

PROJET

OBSERVATIONS SUR LA NATURE DE LA FRACTION ARGILEUSE ET L'EVOLUTION  
DE QUELQUES SOLS ROUGES D' HAITI SITUES SUR CALCAIRES DURS

OBSERVATIONS SUR LA NATURE DE LA FRACTION ARGILEUSE ET L'EVOLUTION  
DE QUELQUES SOLS ROUGES D'HAÏTI SITUES SUR CALCAIRES DURS \*

---

F. COLMET DAAGE , J. et M. GAUTHEYROU: Bureau des Sols - ORSTOM - ANTILLES  
. FUSIL et . KOKOUI: Laboratoire des argiles de M. PINTA - ORSTOM - FRANCE  
M. DELAUNE Laboratoire de géologie et sédimentologie - ORSTOM - FRANCE

1 I N T R O D U C T I O N

---

Les calcaires éocènes constituent la roche mère principale des sols de la République d'Haïti. On rencontre aussi des formations calcaires ou marneuses plus récentes, les dernières en date étant probablement les calcaires coraliens pléistocènes qui forment des plateaux ou des massifs peu élevés en bordure de divers points des côtes de l'île.

Ces calcaires reposeraient sur des formations volcaniques, basaltes ou andésites du crétacées mais, des montées magmatiques plus récentes semblent avoir été fréquentes au sein même des calcaires et expliqueraient les intercalations peu épaisses de laves observées.

Sur le terrain on remarque fréquemment le passage en quelques mètres des formations calcaires aux formations volcaniques. L'opposition est particulièrement saisissante lorsque sur les calcaires se sont développés des vertisols, des sols calcimorphes, ou des rendzines noires qui contrastent fortement avec les sols rouges à évolution ferralitique issus des coulées de laves. (vallée de l'Asile en particulier).

Le passage d'une formation à l'autre n'est pas toujours aussi net, car des sols rouges relativement friables sont fréquemment observés sur les calcaires. Le cas certainement le plus typique se rencontre au plateau de ROCHELOIS ou de vastes étendues de bauxites argileuses rouges recouvrent les calcaires durs.

Ces sols rouges proviennent-ils d'anciennes formations volcaniques, coulées ou projections pyroclastiques, aujourd'hui totalement altérées et dont il ne reste plus que les produits argileux de l'altération, remaniés par l'érosion, reposant en discordance sur les calcaires? Une telle hypothèse a été formulée pour expliquer l'origine des bauxites argileuses sur les calcaires de la JAMAÏQUE. D'après ZANS (cité par MILLOT 1964) les dépôts pyroclastiques de cendres andésitiques auraient recouvert les calcaires et évolués rapidement en bauxite lorsque le drainage interne était excellent sur les calcaires fissurés. Par contre, au dessus des calcaires compacts, dans des conditions de mauvais drainage interne

---

\* Observations de terrain et prélèvements effectués à l'occasion d'une mission d'expert consultant au titre d'un Projet FAO du Fonds Spécial des Nations Unies. Mrs. E. BULLE et M. EDOUARD étant Directeur et co-Directeur Haïtien du Projet.

en profondeur il y aurait eu resilicification et formation d'argile rouge ferralitique à kaolinite et hydroxydes.

On peut fort bien aussi imaginer qu'après l'altération de type ferralitique d'une coulée andésitique ou basaltique jusqu'à disparition complète de celle-ci les produits argileux formés dans des conditions de drainage interne ralenti en profondeur, se trouvent alors placés sur les calcaires fissurés perméables sous-jacents et soumis à un nouveau cycle d'évolution dû à l'accentuation du lessivage.

Les deux cas ci-dessus sont sans doute rencontrés en HAÏTI mais on peut aussi envisager le cas d'une dissolution progressive de calcaires plus ou moins impurs et d'une évolution des produits résiduels en place ou colluvionnés sur les pentes, variable suivant le climat, les conditions de drainage en profondeur et la durée d'évolution.

Ce n'est pas l'observation de quelques profils qui peut permettre de trancher entre ces différentes hypothèses, aussi, l'objet de cette note est-il de présenter un certain nombre de résultats qui soulignent l'intérêt de ces recherches et peuvent aider au début à les orienter.

Ce sont surtout les régions relativement arrosées d'altitude, où la pluviométrie annuelle est comprise entre 1,6 et 2 mètres et assez bien répartie au cours de l'année qui ont retenues notre attention. Les sols y sont bien développés tandis que dans les régions sèches les sols sont très courts et érodés sur les calcaires durs n'atteignant une certaine épaisseur que sur les zones d'accumulation en bas de pente ou sur les formations marneuses.

On étudiera successivement quelques sols volcaniques puis des sols incontestablement dérivés du calcaire, et enfin dans quatre régions différentes des sols rouges sur calcaires dont l'origine fera l'objet de la discussion finale.

2 - SOLS DERIVES DE FORMATIONS VOLCANIQUES DURES.

Ces sols se sont développés sur des coulées andésitiques, labradoritiques, ou basaltiques. Ils ressemblent très étroitement aux ferrisols des Antilles Françaises, sols à évolution ferralitique incontestable mais plus ou moins poussée. Ces sols sont généralement moins profonds que les sols ferralitiques typiques et surtout peuvent encore renfermer une certaine proportion d'éléments altérables dans les fractions sableuses ou argileuses (montmorillonite).

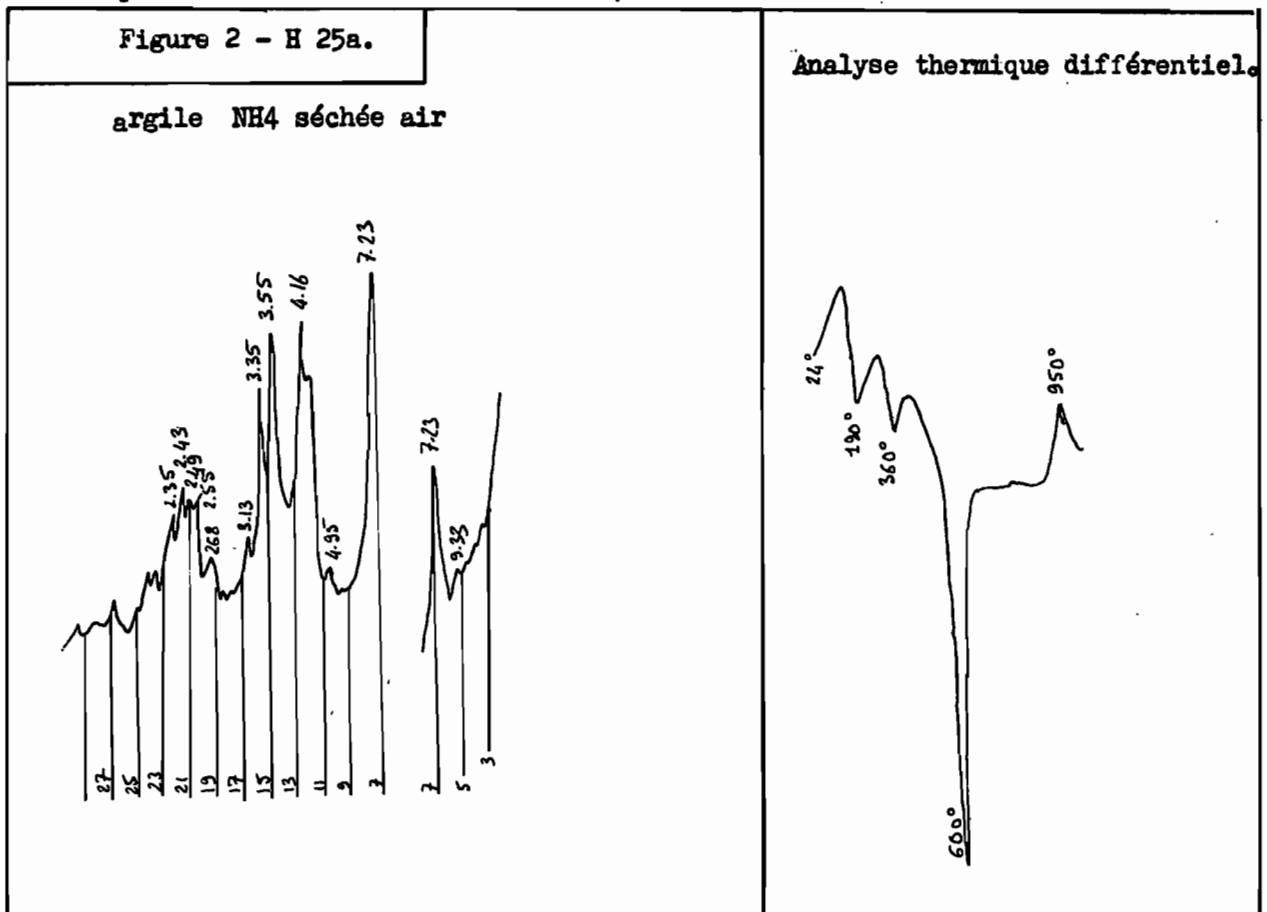
La similitude de ces sols et de ceux des Antilles a permis de limiter le nombre des analyses et de ne conserver que quelques profils parmi les plus représentatifs des diverses régions.

2- 1 A PLAISANCE dans le Nord de l'île sous une pluviométrie voisine de 2 mètres par an et assez régulièrement répartie, les sols présentent les caractères suivants :

profil : 0-60 : argileux, rouge généralement érodés sur les fortes pentes mais avec parfois un niveau superficiel plus foncé brun-rouge. La structure d'ensemble est continue, la sous structure polyédrique assez fine. Le sol est relativement friable entre les doigts et non adhérent

60-100: argileux, rouge-jaune, avec déjà présence de roches noires andésitiques abondantes altérées et peu altérées. Le sol paraît un peu plus compact et adhérent.










Il s'agit donc d'un ferrisol encore peu profond, et modérément évolué. Le sol est peu acide - pH = 6,2 - et la capacité d'échange augmente en profondeur passant de 16 en surface à 21 mé % dans le niveau caillouteux.



CARTON GEOLOGIQUE

d'après  
J. BUTTERLIN 1952

0 10 20 30 Kms

-  Basaltes
-  Andésites
-  Diorites quartzifères
-  Calcaires et schistes argileux du CRETACE
-  Calcaires massifs et crayeux de l'Eocene
-  Calcaires surtout crayeux de l'OLIGOCENE
-  Marnes du MIOCENE
-  Calcaires coralliens PLEISTOCENE
-  Alluvions PLEISTOCENES et RECENTE

PRESQUE ILE  
DU  
NORD-OUEST

Port de Paix

Cap Haitien

19°30

Gonaives

St Marc

Hinche

19°

ILE DE LA  
GONAIVE

PORT AU  
PRINCE

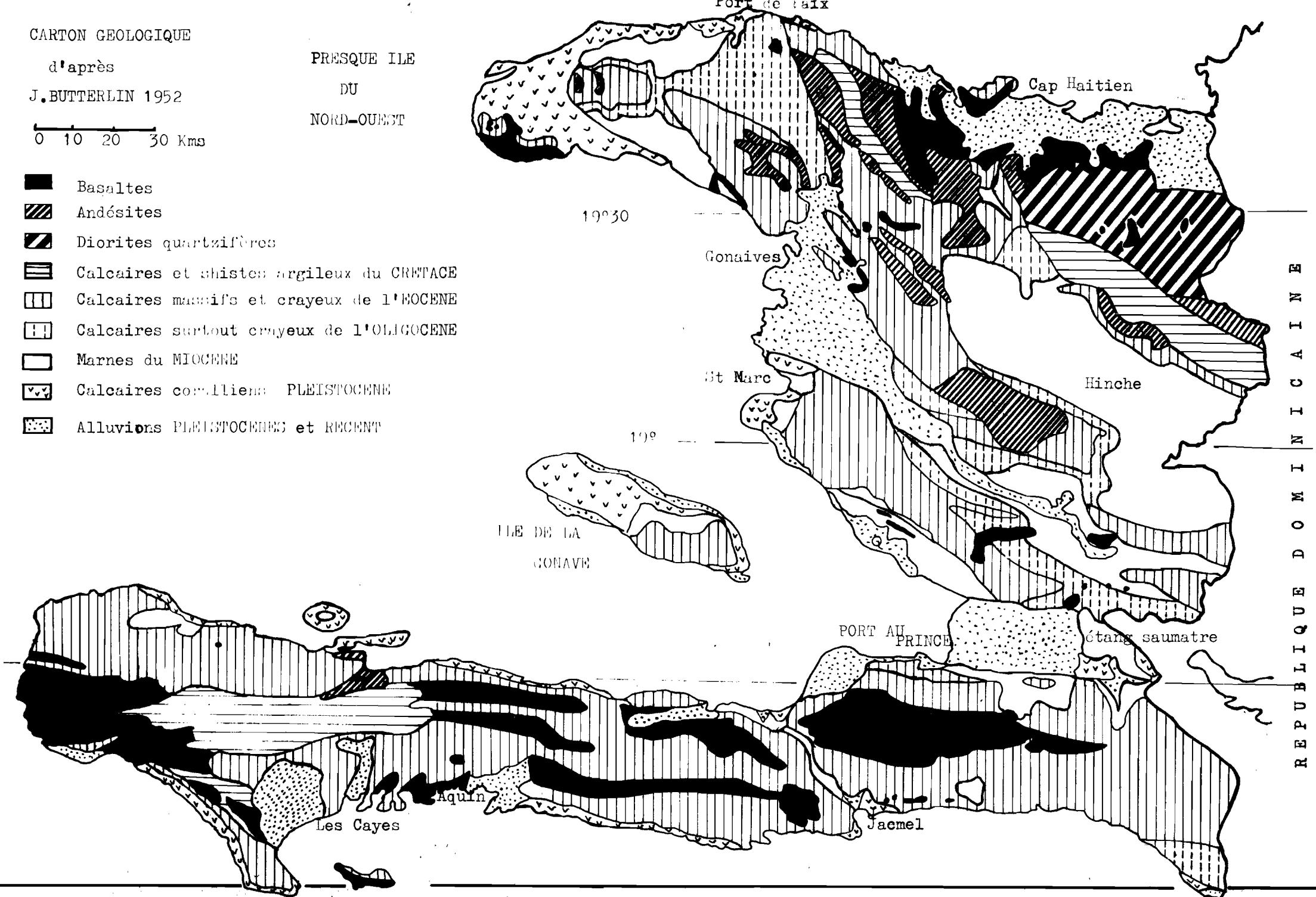
étang saumatre

Aquin

Les Cayes

Jacmel

REPUBLIQUE DOMINICAINE

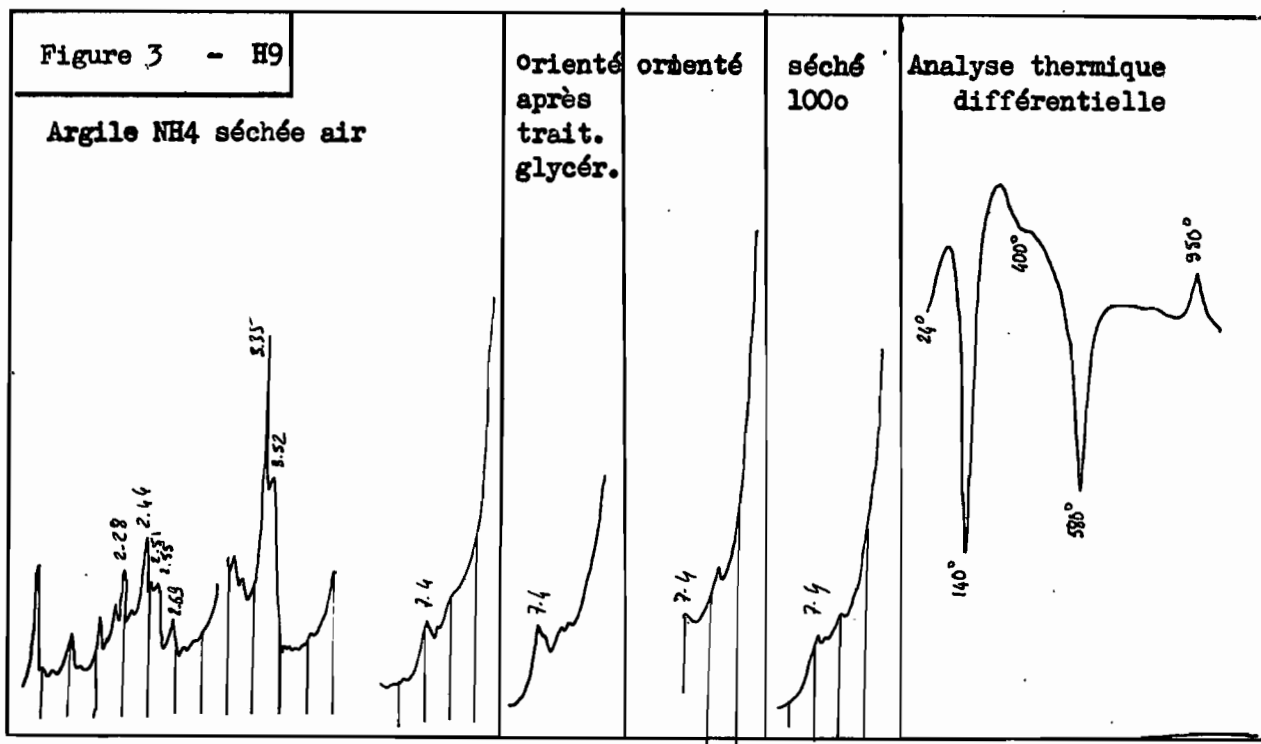


Les courbes de rayons X et d'analyse thermique différentielle de la figure 2 montrent dans le niveau de surface la prédominance d'argile de type kaolinite probablement un fire-clay. La raie à 7,23 Ao est relativement importante par rapport à la bande à 4,45 Ao mais les doublets de la kaolinite vers 2,48 et 2,55 Ao sont assez peu marqués quoique déjà sensibles. La goethite est très abondante. Les très petites raies à 9,33 et 4,95 Ao n'ont pas fait l'objet d'investigation précise.

Dans la même région certains sols sont plus profonds, davantage caractéristiques de l'évolution ferrallitique, plus acides - pH = 5,2 - et l'horizon altéré de coloration variée, gris verdâtre, au dessus de la coulée encore dure peut atteindre plusieurs mètres d'épaisseur semble-t-il.

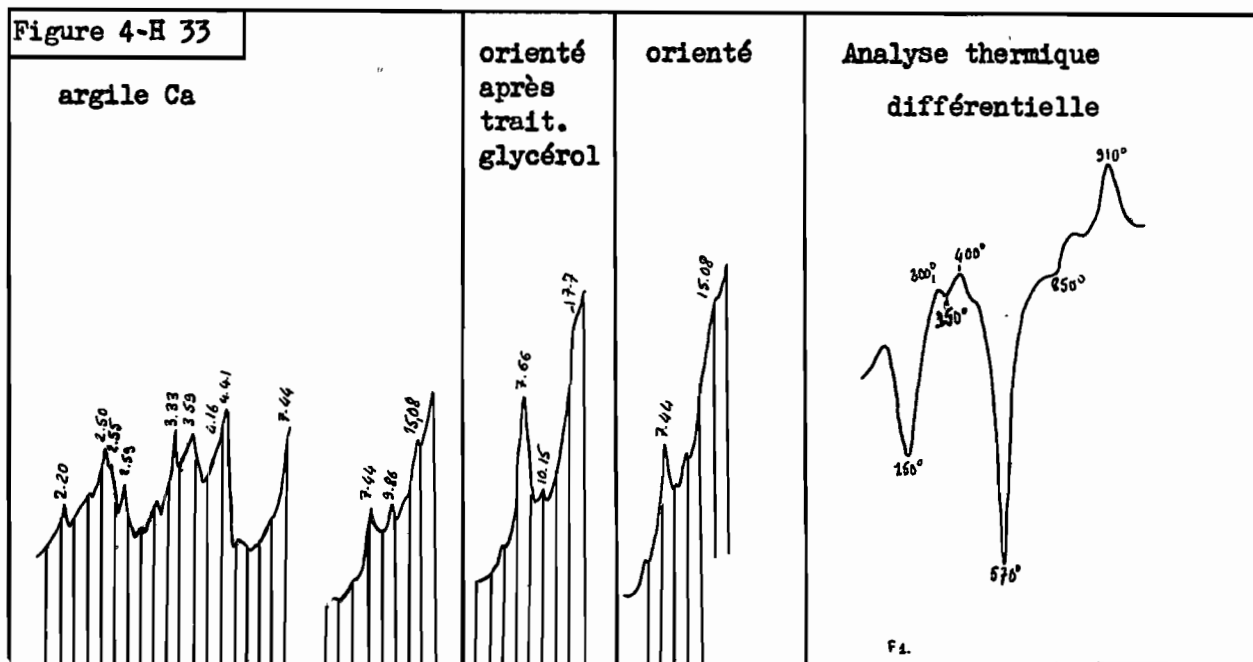
2 -2 Dans la vallée de l'Asile, au Sud de l'île, les sols sur coulées volcaniques sont semblables d'aspect.

Dans un sol rouge argileux, assez compact à l'outil mais relativement friable entre les doigts avec déjà quelques débris de roches plus ou moins altérées et quelques légères veines plus claires brun-jaunâtre, modérément acide - pH = 6,2 - l'examen aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle met en évidence la présence de métahalloysite, de goethite, et de produits amorphes. La capacité d'échange de base est de 25 mé % en profondeur.



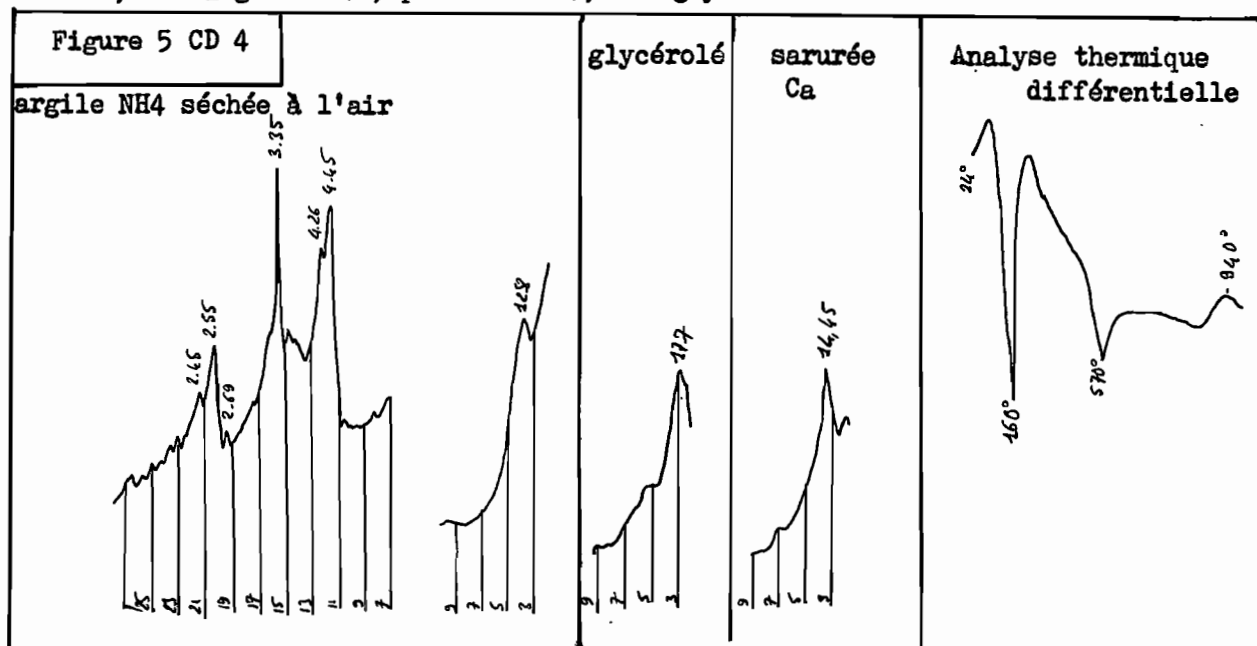
2 -3 Près de PUILBOREAU dans le Nord de l'île, certains sols sur coulée andésitique peuvent avoir plusieurs mètres d'épaisseur. Le niveau rouge argileux encore riche en éléments altérables repose sur un niveau d'altération graveleux ou aréniforme

gris-verdatre. A la base du niveau supérieur argilisé, la coloration est rouge pâle, 2,5 YR 4/8 humide et 6/8 sec; Le pH est déjà relativement bas 5/6 mais la capacité d'échange est élevée : 30 m<sup>é</sup>% pour la teneur en argile : 22%.



L'examen aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle - figure 4 - indique la présence de métahalloysite (raie à 7,44 Ao passant à 7,66 après traitement au glycérol et absence des doublets de la kaolinite), de la montmorillonite (raie à 15 Ao passant à 17,7 avec le glycérol). L'hématite est nettement discernée et la goéthite également quoique en faible quantité. Il y aurait peut être des traces d'illite ?

- 2 - 4 Dans les plaines alluviales d'origine volcanique de la région très humide de ST-LOUIS du Nord, les sols sont très légers, encore très jeunes, riches en éléments volcaniques altérables, sable et gravier, de coloration beige, fortement humifères et riches en montmorillonite qui semble le constituant essentiel (raie à 12,8 Ao argile NH<sub>4</sub>, passant à 17,7 au glycérol).



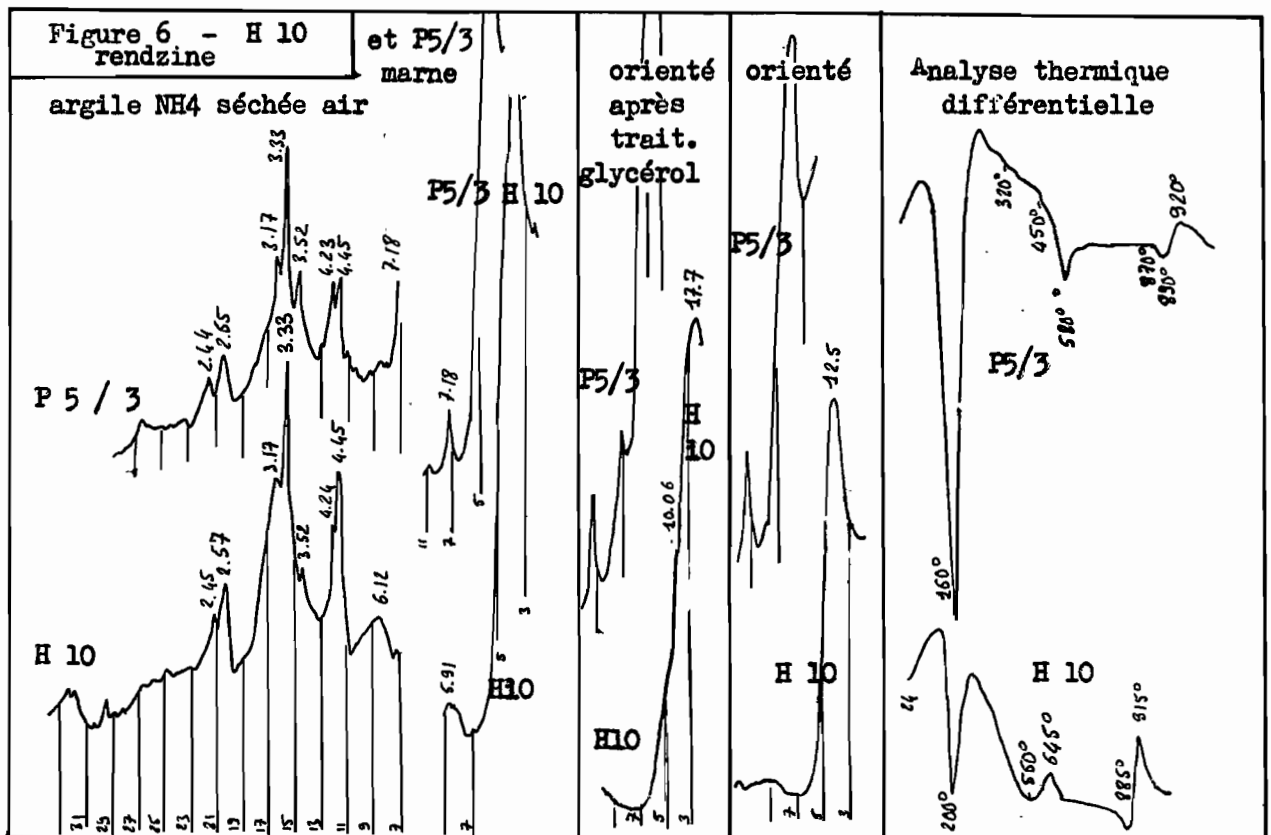
En conclusion, c'est la présence de métahalloysite ou de fire-clay liés aux hydroxydes de fer, goethite ou hématite, qui caractérise principalement les sols issus des formations volcaniques. Les formations très jeunes renfermeraient encore de la montmorillonite

### 3 - SOLS DERIVES DE CALCAIRES

On envisagera ici seulement les sols dont l'origine calcaire, ou marno-calcaire est certaine. De nombreux sols rouges reposant sur calcaires feront l'objet du prochain paragraphe.

3 -1 Dans le Sud de l'île près de PORT SALUT, sur des calcaires tendres crayeux, se développent des rendzines généralement érodées et si mêlées de fins débris calcaires que les sols paraissent presque blancs.

Dans un sol très court très friable, gris-blanc quoique renfermant 4 à 5% de matières organiques, très calcaire, mais avec une capacité d'échange de base de 30 mé%, les rayons X et l'analyse thermique différentielle, indiquent la présence très importante et presque exclusive de la montmorillonite dans la fraction argileuse avec peut être quelques traces d'illite. - Figure 6 - H 10 -



3 -2 Dans les marnes très épaisses du miocène du Nord Ouest de l'île, argilo-limo-neuse renfermant 20% de calcaire et des filonnets salifères, on rencontre essentiellement la montmorillonite (raie à 12,8 argileNH<sub>4</sub> passant à 17,7 au glycérol)P5/3.fig6



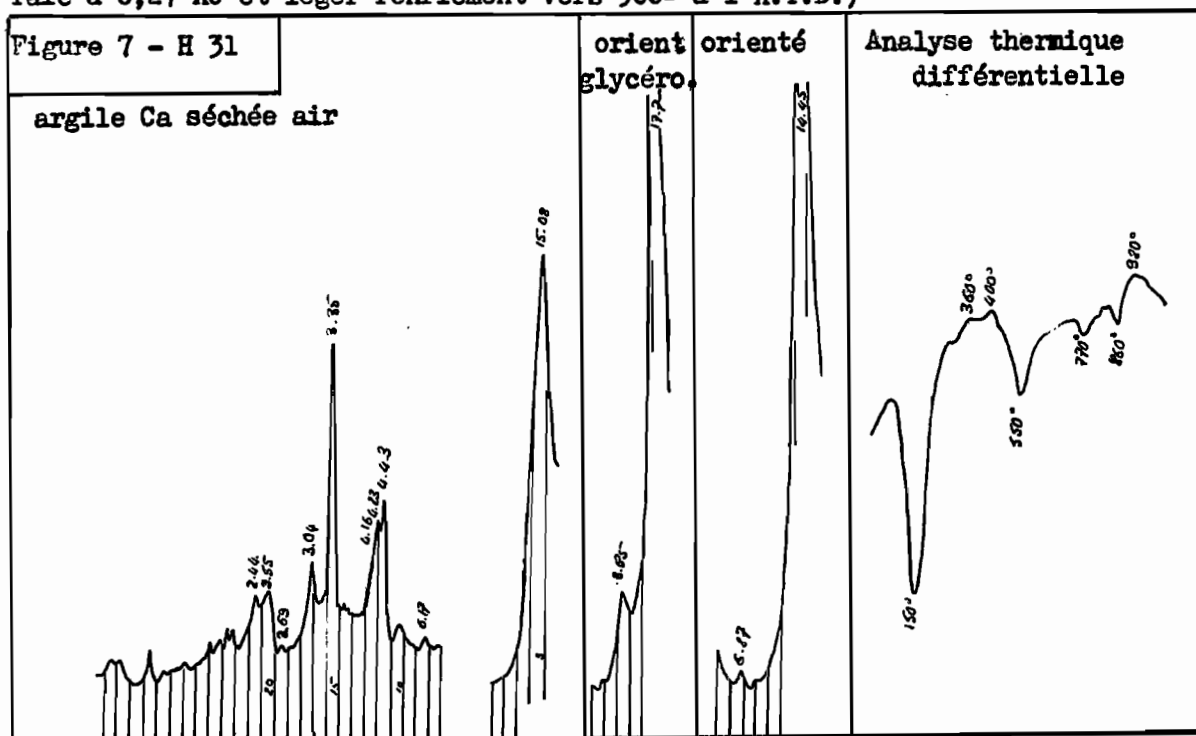
avec un peu d'illite et un peu de minéral à 7 Ao kaolinite ou chlorite. Notons également la présence du quartz. Il s'agissait du niveau de départ d'un sol profond très vraisemblablement, la marne non remaniée (échantillon prélevé par P. PAHAUT)

3 - 3

Près de PUILBOREAU sur les flancs d'une colline dont le sommet porte des sols renziniformes noirs, très caillouteux, on observe le vertisol suivant dans une partie très légèrement concave et moins érodée :

- profil : 0 - 15 argileux noir - sec : 2,5 Y 3/2 - frais : 10 YR 3/2 - très dur sec - fendillé, massif avec masque grumeleux friable - structure polyédrique grossière - porosité importante - micropores de 1 à 2 mm - faces subangulaires non luisantes - le sol humide est plastique et adhérent - rares débris calcaires, sauf quelques blocs de 10 à 20 cms, provenant de la crête de la butte - pH = 7
- 15 - 25 argileux - grisâtre beige - compact massif - adhérent - plastique - racines encore importantes - pH = 6,5
- 25 - 40 Argileux - massif - structure continue - à l'état humide - plastique et adhérent, vertisol jaune uniforme - sec : 10 YR 5/8 frais : 10 YR 5/6 - pas de sables visibles - rares veines un peu plus claires ou légèrement rougeâtres - frais : 5 YR 5/6
- 40 - 80 Argileux - semble moins adhérent - structure continue jaune mais avec des taches grisâtres et rougeâtres plus abondantes - bigarrures - matériau plus friable - moins cohérent quoique encore bien plastique - mas de minéraux visibles. pH = 6

La capacité d'échange est élevée : 51 mé% et constante. L'argile de l'horizon jaune est essentiellement constituée de montmorillonite avec un peu de goethite et un peu semble t'il de boehmite. Il y aurait aussi du quartz. (boehmite, raie à 6,27 Ao et léger renflement vers 500° à l'A.T.D.)



En conclusion, on peut déduire de l'examen de ces profils que le minéral principal rencontré sur les formations calcaires, est la montmorillonite.

#### 4 - SOLS ROUGES FRIABLES A MONTMORILLONITE ET HEMATITE SITUES SUR CALCAIRES DURE

Ces sols sont fréquemment observés à proximité de sols calcimorphes noirs montmorillonitiques.

Tous les sols rouges décrits dans ce paragraphe et les suivants ont été observés à une certaine altitude entre 700 et 1000 m. dans des régions à pluviométrie relativement abondante - 1,6 à 2 m. par an. La température moyenne pendant les mois les plus frais de l'année peut s'abaisser à 20°.

4 - 1 A FUILBOREAU dans le Nord de l'île un sol rouge profond sur les flancs d'une colline a été décrit. Sur la crête à quelques dizaines de mètres on rencontre des sols noirs souvent très courts calcimorphes ou rendziniiformes. L'autre flanc de la colline présente des alternances de vertisols (profil H 31 décrit page 7) et de sols rouges.

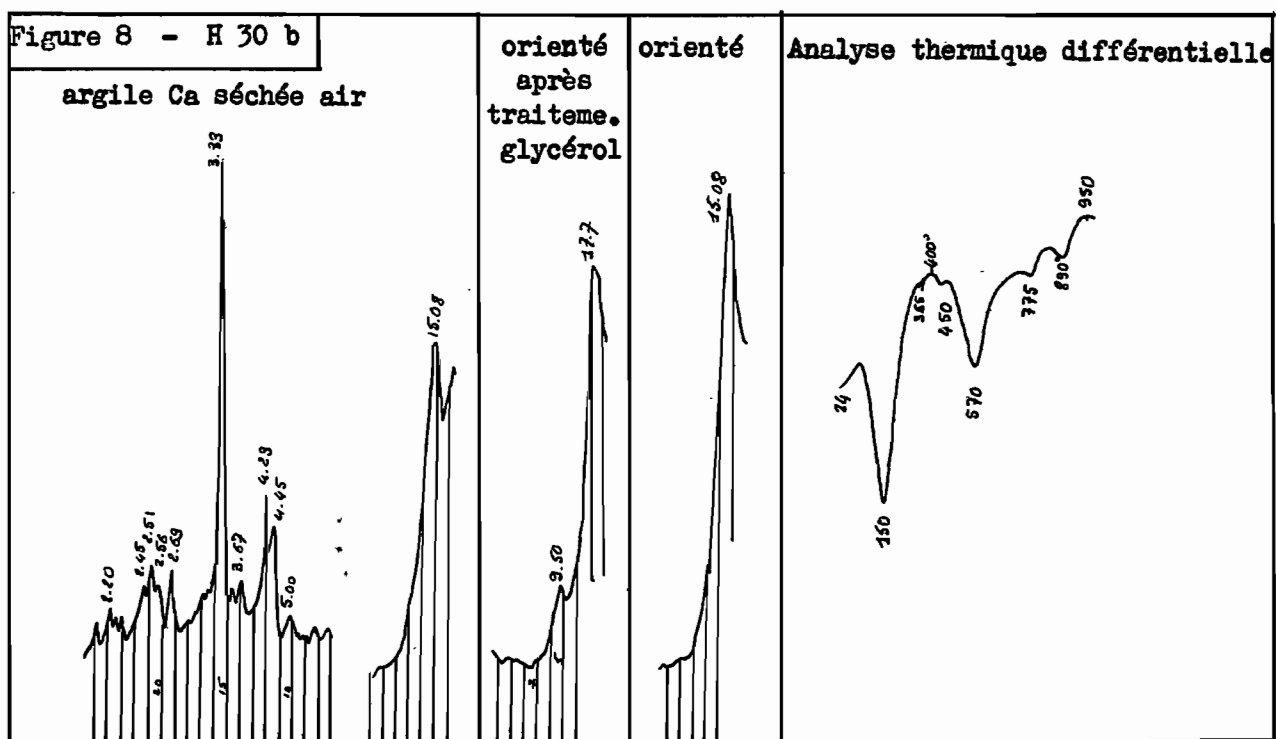
Le profil H 30 est rouge sur environ 2 m. de profondeur, relativement uniforme, friable entre les doigts, un peu plus compact jusqu'à 60 cm. mais s'émiettant en pseudo sable plus en profondeur avec apparition de marbrures diffuses. Il présente donc les caractères morphologiques d'un sol faiblement ferrallitique avec un niveau supérieur paraissant un peu plus compact sur des horizons très friables. La roche calcaire n'a pu être rencontrée bien qu'elleaffleure une dizaine de mètres plus haut.

La teneur en argile dans l'échantillon examiné vers 60 cm. est voisine de 73% avec 15% de limon et très peu de sable. Plus en profondeur la teneur en argile diminue légèrement (63), et les sables fins paraissent un peu plus abondants bien qu'aucun minéral ne soit visible apparemment. Le sol est acide en surface pH 5,6 et en profondeur pH = 4,9. La capacité totale d'échange est relativement élevée : 36 mé%.

profil : 0 - 20 : brun-rougeâtre - frais : 10 R 4/8 - sec : 2,5 YR 4/6 - argileux assez dur à l'état sec mais avec un fin recouvrement d'agrégats - structure à tendance polyédrique - avec faces angulaires - s'émiette bien - porosité moyenne - non adhésif - pH 5,6  
 20 -150 : Uniforme - rouge vif - sec : 10 R 5/8 - frais : 10 R 4/8 - argileux - non adhérent mais très friable - s'émiettant en pseudo-sable à l'état frais - structure d'ensemble continue - faces angulaires luisantes avec revêtement d'argiles rouges - porosité faible - quelques points grisâtres argileux non calcaires - pH 5  
 Le sol paraît plus compact, moins friable jusqu'à 50 cm., puis devient ensuite très friable - les racines descendent jusqu'à 50.  
 150 -180 : quelques petites taches grisâtres plus abondantes - mais au moins 80% de sol rouge, frais : 10 R 4/6 - sec : 2,5 YR 5/8 -  
 Le sol paraît un peu plus plastique - non adhérent - encore bien friable - pas de minéraux altérés visibles. pH 4,9

Dans le niveau friable vers 60 cm. de profondeur les rayons X et l'analyse thermique différentielle indiquent la montmorillonite associée à de l'hématite et

peut être des traces de boehmite Notons également la présence de quartz. Figure 8



La présence de montmorillonite dans les sols rouges friables peut surprendre. Dans bien des sols des Antilles relativement riches en fer, de coloration rouge ou brun-rouge, la présence de montmorillonite est très souvent délicate à déceler par des observations morphologiques du profil et bien des erreurs peuvent être commises. La présence d'hématite, terme ultime d'évolution dans les formations ferralitiques, impliquerait des sols très anciens si on s'en tient aux règles généralement admises. De fait, l'hématite est rarement observée dans les ferrisols et les sols faiblement ferralitiques volcaniques. D'autres conditions ont pu présider ici à son apparition et à l'absence de goéthite quoique celle-ci soit parfois masquée par le quartz.

4 - 2

A une centaine de mètres de ce profil on observe sur les flancs de la colline voisine dont les sols paraissent entièrement rouges le profil suivant peu épais sur le calcaire dur.

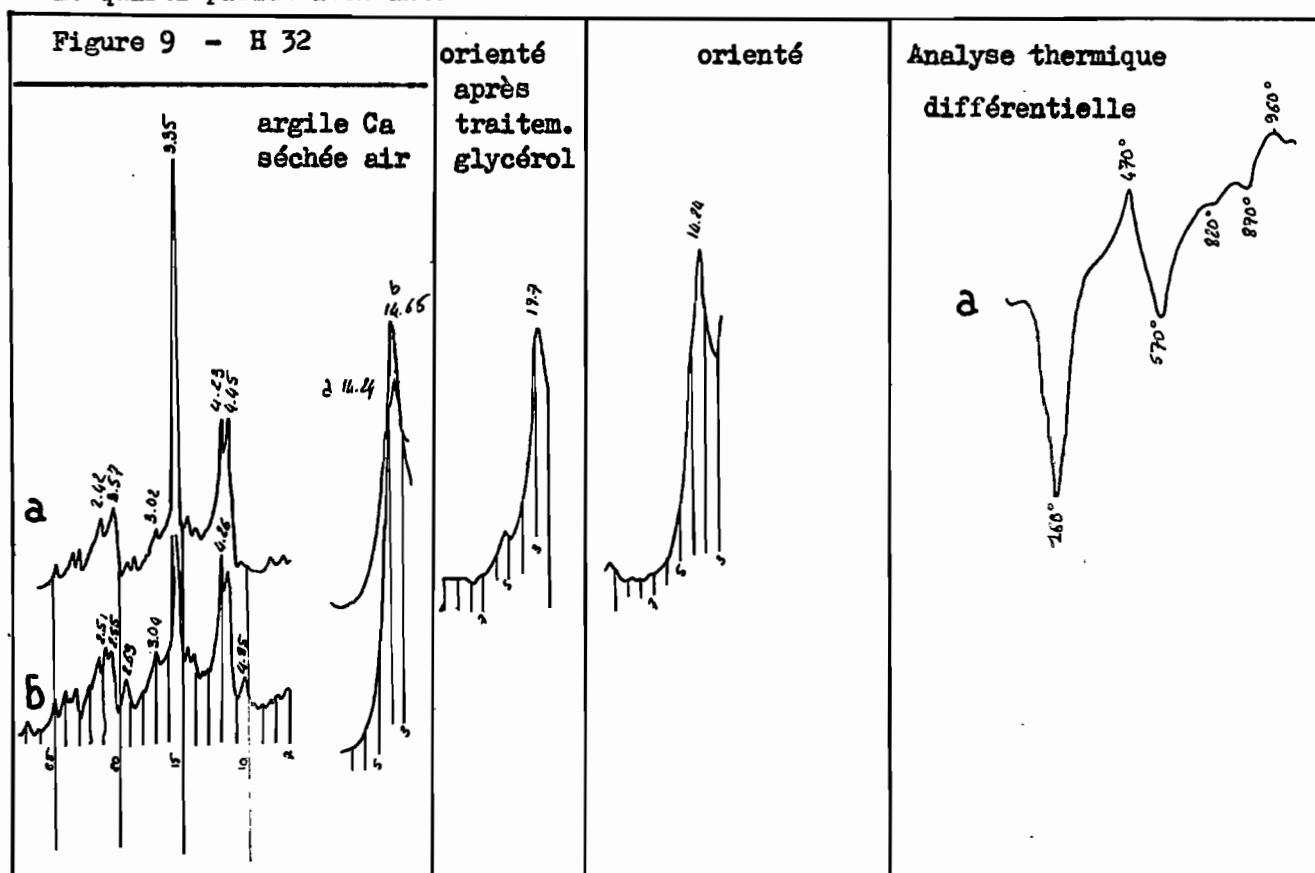
profil 0 - 30 : sols beige brunâtre - 10 YR 5/3 sec et 3/3 humide - peu adhérent argileux en blocs assez durs à l'état sec. Fine porosité rendant les blocs légers. pH = 5,7

30 - 60 : argileux rouge, 2,5 YR 6/8 sec et 4/8 humide, assez friable mais adhérent humide. Un peu plastique.

Le sol est fendillé, uniforme et repose brutalement sans transition sur la dalle de calcaire dur blanc. Cette dalle est souvent brisée formant par endroit de petites falaises de 50 à 100 cm. plus ou moins ennoyées par les sols rouges. pH = 5,4

Le sol est acide et la capacité d'échange élevée passe de 38 en surface à 44 mé% plus en profondeur.

L'argile est essentiellement constituée de montmorillonite en surface comme en profondeur ( raie à 14,2 argile Ca passant à 17,7 avec le glycérol ) on remarque la présence probable d'hématite ou goethite peut être en très faible quantité en surface mais en plus forte quantité en profondeur. Il y aurait un peu de boehmite en surface ( raie à 6,15 Ao et renflement à l'ATD vers 500° ) mais pas en profondeur. Le quartz paraît abondant.



## 5 - SOLS ROUGES A CHLORITES ET INTERSTRATIFIES , ET HEMATITE SITUES SUR CALCAIRES DURS.

5 - 1 - Au Sud de l'île près de Port au Prince (Boutillers) des profils similaires ont été observés.

Le sol est d'abord brun rouge sur 20 à 30 cm, puis rouge vif sur 2 m d'épaisseur environ. Il devient ensuite plus clair, virant au rouge jauné dans les 50 derniers cm au dessus du calcaire dur qu'il recouvre en discordance sans la moindre transition (planche 1, photo 1). Quelques poches d'argiles rougeâtres peuvent être observées plus en profondeur dans la masse du calcaire. S'agit-il d'un sol en place ou en partie colluvionné, il est difficile de le dire. Le profil est très uniforme, relativement friable, paraissant bien perméable.

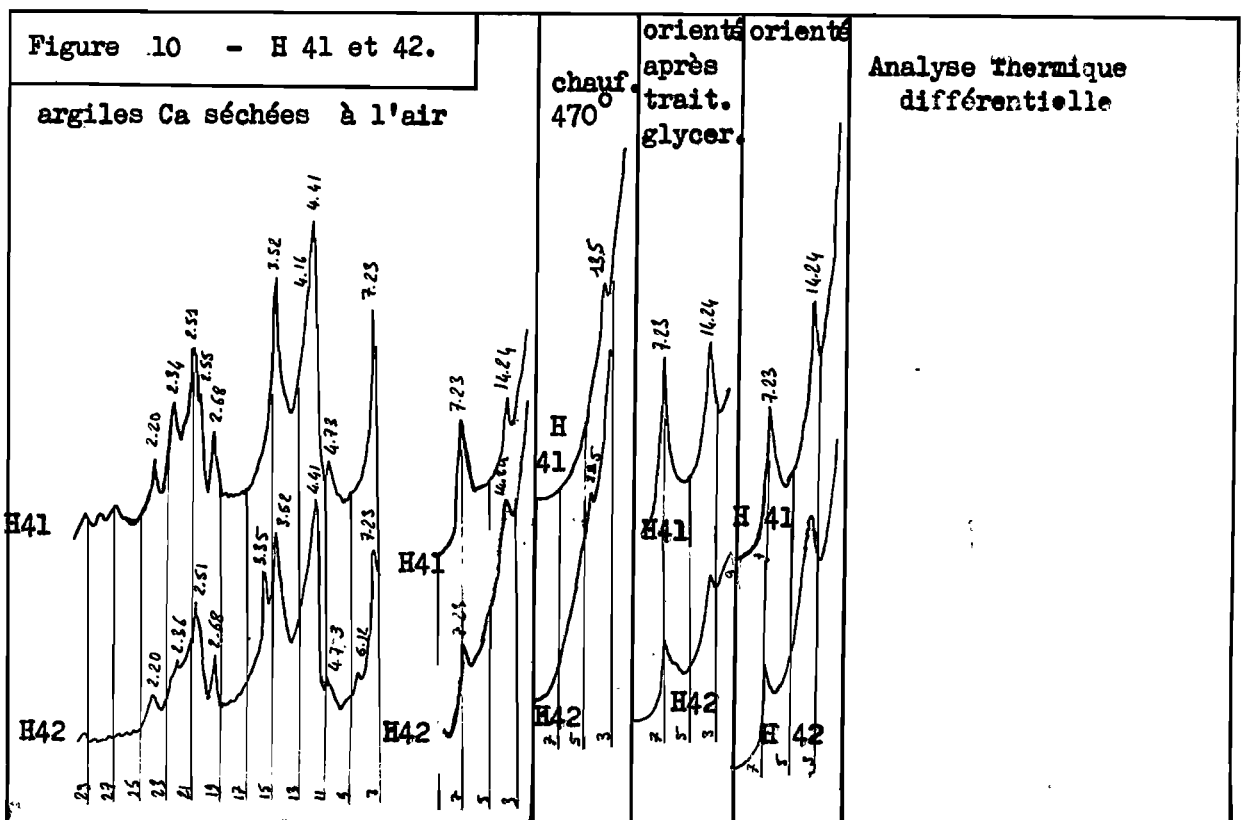
Un échantillon a été prélevé dans la couche de 5 à 10 cm, située immédiatement au dessus du calcaire, donc à environ 2 m de la surface du sol. L'argile représente 87 % du sol et les limons fins et grossiers

7 %. Il n'y a pas de sables. Le pH est voisin de 7,5 et la capacité d'échange de bases du sol .

Les rayons X et l'analyse thermique différentielle indiquent la chlorite probablement interstratifiée avec la vermiculite. La raie à 14,24 Ao ne change pas avec le glycérol, mais à tendance à disparaître plutôt qu'à se renforcer par chauffage à 470° en passant à 13,5 Ao. Un renflement se produirait aussi, après chauffage, vers 10 Ao. L'hématite est abondante et les raies aux rayons X bien nettes. La goethite semble également présente en quantité très faible. Il est difficile de savoir, en présence de chlorite, si la Kaolinite est aussi présente. Figure 10 - H 41.

5 - 2 - A quelques dizaines de mètres de ce profil, sur la forte pente cultivée de la montagne, les sols sont rouges, mais très peu épais: 10 à 20 cm. Le calcaire affleure presque partout, avec des formes de dissolution angulaires conchoidales, et les sols sont parsemés de débris pierreux et graveleux. Le sol est rouge peu compact, se prenant en mottes assez dures lorsqu'il est sec, mais finement poreuses et légères. Humide le sol paraît au peu gras et adhésif et présente une sous-structure à faces subangulaires, lorsque malgré les nombreux graviers calcaires on peut l'observer. Tous ces sols sont très érodés et le contact avec le calcaire très tourmenté est brutal, se prolongeant dans les aspérités, les poches et les fissures. Le pH est voisin de 8 et la capacité d'échange du sol de

Les rayons X et l'analyse thermique différentielle révèlent la présence de chlorite probablement interstratifiée avec la vermiculite, de l'hématite en quantité notable et des traces, semble-t-il de boehmite. La goethite est à peine identifiable. Figure 10 - H42 -



En résumé, ces deux profils semblent représenter un stade d'évolution un peu plus poussé que les précédents - paragraphe 4 - avec dégradation de la montmorillonite en chlorite et vermiculite. L'hématite semble aussi nettement plus abondante. S'agit-il de faciès plus anciens ? Y a-t-il au contraire directement formation de chlorite - vermiculite après un stade montmorillonitique très fugace ? Ces argiles sont-elles héritées des impuretés du calcaire.

## 6 - SOLS ROUGES A HYDROXYDES D'ALUMINE SITUES SUR CALCAIRES DURS

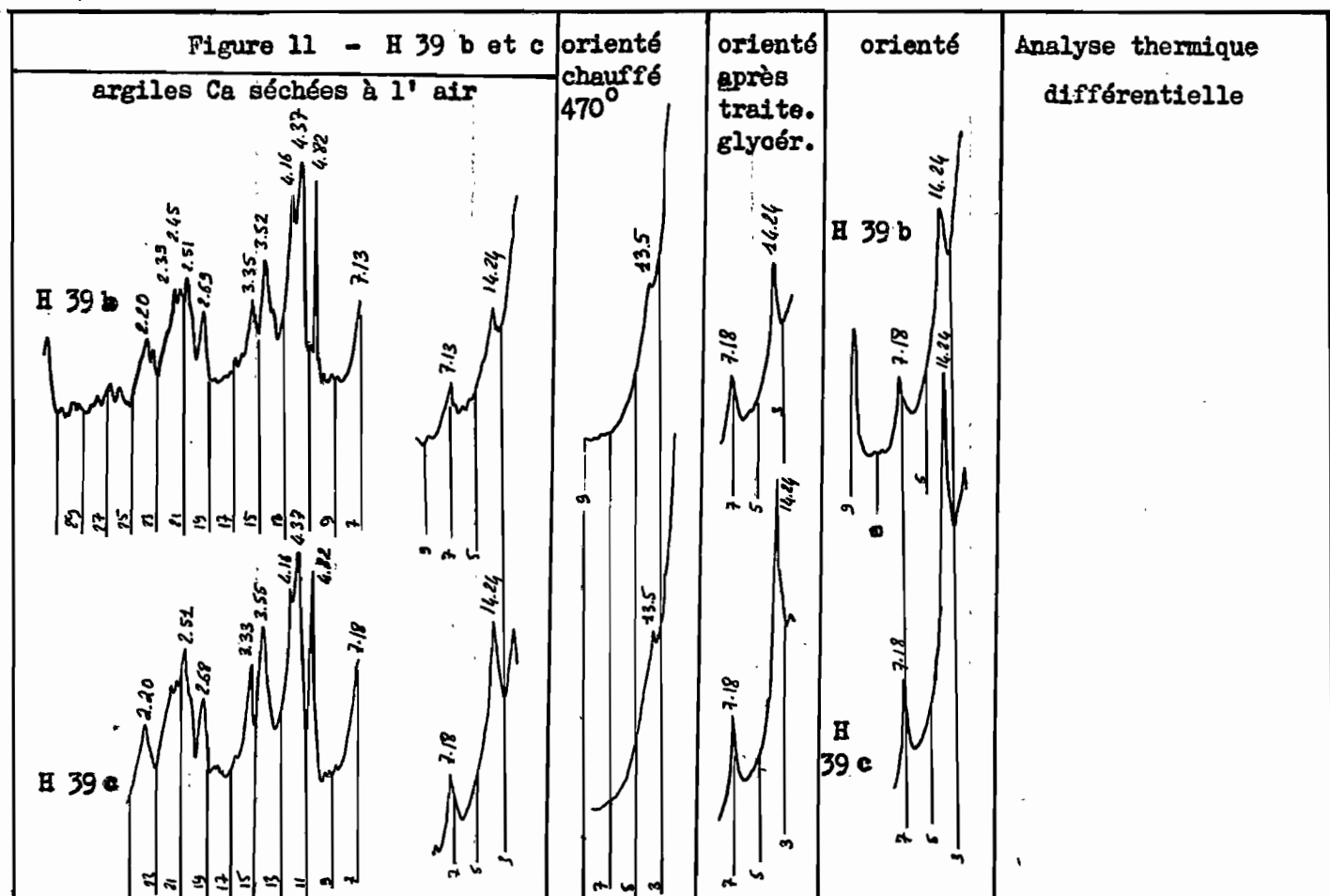
Dans le Sud et dans le Nord de l'île on observe fréquemment des sols rouges très semblables à ceux que nous venons de décrire, mais souvent un peu plus friables non adhérents, bien qu'ils puissent être assez durs à l'outil à l'état sec et présenter quelques fentes de retrait. L'analyse révèle la présence d'hydroxydes d'alumine en quantité importante. La distinction morphologique de ces sols, d'avec ceux qui ont été précédemment étudiés - paragraphes 4 et 5 - n'est pas évidente sur le terrain et des confusions sont très possibles.

6 - 1 Dans le Sud de l'île, près de Kenscoff, les sols sont partout très rouges et peuvent atteindre sur les pentes légèrement concaves 1 ou 2 mètres d'épaisseur d'aspect très uniforme. Ils reposent brutalement sans aucune transition sur des calcaires blancs fissurés et déchiquetés.

11 - Le profil suivant a été décrit sur une forte pente près du sommet de la colline. Le calcaire blanc affleurerait en divers endroits dans les ravines d'érosion ou en surface :

Profil : 0 - 20 argile d'abord brun-jaune, très légère sèche et extrêmement poreuse - petits pores légèrement fissurés -  
20 - 60 argile rouge - peu fissurée ( sol paraissant peu humide ) - structure d'ensemble continue - sous-structure à tendance polyédrique faces subangulaires - s'émiette bien entre les doigts en petits agrégats - non plastique frais - non adhérent - frais, s'écrase en pseudo-sables sans changer de couleur - pas de revêtement - pas de sables ni de graviers visibles -  
Transition brutale avec le calcaire fissuré et aux formes irrégulières - quelques blocs épars dans l'argile dès 50 cm.

La transition avec le calcaire est brutale. Celui-ci est souvent brisé sur 30 à 40 cm. en blocs aux formes éoussées. (planche 1 - photo 2). Entre ces blocs calcaires on peut extraire au couteau une argile rouge brune paraissant légèrement adhésive humide. Ces intercalations d'argiles de quelques mm. à 1 cm. d'épaisseur ne concernent guère que les 20 premiers centimètres car plus en profondeur les blocs sont très jointifs et le calcaire devient massif, sauf aux emplacements des fissures remplies d'argile rouge entraînée.

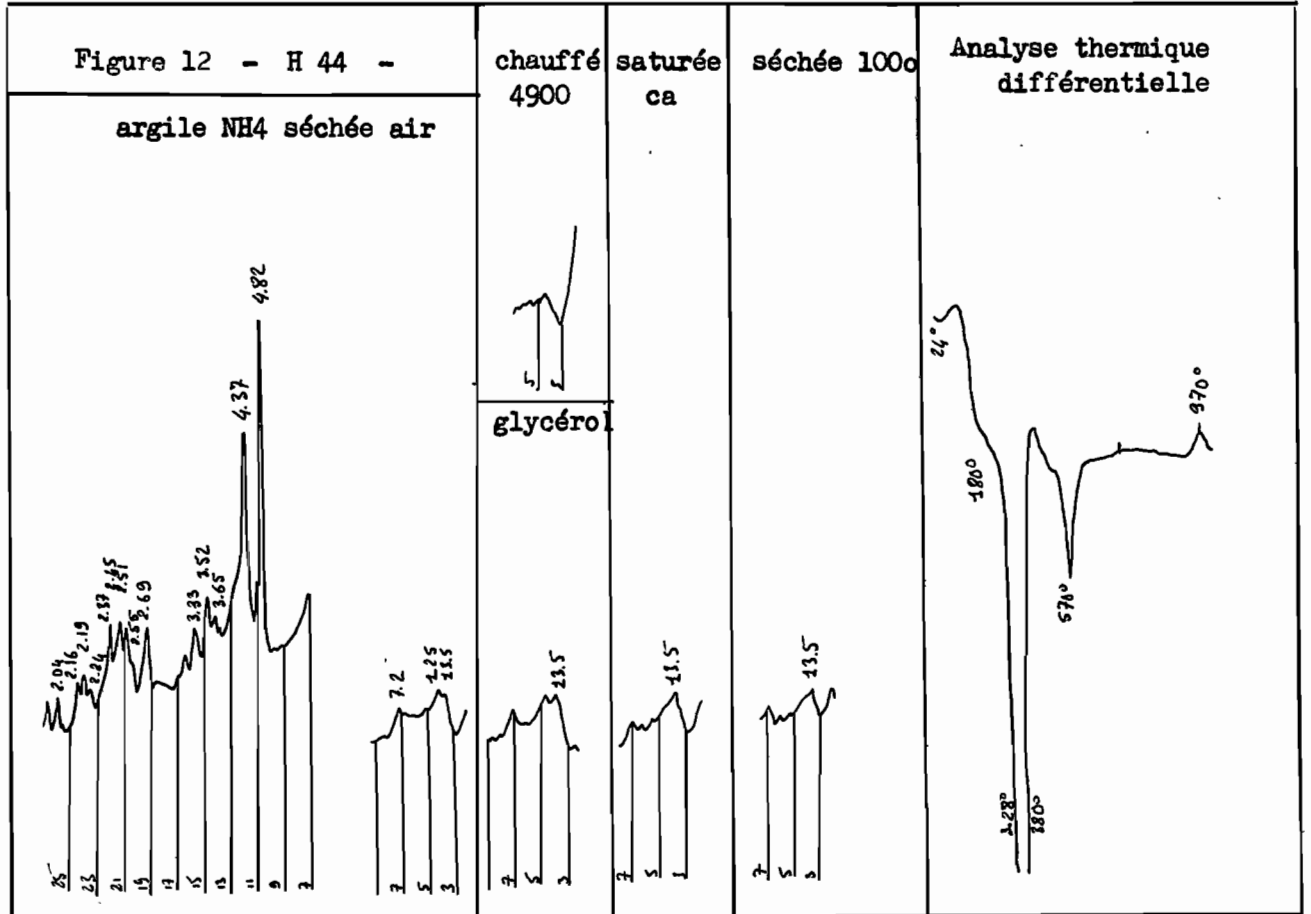


La composition minéralogique du sol rouge et des lamelles d'argile incluses dans le calcaire en profondeur sont identiques (rayons X et A.T.D.) en dépit des différences importantes de pH (5 dans le sol rouge, 8,3 dans les lamelles) qui peuvent d'ailleurs provenir en partie des particules de calcaire écrasées au broyage.

La chlorite ou un interstratifié chlorite-vermiculite (raie à 14,24 argile Ca inchangée glycérol et diminuée par le chauffage à 470° avec un léger renflement à 10 Ao) est associée à une quantité très importante de gibbsite et relativement abondante d'hématite et goethite. Il semble difficile de dire si les argiles de type kaolinique sont présentes.

partiellement colluviale, à partir des niveaux de surface de sols du type précédent.

Ce sols renferment davantage de gibbsite comme l'indique la figure 12. L'hématite est bien représentée, la chlorite ou l'interstratifié, chlorite-vermiculite n'existerait qu'en faible quantité (et éventuellement la kaolinite si elle existe?). Il n'y aurait que des traces de goethite.



L'évolution de ces sols tendrait donc à la disparition des argiles, chlorites ou interstratifiés chlorite-vermiculite, et de la goéthite avec augmentation importante de la proportion de gibbsite surtout, et d'hématite.

6 - 2

Dans le Nord de l'île on observe des sols rouges semblables sur les calcaires durs. Le relief est souvent plus abrupte avec des falaises calcaires verticales de plusieurs dizaines de mètres. Le calcaire semble plus dur.

Les replats ondulés séparant ces falaises successives sont souvent inclinés en amphithéâtres vers le pied de la falaise supérieure. Les eaux s'engouffrent dans des puisards où ruissellent au bord de la falaise supérieur contribuant ainsi à son effondrement et au renforcement de sa hauteur et de son caractère abrupte.

Les sols rouges friables, sont généralement peu épais sauf dans les parties concaves. Le calcaire dur affleure un peu partout mais, à la différence de la région précédente où il y avait tendance en surface à fragmentation en blocs à surfaces arrondies émoussées par la dissolution, il se présente ici avec des formes de



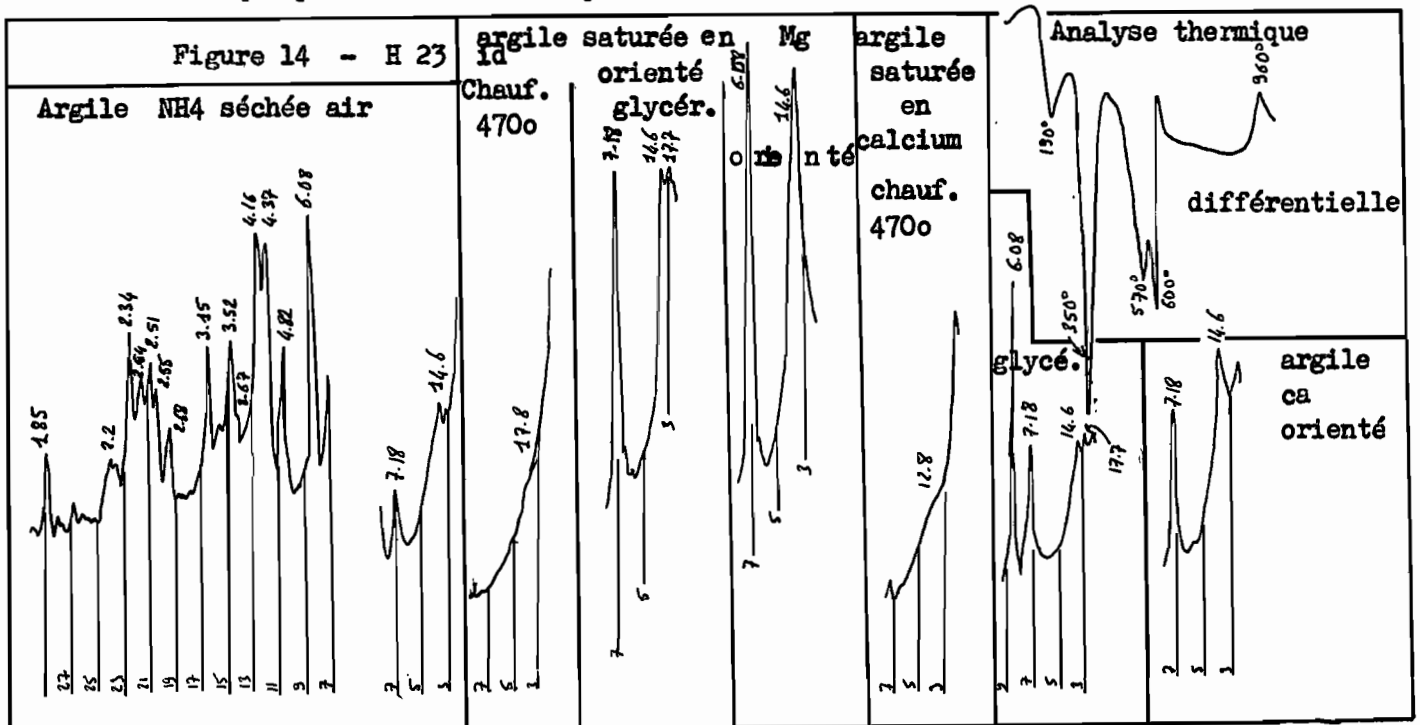


Les rayons X et l'analyse thermique différentielle montrent une quantité très importante de boehmite et de gibbsite. La chlorite ou un interstratifié chlorite-vermiculite ne sont présents qu'en faible quantité. La kaolinite, si elle existe toutefois, serait peu importante. L'hématite et la goéthite sont assez abondants.

En résumé, il s'agit donc d'un sol déjà fortement bauxitisé mais avec une forte proportion de boehmite alors que dans le précédent profil au sud de l'île on ne rencontrait que la gibbsite. La présence de boehmite peut-elle être attribuée au pH encore relativement élevé du sol. Il semble que cette hypothèse soit très fragile.

22 - Au pied de cette falaise, les sols rouges forment par place de vastes éboulis en fortes pentes d'où émergent les calcaires blancs parsemés de larges cristaux de calcite. L'argile est très rouge, friable en surface presque grumeleuse avec un masque d'agrégats de quelques centimètres, finement polyédriques, mais paraît plus grasse en profondeur. L'épaisseur de ces sols dépasse rarement 60 cm. mais de petites poches d'argile rouge sont visibles dans la masse du calcaire blanc.

Le pH est relativement élevé 7,7 et la capacité d'échange de base atteint 27 mé%. La composition minéralogique de l'argile diffère seulement de celle du sol précédemment examiné et situé au dessus de la falaise, par la présence d'un peu de montmorillonite (gonflement à 17,7) en plus de l'interstratifié chlorite vermiculite ou montmorillonite. Les traitements au chlorure de calcium ou de magnésium donnent des conclusions analogues. La boehmite, toujours très importante, la gibbsite, la goéthite et l'hématite semblent se retrouver dans les mêmes proportions. Il y a probablement eu sur la pente mélange avec des produits d'altération montmorillonitique plus récents des impuretés du calcaire.



6 - 3 Poches argileuses dans le calcaire de profondeur

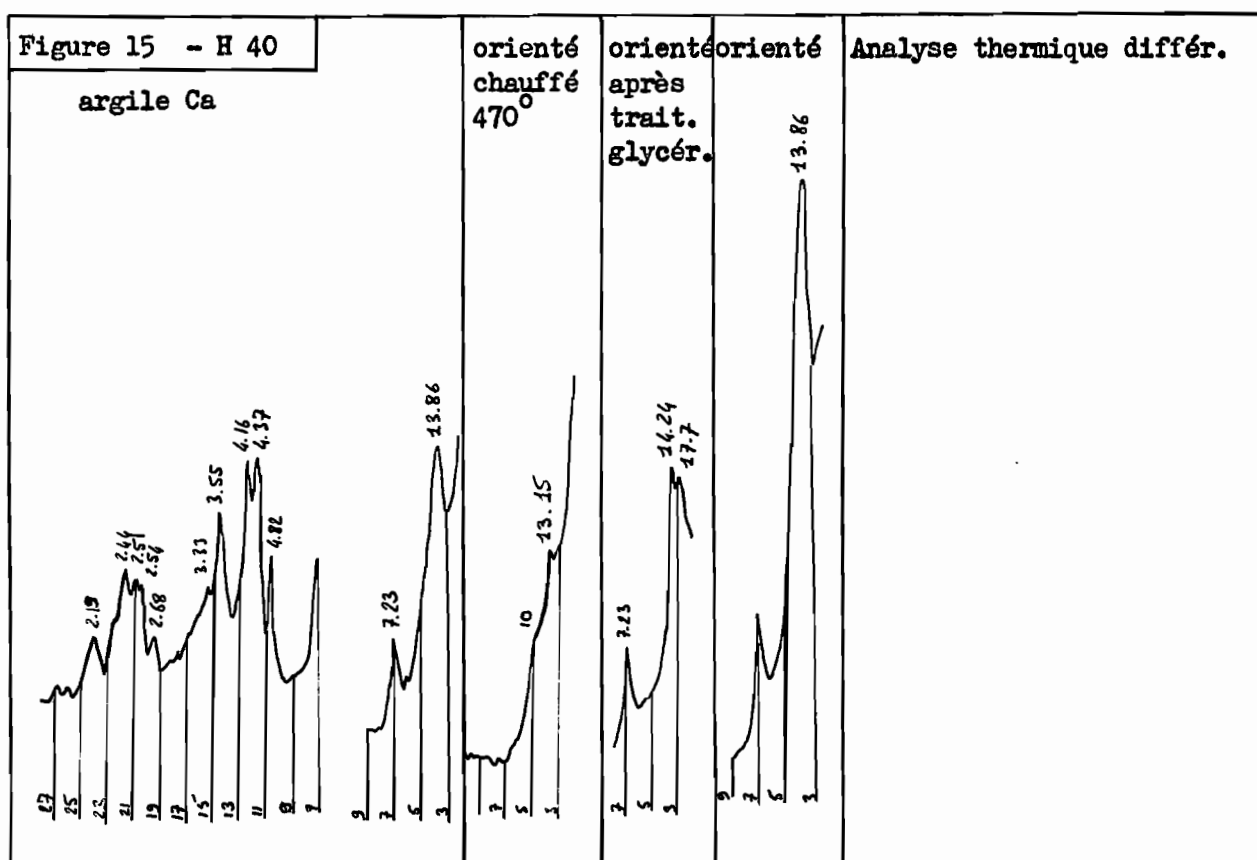
Dans les tranchées de routes nouvellement ouvertes ou rajeunies dans les calcaires de ces régions on observe en profondeur dans la masse même du calcaire de petites poches d'argiles n'ayant parfois que quelques centimètres de diamètre, de coloration rouge ou rose-pâle. On s'est efforcé de choisir pour les prélèvements des poches nettement éloignées des fissures par où les eaux s'infiltrent dans le calcaire entraînant des éléments du sol superficiel. Ces prélèvements n'ont pu être faits exactement aux emplacements des profils décrits ci-dessus mais à peu de distance et les sols situés à 1 ou 2 m. audessus sont tout à fait analogues.

3 1 - Dans le Sud de l'île, le même versant que les profils H 39 et 44 précédemment décrits, a été choisi. Ces profils étaient très riches en gibbsite et ne présentaient pas de montmorillonite. De l'argile rouge a été prélevée dans une tranchée ravivée la veille par les terrassiers dans une petite poche située à plus de 2 m. en dessous de la limite du calcaire et du sol rouge superficiel. Les petites poches emplies d'argile étaient plutôt rares et ne dépassaient guère en volume quelques centimètres cubes. Le calcaire paraissait à l'endroit du prélèvement compact et continu sans fissures apparentes à moins de 3 ou 4 m. (planche 1 photo 3). Le calcaire était rubéfié légèrement par endroit. L'argile des petites poches était rouge-brune un peu plastique et finement poreuse.

Bien que les possibilités d'un entraînement en profondeur depuis les niveaux supérieurs soient à l'endroit du prélèvement apparemment très réduite, c'est cependant une hypothèse qu'il n'est pas possible de rejeter catégoriquement. On sait en effet la profondeur à laquelle certaines racines peuvent se frayer un passage dans les massifs calcaires. C'est une voie sinueuse, une fois la racine disparue, par laquelle des entraînements peuvent se produire sans qu'il soit facile de les déceler.

Enlevé délicatement au couteau, avec un entraînement inévitable de particules calcaires, cette argile rougeâtre a un pH voisin de 8,3 et une capacité d'échange de base de  $\text{m}\%$ .

Les rayons X et l'analyse thermique différentielle indiquent une forte proportion de montmorillonite en association avec de la chlorite. Il y a gonflement de l'argile Ca. avec le glycérol de 13,9 Ao à 17,7 avec une raie à 14,24. Par chauffage à 470° il y a diminution d'intensité et passage à 13,2 Ao de ces raies avec renflement assez net à 10 Ao. La gibbsite paraît assez abondante ainsi que la goéthite. La présence de kaolinite en faible quantité est possible mais peu probable.



La comparaison avec les profils H 39 et 44 situés plus au dessus sur la colline indique clairement une proportion beaucoup plus faible de gibbsite et beaucoup plus importante d'argiles chlorite ou interstratifié chlorite-vermiculite ou montmorillonite avec présence de montmorillonite.

Les sols rouges de recouvrement étant très uniformes sur toute l'épaisseur du profil, ce qui se conçoit aisément avec un drainage interne aussi rapide dans un milieu friable, la présence de montmorillonite dans ces poches de profondeur a certainement pour origine des produits de l'altération ou de la transformation des impuretés du calcaire au contact même des solutions de dissolution du calcaire en milieu à pH élevé. La gibbsite s'est-elle formée in-situ ? à t-elle été entraînée depuis la surface, ? Il est difficile de répondre. On peut prudemment penser à un entraînement avant d'ébaucher des hypothèses de néo-formation dans des conditions plutôt rares dans les régions tropicales humides.

En résumé, Il serait donc permis de penser, qu'à une altération de type montmorillonitique (ou héritage) au sein même du calcaire aurait succédé une évolution tendant rapidement à la disparition de cette argile au profit de chlorites ou d'interstratifiés avec la vermiculite et d'hydroxydes de fer et d'alumine ces derniers devenant très rapidement prédominants en milieu acide sous forme de gibbsite.

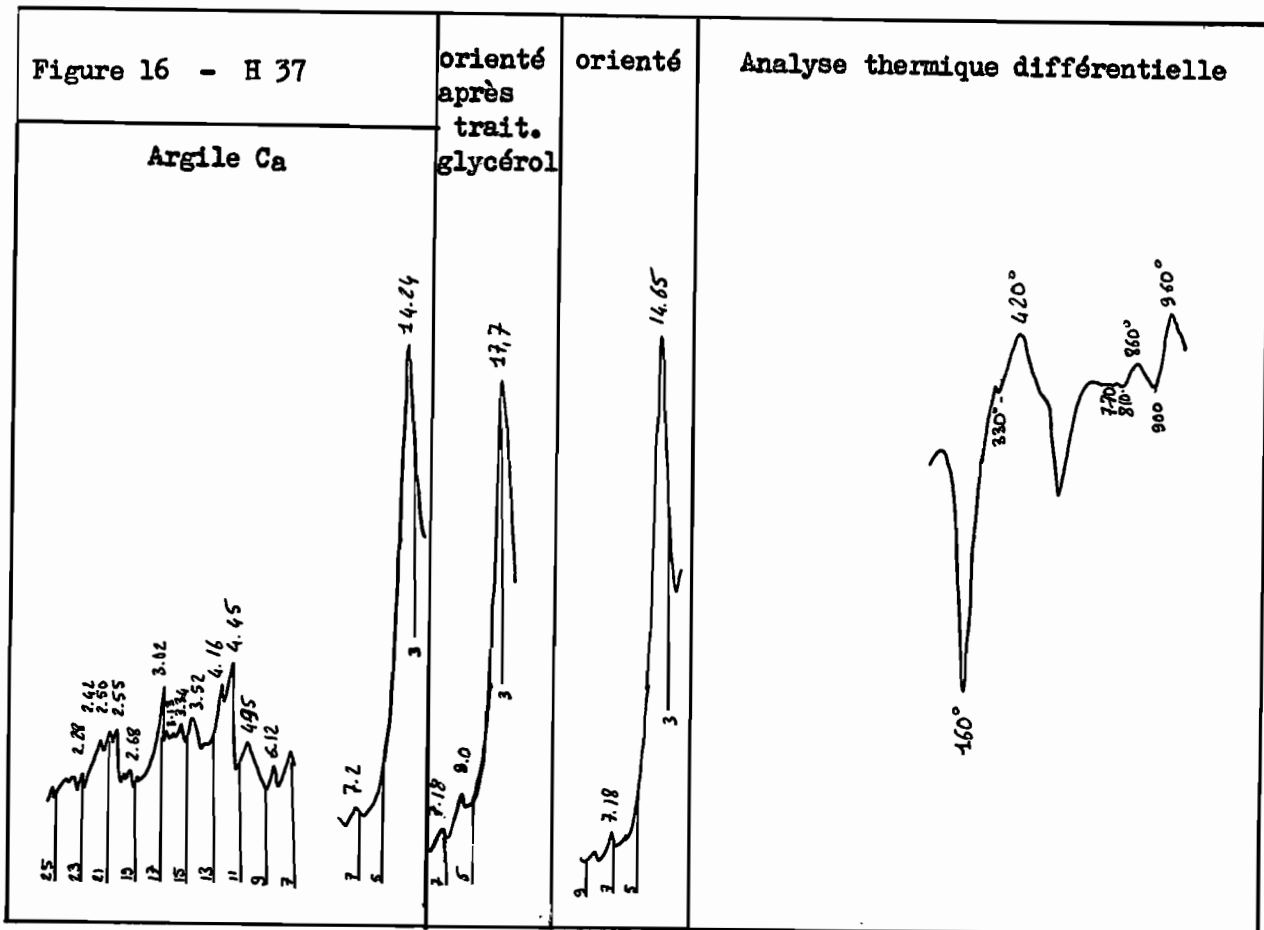
6 - 32 - Dans le Nord de l'île on a également prélevé de l'argile dans les poches du calcaire.

32 - 1 Les fortes pentes situées au pied de la falaise où le profil 38 riche en boehmite et gibbsite a été examiné sont recouvertes d'argiles rouges de composition voisine mais avec présence d'un peu de montmorillonite. (H 23 ).

Dans le calcaire blanc massif on a gratté de fines lamelles d'argile rouge brune - 5 YR 4/6-à environ 60 cms sous la limite du calcaire dur et du sol rouge.

Le pH est élevé 8,2 et la capacité d'échange de base voisine de 31 mé% pour la terre et les fines particules calcaires entraînées avec.

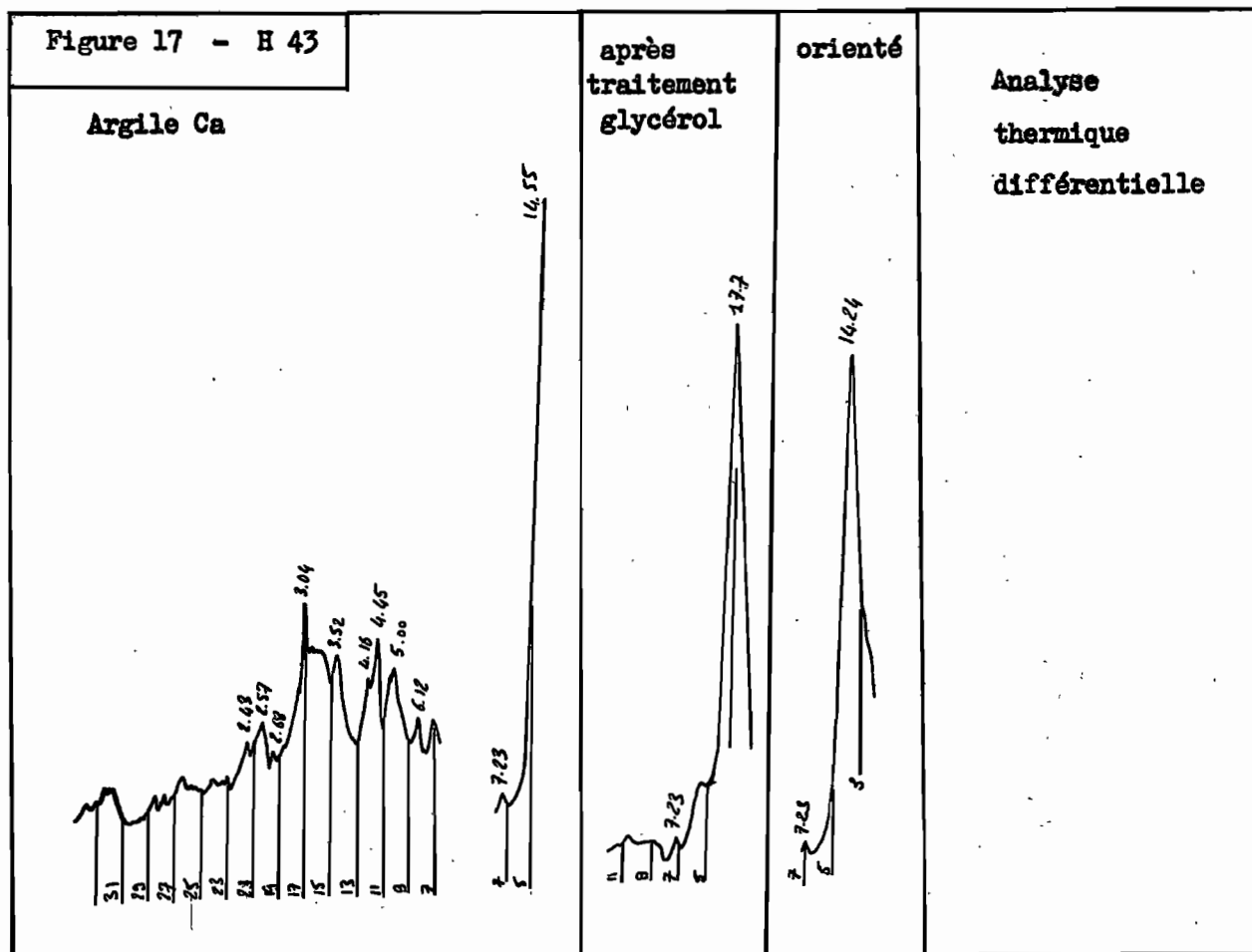
Les rayons X et l'analyse thermique différentielle indiquent la présence de montmorillonite en forte proportion avec peut être des traces de chlorite ou de kaolinite ? La boehmite est décelée mais en petite quantité (raie à 6,12 Ao et renflement à l'A.T.D. vers 500°). La goethite semble peu abondante.



32 - 2 A quelques centaines de mètres on a prélevé, dans une profonde et récente ravine d'érosion creusée dans le calcaire avec des entonnoirs où tourbillonnent les eaux des fortes pluies, en ravivant les parois, un matériau très léger, argilo-calcaire, rose-pâle, emplissant de petites poches du calcaire qui paraît in-si plus ou moins altéré avec des limites diffuses, des parois. Il est vraisemblable qu'il y a eu dissolution du calcaire et formation au moins partielle à cet endroit

même des produits contenus dans la poche.

Après destruction du calcaire à l'acide et élimination, les rayons X et l'analyse thermique différentielle révèlent dans la fraction argileuse une forte proportion de montmorillonite avec un peu de boehmite et de goethite. Le pH est élevé 8,8 sur la terre écrasée et la capacité d'échange du sol entier voisine de 60%.



En résumé, comme pour le Sud de l'île il est donc permis de penser qu' une altération de type montmorillonitique des impuretés du calcaire a dans un premier stade contribué à remplir les poches du calcaire en profondeur d'argiles de ce type. Par la suite, ces produits placés en surface par la dissolution et la disparition progressive du calcaire environnant auraient évolués rapidement en boehmite gibbsite, chlorites et interstratifiés

32 - 3

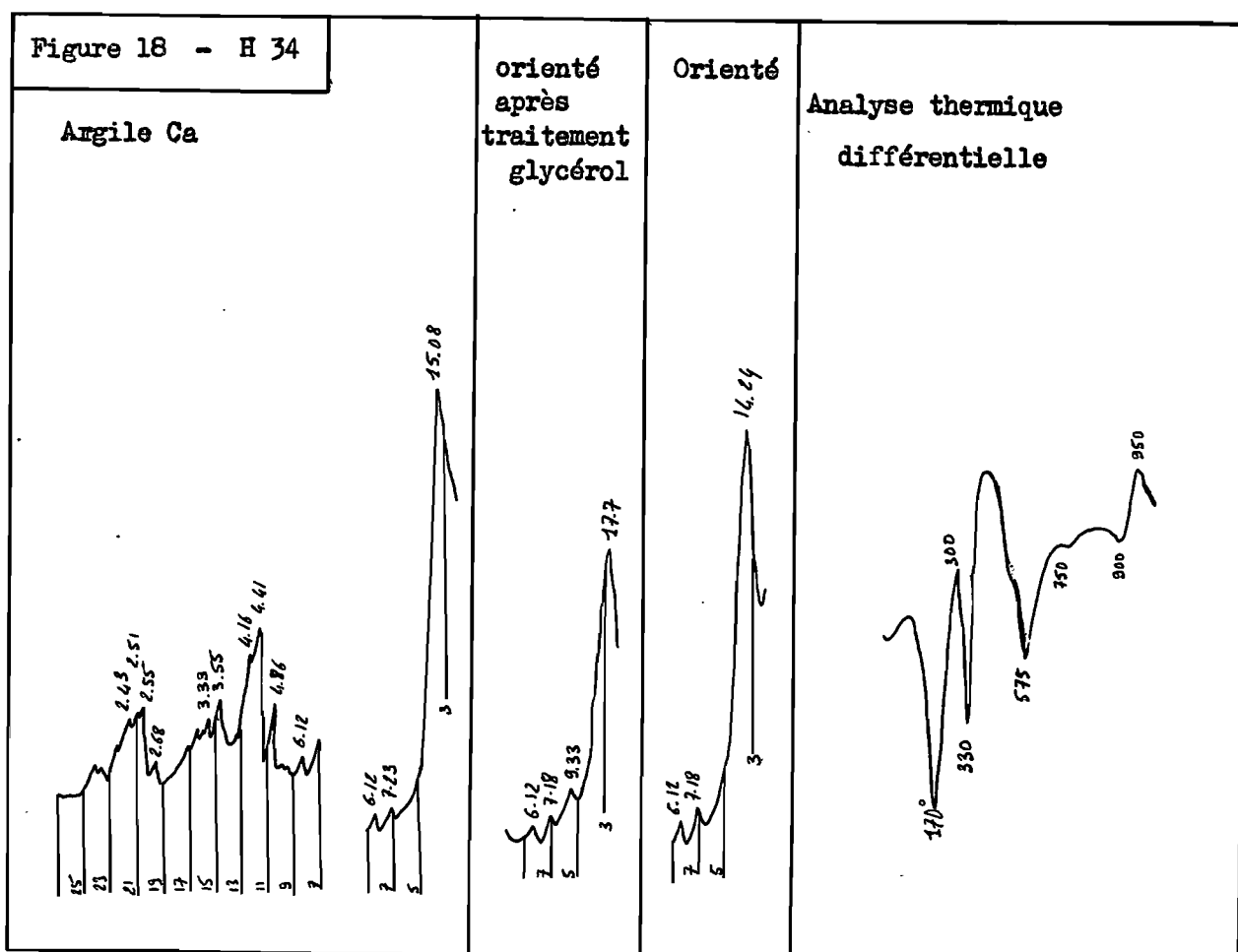
Dans cette région du Nord de l'île la boehmite semble nettement plus importante que la gibbsite à tous les degrés de l'évolution des sols. Dans le Sud de l'île au contraire, on rencontre presque exclusivement la gibbsite, et la boehmite n'est

décelée qu'à l'état de trace dans les facies de sols rouges encore tres pauvres en hydroxyde d'alumine.

Un autre prélèvement d'argile rouge en lamelles dans les alvéoles du calcaire a été effectué à quelques kilomètres de l'endroit où ont été prélevés dans le Nord de l'île les échantillons H 37 et 43 de profondeur.

Le sol surmontant ces calcaires est rouge 5 YR 4/4 mais peu épais, 20 à 30 cm., érodé. Le calcaire est très tourmenté et des apports de sol de surface en profondeur, au moins partiels, sont probables ?

Les rayons X et l'analyse thermique différentielle indiquent une forte proportion de montmorillonite, des traces d'un minéral ayant une raie à 7 Å, kaolinite ou chlorite, de la gibbsite en quantité relativement importante, de la boehmite en plus faible proportion et enfin un peu de goethite.



Il semble que ce matériau soit nettement plus évolué que ceux précédemment examinés dans les poches du calcaire. Il y a peut être mélange partiel avec des particules entraînées depuis le sol superficiel.

Le pH est élevé et la capacité d'échange de base sur le sol total importante, 48 mé%.

La difficulté de ces études est bien l'incertitude concernant des entrainement éventuels en profondeur de débris de sol superficiel renfermant de la gibbsite.

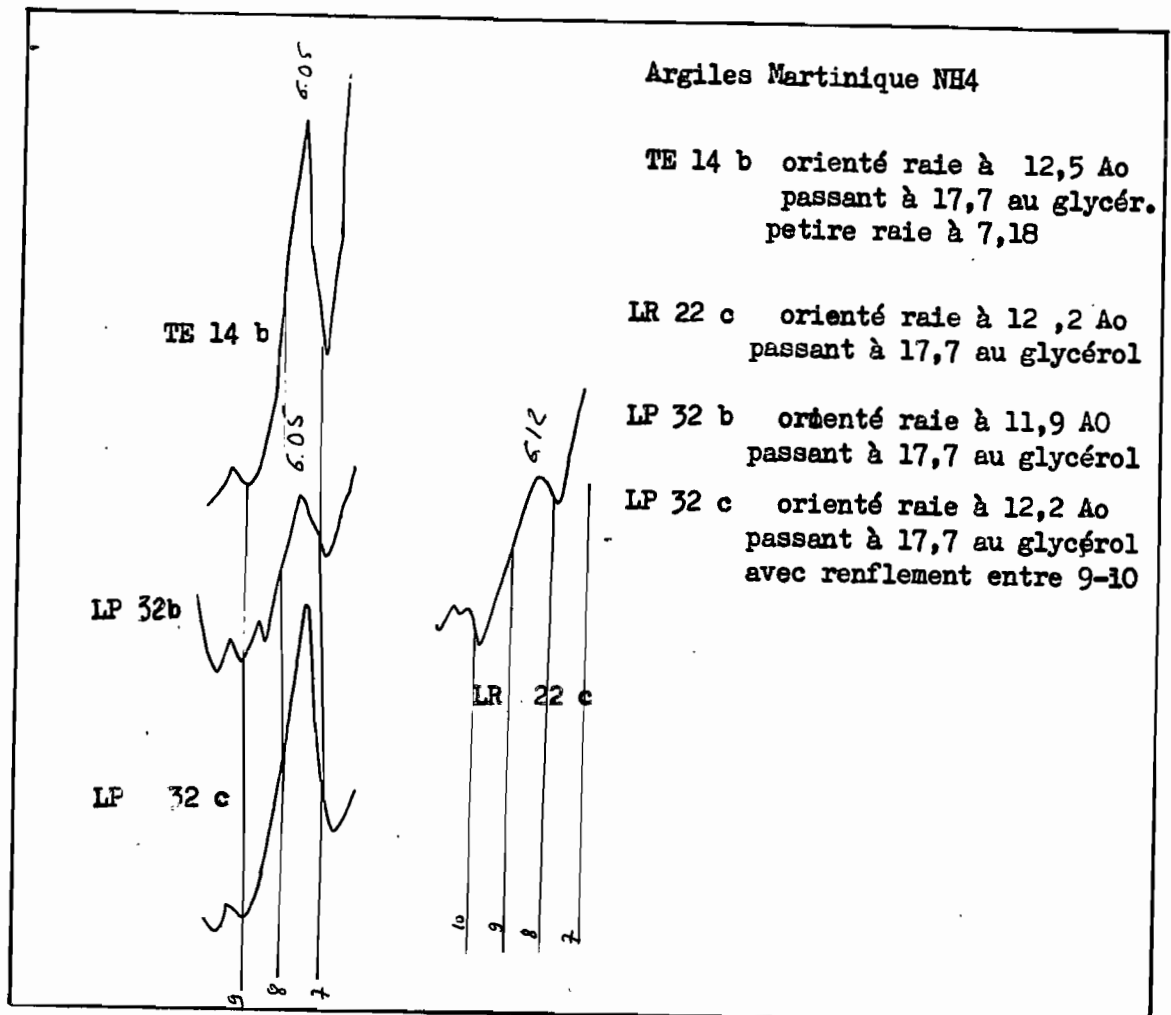
6 - 4 Les bauxites argileuses

41 - remarques sur la formation de la boehmite

Il résulte des faits exposés dans les paragraphes précédents que les sols rouges évolués semblent s'enrichir progressivement en hydroxyde d'alumine qui peuvent être la gibbsite, ou une association de gibbsite et de boehmite dans laquelle ce dernier minéral peut parfois dominer. Avec les restrictions faites sur des entraînements éventuels en profondeur de produits de surface, la boehmite semblerait cependant apparaître avant la gibbsite dans les sols encore riches en montmorillonite ou en interstratifiés chloritiques.

De fait, la boehmite est souvent observée aux Antilles-Françaises en petite quantité dans les niveaux de départ des sols formés en régions humides sur des tufs volcaniques argilisés montmorillonitiques récemment découverts par l'érosion des coulées ou des brèches qui les recouvraient. La boehmite paraît ici une forme très transitoire de la décomposition de la montmorillonite vers la métahalloysite ou les fire-clay. Les conditions de drainage internes sont ici totalement différentes car celui-ci est très faible ou nul en profondeur. La boehmite ne se retrouve pas dans les niveaux supérieurs du sol plus dégradés et plus riches en argiles du type kaoliniques.

Figure 19 - LR 22 c - Martinique LP 32 C - T E 14 c



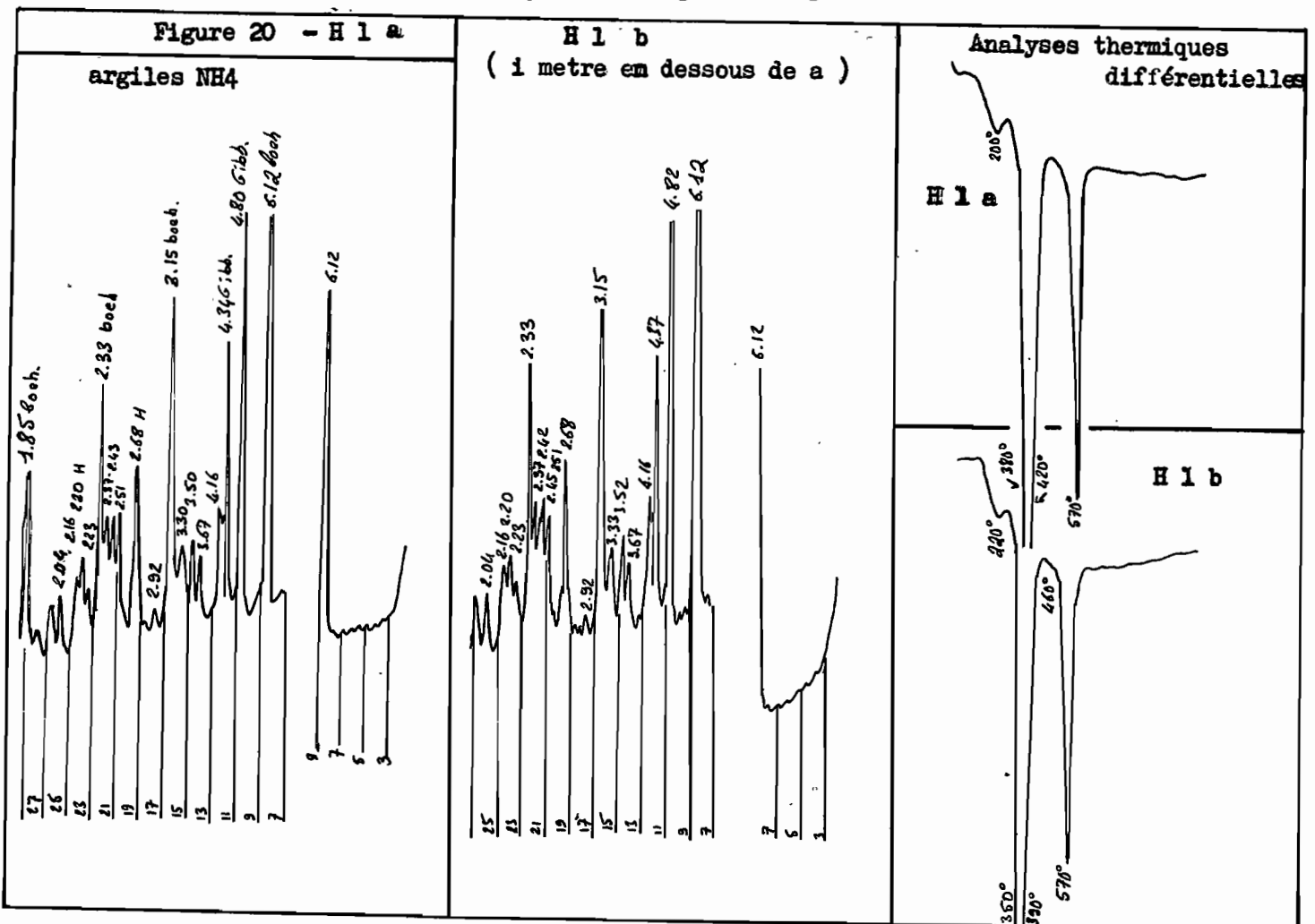


- De même dans certains horizons de sols sur cendres volcaniques d'Equateur dans des régions à saison sèche marquée, où le processus normal d'évolution est l'halloysite hydratée 4 H<sub>2</sub>O avec un stade initial amorphe dans lequel la montmorillonite est parfois décelée, on remarque la présence fréquente d'un peu de boehmite qui disparaît dans le niveau supérieur du sol.

En conclusion, la présence de boehmite peut sembler d'après ces quelques exemples liée à la dégradation de la montmorillonite. Dans certains sols elle disparaît rapidement, alors que la gibbsite semble au contraire devenir plus importante. Dans d'autres sols la boehmite semble au contraire se conserver. S'agit-il encore d'une phase transitoire dans laquelle la boehmite est appelée progressivement à céder la place à la gibbsite. Il semble difficile de pouvoir le penser.

6 - 42 Les bauxites argileuses du plateau de Rochelois

Dans la presqu'île Sud de l'île ,un vaste plateau ondulé relativement bien drainé et arrosé à 1000 metres d'altitude environ ,est recouvert de sols rouges friables analogues à ceux que nous avons décrits. L'épaisseur de ces sols varie de quelques dizaines de centimetres ,avec de fréquents affleurements du calcaire ,à plusieurs mètres . Ils sont très uniformes de structure continue ,moyennement compacts à l'outil ,très friable entre les doigts . Ils reposent sans transition ,brutalement sur les calcaires blancs. La Capacité d'échange de base du sol entier est tres faible , 6 à 10 méq % et le pH de .



Les rayons X et l'analyse thermique différentielle indiquent une très importante proportion de boehmite et de gibbsite. L'argile en est presque exclusivement constituée. Il n'y a pas traces de minéraux argileux : chlorites, kaolinites ou montmorillonite ,..L'hématite est bien représentés, la goethite est peu abondante.

L'échantillon H1 a été prélevé dans un profil épais à environ 2 metres en dessous de la surface du sol et 2 metres au dessus du calcaire. L'échantillon H2 a été prélevé au même endroit mais à moins de 1 metre au dessus du calcaire sous jacent. A cette profondeur l'argile paraissait un peu plus grasse , peut etre parceque plus humide car les résultats sont identiques. Ces bauxites sont d'ailleurs exploitées, et les engins de la Cie Kaiser raclent le sol jusqu'au calcaire dur.

En résumé, cet exemple montre bien la persistance de la boehmite jusqu'au stade ultime de l'évolution du sol. Il est difficile d'en donner les raisons. Comme pour les bauxites du midi de la France , également riches en boehmite et intercalées dans des calcaires , ce dernier a t'il eu par le maintien d'un milieu riche en bases une influence sur sa formation. Dans tous les sols tropicaux acides on ne rencontre que la gibbsite. Certains auteurs pour la formation des bauxites à boehmite de France invoquent un milieu engorgé peut etre dans certaines parties concaves imperméables du calcaire????

#### 6 - 5 Quelques cas intermédiaires- Sols à hydroxydes d'alumine en quantités notables

Dans les paragraphes précédents -4 et 5- des sols rouges constitués essentiellement de montmorillonite et d'hématite ou de Chlorites et interstratifiés chlorites-vermiculites? et hématites ont été décrits. La boehmite dans ces sols n'était décelée en surface qu'en faibles quantités et la gibbsite n'était pas représentée.

On peut naturellement penser que tous les intermédiaires existent entre ces sols rouges pratiquement dépourvus d'hydroxydes d'alumine et les sols rouges d'apparence tres voisine dont la composition préfigure déjà une bauxite (paragraphes 6-1 et 6-2) .

Les sols observés sont situés sur des fortes pentes , et il est difficile de savoir ce qui a pu se former in-situ et ce qui a été apporté par ruissellement par les eaux depuis les hauteurs où se rencontrent fréquemment des sols riches en gibbsite et boehmite. L'érosion en Haiti est extrêmement active.

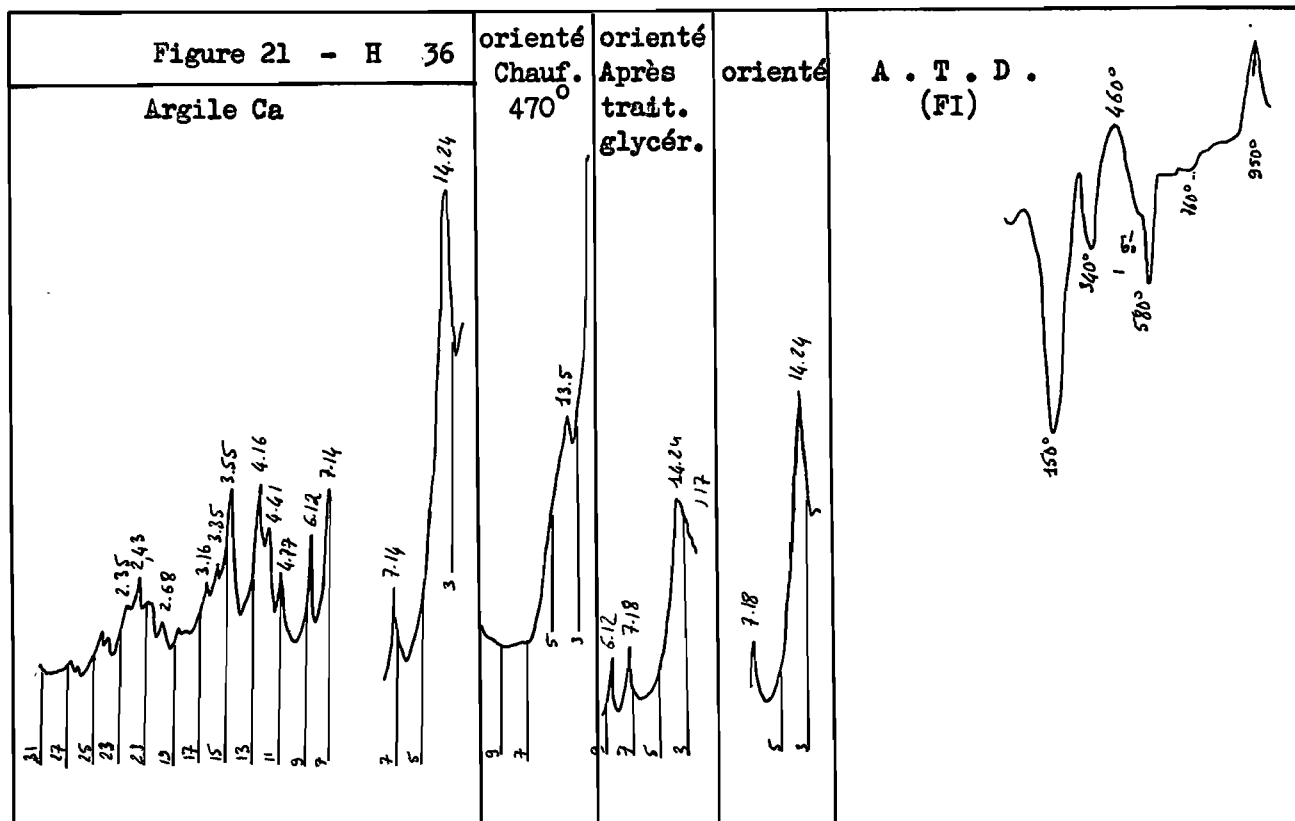
On ne retiendra que le cas suivant dans lequel deux profils bien représentatifs , l'un relativement friable à tendance ferralitique et l'autre

gras ,adhérents, sont rencontrés à quelques dizaines de mètres tout au plus de distance dans le Nord de l'île.

51 - Le profil H 36 pourrait être confondu avec un ferrisol ou un sol faiblement ferrallitique sur formation volcanique. Le sol est argileux mais relativement friable avec quelques petits pisolithes ferromanganiques. En profondeur des légères taches brun-rougeâtres diffuses à brun jaune sale apparaissent. Le pH est voisin de 7 et la capacité d'échange de base pour le sol entier de 36 mé %.

- Profil: 0 - 15 Argileux - brun foncé , sec : 10 YR 4/3 et idem frais. Assez compact. Structure d'ensemble continue. Porosité faible. Sous-structure à tendance angulaire. Les mottes s'émiettent assez bien. Peu plastique. Peu adhérent. pH = 6,7
- 15 - 40 Argileux - brun jaune à jaune - sec : 5 YR 5/8 et idem frais. Structure d'ensemble continue. Sous-structure polyédrique à faces angulaires luisantes,- relativement friable - plastique à l'état humide - quelques nodules ferro-manganiques noirs de 1 à 2 mm. Le sol frais est assez compact à l'outil.
- 40 - 80 Idem, mais plus friable, s'émiette aisément - plastique mais peu adhérent à non adhérent. - Structure continue - uniforme - pas de concrétions noires. pH = 6,9
- 80 - 150 Idem mais légères taches brun rougeâtres diffuses et brun jaune sale- Pas de minéraux visibles - le sol humide est assez compact et plastique, un peu gras mais les mottes s'émiettent assez bien. pH 7,4

Dans l'horizon B vers 50 cm. de profondeur les rayons X et l'analyse thermique différentielle indiquent la présence de chlorite probablement interstratifiée avec la vermiculite (raie à 14,2 stable au glycérol passant à 13,5 en diminuant d'intensité par chauffage à 470° avec renflement vers 10 Ao



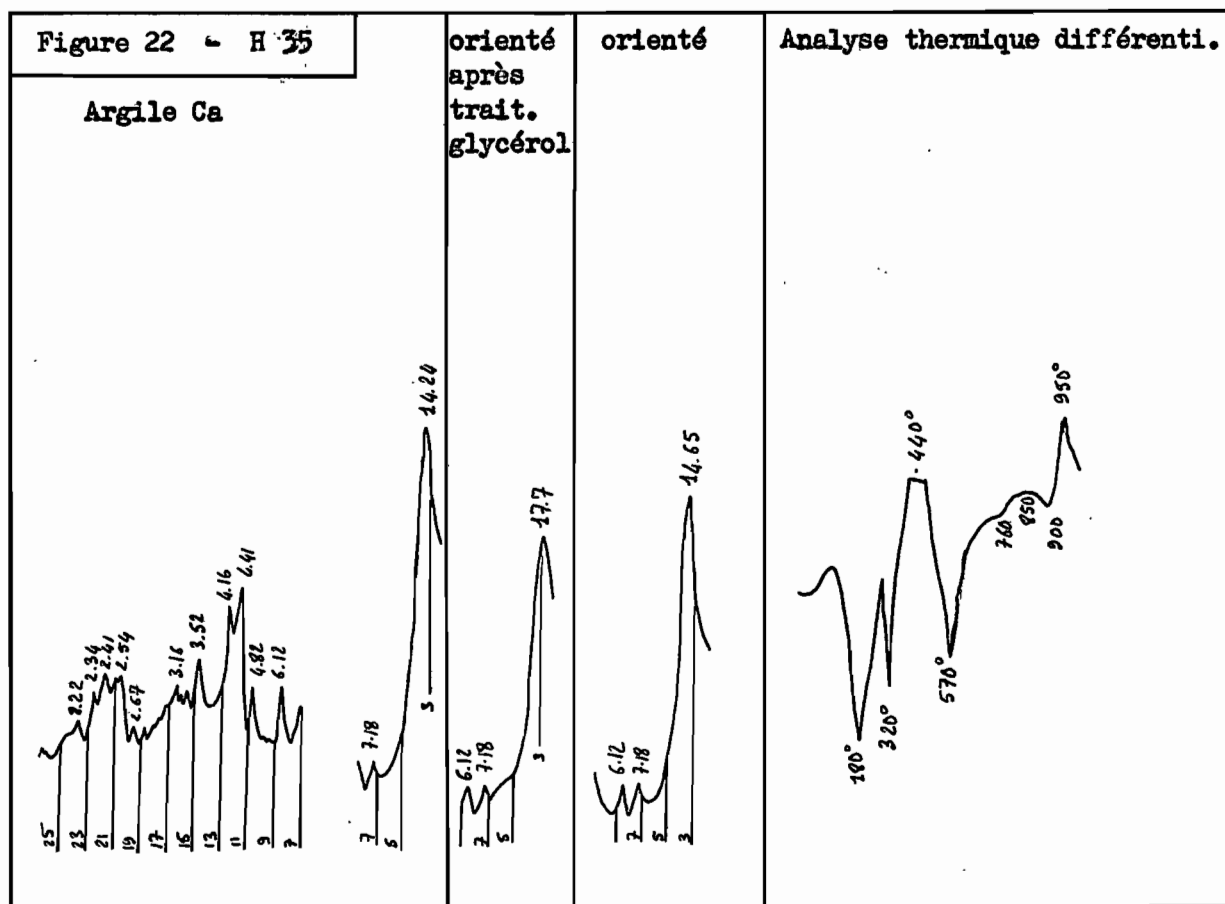
La boehmite est importante, bien visible aux rayons X et à l'analyse thermique différentielle ainsi que la goethite. Il y aurait un peu de montmorillonite. La présence de kaolinite en faible quantité est incertaine.

6 - 52

A une dizaine de mètres de ce profil sur une pente plus forte, le calcaire affleure fréquemment. Les sols sont peu profonds, 30 à 40 cm. parfois même moins, riches en surface en débris calcaires caillouteux, à tendance nettement vertisolique.

- profil : 0 - 10 argile brune foncée - sec : 5 YR 3/4 et frais 4/4 - structure massive. Sol très compact, gras, adhérent humide et très dur sec. Le sol est recouvert d'un masque d'agrégats friables en surface. Il y a de nombreux graviers et cailloux calcaires.
- 10 - 30 argile brune, moins foncée - sec : 7,5 YR 4/4 et un peu plus claire humide. Argile adhésive en remplissage en des blocs calcaires fissurés et tourmentés. Débris calcaires très abondants rendant le sol difficile à approfondir.

Le pH est élevé 8,1 sur la terre écrasée et la capacité d'échange de base constante sur le sol entier : 54 mé% nettement plus élevée que dans le profil précédent. Les rayons X et l'analyse thermique différentielle révèlent la présence de montmorillonite de boehmite, de gibbsite et de goethite en quantités relativement importantes.



En résumé, ces deux profils constituent bien des intermédiaires entre les sols rouges dépourvus d'hydroxydes d'alumine et ceux à tendance bauxitique. La possibilité même réduite d'entraînements sur les pentes de produits d'altitude bauxitiques incite à la prudence et à des observations plus nombreuses.

VII      DISCUSSION

7 - 1 EXAMEN MINÉRALOGIQUE DES SABLES.

Les sols rouges que l'on rencontre sur calcaire à des stades très variés d'évolution, sont-ils des vestiges de formations volcaniques dispersées ou proviennent-ils des impuretés du calcaire. Ces impuretés sont-elles d'origine volcanique, comme on le constate très souvent dans les calcaires coralliens de la Guadeloupe où de véritables lentilles et même des niveaux épais discontinus sont observés, témoignant ainsi qu'une présence plus diffuse dans la masse soit probable: Projections directe dans la mer ou entraînement par les rivières.

Les sols très évolués, fortement bauxitisés ne renferment presque plus de sables et l'identification de ceux-ci semble délicate lorsqu'elle est encore possible. Par contre les faciès modérément évolués, devraient renfermer encore quelques indices attestant de leur origine volcanique.

L'examen minéralogique des sables paraît donc pouvoir dans certains cas renseigner utilement non pas sur l'origine exclusive du sol, mais sur la contribution évidente de certains matériaux volcaniques sans pouvoir d'ailleurs préciser s'ils se présentent coulés distinctes ou en fines particules pyroclastiques mêlées aux calcaires, lors de leur formation ou en recouvrement récent.

Dans le profil H 35 - 21, sol avec gibbsite et boehmite, mais renfermant encore de la montmorillonite, la composition des minéraux de la fraction lourde des sables présente une dominance d'hypersthène et de hornblende verte, composition fréquente des cendres andésitiques. De l'épidote, probablement secondaire, est aussi rencontrée avec des traces de Zircon. C'est une composition fréquente des minéraux lourds des sols sur formations volcaniques, brèches, coulées, ou cendres dans les Antilles françaises.

Dans l'argile rouge riche en gibbsite et boehmite, prélevée à peu de distance, l'hypersthène et la hornblende verte sont très peu représentés, l'épidote constituant 84 % des minéraux lourds. L'épidote provient-elle de la transformation des minéraux rencontrés dans les précédents sols: Amphiboles, Augites, ..... ?. Une origine volcanique partielle de ce sol nettement plus ancien peut donc être admise en ce cas au même titre que pour le précédent profil.

Tableau 1	Minéraux lourds des sables -(M.DELAUNE)						
	pondéral % de Sab. Tot.	en % de minéraux lourds					
Echantillons		Hypersthène	Augite	Hornb. Verte	épidotes	zircon	rutile
H 21 (35)	4,1	62	2	18	16	2	
H 23	3,2	2	4	6	84	4	+

Le problème n'est pas aussi simple cependant, et la présence de minéraux d'origine volcanique dans les Caraïbes sur des sols d'évolution poussée déjà très anciens, ne prouve pas de façon impérative que les sols en soient exclusivement issus. Une des difficultés rencontrées dans l'étude de certains sols volcaniques évolués des Antilles françaises, est précisément souvent le pourcentage relativement plus important, contrairement à la logique, d'éléments peu altérés dans les niveaux de surface qu'en profondeur où, parfois même, dans certains tufs argilisés profonds, ils sont absents, bien que les sols en dérivent manifestement en grande partie. Le volcan originel, lieu de ces émissions, n'est toutefois situé dans ces îles qu'à quelques dizaines de Kms. Aux époques récentes cependant les dépôts de cendres des dernières éruptions en Martinique et à St. Vincent ont été identifiés en quantité notable dans les îles voisines comme la Barbade, sur les sols calcimorphes.

Sans fournir la preuve rigoureuse d'une origine spécifiquement volcanique, distincte des calcaires et des impuretés qu'ils renferment, la présence relativement abondante de minéraux volcaniques primaires ou secondaires, peut contribuer à expliquer en partie l'importance des teneurs en aluminium de certains sols évolués.

#### 7 - 2 HYPOTHESE D'UN RECOUVREMENT DE CENDRES ANDESITQUES OU DACITIQUES

L'hypothèse de l'altération dans des conditions de drainage interne excellent d'un manteau de recouvrement récent de cendres andésitiques peut fort bien expliquer la formation des hydroxydes d'alumine sans apparition de la kaolinite, la silice étant aussitôt entraînée et les resiliifications ne pouvant pas se produire.

En climat modérément humide, l'évolution des sols sur cendres, avec un bon drainage en profondeur aboutit à l'hallowysite, en climat sec ou dans des conditions de mauvais drainage interne à la montmorillonite, et en climat très humide à des produits amorphes très hydratés qui donnent directement naissance à des hydroxydes d'alumine ( gibbsite ) lorsque l'élimination de la silice en profondeur est possible. Ce dernier processus n'a été observé que dans des sols déjà fortement désaturés en bases, aux Antilles Française comme en Equateur (COLMET DAAGE 1961-5-7) et pourrait très bien expliquer l'apparition de bauxites dans des dépôts relativement épais au dessus de calcaires très perméables.

On explique difficilement cependant l'existence des cas intermédiaires sols rouges à hydroxydes d'alumine renfermant aussi une proportion appréciable de montmorillonite et de chlorite ou d'interstratifiés chlorite-vermiculite ou montmorillonite sans apparition importante de la kaolinite ou de l'hallowysite.

Est il possible de supposer que des cendres intercalées dans les calcaires et s'altérant en profondeur ,ou entraînées dans les fissures du calcaire ou au bas des pentes et constamment imprégnées par les eaux, chargées en bases, de dissolution des calcaires ,puissent s'altérer en donnant soit des montmorillonites ,soit des hydroxydes d'alumine.? Ces conditions très particulières et rarement rencontrées sous les tropiques humides,peuvent elles expliquer la présence de la boehmite?. Doit on seulement attribuer la formation des hydroxydes d'alumine au processus classiques de l'altération des cendres sur des plateaux bien drainés, et expliquer leur présence sur les pentes par simple mélange de produits entraînés par l'érosion avec les argiles montmorillonitiques ou chloritiques dont l'origine pourrait être d'ailleurs volcanique ou plus simplement un héritage ou des néoformations liés aux impuretés des calcaires ou aux marnes.

7 - 3

#### HYPOTHESE DE L'ALTERATION DE COULEES VOLCANIQUES EN PLACE

Il est curieux de constater que les sols rouges à divers stades d'évolution ne renferment généralement pas de Kaolinite, bien que les difficultés d'identification de cette argile en présence de chlorite et vermiculite laisse quelques incertitudes.

Il parait peu probable qu'entre la néoformation de la montmorillonite audessus de la coulée dans des conditions de drainage interne modéré ou imparfait, et les argiles bauxitiques, un intermédiaire kaolinique ne soit jamais rencontré, comme on le constate pourtant dans presque tous les produits de l'altération des coulées en Haiti et aux Antilles Françaises. Le processus classique impliquerait pour les sols les plus évolués la présence simultanée de la forme la plus stable des argiles, c'est à dire la Kaolinite plutôt que la montmorillonite ou les chlorites - vermiculites, à coté des hydroxydes d'alumine et de fer.

Tous les vertisols formés sur des matériaux volcaniques aux Antilles Françaises renferment une certaine proportion d'argiles du type Kaolinique, (métahalloysite ou fire-clay) dont la proportion ne fait que s'accroître au cours de l'évolution et de la dégradation de la montmorillonite. La présence des eaux de dissolution des calcaires, maintenant le milieu constamment riche en bases peut-elle inhiber la formation de la Kaolinite? Peut-il y avoir au cours de l'altération des minéraux primaires formation simultanée de la montmorillonite et des hydroxydes d'alumine avec maintien et cristallisation de ceux-ci.

S'il y a d'abord formation de montmorillonite seule, puis individualisation du fer et dégradation de la montmorillonite en milieu basique, peu importe alors que celle-ci soit d'origine volcanique ou provienne par héritage de marnes ou d'impuretés des calcaires.

7 - 4 HYPOTHESE DE L'ALTERATION D'ARGILES HERITEES OU DE NEOFORMATION SUR LES IMPURETES DES CALCAIRES, OU LES MARNES

41- Nature de l'argile des formations sédimentaires.

L'importance des formations de marnes calcaires est frappante en Haiti. Dans le Nord-Ouest leur épaisseur peut atteindre plus de cent mètres, avec présence presque exclusive de montmorillonite. Constamment le long des routes on peut observer l'intercalation dans les calcaires durs des bandes marneuses de quelques dizaines de cms à plusieurs mètres d'épaisseur.

La montmorillonite est elle toujours le minéral essentiel de ces formations marneuses ou des impuretés diffuses dans le calcaire. La chlorite et les interstratifiés chlorite - vermiculite ou montmorillonite doivent-ils être considérés comme des produits d'évolution de la montmorillonite ou sont-ils directement hérités de certaines formations. Il semble d'après Millot (1964) que le passage à double sens puisse être observé dans la nature. La montmorillonite pourrait provenir de l'évolution ultime de chlorites et de vermiculites, mais la disparition de la montmorillonite avec apparition de chlorites et vermiculites aurait été observé dans les sols, souvent en interstratifiés. Ces études concernent les régions tempérées ou la présence d'illite perturbe sensiblement le problème de la disparition d'un minéral et de l'origine des autres minéraux apparus.

En Haiti les apparences peuvent actuellement, dans l'état des études, faire penser à une évolution dans le sens montmorillonite vers les chlorites et les interstratifiés chlorite - vermiculite. Le fait que la montmorillonite soit présente dans les poches du calcaire en profondeur n'implique pas cependant qu'elle constitue, après la disparition du calcaire, le matériau mère des sols à chlorites et interstratifiés qui surmontent ces calcaires. On imagine aisément que dans les poches du calcaire, en milieu imparfaitement drainé, les conditions soient quelque peu différentes de celles qui se présentent au contact même du sol rouge et de la surface des calcaires en dissolution, avec évacuation rapide des produits dissouts. L'entraînement dans les poches du calcaire d'impuretés peut conduire par des néoformations ou des transformations d'argiles héritées comme la chlorite et la vermiculite à l'apparition de montmorillonite.

L'évolution au sein d'une même étendue de sols rouges varie peut-être suivant la distance aux fissures principales du calcaire par où s'évacuent les eaux de drainage en profondeur. Que se passe-t-il lorsque par suite d'éboulements ou de colmatages des modifications interviennent dans le réseau de drainage interne préférentiel du sol et que certaines zones jusqu'alors excessivement drainées deviennent subitement ou progressivement engorgées.

La nature de l'argile est probablement assez constante dans une même formation marine bien que les venues volcaniques aient pu par



compression et échauffement provoquer une diagénese. Des différences peuvent exister d'une formation à l'autre, soit qu'il y ait eu accumulation de produits de nature différente, soit qu'il y ait eu des transformations au sein même du dépôt. Une étude systématique des argiles des divers sédiments calcaire ou marno-calcaires serait donc en Haiti à entreprendre. Trouvera-t-on exclusivement la montmorillonite, ou également la chlorite et des interstratifiés chlorite-vermiculites, et même des illites. C'est ainsi que dans un sol très rouge situé sur les calcaires coralliens de la région relativement sèche de Jean Rabel, on note la présence d'illite avec un peu de chlorite (et de fire clay?). L'illite est très probablement ici héritée, mais des observations détaillées n'ont pas eu lieu dans cette région. (1)

La faible proportion des illites serait à mettre en parallèle avec le volcanisme intense de cette région caraïbe. Cette argile n'est presque jamais rencontrée dans les produits néoformés des sols volcaniques en régions tropicales et il ya peu de chances ainsi, que les sédiments qui en dérivent en renferment une proportion importante sauf cas de diagénese ultérieure. Au Brésil, dans le Nord-Ouest du pays, les sédiments marnocalcaires intercalés dans les grès crétacés renferment des interstratifiés chlorite - illite - montmorillonite avec présence plus ou moins importante de la montmorillonite dans les vertisols ou paravertisols qui en dérivent directement. L'illite était souvent présente, semble-t-il hors de l'interstratifié en petite quantité: dioctaédrique. Son existence dans des sédiments à proximité du bouclier précambrien Sud-Américain ne peut surprendre. Dans les sols intergrades fersiallitiques - vertisols sur les venues basiques où les facies enrichis, des interstratifiés chlorite montmorillonite sont parfois rencontrés à côté de la montmorillonite et de la métahalloysite. (COLMET DAAGE, GUICHARD 1965)

Aux Antilles Françaises la montmorillonite et les argiles Kaoliniques ou halloysites sont exclusivement observées sur les calcaires et les formations volcaniques et l'illite est très rare.

#### 7 - 42 - Formation des sols rouges et des bauxites

Peut-on envisager la transformation d'une argile montmorillonitique ou d'un interstratifié chlorite-vermiculite, argiles déjà riches en fer, en une argile bauxitique. Le processus serait sans doute au début voisin de celui tendant à la formation des sols rouges méditerranéens sur calcaires durs, où le contact sol-calcaire est également très brutal sans transition. Il y aurait rubéfaction par individualisation du fer hors des complexes, et apparition d'une structure de plus en plus friable, moins adhérente, attribuable à l'enrobage très efficace des particules d'argiles par les hydroxydes de fer. Le milieu resterait au début constamment bien flocculé par le calcium des eaux de dissolution des calcaires environnants. Il semble possible que ces sols rouges constitués essentiellement de mont-

(1) Prélèvement effectué par L.ALEXIS.

-morillonite puissent par une évolution plus poussée dans des conditions satisfaisantes de drainage interne due à leur structure friable très particulière et la perméabilité du substratum fissuré calcaire, donner naissance à des hydroxydes d'alumine, boehmite puis gibbsite sans qu'il y ait pour autant des resiliifications et apparition de la Kaolinite. Il s'agirait d'une évolution semblable à celle des substances amorphes des sols à allophanes qui en milieu très perméable et constamment humide donnent naissance rapidement à la gibbsite, sans qu'une resiliification en Kaolinite puisse se produire. Le maintien de l'état d'hydratation dans ce cas, d'un milieu riche en bases dans l'autre, et l'entraînement rapide des produits de dissolution, dont la silice, par des eaux très peu chargées en cet élément dans les deux cas, empêcheraient la formation des argiles Kaoliniques ou halloysites.

Le processus de la dégradation de la montmorillonite puis de la chlorite et des interstratifiés conduirait à l'individualisation de l'alumine, alors que dans presque tous les sols volcaniques riches en montmorillonite, ce qui implique généralement un drainage interne imparfait, il y a apparition des argiles Kaoliniques et halloysites. Quelles sont alors les conditions qui président à l'apparition soit de la boehmite, soit de la gibbsite? On peut seulement faire remarquer la présence de boehmite dans les sols en liaison avec la montmorillonite ce qui fut sans doute aussi jadis le cas de la boehmite des bauxites sur calcaire.

+

Le problème le plus important n'est peut-être pas en fait , le passage du sol rouge à montmorillonite friable et perméable, aux argiles bauxitiques, mais plutôt celui de la formation de ces sols rouges ne renfermant encore que peu ou pas d'hydroxydes d'alumine. Il importe peu alors de savoir si ces sols rouges sont d'origine volcanique ou hérités de marnes calcaires avec ou sans transformations ou néoformations. La difficulté essentielle est d'expliquer le passage de la marne ou du sol vertisolique peu perméable au sol rouge montmorillonitique friable sans apparition des argiles très stables du type Kaolinique. C'est donc semble-t-il une voie où les recherches sont d'abord à poursuivre. Elles impliquent la connaissance des argiles originelles des divers sédiments calcaires impurs ou marneux, puis l'étude du processus du passage du fer inclus dans les argiles à une forme très efficace de recouvrement pelliculaire conférant aux sols leurs structures perméables et leur coloration très rouge. S'agit-il de fer à l'état amorphe comme SEGALEN (1966) le signale? Quelles sont les conditions qui président à son apparition en milieu fortement calcaire? Ces processus sont peu fréquents en régions tropicales humides où l'acidité est en général la règle. Ils sont sans doute voisins de ceux qui aboutissent à la formation des sols rouges des régions méditerranéennes sur les calcaires. Ceux-ci sont malheureusement encore fort mal connus, bien des auteurs invoquant justement

des conditions climatiques antérieures de type tropical humide comme celles qui prévalent actuellement en Haiti. Il s'agirait pour eux de sols fossiles, l'une des raisons invoquées étant le passage brutal du sol rouge au calcaire dur comme en Haiti. Les mécanismes mis en cause sont des hypothèses qui ne peuvent expliquer la formation des sols rouges montmorillonitiques friables sans apparition simultanée de la kaolinite, qu'il s'agisse de sols fossiles ou formés dans les conditions climatiques actuelles de ces régions relativement sèches (LAMOUREUX 1965).

L'étude des formes du fer responsable de la structure friable et de la perméabilité des sols rouges riches en montmorillonite, en présence ou non d'hydroxydes d'alumine, et des conditions de l'apparition de ces formes en enrobements efficaces sur les particules du sol, nécessite de nombreuses observations sur le terrain et au laboratoire d'échantillons à divers stades d'évolution. Ces transformations semblent nécessaires pour conditionner le sol et permettre ensuite la dégradation de la montmorillonite, sans qu'il y ait apparition et augmentation progressive d'argiles de type kaolinique comme c'est le cas sur les formations volcaniques dans le passage des vertisols ou des intergrades vertisols - ferrisols aux ferrisols encore compacts puis aux sols ferrallitiques friables. S'agit-il seulement des conditions de drainage interne dans les différents horizons du sol et de la concentration en substances dissoutes des eaux de percolation.

#### 7 - 43 Comparaison des observations de terrain et des expériences de laboratoire.

Le simple exposé des faits concernant ces divers profils suggère aussitôt quelques hypothèses sur l'évolution des sols et des argiles. Elles sont encore des plus fragiles et l'examen plus détaillé de la nature même des argiles est avant toute chose à poursuivre. D'autres techniques devront être utilisées et en particulier les examens aux rayons X après défférisations et saturation avec divers cations pour l'étude du gonflement, l'analyse totale de l'argile pour la détermination principalement du fer, de l'aluminium et du magnésium, afin d'essayer de mieux définir ce qui a été appelé ici chlorite ou interstratifiés chlorite-vermiculites.

Divers auteurs cités par BROWN (1961) signalent "l'existence de chlorites alumineuses dans lesquelles le feuillet brucitique serait remplacé par un feuillet aluminique (ou gibbsitique)." " Certaines vermiculites à feuillet aluminique ne présenteraient pas l'effondrement de la structure et la disparition de la raie vers 14 Ao au chauffage, prêtant ainsi confusion avec la chlorite." "On signale dans diverses bauxites à boehmite la présence d'un minéral à 14-15 Ao qui n'a pas été identifié avec certitude. Il s'agirait

probablement de la chlorite et presque certainement pas de la montmorillonite." "Des interstratifiés serpentine, minéral à 7 Ao, et chlorites pourraient être confondus avec des chlorites riches en fer."

Le point qui mérite particulièrement d'être précisé est la présence éventuelle de la kaolinite difficile à mettre en évidence en présence des chlorites. On a montré dans cet exposé l'importance qu'il fallait y attacher pour l'explication des processus de pédogénèse.

+

Les transformations des argiles au laboratoire sous des conditions variées de la concentration en divers électrolytes, de température et de pression ont faits l'objet de très nombreuses investigations. Il serait très intéressant de savoir si ces transformations, comme celles que suggèrent à première vue les faits exposés, ont été constatées dans des conditions voisines de celles actuellement rencontrées en Haiti.

43 - 1 Passage montmorillonite - chlorites et interstratifiés.

En étudiant l'altération de montmorillonites de carrières en présence de résines échangeuses de cations avec dialyse des produits d'hydrolyse pour qu'ils réagissent en milieu très dilué, FRIPIAT et ses collaborateurs concluent:"

" Le mécanisme primaire de l'altération de la montmorillonite est l'extraction d'une fraction de l'aluminium et la précipitation ultérieure d'une couche d'hydroxyde plus ou moins bien cristallisée entre les feuillets de la montmorillonite. Ce mécanisme expliquerait la nature des produits formés dans le circuit d'échange et en particulier le maintien des distances basales supérieures à 13 Ao dans les substances traitées à température aussi élevée que 550° (ce qui s'observe en Haiti) ."Au cours de l'altération de la montmorillonite, des substances de faible poids moléculaire diffuseraient à travers la membrane de dialyse et cristaliseraient dans le milieu dilué - à pH élevé - sous forme d'un interstratifié de montmorillonite aluminique et d'une chlorite."

" La formation de l'interstratifié se fait dans une gamme étendue de pH puisqu'ils atteignent en fin d'expérience 2 à 3,5, dans le milieu d'échange et 9 à 10 dans le circuit de dialyse, fait méritant d'être souligné, car il est assez exceptionnel qu'une phyllite puisse se former de façon sensiblement identique dans une telle gamme de pH. Tout au plus a t'on remarqué que la morphologie des substances obtenues en milieu basique semblent plus parfaite que dans les solutions acides."

D'après ces auteurs, et c'était l'idée directrice de leurs expériences, l'interstratifié montmorillonite - chlorite, issu de la montmorillonite pourrait être un précurseur de la kaolinite. Qu'ils n'y soient pas arrivés rends précisément les résultats de ces expériences beaucoup plus proches des faits observés en Haiti.

Ces auteurs font remarquer:

"Quelques raies d'intensité moyenne ne s'insèrent pas dans les séquences du minéral interstratifié. Ces réflexions s'observent habituellement à 10,16, - 5,09 - 3,34 Ao et pourraient provenir d'une montmorillonite totalement fermée ou d'un mica".

Rappelons que certaines de ces raies sont apparues - 5 et 3,34 - en particulier, dans des diagrammes d'Haiti sans qu'une explication ait pu être donnée.

Ces auteurs signalent aussi:

"Une raie à 7,1 - 7,2 Ao qui, bien qu'atténuée, subsiste après calcination et pourrait s'expliquer en admettant la présence de chlorite vraie à côté de l'interstratifié."

Dans les diagrammes d'Haiti ces raies disparaissent par chauffage à 470°.

Il y aurait donc une certaine concordance entre les sentiments qui résultent des observations de terrain en Haiti et les faits constatés au laboratoire dans des expériences.

#### 43 - 2 Boehmite, gibbsite, kaolinite.

Le problème de l'apparition de la boehmite et de la gibbsite est plus confus. Il est connu (HENIN, de KIMPE ....) que les pH élevés dans les expériences de synthèse au laboratoire, vers 8 - 9 favorisent la formation des argiles 2:1 et les pH plus faibles 6 - 7, des argiles 1:1. Dans la gamme des pH 6 - 7 il peut y avoir précipitation d'hydroxyde d'aluminium, mais la rapide recristallisation de celui-ci en boehmite empêcherait la formation de la kaolinite dans ces conditions de milieu.

En faisant vieillir des gels d'hydroxyde d'alumine à température ordinaire, HERBILLON et GASTUCHE, obtiennent d'abord à pH 8 une pseudo-boehmite alors qu'en milieu plus acide les gels restent amorphes aux rayons X. En milieu très dilué par dialyse, et désionisé, il y a formation de gibbsite et bayerite pour les gels précipités à pH 8, bayerite et pseudoboehmite pour ceux précipités à pH 6,5 et gibbsite pure pour ceux précipités à pH 4,5, le pH final étant dans les trois cas voisin de 5,5. Ils concluent:

" Quelque soit le pH initial de précipitation du gel, la dilution par dialyse induit plus ou moins facilement mais dans tous les cas la synthèse des trihydrates cristallins. La bayérite et la pseudoboehmite semblent dérivés des gels à structure plus désordonnée rapidement précipités dans la zone d'insolubilisation maximale." (avec Na )

Ces auteurs signalent que:

" La présence de kaolinite dans le cas de gels vieillis dans la solution mère à pH 8 a un effet promoteur sur la cristallisation des trihydrates et inhibe la formation de pseudoboehmite."

La kaolinite étant toujours présente dans les sols à évolution ferrallitique et les pH d'abrasions au contact des minéraux en voie d'altération élevés (DELVIGNE 1965 - pH 8 à 9 dans les plagioclases où apparaît la gibbsite) faut il voir la une des raisons de l'absence de boehmite et de la présence presque exclusive de la gibbsite dans les sols des régions tropicales humides. Dans certains sols sur cendres volcaniques de Guadeloupe encore très hydratés, évolués et renfermant très peu d'hallowaysite ,mais acides , on trouverait surtout la bayérite. En Haiti la kaolinite n'apparaissant pas , semble t-il , cela faciliterait le maintien de la boehmite premier hydroxyde formé.

D'après ces mêmes auteurs :

"pour que la silicification proprement dite ait lieu en kaolin, l'ajoute de silice doit être simultanée à l'édification de la couche gibbsitique. Il n'y a pas silicification proprement dite de la gibbsite"(ce que contestent certains auteurs pour expliquer les toits des gisements de bauxite.)"mais apparition simultanée des deux formes cristallines. La raison de formation de la kaolinite dépendrait dans un milieu fortement désionisé de la concentration en silice des eaux de percolation"

Dans les sols montmorillonitiques conditionnés et rendus friables par les hydroxydes de fer ,peut-on supposer que les eaux de percolation demeurant trop riches en cations ,calcium principalement, et trop pauvres en silice pour que la synthèse de la kaolinite puisse se produire, il y ait apparition de boehmite et self-enrichissement de la montmorillonite en aluminium, avec transformation en interstratifiés avec des chlorites alumineuses (et peut être des vermiculites aluminiques). Le sol devenant alors très perméable et la silice étant très rapidement évacuée. la formation de la kaolinite ne pourrait se faire simultanément à l'apparition des feuillets gibbsitiques ,après disparition de la montmorillonite ,transformation en chlorites alumineuses,et interstratifiés et début de dégradation de ceux-ci. Les sols s'approfondissant in-situ ou par accumulation sur certains replats de pentes, puis étant placés par la suite par le jeu de l'érosion et effondrements , formation de puisards dans le calcaire, en position dominante où ils sont alors exclusivement percolés par les eaux de pluies avec une végétation réduite ,la désaturation progressive en bases accentuerait la formation de la gibbsite.

La proportion de gibbsite et de boehmite dans les sols bauxitiques les plus évolués pourrait donc dépendre de la durée de la première phase d'évolution pendant laquelle l'ionisation du milieu est favorable à la formation de pseudoboehmite ,comme cela semble fréquent au laboratoire (FRIPIAT, HENIN, PEDRO) puis avec le temps en boehmite bien cristallisée et stable ,ces conditions étant peu propices encore à la formation de la gibbsite comme elles le deviendront par la suite

8 CONCLUSION

Il serait tres prématuré ,après cet exposé,de conclure sur l'origine et les processus de formation des divers sols examinés. Des observations de terrain beaucoup plus nombreuses ,dans d'autres régions de l'ile et dans des positions topographiques variées, ainsi que des analyses plus précises ,surtout pour l'identification des minéraux des argiles , sont nécessaires.

Les expériences en laboratoire sont très suggestives et précises, mais elles montrent que parfois quelques légères modifications des conditions de milieu peuvent profondément modifier les produits obtenus ,soulignant par les contradictions apparentes fréquentes de la littérature qui les concerne , la complexité des facteurs en jeux et le danger des extrapolations hatives.

Il est intéressant de constater que certains des résultats précis exposés d'investigations au laboratoire ,semblent concorder ,en laissant encore bien des points obscurs,avec les hypothèses que suggèrent les observations de terrain en Haiti.

La formations de sols rouges friables montmorillonitiques ,sans kaolinite à partir des montmorillonites héritées ou néoformées sur les impuretés du calcaire ou des débris volcaniques,demeure difficile à expliquer.Le quartz décelé en abondance dans la fraction fine est il d'origine primaire? -on en trouve aussi dans les marnes - ou secondaire ?On en trouve fréquemment dans les vertisols sur calcaires coralliens en Guadeloupe ? Y a t'il une analogie avec l'abondance de la cristobalite dans les niveaux de formation et de dégradation de la montmorillonite des tufs volcaniques marins, ou aériens.

MAI 1967

PS: Nous exprimons nos remerciements aux agronomes Haitiens du Projet FAO qui nous ont aidés sur le terrain-MM.LOHIER et YOUANCE - et au laboratoire MM.ALEXIS et FENELON.

BIBLIOGRAPHIE

- BROWN (G.) -1961 - The X-Ray identification and crystal structures of clay minerals.  
Minéralogical society London
- BUTTERLIN (J.)-1960-Géologie générale et régionale d'Haïti. Trav. et mém. Inst. Hautes  
Et. Amérique Latine VI - Université - PARIS.
- CAILLERE (S.), HENIN (S.) -1963 - Minéralogie des argiles. Masson.
- COLMET-DAAGE (F.), GUICHARD (E.) - 1965 - Caractéristiques et classification des prin-  
cipaux sols du Val Jaguaribe Etat du Ceara - Brésil. Cah. Pédo. ORSTOM Vol 111  
fasc. 1 pp. 3.20.
- COLMET-DAAGE (F.), LAGACHE (P.) - 1965 - Caractéristiques de quelques groupes de sols  
dérivés de roches volcaniques aux Antilles Françaises. Cah. Pédo. ORSTOM  
Vol 111 fasc. 2 pp. 91-121
- COLMET-DAAGE (F.), DELAUNE (M.) et al. - 1967 - Caractéristiques de quelques sols  
d'Equateur dérivés de cendres volcaniques. Cah. Pédo. Vol V fasc. 1 et 2.
- DELVIGNE (J.) - 1965 - La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique.  
Mém. ORSTOM n° 13.
- FRIPIAT (JJ), GASTUCHE (C.) - 1961 - Réflexion sur les problèmes de synthèses. CNRS  
Colloques Internationaux - n° 105 - pp. 207-210
- GASTUCHE (MC) - 1964 - The octahedral layer - clays and clay minerals - proceedings  
of the 12 th National conference - Atlanta - Georgia - OCT. 1963 - pp. 471 -  
493
- GASTUCHE (MC), HERBILLON (A) - 1962 - Etude des gels d'alumine : cristallisation en mi-  
lieu désionisé. Bull. Soc. Chim. de France - pp. 1404 - 1412.
- GRIM (ER) - 1953 - Clay mineralogy. Mc Graw Hill. London
- HERBILLON (A.), GASTUCHE (C.) - 1962 - Etude des complexes kaolinite-hydroxyde  
d'aluminium - Synthèse et gènes des trihydrates cristallisés. Bull. Gr. Fr.  
des Argiles - XIV CNRS Paris - pp. 77-93.
- KIMPE de (C.), GASTUCHE (MC), BRINDLEY (GW) - 1961 - Ionic coordination in aluminos-  
ilicic gels in relation to clay mineral formation - American mineralogist  
46 - pp. 1370-1388.
- KIMPE de (C), HERBILLON (A), FRIPIAT (JJ) - 1966 - Synthesis of analcite and clay mine-  
rals in relation to the reactivity of the starting materials.  
Proc. International clay conf. 1966 - pp. 109 - 119.
- KIMPE de (C), GASTUCHE (MC), BRINDLEY (GW) - 1964 - Low temperature syntheses of  
kaolin minerals. American mineralogist 49 - pp. 1 - 16.
- LAMOUREUX (M.) - 1965 - Observations sur l'altération des roches calcaires sous climat  
Méditerranéen humide- Liban - Cah. Pédo. ORSTOM Vol. 3 Fasc. 1 - pp. 21-42



MILLOT (G) - 1964 - Géologie des argiles. Masson

PONCELET (GM), BRINDLEY (GW) -1966- Experimental formation of kaolinite from montmorillonite at low temperature .Technical report No 2 Pennsylvaniana State University .Ronéo.

SEGALEN (P) -1965- Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide. Cah. Pédo. Vol 111 fasc 2 pp 149-175 et fasc.3 pp 179-205.

SEGALEN (P) -1966- Etude des produits amorphes des sols à hydroxydes .8pages dactylo

VAN MOORT (JC), de KIMPE (C), HERBILLON (A), FRIPIAT (JJ) -1966- Néosynthèse d'un interstratifié chlorite -montmorillonite à partir des produits d'altération de la montmorillonite . Bull. Soc. Fr. Minér. Crist. LXXXIX pp 89-99.

ZANS (V.A), LEMOINE (RG), ROCH (E) - 1961 - Génése des bauxites caraibes C.R. Ac;Sc; 252 , 3302-3304.

ZANS (V.A) -1952- Bauxites ressources of Jamaica and their développement. Col; Géol. min. res.,3,pp 307-333

et

CAMEZ (T), ROTH (C) -1957- Evolution des minéraux argileux des lehms des environs de Strasbourg. Bull. Serv. Geol. Als: Lor. 10 , pp21-25

CAMEZ (T), LUCAS (J), MILLOT (G) - 1959- Minéraux argileux interstratifiés dans certains sols et leur évolution. Bull. Gr. Fr. Arg. 11, pp.43-47.