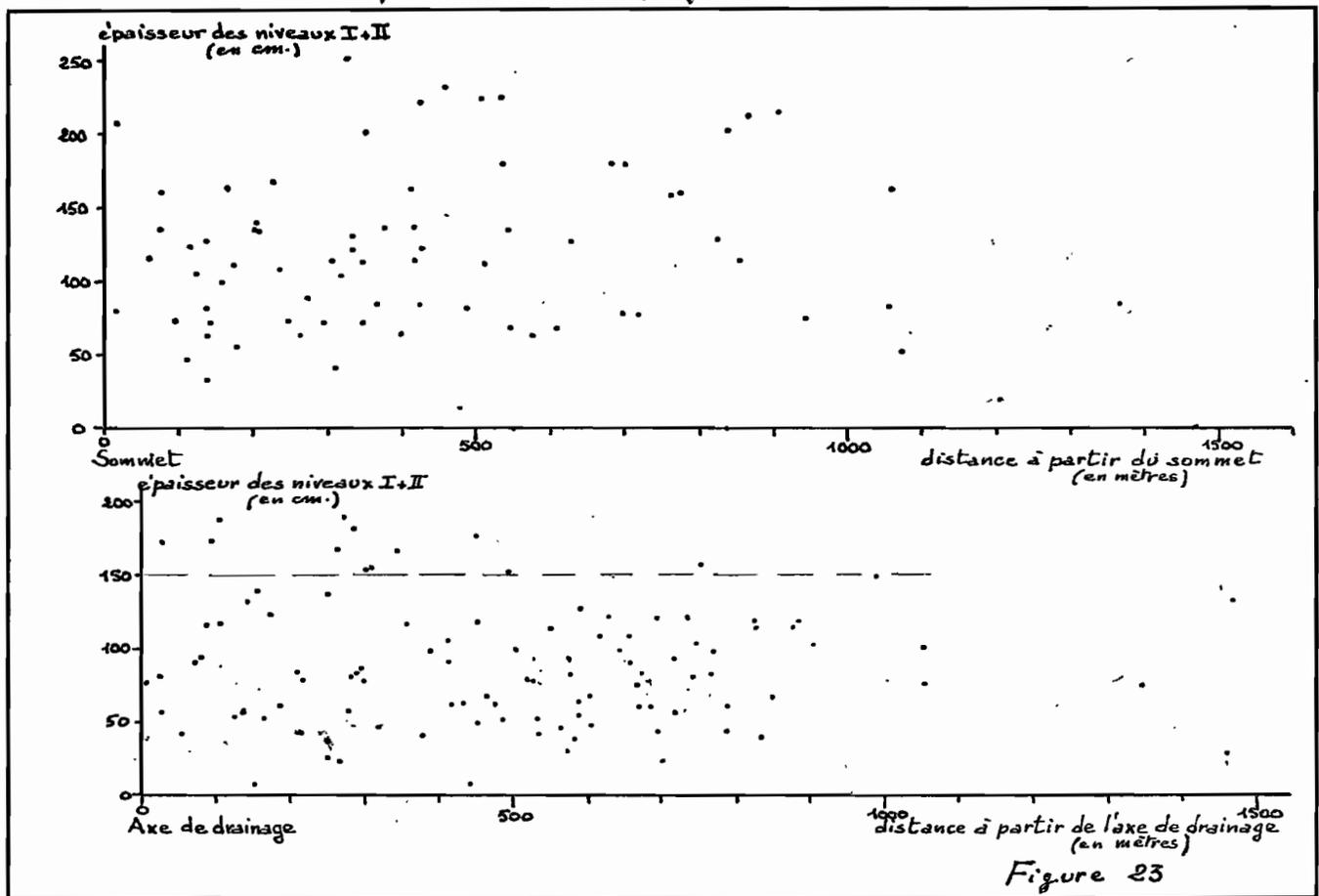


Figure 23

La figure 23 met en parallèle cette caractéristique avec la distance séparant les profils d'une part, des sommets, d'autre part, des axes de drainage (voir la dernière remarque infrapaginale).

Sur le graphique sur lequel les distances se réfèrent à l'axe de drainage, il semble pourtant, que les plus fortes puissances (supérieures à 150 cm) semblent se concentrer en bas des versants.

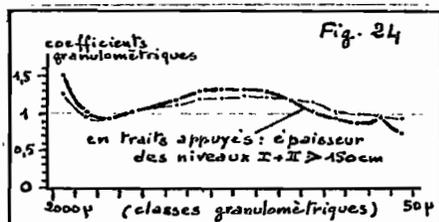


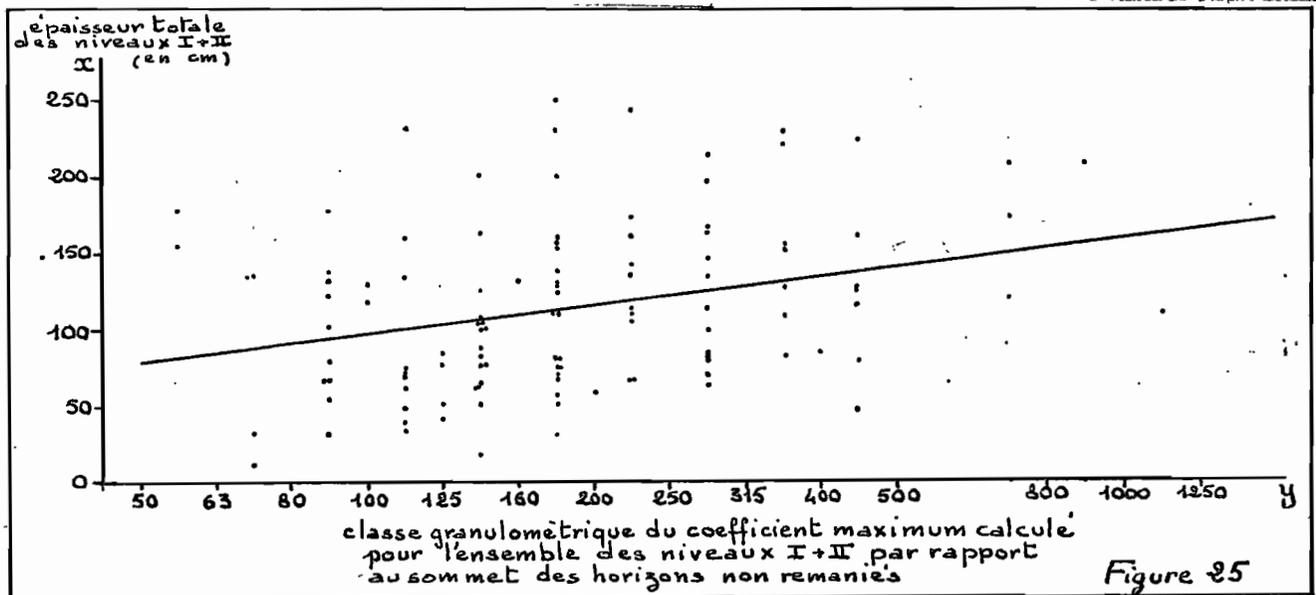
Fig. 24

La figure 24 illustre les courbes des coefficients granulométriques d'une part, des sols à niveaux I + II plus épais que 150 cm et, d'autre part, de ceux dont l'ensemble des horizons remaniés est plus mince, ceci pour les moitiés inférieures des versants. Les écarts sont très faibles et l'analyse des variances entre chaque groupe des données est loin de révéler de différence significative

pour aucune des 15 classes granulométriques. Les coefficients pour les fractions sableuses les plus fines sont même un peu plus faibles pour les niveaux remaniés les plus épais. C'est semble-t-il le contraire de ce qu'il pourrait être attendu d'un apport sableux en bas de pente. En effet, si un colluvionnement était impliqué, celui-ci devrait refléter la granulométrie très généralement plus fine des horizons supérieurs c'est-à-dire de ceux les plus exposés au décapage original à l'amont de cet éventuel colluvionnement.

Une analyse statistique plus générale, plus complète, fut effectuée sur toutes les données, de la liaison entre puissance des horizons remaniés et valeur des coefficients granulométriques de chaque fraction sableuse. Elle s'est révélée nulle. Ce fait souligne le danger de la tendance fréquente, lors des travaux de terrain, de se baser sur les épaisseurs de certains sols ou horizons remaniés pour statuer sur des aspects extérieurs de leurs matériaux constitutifs.

En définitive, la seule influence trouvée de cette puissance des horizons remaniés s'exerce sur la classe granulométrique à laquelle nous avons le coefficient maximum entre niveaux remaniés et sommet du niveau en place. La figure 25 illustre cette liaison, d'ailleurs fort étroite puisque, pour un coefficient de corrélation positif de 0,36 environ, nous obtenons, avec une probabilité de 10^{-5} environ, une très haute signification.



Dans l'état actuel des connaissances acquises, l'interprétation de ce fait semble ne devoir reposer que sur des hypothèses hasardeuses.

4.3.5. Conclusion sur l'influence des facteurs topographiques

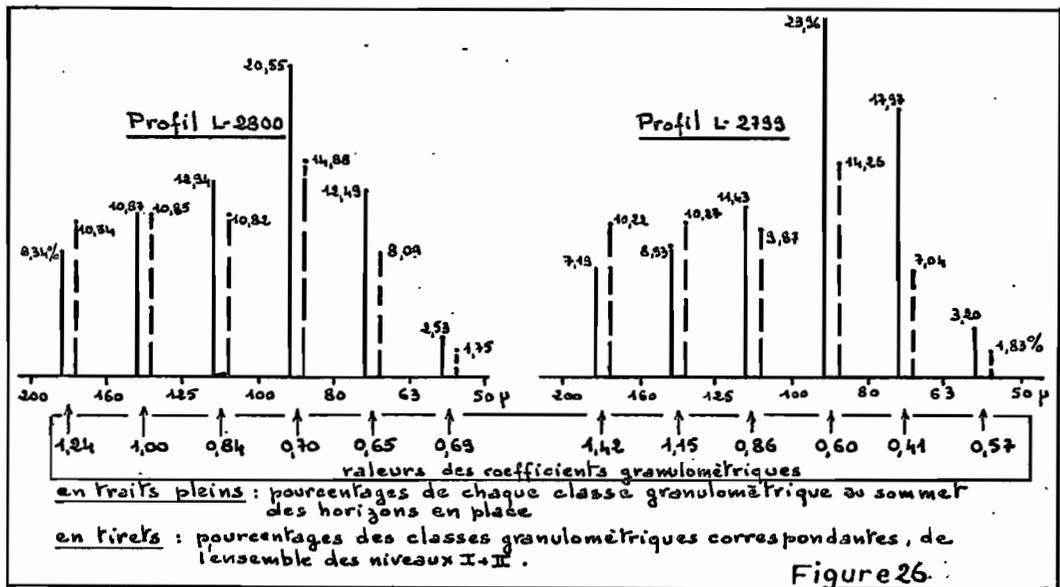
Les faits semblent parler d'eux-mêmes : la redistribution granulométrique des sables dans les niveaux remaniés ne paraît, pour le moins, que très peu influencée par la situation topographique des sols.

4.4. Le rôle du matériau du niveau en place

Les exemples donnés par la figure 5 nous ont déjà permis de penser qu'en fait, malgré toutes les très fréquentes discontinuités morphologiques des sols, les profils granulométriques peuvent être très continus dans la progressivité des pourcentages dans le sens vertical.

Nous pouvons également observer, nous reportant à la figure 3, que les courbes cumulatives établies respectivement pour l'ensemble des niveaux remaniés et pour le sommet des horizons en place traduisent un parallélisme assez remarquable.

Enfin la figure 26 nous offre deux exemples détaillés chiffrés, permettant de mieux apprécier ce fait. Nous pouvons observer en particulier, que, malgré des



maximum de pourcentages très accentués pour certaines fractions sableuses du niveau en place, la régularité de la décroissance du coefficient granulométrique n'en est pas affectée pour autant. L'ensemble des niveaux remaniés reflètent alors, en effet, très fidèlement ce brusque accroissement.

4.4.1. Parenté granulométrique entre horizons en place et horizons remaniés

Le calcul du coefficient de corrélation pour chaque classe granulométrique inférieure à 500 microns, entre pourcentages au sommet du niveau III d'une part, et ceux de l'ensemble des horizons remaniés d'autre part, aboutit à des valeurs très élevées et très hautement significatives. Nous avons, par exemple, $r = + 0,757$ avec P inférieure à 10^{-9} et $r = + 0,805$ avec P inférieure à 10^{-11} respectivement pour les fractions 50 - 80 et 250 - 315 microns. Ces données chiffrées nous offrent une certitude pratiquement absolue d'une parenté très étroite entre horizons en place et remaniés.

Il faut signaler que cette liaison semble nettement moins étroite pour les classes les plus grossières, mais l'interruption subie par les travaux d'analyses statistiques par manque soudain de moyens de calculs, empêche de statuer avec plus de précision.

De même, si nous comparons la granulométrie du seul niveau I à celle du sommet des horizons en place, nous obtenons de semblables résultats. Les valeurs des coefficients de corrélation et le degré de signification sont cependant moins élevés. Toujours par la même méthode, les niveaux II par rapport à III, les niveaux I par rapport à II révèlent une étroite filiation mais le travail pour débrouiller cet écheveau de "parentés verticales" à l'échelle des horizons ou sous-horizons, reste pour le moment, inachevé.

Ces "parentés verticales" partielles apparaissent s'intégrer finalement, pour donner à l'ensemble des niveaux remaniés, une redistribution granulométrique typique.

4.4.2. L'influence de la taille des sables

Enfin, parallèlement à l'influence très étroite du pourcentage de chacune des fractions sableuses au sommet des horizons en place, il apparaît évident, au simple examen des courbes de coefficients granulométriques, que la taille des sables est en elle-même, un facteur déterminant de la redistribution granulométrique dans les horizons remaniés. En l'absence de données chiffrées, non encore disponibles, la seule observation de la très nette progressivité des valeurs des coefficients granulométriques, dans les différentes sections de toutes les courbes établies, suffit pour nous confirmer l'existence d'un rapport de corrélation très significatif entre pourcentages des diverses fractions sableuses des niveaux remaniés et leur taille.

5. CONCLUSION

5.1. Récapitulation des faits

5.1.1. Facteurs topographiques

Il est manifeste que, pratiquement tous les sols développés sur ce socle granito-gneissique sont intensément et plus ou moins profondément remaniés et que nous pouvons, à première vue, tout au moins, invoquer la possibilité de transport de matériaux fins pour expliquer les discontinuités morphologiques des profils.

Cette présomption est mise en défaut par de nombreux caractères :

- forte individualité des profils granulométriques à faible distance (de l'ordre de quelques dizaines de mètres) les uns des autres sur un même versant.
- continuité fréquente de la progressivité des caractéristiques des profils granulométriques, de la base vers le sommet des sols malgré l'existence de discontinuités morphologiques marquées.
- il existe bien une forte redistribution granulométrique des sables dans les horizons remaniés, par rapport à ceux qui n'ont pas subi de bouleversements et issus directement de la roche mère sous-jacente. Toutefois, aucune dépendance sensible de cette redistribution ne peut être dégagée, de la position topographique, du degré de déclivité du terrain ou de la forme de modelé.

5.1.2. Influence du type de pédogenèse

Ni l'envahissement en hydroxydes de fer de certains horizons, ni la désaturation en silice du profil n'apparaissent être responsables de cette redistribution granulométrique, et d'autres facteurs doivent être invoqués pour expliquer les différences observées par certains groupes. La puissance du développement des horizons remaniés n'est aucunement liée, d'autre part, de manière significative, à la redistribution granulométrique.

5.2. Caractéristiques de la redistribution granulométrique

Sensiblement indépendante des conditions topographiques et du modelé du terrain, des facteurs pédogénétiques couramment invoqués, ainsi que de la puissance des horizons intéressés, elle se reproduit, en moyenne identique à elle-même, malgré des variations de détail, en tout point du paysage (si l'on excepte les portions inférieures de versants couverts d'un complexe alluvio-colluvial). Pour l'ensemble des horizons remaniés, elle apparaît être la résultante d'une suite de redistributions verticales entre les divers niveaux et par rapport aux horizons non remaniés, dérivés directement de la roche mère sous-jacente.

Elle est caractérisée, pour l'ensemble des horizons remaniés, d'abord par un enrichissement progressif, régulier, en fractions sableuses de moyenne taille, enrichissement de plus en plus marqué dans le sens des granulométries décroissantes.

Ce phénomène est limité par un appauvrissement (sensu lato) en sables les plus fins, lui aussi progressivement de plus en plus marqué vers les fractions de taille minimum.

D'autre part, le matériau fin des horizons remaniés entretient une extrêmement étroite parenté granulométrique avec celui des horizons rigoureusement en place.

Il faut remarquer, au passage, que cette parenté, d'ordre granulométrique entre horizons remaniés et matériau originel plus ou moins évolué, rigoureusement en place, se retrouve dans pratiquement toutes les caractéristiques pédogénétiques.

Nous avons vu que pour les sols les moins évolués, à montmorillonite dominante, la moyenne des pourcentages des sables les plus fins offre certaines différences par rapport aux autres sols. Il faut noter que, comparativement aux autres grands groupes, nous avons à faire ici à tout un ensemble relativement très jeune dans l'évolution générale du paysage. Puisqu'il doit bien exister une cause à l'origine de la redistribution granulométrique, il est concevable de voir, dans cette différence, la marque du facteur temps. Cette redistribution caractéristique ne s'effectue certainement pas d'une manière instantanée. En effet, elle semble être extrêmement élaborée et résulter statistiquement d'une suite d'actions effectuées dans le même sens.

5.3. Hypothèse retenue

Ce phénomène de redistribution granulométrique, de caractères sensiblement autochtones, dans les horizons remaniés, est donc absolument général, pratiquement indépendant des conditions topographiques et chimiques de la pédogenèse. Il semble traduire l'action d'un facteur de tout autre ordre, oeuvrant sur place, gagnant le profil en profondeur tout en gardant sensiblement ses caractères propres.

Sur le plan du bilan des horizons remaniés, la disparition partielle des sables les plus fins, serait l'oeuvre d'une érosion très superficielle qui les exporte (ou les a exporté) hors du paysage à mesure de leur concentration au sommet du profil tandis que la base des horizons remaniés s'enrichit corrélativement en sables plus grossiers. Aucun apport ou transit sensible ne marque aucun point particulier du paysage, en dehors des complexes alluvio-colluviaux, bien distincts, d'importance relativement restreinte, que l'on retrouve le long de certains axes de drainage. Le façonnement de ce socle granito-gneissique est donc dominé par l'érosion. Celle-ci semble s'être effectuée (ou s'effectuer encore de nos jours) sous forme d'une exportation progressive des tranches les plus superficielles des sols vers les cours d'eau puis les zones de sédimentation côtières. Le problème de l'établissement des bilans géochimiques des sols paraît donc, devoir se poser à partir de deux notions fondamentales : autochtonie générale des matériaux ainsi que décapage superficiel des fractions les plus fines. Ces deux notions ne sont toutefois pas exclusives : il ne faut pas écarter à priori, en particulier, les redistributions sous forme soluble, pseudo-soluble ou colloïdale le long des toposéquences. C'est pourquoi la notion d'autochtonie doit être restreinte, pour le moment du moins, aux matériaux sous forme solide.

LOME, le 28 Mai 1972

A. LÉVÊQUE

R E S U M E

Les sols extrêmement remaniés qui font l'objet de l'étude partiellement présentée dans cette note semblent traduire, par leur morphologie, une action de transport et de dépôt de matériaux fins dans le paysage.

A l'aide d'une nouvelle méthode d'analyse des résultats granulométriques, il apparaît qu'il existe bien une très nette redistribution des sables. Celle-ci est, cependant, très fortement indépendante des situations topographiques et ne traduit aucunement un quelconque apport extérieur de matériaux fins dans la constitution des horizons remaniés des profils. Cette redistribution apparaît également indépendante des facteurs physico-chimiques impliqués dans la pédogenèse.

En définitive, le même type de redistribution granulométrique se retrouve en toute position topographique, sur tous les points du modelé, indépendamment de l'évolution pédogénétique propre des différents sols.

Elle semble être le résultat d'un phénomène gagnant, à partir de la surface des profils, les horizons de profondeur, sous les caractéristiques d'une suite d'actions qui se répètent toujours dans la même direction et le même sens. L'érosion superficielle semble devoir s'alimenter dans la concentration superficielle de sables les plus fins. Ceux-ci sont ou ont été exportés du paysage, sans laisser trace d'un apport ou d'un transit sensible en quelque point que ce soit, sauf pour les complexes alluvio-colluviaux de certains des axes de drainage.

B I B L I O G R A P H I E

- CAILLEUX (A.), TRICART (J.) - 1959 - Initiation à l'étude des sables et des galets ;
Tome I - C.D.U. - 376 p.
- FAUCK (R.) - 1971 - Contribution à l'étude des sols des régions tropicales. Les sols
rouges sur sables et grès d'Afrique Occidentale. Thèse Fac. Sci. Univ.
Strasbourg.
- KRUMBEIN (N.C.), PETTIJOHN (F.J.) - 1938 - Manual of Sedimentary Petrography.
Appleton-Century - Crofts. Inc. New-York.
- LAPORTE (G.) - 1962 - Reconnaissance pédologique le long de la voie ferrée COMILOG.
I.R.S.C. MC 119. Brazzaville, 149 p. multigr.
- LEVEQUE (A.) - 1969 - Le problème des sols à nappes de gravats. Observations et
réflexions préliminaires pour le socle granito-gneissique au Togo.
Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. VII, n° 1, pp. 43 - 69.
- MILLOT (G.) - 1967 - Les deux grandes voies de l'évolution des silicates à
la surface de l'écorce terrestre. Rev. questions Scientifiques
t. 138, 15ème série, t. 28, n° 23.
- MILLOT (G.), RADIER (H.), MULLER-FUEGA (R.), DEFOSSEZ (M.), WEY (R.) - 1959 -
Sur la géochimie de la silice et des silicifications sahariennes.
Bull. Serv. Carte géol. Als. Lor. 12, fasc. 2, pp. 3 - 11.