

# TIRSIFICATION ET CLASSIFICATION DES VERTISOLS

Apport de l'analyse minéralogique des argiles  
à la connaissance des tirs

C. HESS \* et U. SCHOEN \*

## SOMMAIRE

*Aperçu historique et problèmes de classification des vertisols*  
*Répartition des vertisols dans le monde. Choix du pays d'étude et*  
*de la méthode*  
*Présentation de quelques profils de sols au Maroc*  
*Premières conclusions tirées des résultats*  
*Observations complémentaires, discussion, synthèse et conclusions*  
*Application des résultats à la classification des vertisols*

## Aperçu historique et problèmes de classification des vertisols

Lorsque l'on parle de classification des sols, une discussion animée a existé et existe encore au sujet de la place des sols appelés maintenant le plus souvent « vertisols ». Chaque information précise sur la genèse et la dynamique de ces sols fournit une contribution objective à la discussion.

Nous voudrions montrer ici, en introduction, comment différents

---

\* Laboratoire de minéralogie du sol à l'Institut National de la Recherche Agronomique Rabat (INRA).

Les auteurs, envoyés par l'Institut de Pédologie de l'Université de Göttingen en Allemagne, expriment leur reconnaissance à l'Institut National de la Recherche Agronomique qui leur a donné la possibilité de travailler dans son cadre, ainsi qu'à la Deutsche Forschungsgemeinschaft (Fondation Allemande pour la Recherche) qui leur a attribué des bourses. Ils remercient leurs collègues au Maroc de leur accueil et de leur collaboration.

auteurs sont arrivés à classer ces sols très différemment parce que chacun d'eux partait d'un point de vue différent, à savoir la propriété de ces sols qui lui semblait la plus importante.

Par exemple, le caractère d'hydromorphie a souvent été mis au centre des observations : En 1954, G. BRYSSINE a divisé les sols en sols automorphes et sols hydromorphes [17], en classant les tirs du Maroc avec les hydromorphes. De même AUBERT a décrit les argiles noires tropicales parmi les sols hydromorphes, en les distinguant, certes, des sols à hydromorphie permanente par l'appellation « sols à engorgement temporaire » [5]. Peu après, BRYSSINE subdivisera également en sols à régime aérohydropédique (parmi lesquels se rangeront les tirs) et en sols à régime hydropédique (sols marécageux) [18].

Par contre, en 1956, les tirs seront mis dans la classe des sols calcimorphes par AUBERT et DUCHAUFOR, parce que la dynamique de ces sols est dominée par les ions  $\text{Ca}^{++}$  [6] ; les ions  $\text{Ca}^{++}$  pouvant être remplacés par les ions  $\text{Mg}^{++}$  [85], (on parlera alors de sols calci-magnésimorphes).

Vu l'influence également forte de plusieurs facteurs sur la formation de ces sols, la 7<sup>th</sup> approximation des pédologues des USA propose un « order » à part, l'ordre des « vertisols » [83]. En y apportant quelques modifications (quant à la teneur en argile et en minéraux argileux gonflants) AUBERT intègre les vertisols comme classe nouvelle et réserve ainsi la classe des calco-magnésimorphes aux sols dont la formation est dominée par  $\text{CaCO}_3$  et (ou)  $\text{MgCO}_3$  ou par  $\text{CaSO}_4$  [7]. Mais DUCHAUFOR continue à les considérer comme des calcimorphes, à cause de la dynamique  $\text{Ca}^{++}$  [27, 28]. Cette dynamique de  $\text{Ca}^{++}$  a été décrite sous le nom de « métabolisme du bicarbonate de Calcium » à l'exemple des régurs des Indes [73].

La classification de la Société allemande de pédologie n'entre pas en considération ici, puisqu'elle n'est pas une classification à échelle mondiale et que les vertisols ne se trouvent pas en Allemagne ou seulement à l'état fossile sur de très faibles étendues [57, 58]. En revanche, dans la classification britannique d'AVERY à orientation mondiale, les vertisols ne semblent pas trouver une place bien précise, ils apparaissent avec les sols alluviaux dans lesquels, en introduisant l'hydromorphie comme facteur secondaire, l'attention a été portée sur la teneur en argile du matériau originel comme facteur principal [9]. Retenons tout de suite que la teneur en argile constitue, en effet, un critère important qui fait partie des facteurs déterminant la tirsification. La 7<sup>th</sup> approximation exige 35 % d'argile comme valeur minima pour un vertisol, tandis qu'AUBERT, dans son optique plus pédogénétique, inclut aussi des sols à teneur en argile

plus faible, si par ailleurs leurs conditions de formation correspondent à celles d'un vertisol. C'est pour cela qu'il appelle la 3<sup>e</sup> classe « vertisols et parvertisols ».

Quant à la composition minéralogique de la fraction argileuse, la 7<sup>th</sup> approximation exige la présence de minéraux argileux gonflants, qui a été constatée pour les vertisols par de nombreux auteurs. Ici aussi, AUBERT apporte une modification, afin de ne pas exclure les quelques vertisols sans minéraux montmorillonitiques qui ont été signalés [8]; nous touchons ainsi au problème de savoir si la présence de ces minéraux est, ou n'est pas, un critère indéniable de la formation d'un vertisol.

Pour ce qui est de la couleur, la corrélation généralement admise entre vertisols et couleur noire est remise en question par certains sols rouges, qui sont identiques aux vertisols [56, 64].

La majorité des vertisols se trouve en zone tropicale et subtropicale, mais quelques-uns de ces sols ont été observés en zone tempérée [54, 61] et en zone subéquatoriale [67] sans que leur classification soit toujours sans équivoque. Ainsi se pose la question de savoir si les vertisols sont des sols zonaux ou azonaux.

Nous essayerons d'apporter des éléments complémentaires à la discussion en nous servant de l'analyse minéralogique des argiles pour caractériser le mécanisme de la formation des vertisols.

### Répartition des vertisols dans le monde. Choix du pays d'étude et de la méthode

Dans le cadre d'un programme de recherche, entrepris par l'Institut de pédologie de l'université de Göttingen en Allemagne dans le but de contribuer à la connaissance des lois régissant la formation des sols noirs, on a étudié jusqu'à présent :

- les rendzines [75] et les chernozems [54] en zone tempérée,
- le regur [73] en zone tropicale,

tandis que la présente étude se consacre aux tirs du Maroc, exemple d'une formation de sol en zone subtropicale.

Sans pouvoir citer ici les très nombreux travaux décrivant les vertisols, souvent sous des noms assez divers et des noms locaux \*, nous voudrions attirer seulement l'attention sur la délimitation des vertisols

\* par exemple : grumosol, regur, black cotton soil, margalitic soil, argile noire tropicale, tirs, tierras negras andaluzas, smonitza.

« vrais » par rapport à des sols apparentés, formés dans d'autres conditions, sous d'autres climats, et sur les formes de transition avec ces derniers, car la place des vertisols dans la classification se comprend surtout à partir de ces transitions. Tandis que quelques vertisols limitrophes de la zone tempérée (et y pénétrant) sont déjà étudiés [54, 22, 23, 61], les transitions vers la zone équatoriale semblent relativement peu décrites [51, 52, 67].

Les tirs du Maroc ainsi choisis se trouvent donc en plein dans la zone favorable à la formation des vertisols. Il en est de même pour les vertisols de l'Espagne du Sud (« *tierras negras andaluzas* » ou « *tierras de bujeo* ») [39, 65, 66] et ceux de l'Algérie (« *touares* ») [12, 30, 31], qui présentent des caractères très voisins.

Le terme vernaculaire algérien « *touares* » [38] est le pluriel du terme marocain « *tirs* ». C'est un mot d'arabe dialectal, apparenté sans doute au mot « *tours* » (pluriel : *tourous*) de l'arabe littéraire qui signifie : bouclier, disque, croûte de sol, mais aussi terrain plat grisâtre et plaine aux contours ronds (cuvette)\*. Les paysans marocains désignent par « *tirs* » en général une terre qui est bonne, assez argileuse, de couleur gris-noir, gardant l'humidité pendant la période sèche et la cédant aux plantes, utilisable pour laver et pour enduire les maisons. Or cette appellation non seulement varie de région en région, mais elle est souvent peu précise ; aux Doukkala, par exemple, les paysans appellent « *tirs* », à la fois tous les sols argileux indépendamment de leur couleur, exception faite pour les sols argileux rouges qui portent le nom de *hamri* (*ahmar* = rouge), et tous les sols de couleur foncée et très foncée même s'ils sont de texture moyenne ou légèrement sableuse. En effet, le terme est utilisé dans des régions où il n'y a pas de « *tirs* » au sens pédologique de vertisol [37, 38]. Il en résulte que le terme vernaculaire « *tirs* » dépasse le terme pédologique « *vertisol* ». D'un autre côté, le pédologue cartographe est assez souvent amené à appeler « *vertisol* » un sol qui n'est pas un *tirs* au sens des paysans. Il nous semble donc indiqué de ne plus utiliser le terme de *tirs* comme terme pédologique, mais de le remplacer par « *vertisol* », terme bien défini. Par contre, les termes purement pédologiques (et non vernaculaires) « *tirsifier* » et « *tirsification* » peuvent être conservés, faute de termes qui puissent les remplacer.

Les vertisols du Maroc ont été étudiés depuis longtemps\*\* et différentes méthodes ont été utilisées ; en particulier, les propriétés physiques des *tirs* ont fait l'objet d'une étude approfondie [20]. Par contre, la méthode d'analyse minéralogique des fractions argileuses n'a été que très peu appliquée. C'est pourquoi nous nous sommes tournés, depuis notre arrivée en 1961, vers cette méthode afin de fournir des données complémentaires contribuant à la connaissance des vertisols. Ainsi des spécimens

\* Dictionnaire « *Matin-el-laura* » Beyrouth 1958.

\*\* Un des premiers fut FISCHER [36] ; pour les autres travaux cf. les résumés bibliographiques comme [91, 94].

de la plupart des vertisols des différentes régions du Maroc \* et des sols qu'ils côtoient ont été étudiées par la méthode de diffraction des rayons X et de celle de l'analyse thermique différentielle (ATD) \*\* (150 profils). En plus des résultats publiés ailleurs [43, 44], quelques exemples typiques seront présentés et discutés ici.

## Présentation de quelques profils de sol du Maroc

### 1. Sols noirs sur basalte dans les Zaërs \*\*\*

#### a. Séquence « Rommani »

Il s'agit là d'un sol tirsifié de coteau (« sol rendziniforme ») et d'un tirs de bas-fond, sols qui ont été prélevés au sud de Rommani sur un versant face au mont « El Kelaâ ». Il s'agit de deux sites entre lesquels le degré d'hydromorphie varie en fonction de la topographie : Au piedmont, dans le vallon arrosé par l'oued Ared et par les eaux de ruissellement latéral, un tirs profond à structure prismatique grossière s'est développé, tandis que sur le versant, mieux drainé et plus sec, un sol tirsifié peu profond à structure grumeleuse s'est formé. Le matériau originel est essentiellement le basalte permotriasique altéré, mais on ne peut pas exclure une contamination :

- pour le versant, par des matériaux miocènes en provenance du haut niveau dont on trouve des témoins dans toute la région,
- pour le bas-fond, en plus de cela, par des alluvions issues des schistes et quartzites du Primaire.

Enseignements tirés de l'analyse minéralogique de la fraction argileuse (TAB. 1).

L'altération météorique décompose les minéraux du basalte, instables dans les conditions météoriques, à savoir olivine (O), augite (Au) et feldspath (plagioclase, Plag). En même temps, la montmorillonite (M), minéral argileux en équilibre avec le milieu du sol, se cristallise à partir des solutions de décomposition. Tandis que, dans le basalte altéré et remanié (N° 509), olivine et augite sont déjà complètement décomposées dans la fraction argileuse, des restes de plagioclase subsistent. Sur le versant, décalcarié, la calcite a disparu. La kaolinite (K) est présente dans les deux sols, mais en très faibles teneurs ; elle n'est pas néoformée comme la montmorillonite (M), mais un héritage, sans doute du matériau miocène. Chlorite (C) et interstratifiés (interss 2:1) pourraient être également un héritage, mais leur présence déjà dans le basalte altéré fait penser à une faible néoformation de chlorite (C) en même temps que celle de la montmorillonite (M). En effet, l'offre en ions  $Mg^{++}$  est importante, causée par la décomposition d'olivine et d'augite, minéraux riches en Mg, ce qui pourrait provoquer, par la constitution de feuillets brucitiques ( $Mg_3(OH)_6$ ) entre les feuillets montmorillonitiques, une apparition de chlorite. Les interstratifiés chlorite-montmorillonite (C-M) reflèteraient alors les stades intermédiaires.

\* Pour la répartition des vertisols au Maroc, voir [93].

\*\* La partie méthodologique a fait l'objet d'une publication à part [63] ; nous rappelons que les résultats de toutes les analyses retenus dans cet article ne concernent que la fraction argileuse des échantillons, précision que nous ne répèterons pas pour ne pas alourdir le texte.

\*\*\* Pour une présentation plus complète des sols des Zaërs voir [89].

La tirsification s'est donc produite dans un matériau riche en M et ceci est surtout important pour le tirs de coteau dans lequel la forte capacité de rétention d'eau de M peut compenser, dans une certaine mesure, le manque d'hydromorphie topographique.

b. Tirs de plateau très noir « Bled el Mouad »

Il s'agit d'un vertisol très profond et très bien développé, situé sur un plateau qui correspond au niveau de la transgression moghrebiennne. La marne moghrebiennne a presque entièrement disparu et se trouve, sous forme de contamination, mêlée au basalte décomposé qui lui est sousjacent. Les différents éléments du matériau originel de ce sol ont été séparés au laboratoire : des morceaux de basalte altéré, le remplissage des alvéoles contenues dans le basalte, constitué par de l'olivine décomposée, enfin des morceaux de marne moghrebiennne.

L'analyse minéralogique de la fraction argileuse (TABLEAU 1) détecte :

- dans le basalte altéré, encore les traces des minéraux primaires ; leurs quantités correspondant à l'instabilité décroissante allant dans le sens  $O > Au > Plag$  ;
  - dans les alvéoles, O a déjà totalement disparu ; un minéral micacé s'est formé, minéral qui est probablement de la séladonite (Se) qui se rencontre dans les alvéoles des basaltes et provient de l'altération de l'olivine [45] \*.
- Ici encore, la présence de C et des interstratifiés (C-M), qui ne peuvent pas être un héritage, font envisager une faible néoformation de C accompagnant la néoformation massive de M ;
- dans la marne moghrebiennne dont la composition correspond assez étroitement à celle du produit d'altération du basalte, nous voyons d'autres minéraux faiblement présents : illite (I), kaolinite (K), calcite et quartz (Q) ;
  - dans le sol, M a encore augmenté par rapport à la moyenne des matériaux originels. Les fournisseurs de cet apport furent les minéraux primaires (qui ont disparu en ne laissant que des traces de plagioclase), mais aussi C et les interstratifiés (C-M).

La tirsification se greffe donc sur un matériau presque entièrement composé de M.

c. Rendzine « Maaziz »

Cette rendzine, que nous comparerons aux tirs précédents, s'est formée à partir de basalte, sur la croupe du Jbel « Bir Izem », à l'Ouest de Maaziz, entre l'oued Grou et l'oued Bou Regreg ; mais on ne peut pas exclure une contamination venant du Miocène, qui, aujourd'hui érodé, a recouvert autrefois le basalte.

Un horizon A peu profond : une structure grumeleuse bien drainante et un dessèchement rapide après l'humectation sont les caractéristiques de ce sol.

L'analyse minéralogique de la fraction argileuse montre des teneurs en M identiques pour le matériau originel et pour le sol. L'augmentation des interstratifiés et la diminution de C s'expliqueraient de la façon suivante : les couches brucitiques complètes ( $Mg_3(OH)_6$ ) de la chlorite, néoformée dans la roche-mère altérée, se décomposent partiellement, se « déplètent », ce qui donne lieu à des interstratifications du type C-M. La calcite peut être ou bien néoformée lors de l'altération météorique, ou bien un héritage du Miocène, comme K et Q.

\* Ce minéral (Seladonit en allemand) est identique à la glauconite ; en français on écrit le plus souvent céladonite.

TABLEAU 1\* — Sols noirs sur basalte dans les Zaïers

Séquence « Rommani » - Rommani (Marchand) \*\* 388,15 - 324,15  
387,85 - 342,35

	I	C	V	M	inters 2:1	K	A	calcaie	Q	O <sup>11</sup>	Au <sup>11</sup>	Plag <sup>11</sup>	Se <sup>11</sup>
508 <sup>21</sup> Tirs de bas-fond 50 cm	abs	ff	abs	F	f	ff	abs	ff	ff	abs	abs	Tr	abs
509 Basalte altéré avec contaminations 120 cm	abs	ff	abs	F	ff	abs	abs	f	abs	abs	abs	Tr	abs
510 Sol tirsifié de coteau 50 Sol rendzini-forme 20 cm <sup>21</sup>	abs	ff	abs	F	ff	ff	abs	abs	ff	abs	Tr	ff	abs

RW 10<sup>31</sup>: Tirs de plateau très noir « Bled el Moutad »  
Ben Slimane (Boulhaut) 341,97 - 324,72

220 <sup>21</sup> Tirs 20-65 cm	abs	Tr	abs	F	ff	ff	abs	abs	f	abs	abs	Tr	abs
219 Base du Tirs 80-90 cm	abs	Tr	abs	F	ff	Tr	abs	nd	nd	abs	nd	nd	abs
218 Marne maghrébienne	Tr	Tr	abs	F	ff	Tr	abs	ff	ff	abs	abs	abs	abs
217b Alvéoles d'olivine décomposée	abs	ff	abs	mF	f	abs	mf						
217a Basalte altéré	abs	ff	abs	m	f	abs	abs	abs	abs	Tr	ff	f	abs

RW 56<sup>31</sup>: Rendzine « Maaziz ».  
Teddars 403,4 - 343,35

513 <sup>21</sup> Rendzine 20 cm	abs	Tr	abs	F	f	Tr	abs	f	ff	abs	abs	abs	abs
224 Horizon de transition 30 cm	abs	ff	abs	F	f	Tr	abs	nd	nd	abs	abs	abs	abs
514 Basalte altéré avec contaminations 85 cm	abs	ff	abs	F	ff	Tr	abs	f	abs	abs	abs	abs	abs

\* pour les méthodes, les définitions des minéraux et les abréviations voir [63].

Nous rappelons les abréviations suivantes:

I = illite M = montmorillonite ou minéraux montmorillonitiques,  
C = chlorite les deux termes sont employés indifféremment.  
V = vermiculite

\*\*\*

inters 2:1 = interstratifications des minéraux du groupe Te: Oc = 2:1, lesquels sont: I, C, V et M. Dans la présentation de nos résultats, nous n'avons pas spécifié ces interstratifications entre I, C, V et M, comme C-M, V-M, etc.

K = kaolinite S = sépiolite  
A = attapulgite, = palygorskite (P) Q = quartz

abs = absent mF = moyen fort  
Tr = traces F = fort  
ff = très faible FF = prédominance  
f = faible nd = non déterminé  
mf = moyen faible

Dans la présentation des résultats, l'épaisseur des colonnes est fonction des teneurs en minéraux.

\*\* carte topographique du Maroc au 50 000<sup>e</sup>.

\*\*\* les filets gras séparent deux emplacements différents à l'intérieur d'une série.

- 1) O = olivine, Au = augite, Plag = plagioclase, Se = séladonite
- 2) enregistrement du laboratoire de minéralogie du sol (INRA)
- 3) enregistrement du service de la cartographie des sols (INRA)

## 2. Tirs profond « Ben Slimane »

Ce profil (situé en bordure d'une petite carrière, au SE de Ben Slimane, sur la route allant à Sidi Bettache) de formation complexe, est un tirs qui s'est essentiellement développé sur marne moghrebienne, mais il contient aussi des éléments d'apports très divers. La teneur en argile, qui diminue du bas (74 %) (analyse effectuée après décalcarisation) vers le haut (44 %) est le reflet de cette formation complexe.

L'horizon A montre une structure polyédrique sur les 10 premiers cm ; au-dessous se trouve l'horizon à structure prismatique grossière ; un faible horizon à structure en lentilles représente la transition vers l'horizon C, à savoir un limon calcaire à taches et granules. Le profil est décalcarisé jusqu'à 60 cm de profondeur [89].

TABLEAU 2 — RW 8<sup>1)</sup> : Tirs profond « Ben Slimane »  
Ben Slimane (Boulhaut) 347,95 - 330,32

	I	C	V	M	interss 2:1	K	A	calcite	Q
Tirs profond 515 40 cm	Tr	ff	abs	F	f	f	Tr	abs	f
Marne moghrebienne 516 110 cm	Tr	ff	abs	mF	mf	ff	ff	mf	ff

1) voir [89]

La fraction argileuse du substratum (TABLEAU 2) montre une composition assez proche de la marne moghrebienne du tirs « Bled el Mouad ». Il y a en plus une faible teneur en attapulgite (A) qui disparaît dans le sol, en ne laissant que des traces ; les interstratifiés (interss) diminuent également. M augmente, au dépens de A et des interss. Les teneurs plus élevées en kaolinite (K) et en quartz (Q) dans le sol seraient des témoins d'un apport, venant, par exemple, des roches du Primaire, schistes et quartzites. L'interprétation des résultats minéralogiques n'est qu'approximative, à cause de la complexité du profil. Retenons surtout la forte teneur en M du matériau qui a subi la tirsification.

## 3. Séquence « Khénichet-sur-Ouergha »

Il s'agit là d'une rendzine, d'un tirs très noir de coteau et d'un tirs très noir de bas-fond, trois sols qui se sont formés sur le versant de la colline « El Moghra » (côte 155) au N.-O. de Khénichet [64]. Le développement de la tirsification va croissant du haut vers le bas de la colline. En descendant la pente, l'augmentation de l'humidité dans le profil s'accompagne d'une décarbonatation progressive :

- le sommet porte une rendzine peu profonde à structure grumeleuse,
- au milieu du versant la rendzine a cédé la place à un tirs de coteau, très noir et assez profond,
- au piedmont un tirs de bas-fond très noir et à structure très grossière s'est formé.

Tableau 3 — Séquence « Khénichet-sur-Ouergha »

Khénichet - S-O 470,50 - 429,40  
 470,30 - 429,55  
 470,05 - 429,55

	I	C	V	M	interss 2:1	K	A	S	calcite	Q
KH3 <sup>1)</sup> Tirs de bas-fond 490 très noir 55cm	abs	ff	abs	F	f	ff	Tr	abs	abs	f
KH4 <sup>1)</sup> Tirs de coteau 489 très noir 25cm	abs	ff	abs	mF	mf	abs	m	Tr	f	ff
Marne d'Eocène 521 altérée 75cm	abs	ff	abs	mF	f	abs	mF	Tr	mf	ff
KH1 <sup>1)</sup> Rendzine 488 20cm	abs	f	ff	m	f	abs	mF	ff	mf	ff
Marne d'Eocène 520 60cm	abs	f	ff	m	f	abs	mF	ff	mf	ff

\*\*\*

\*\*\*

1) voir [64]

La roche-mère est une « marne blanche à silex » de l'Eocène, riche en argile, mais perméable et résistant à l'érosion ; au piedmont, les colluvions de la marne se superposent aux alluvions de la terrasse ancienne de l'Ouergha ; à la hauteur du prélèvement dans le profil du bas, le matériau original est donc un mélange entre colluvions marneuses et alluvions de la terrasse.

L'analyse minéralogique (TABLEAU 3) des argiles de cette séquence, qui ont manifestement la même origine, mis à part l'apport faible des alluvions, révèle, en allant du haut vers le bas de la colline, une évolution progressive des minéraux :

- calcite diminue et disparaît, accompagnant ainsi la décarbonatation,
- attapulgite (A) et sépiolite (S), minéraux très peu stables, diminuent ou disparaissent,
- chlorite (C) et vermiculite (V) se transforment en M, en passant par les interstratifiés que nous voyons augmentés dans le tirs de coteau,
- M augmente aux dépens de A, S, C, V et des interss,
- kaolinite (K) est un héritage contenu dans les alluvions de l'Ouergha,
- quartz (Q), déjà présent dans la roche-mère, est augmenté par les alluvions.

On constate, dans le cas de la rendzine, que les conditions de sécheresse et de rajeunissement par l'érosion ne permettent pas l'évolution des minéraux argileux ; la composition de la fraction argileuse de la roche-mère et du sol est la même. Par contre, l'hydromorphie sur le versant, qui conduit au tirs, a déjà altéré la marne sous-jacente et a modifié son propre cortège de minéraux argileux.

#### 4. Séquence « Sidi Slimane » (Gharb)

La séquence se trouve au N-E de Sidi-Slimane entre l'Oued Beth et l'Oued El Hamma. L'Oued Beth, qui s'est creusé un lit assez profond dans ses propres dépôts, exerce un drainage qui va en diminuant à mesure qu'on s'éloigne de ses berges. Cet effet est accentué par la topographie : le bourrelet du Beth est surélevé ; ce qui fait que le caractère d'hydromorphie va grandissant pour les profils de la séquence, en direction Ouest-Est. Cette Hydro-séquence, qui, en partie, dans un autre contexte a déjà fait l'objet d'une description détaillée [16, 20] a été choisie afin de montrer l'influence de la variation des conditions hydriques sur la pédogenèse.

W OUED BETH		Terrasse soltanienne			E OUED EL HAMMA
enterré par le dess du Beth		non enterré		Terrasse rharbienne	
matériau originel non rubéfié	horizon rubé- fié (sol châ- tain enterré)	sol châtain (hamri)	sol châtain tirsifié (tirs brun)	tirs brun-noir	tirs noir *

\* appellations d'après PUJOS et DIVOUX [68].

Les sols châtains : le premier, enterré, a été prélevé dans la coupe naturelle du Beth à la sortie nord de Sidi-Slimane (coupe indiquée sur la « carte des sols du Gharb » de DIVOUX [68], le second sur l'ancienne Station expérimentale. Les deux emplacements sont en dehors de la zone de stagnation d'eau : les sols ne sont pas tirsifiés et gardent leur couleur d'origine.

Les deux sols à tirsification sur matériau rubéfié se trouvent également sur l'ancienne Station expérimentale : en allant vers la plaine située légèrement plus bas, la tirsification s'est surimposée de plus en plus à l'ancien hamri provoquant ainsi un noircissement.

Enfin, le tirs noir, formé sur la terrasse rharbienne de l'Oued El Hamma, subit, lors des inondations de l'hiver, une période d'hydromorphie plus prolongée que les autres sols de la série.

L'analyse minéralogique de la fraction argileuse nous donne les renseignements suivants (TABLEAU 4) :

M est présente partout en assez fortes quantités déjà dans le matériau originel ; mais le dépôt du Rharbien en contient moins que les dépôts du Soltanien. La tendance d'évolution, allant vers l'augmentation de M au dépens de C, reste au stade des interstratifications (C-M). Dans les quatre formations rubéfiées, le degré de cristallinité des minéraux 2:1 est diminué en haut du profil, là où la rubéfaction est la plus forte, mais les teneurs en K restent inchangées lors de cette dégradation. Les teneurs identiques, à l'intérieur des profils, en I, K et Q qui sont des minéraux stables pouvant servir de traceurs [43], font penser que cette rubéfaction, accompagnée de la dégradation des minéraux, s'est produite sur place ; à moins qu'il ne s'agisse, cas peu probable, de deux apports venant exactement de la même origine dans les montagnes, le premier érodé sans avoir subi une pédogenèse, le deuxième étant un sol rouge érodé.

TABLEAU 4 — Séquence « Sidi Slimane »

Sidi Slimane 452,52 - 407,66 (B 155)  
 452,67 - 407,50 (B 153)  
 453,01 - 407,05 (B 152)  
 456,17 - 408,56 (B 9)

	I	C	V	M	interss 2:1	K	A	calcite	Q	
B9 <sup>1)</sup> Tirs noir 487 60cm	ff	mf	abs	m	mf	f	abs	f	ff	***
486 Tirs brun noir B152 <sup>2)</sup> 45cm	f	f	abs	mF	mf	f	abs	abs	ff	
308 160-170 cm	f	mf	abs	mF	f	f	abs	abs	ff	***
485 Sol châtain tirsifié B153 <sup>2)</sup> 30cm	f	f	abs	mF	mf	f	abs	abs	ff	
519 110 cm	f	mf	abs	mF	f	f	abs	Tr	ff	***
484 Sol châtain B155 <sup>2)</sup> 35cm	f	ff	abs	mF	mf	f	abs	abs	ff	
311 115-140 cm	f	f	abs	mF	f	f	abs	f	ff	***
380 Soltanien rubéfié	mf	mf	abs	mF	f	f	abs	nd	ff	
379 Soltanien non rubéfié	mf	mf	abs	mF	f	f	abs	nd	ff	

1) voir [20]

2) voir [16]

Dans la partie supérieure des trois profils prélevés sur l'ancienne Station expérimentale, les teneurs en argile (déterminées après décarbonatation) sont les mêmes, elles sont de l'ordre de 60 %. Or, tandis que dans le sol tirsifié et dans le tirs cette teneur est la même pour tout le profil, dans le hamri l'argile a augmenté par rapport à son sous-sol. Aussi doit-on constater une augmentation de M dans le hamri, bien que la teneur relative en M des fractions argileuses (mF) soit la même ; car la teneur absolue en M a augmenté, puisque les fractions plus grossières, dans lesquelles l'argilification a puisé, ne contiennent pas de M.

La transformation de C en C-M libère des ions  $Mg^{++}$ , qui sont adsorbés par

l'argile. En effet, nous constatons [16] une assez forte proportion de  $Mg^{++}$  parmi les ions échangeables adsorbés par le sol (complexe absorbant) mais, fait caractéristique et souvent observé ailleurs dans les profils de tirs, la proportion en  $Mg^{++}$  en bas du profil est plus forte. A titre d'exemple :

	HAMRI (B 155)		TIRS BRUN-NOIR (B 152)	
	Ca	Mg	Ca	Mg
Haut du profil	75 *	20	60	35
Bas du profil	55	40	35	55

\* Résultats exprimés en % du total des ions échangeables.

La libération de  $Mg^{++}$  lors de la transformation de C en C-M \* et un lessivage différentiel dû à l'hydratation plus forte des ions  $Mg^{++}$  par rapport aux ions  $Ca^{++}$  [76] pourraient expliquer ce phénomène.

##### 5. Séquence « Sidi Bennour » (Doukkala)

Il s'agit là d'un sol châtain tirsifié, d'un sol tirsifié profond et d'un sol hydromorphe \*\*, sols sur matériau salétien argileux qui ont été prélevés à l'Ouest de Sidi Bennour [92] et qui forment une hydro-séquence, dans laquelle les variations des conditions hydriques sont moins le résultat de la topographie de la surface (les trois sols, séparés par de très faibles distances, se sont formés dans la plaine) que de la profondeur différente à laquelle se trouve la croûte calcaire ; il s'agit donc d'un relief souterrain. C'est ainsi que sous le châtain tirsifié le substratum argileux est moins épais que sous les deux autres sols ; ceci est important, car pendant la saison des pluies, le caractère d'hydromorphie de ces sols en Doukkala n'est pas provoqué par la nappe phréatique, mais par la capacité de rétention d'eau du sol et de son substratum. Voici quelques teneurs en argile (après décarbonatation) :

	SOL CHÂTAIN TIRSIFIÉ	SOL TIRSIFIÉ PROFOND	SOL HYDROMORPHE
haut du profil	43	25	25
bas du profil	62	25	41

La composition minéralogique (TABLEAU 5) semble refléter une évolution de l'argile :

— dans les sols tirsifiés, C se transforme en M ou en interss.

\* Les chlorites contiennent plus de Mg que les montmorillonites, voir, par exemple, les résultats d'analyse cités dans [45].

\*\* appellations d'après WILBERT [90, 92].

TABLEAU 5 — « Sidi Bennour » (Doukkala)

Sidi Bennour <sup>1)</sup> 209,6 - 234,02  
 208,9 - 234,41  
 208,6 - 234,38

	I	C	V	M	interss 2:1	K	A	calcite	Q
499 <sup>3)</sup> Sol hydromorphe 20 cm	mf	ff	abs	f	ff	f	abs	f	f
L261 <sup>2)</sup> — 527 Salétien argileux encroûté 90 cm	mf	ff	ff	abs	f	f	abs	abs	f
501 Sol tirsifié profond 30 cm	mf	ff	abs	m	f	f	abs	abs	f
L268 — 529 Salétien argileux 130 cm	mf	f	abs	mf	f	f	abs	ff	f
500 Sol châtain tirsifié 30 cm	f	ff	abs	mf	mf	f	abs	abs	f
L267 — 528 Salétien argileux encroûté 100 cm	f	f	abs	mf	f	f	abs	f	f

\*\*\*

\*\*\*

<sup>1)</sup> carte des sols Abda-Doukkala, 1:100 000 [92]

<sup>2)</sup> enregistrement de la cartographie des sols (INRA)

<sup>3)</sup> enregistrement du laboratoire de minéralogie du sol (INRA)

— dans le bas du sol hydromorphe, V remplace M. Ceci pourrait être une transformation de M en V, dans laquelle une couche d'ions  $Mg^{++}$  hydratés est constituée entre les feuillets de M, empêchant le gonflement de celle-ci. En effet,  $Mg^{++}$ , libéré ailleurs par l'évolution  $C \rightarrow C-M \rightarrow M$ , pourrait se concentrer dans les sites hydromorphes et créer des conditions semblables aux conditions marines. Or, ces dernières sont caractérisées par une évolution de l'argile qui est l'inverse de celle dans les sols :  $M \rightarrow M-V \rightarrow V \rightarrow V-C \rightarrow C$  ; il s'agit donc d'une « complétion » : des couches magnésiennes se constituent entre les feuillets de M ; (par contre, dans les sols, nous assistons à une « déplétion » c'est-à-dire que des couches magnésiennes se décomposent).

— dans le haut du sol hydromorphe, subissant une évolution normale pendant les périodes non-hydromorphes, M se serait reconstituée à partir de V et des interss V-M.

Retenons, pour toute la séquence, les teneurs en M nettement plus faibles, en comparaison avec les séquences précédentes.

Rappelons également que l'état de M du « Sol tirsifié profond », relativement peu argileux, est différent de celui du « sol châtain tirsifié » : dans ce dernier, les feuillets de M semblent être mieux orientés (voir à ce sujet les remarques méthodologiques [63]).

## 6. Paravertisol « Doukkala »

Dans le profil de ce sol, qualifié de « paravertisol peu typique » par le pédologue cartographe \*, un horizon noir, tirsifié, d'âge rharbien (échantillons n° 323 et 324) repose sur un horizon rougeâtre, qui pourrait être considéré comme le matériau parental ; à 140 cm un sable grossier, datant du Soltanien. Voici quelques résultats d'analyse intéressant notre contexte :

	ARGILE %	LIMON %	SABLE FIN %	SABLE GROSSIER %	CaCO <sub>3</sub> %	CEC * méq/100 g	pH
N° 324	23	12	37	23	1,3	13,4	7,6
323	30	10	25	29	1,1	13,6	7,5
322	32	8	26	28	1,6	14,9	7,85
321	18	7	31	40	2,4	6,6	8,2

\* C E C : capacité d'échange de cations.

Par contre, l'analyse minéralogique (TABLEAU 6) indique une discontinuité entre l'horizon rougeâtre et le vertisol : il y a disparition de la faible teneur en M, cependant, il y a plus d'interstratifiés, mais sans interstratification avec M.

M, C, V, et interss sont très mal cristallisés ; de ce fait leur détermination est peu certaine, de sorte que d'autres analyses, faites antérieurement, ont pu

TABLEAU 6 — L 274<sup>1)</sup>. Paravertisol

x = 181,000  
Doukkala : y = 212,000  
z = 164 m

	I	C	V	M	interss 2:1	K	A	calcite	Q	G
324 <sup>2)</sup> 0-5 cm	m	Tr	ff	abs	mf	ff	abs	nd	f	abs
323 30 cm	m	Tr	ff	abs	mf	f	abs	nd	f	nd
322 Horizon rougeâtre 80 cm	m	Tr	ff	f	f	f	abs	nd	f	nd
321 Sable grossier 140 cm	m	Tr	ff	f	f	f	Tr	nd	f	Tr

1) enregistrement de la cartographie des sols (INRA)

2) enregistrement du laboratoire de minéralogie du sol (INRA)

\* Communication verbale de J. WILBERT.

indiquer « absence de M », mais présence de traces de « minéraux gonflants » dans les 2 horizons inférieurs.

Les capacités d'échange de cations assez élevées, de l'ordre de 45 méq/100 gr de la fraction argileuse pour l'horizon de 30 cm, montrent qu'il doit y avoir, en plus de l'illite, des minéraux à capacité d'échange élevée : V, les interss et C ; nous pourrions même avoir affaire à une montmorillonite si dégradée et mal cristallisée qu'elle échappe à l'analyse minéralogique, sans pour autant cesser d'exercer une capacité d'échange [63].

Retenons qu'il y a ici une présence d'illite importante (plus forte que dans tous les autres profils présentés), mais aussi d'autres minéraux 2:1 qui sont très mal cristallisés, héritage d'une évolution intense de l'argile antérieure au Rharbien et sans doute aussi au Soltanien.

### 7. Sables noirs du Gharb

Ces sols ont été prélevés dans la région côtière, caractérisée par des dépressions plus ou moins grandes (merja et daya) entre les cordons des différents systèmes dunaires.

a) Les sols de la séquence « daya route côtière » se trouvent à l'Est du km 16,1 de la route côtière, allant de Kénitra à Sidi Allal Tazi. La dépression est assez fréquemment inondée en hiver. Au point de vue conditions de formation, le « sol sableux tirsifié » (Dht<sup>1</sup>) \* correspond, en quelque sorte, à un tirs de bas-fond ; le « sol sableux peu tirsifié » (Dht<sup>2</sup>) \*\*, sur le versant de la dune, correspond, lui, à un tirs de coteau ; le versant est décalcarisé, le bas-fond calcaire.

TABLEAU 7 — Sables noirs du Gharb

#### a) Séquence « daya route côtière »

	I	C	V	M	interss 2:1	K	A	calcite	Q
5a <sup>2)</sup> Sol sableux tirsifié B 279 <sup>1)</sup> 14 - 28 cm	ff	ff	abs	F	f	f	abs	f	Tr
5 <sup>2)</sup> Sol sableux peu tirsifié B 280 <sup>1)</sup> 14 - 26 cm	ff	ff	abs	F	f	f	Tr	abs	f

\*\*\*

#### b) Sol de daya « Bir Rami » (Kénitra)

507 <sup>2)</sup> Sable brun-noir "Bir_Rami"	Tr	ff	abs	mf	mf	f	abs	nd	nd
--	----	----	-----	----	----	---	-----	----	----

1) voir [19]

2) enregistrement du laboratoire de minéralogie du sol (INRA)

\* Appellations d'après PUJOS et DIVOUX [68].

\*\* Ces deux sols sont décrits dans [19].

b) Le « sable brun-noir » de la daya Bir Rami (prélevé dans la roseraie de R. BLEULER) est comparable au « sol sableux tirsifié », mais grâce à un canal de drainage, la daya n'est plus inondée.

Dans les deux cas, il s'agit d'un matériau, provenant de dunes anciennes, plus ou moins rubéfié, sur lequel une tirsification s'est greffée ; elle est plus forte dans les bas-fonds que sur les versants. Les teneurs en argile sont faibles : 14 % sur le versant, 21 % dans le bas-fond (« daya route côtière »). La couleur de ces sols est gris-brun à gris-foncé, la structure est particulière, avec un léger début de structure prismatique. Nous avons affaire à des sols qui sont proches des « taougue »\* ; ceux-ci étant des sols sableux noirs assez humifères, recherchés pour leur fertilité et leur facilité de travail.

L'analyse minéralogique (TABLEAU 7) révèle des teneurs considérables en M ; dans « Bir Rami », la teneur moins forte en M est compensée par plus d'interss. La composition de la fraction argileuse est tout à fait comparable à celle des vertisols présentés plus haut.

### Premières conclusions tirées des résultats

Passons maintenant en revue les sols présentés en portant notre attention sur les facteurs susceptibles de provoquer la formation d'un vertisol\*\*. Ces facteurs doivent être les mêmes pour la tirsification du passé géologique que pour celle de l'actuel. Parmi les cas présentés, il y a des tirsifications fossiles et récentes, mais la datation exacte est le plus souvent très difficile et ne fait pas l'objet de cet article. La possibilité de tirsifications très anciennes, remontant jusqu'au Tertiaire, a été mise en évidence [44].

#### 1. Présence de « argile gonflante » (surtout M)\*\*\*

##### a. Les sols noirs sur basalte dans les Zaërs :

M présente partout en forte quantité, entièrement néoformée\*\*\*\* à partir des minéraux du basalte ; la tirsification se greffe sur M en voie de formation, donc sur des surfaces fraîches.

##### b. Tirs profond « Ben Slimane » :

La présence de M en forte quantité est le résultat d'un héritage\*\*\*\*

\* D'après le « dictionnaire français-arabe » de H. MERCIER, Rabat 1959, (marocain dialectal) : « tugi » = « terres d'alluvion palustre ».

\*\* cf. aussi [43], où le jeu de ces facteurs a déjà été évoqué.

\*\*\* Nous mettrons entre guillemets l'appellation abrégée de chacun de ces facteurs : « argile gonflante », « teneur en argile », « dynamique de Ca », etc.

\*\*\*\* Nous parlons d'« héritage » lorsqu'un minéral est hérité du matériau originel en gardant son identité d'espèce minéralogique.

Nous parlons de « néoformation » lorsqu'un réseau nouveau se cristallise à partir de solutions.

Nous parlons de « transformation » lorsqu'une nouvelle espèce minéralogique se forme par des modifications à l'intérieur des réseaux cristallins, sans que leur schéma de base soit touché. Ce terme s'applique ici uniquement aux transformations de minéraux argileux du type  $Te : Oc = 2:1$ .

important, provenant des marnes moghrebiennes, qui a été augmenté par une néoformation à partir de A et par une transformation à partir des interstratifiés.

c. Séquence « Khénichet-sur-Ouergha » :

L'héritage de M en quantité moyenne est renforcé par une néoformation de M à partir de A et de S. Seulement M néoformée possède des surfaces entièrement fraîches. Plus il y a de M, mieux le tirs est développé.

d. Séquence « Sidi Slimane »

Les teneurs moyen-fort en M sont le produit d'un héritage qui a été augmenté par transformation à partir de C (stade des interstratifiés). Les surfaces de M sont vieilles : nous sommes sur terrasse soltannienne rubéfiée ; il y avait donc revêtement des surfaces de M par des hydroxydes de Fer. La tirsification se greffe ainsi sur un matériau rubéfié.

Dans le « tirs noir » qui est sur terrasse rharbienne, il y a moins de M et absence de rubéfaction, mais les surfaces peuvent quand même avoir vieilli au cours de l'érosion et de la mise en place.

e. Séquence « Sidi Bennour » (Doukkala) :

M se trouve en quantités assez faibles, augmentées légèrement par transformation. Dans les deux sols tirsifiés, les teneurs en M sont plus importantes que dans le sol hydromorphe.

f. Paravertisol « Doukkala » :

Dans les horizons tirsifiés du profil, M est absente, et même parmi les interstratifiés, présents en quantité assez importante, les interstratifications avec M ne semblent pas figurer.

g. Sables noirs du Gharb :

Dans la séquence « daya route côtière » il y a forte teneur en M ; à Bir Rami la teneur en M est plus faible, mais elle est renforcée par la présence importante des interstratifiés.

Exception faite pour le « paravertisol » où il n'y a pas de M, mais d'autres minéraux 2:1, possédant une capacité d'échange de cations considérable malgré leur très mauvaise cristallinité, nous constatons que tous les sols se sont formés soit à partir d'un matériau originel qui contient déjà M, soit à partir d'un matériau d'altération d'une roche-mère dans lequel M s'est formée au cours de cette altération.

Ceci nous fait dire que la tirsification suit, pas à pas, les matériaux originels riches en M, à condition, certes, que les autres facteurs soient suffisamment représentés.

Déjà DEL VILLAR a observé que les vertisols en Andalousie suivent la bande des marnes tertiaires en bordure Sud du bassin du Guadalquivir [88]. Or, ces marnes possèdent une forte teneur en M [66].

## 2. « Teneur en argile »

La teneur en argile (fraction inférieure à  $2 \mu$ ) de la majorité des sols est supérieure à 35 %, limite inférieure pour les vertisols établie par la 7th approximation [83] ; retenons cependant les exceptions :

- deux parmi les sols tirsifiés : le « paravertisol » [23 et 30 %] et le « sol tirsifié profond » de la séquence « Sidi Bennour » (25 %) ; dans ce dernier non seulement une importante profondeur du profil, mais aussi une teneur en M plus forte que chez les autres sols de la séquence, contrebalançant cette déficience en teneur d'argile,
- le sol hydromorphe de « Sidi Bennour » (25 %),
- les « sables noirs » du Gharb (14 et 21 %).

## 3. Présence d'ions $Ca^{++}$ et (ou) $Mg^{++}$ — « dynamique du $Ca^{++}$ » \*

Les vertisols présentés sont calcaires ou non-calcaires, la présence de  $CaCO_3$  ne semble donc pas avoir un rôle spécifique. Par contre, le « complexe absorbant » de tous est dominé par  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  ; citons, à titre d'exemple, le sol châtain de Sidi Slimane : 95 % de son complexe absorbant sont occupés par  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$ . Ces deux ions sont fournis par la décomposition des minéraux primaires riches en  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  lors de l'altération météorique des roches-mères :

- olivine, augite et plagioclase dans les sols sur basalte,
- attapulgite et sépiolite dans certains sols sur marnes,
- chlorite, minéral presque omniprésent, influant toutes les pédogèneses,
- calcite et dolomie dans les sols sur matériau calcaire et dolomitique,
- biotite et phlogopite dont la décomposition est observée seulement par les méthodes minéralogiques optiques qui étudient les fractions grossières ; car l'illite des fractions argileuses, produit de l'altération des micas, n'évolue plus dans le cas de nos sols.

Sur les pentes, en général,  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$  sont fournis directement par l'altération des minéraux ; dans les bas-fonds, en plus de l'altération directe, les apports latéraux d'eaux de ruissellement chargées d'alcalino-terreux surajoutent ces éléments.

---

\* En abrégant « dynamique du  $Ca^{++}$  » nous pensons toujours à la dynamique du  $Ca^{++}$  et du  $Mg^{++}$ .

#### 4. « profondeur suffisante » et « nature du substratum » :

Dans les vertisols, la profondeur du profil est le plus souvent considérable ; mais elle diminue, lorsque le sol se trouve sur un versant. C'est ainsi que les tirs de coteau constituent une transition vers les rendzines qui sont généralement peu épaisses. En effet, pour le « sol tirsifié » (« sol rendziniforme ») de Rommani et le « tirs de coteau très noir » de Khénichet, il est étonnant que dans ces sols relativement peu profonds une tirsification puisse avoir lieu. Ceci s'explique par le fait que cette « carence » du facteur « profondeur suffisante » est compensée par l'optimum d'autres facteurs (en particulier « argile gonflante » et « teneur en argile »).

Pour le « sol châtain tirsifié » de Sidi Bennour, on s'attendrait également à le trouver en dehors du domaine de la tirsification, vu le manque de profondeur du profil. Cependant, il est nettement argileux (43 %) et, surtout, il repose sur un substratum déjà argileux ce qui le rapproche beaucoup d'un vertisol, car un substratum à forte rétention d'eau peut compenser, dans une certaine mesure, une profondeur qui fait défaut.

Nous constatons donc que la formation d'un vertisol est déterminée, non seulement par la nature minéralogique de l'argile (argile montmorillonitique) et la teneur en argile (dépassant 35 %), mais encore par la masse absolue d'argile dans le profil ; or, celle-ci est fonction de la teneur en argile et de la profondeur du profil.

Masse absolue d'argile et nature minéralogique de celle-ci assurent la capacité de rétention d'eau du profil.

#### 5. « hydromorphie »

L'hydromorphie est un facteur à l'intensité duquel la tirsification est très sensible : lorsque, en présence des autres facteurs, la tendance de la pédogenèse va dans le sens de la tirsification, une insuffisance d'hydromorphie freine ce processus. Passons en revue les hydro-topo-séquences présentées\*.

Dans les séquences « Rommani » et « Khénichet » nous avons vu que plus l'hydromorphie est prononcée, plus la tirsification est avancée.

\* C'est-à-dire séquences dans lesquelles les variations des conditions hydriques sont dues à la topographie et non au climat, qui reste le même pour tous les sols d'une même séquence ; inversement, dans une hydro-climat-séquence, à l'intérieur de laquelle les sols sont séparés par des distances beaucoup plus grandes, les conditions hydriques varient en fonction des différences de climat, tandis que tous les sols se trouvent dans une situation topographique comparable.

Le même résultat se trouve dans la série « Sidi Slimane » où à une très faible différence de relief correspondent des variations de drainage déterminant la formation des sols.

Dans la séquence « Sidi Bennour », due au relief de la surface encroûtée, nous avons affaire, pour le sol châtain à un léger défaut d'hydromorphie, pour le sol hydromorphe à une action de l'eau plus prolongée dans le temps que dans les vertisols.

Dans l'hydro-topo-séquence dunaire des sables noirs, l'emplacement des profils est analogue à celui d'un tirs de coteau et d'un tirs de bas fond.

#### 6. « Interruption » temporaire de l'hydromorphie

Dans le cas des vertisols, il y a intermittance de l'action de l'hydromorphie ; nous considérons cette intermittance comme un facteur indépendant. La diminution ou la disparition de cette intermittance mène vers un sol hydromorphe proprement dit (« Sidi Bennour »).

Il va sans dire qu'il peut y avoir toutes les transitions ; par exemple, à l'emplacement du « sol sableux tirsifié » du Gharb, l'eau peut stagner pendant des mois, créant ainsi un sol de daya. C'était le même cas pour le « sable brun-noir » avant le drainage artificiel de la daya Bir Rami.

#### 7. « Chaleur » pendant l'interruption de l'hydromorphie

Pour tous les sols présentés, étant donné qu'ils se sont formés dans la zone subtropicale, la chaleur pendant la période de dessèchement est suffisamment élevée.

Après avoir constaté séparément l'action de ces 7 facteurs, nous verrons comment l'action jointe de ces facteurs provoque la tirsification.

### Observations complémentaires

Afin de contribuer à la description de la nature de la liaison entre argile et matière organique en fonction des conditions hydrologiques, nous avons observé le comportement de M sous l'effet de la tirsification. Ainsi nous nous sommes concentrés surtout sur les facteurs « argile gonflante » et « hydromorphie » dont les variations influent beaucoup sur le degré de tirsification.

En plus de l'identification des minéraux argileux (voir présentation des profils) nous avons pu préciser le comportement de M par différentes manières d'examen.

Dans les analyses de série, chaque échantillon est examiné aux rayons X à 3 états différents :

1. à l'état naturel, c'est-à-dire sans traitement préalable: déposés sur lames de verre, les films d'argile dans lesquels les feuillets des minéraux phylliteux se trouvent orientés, sont séchés à l'air uniquement ;

2. à l'état glycérolé: une fine couche de glycérol est étalée sur les films d'argile; par la pénétration du glycérol entre les feuillets des minéraux argileux gonflants, les feuillets s'écartent alors, gonflement qui est mesurable par l'augmentation de la distance réticulaire (001), c'est-à-dire la distance perpendiculaire au plan de clivage préférentiel des minéraux argileux phylliteux.

3. après chauffage à 580°C: les minéraux argileux gonflants sont contractés par déshydratation, la matière organique est brûlée en grande partie, certaines réactions ont eu lieu, comme par exemple la destruction du réseau cristallin de la kaolinite.

Dans certains cas, des préparations spéciales sont effectuées avant l'examen, par exemple :

1. saturation du « complexe absorbant » en  $\text{Ca}^{++}$ : or dans le cas de nos échantillons, déjà saturés largement en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ , l'état naturel de M est pratiquement le même que l'état calcique :

Séquence Rommani :

— 15.5 Å pour le basalte altéré (état naturel: 15.7 Å).

— 15.7 Å pour le tirs (fraction « brun ») (état naturel: 16.0 Å).

2. Fractionnement entre fractions désignées « brun » et « noir »: dans les échantillons de sols vertiques, la « fraction argileuse » prélevée après dispersion normale ne représente souvent qu'une partie de l'argile totale contenue dans l'échantillon; cette « fraction argileuse » ne représentant que l'argile normalement dispersable est alors désignée par « brun », tandis que la fraction argileuse obtenue après agitation prolongée porte le nom « noir » et contient les complexes argilo-humiques typiquement vertiques. Dans les échantillons de roche-mères, il n'y a évidemment pas de fractionnement entre « brun » et « noir »;

3. chauffage progressif de 200 à 580°C: l'examen à des températures intermédiaires peut alors révéler des degrés de contraction différentes.

4. saturation du « complexe absorbant » en  $\text{K}^+$ : contraction de certains minéraux 2:1 par « fixation de potassium ».

5. oxydation de la matière organique: deux traitements à  $\text{H}_2\text{O}_2$  (50 vol.) à 80°C.

De plus amples détails sont donnés dans la partie méthodologique [63].

### 1. Distance réticulaire de M

La distance réticulaire (001) de M a été comparée entre matériau originel et sol, ou entre sols à l'intérieur d'une série. Nous présentons ici quelques exemples caractéristiques :

#### a. Etat naturel de M

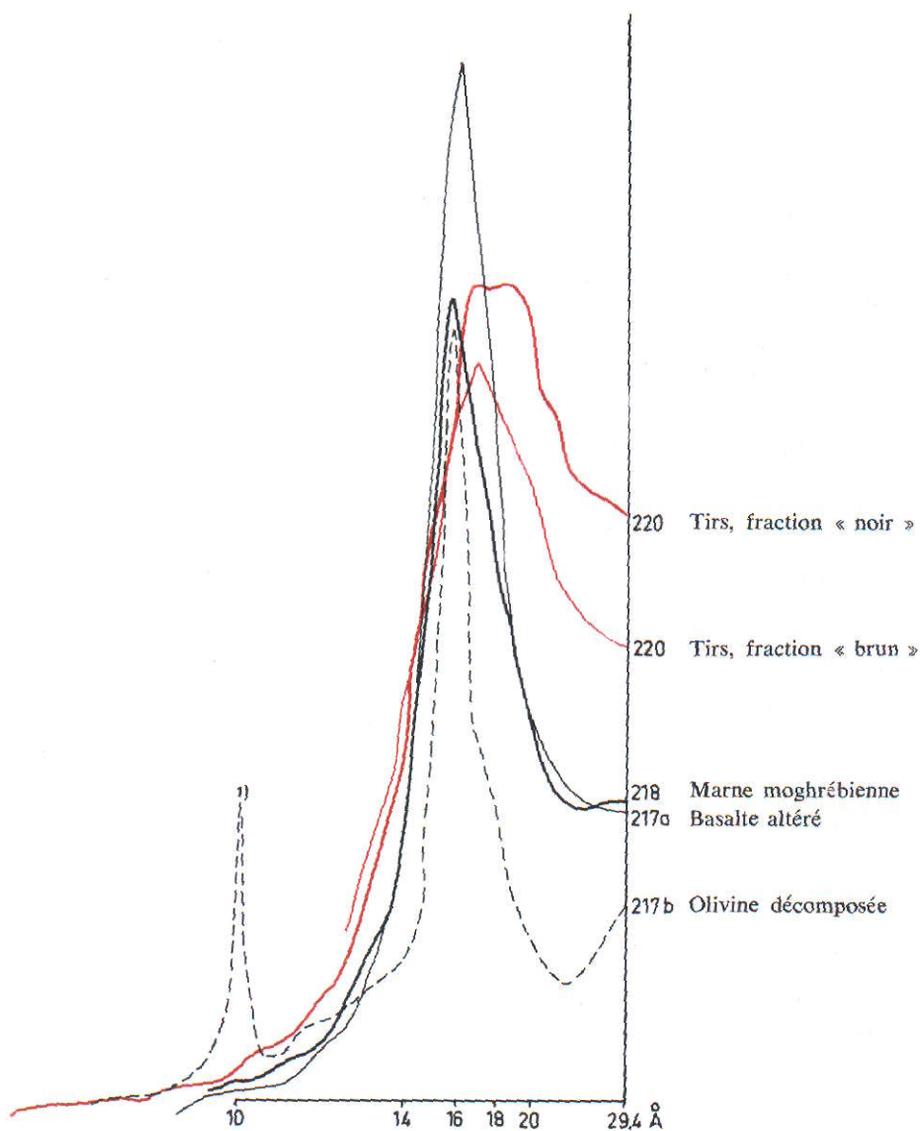
Dans le profil de tirs « Bled el Mouad » (FIG. 1), la distance réticulaire — dans les matériaux originaux est de :

— 15.7 Å (basalte altéré)

— 15.5 Å (alvéoles d'olivine décomposée)

— 15.5 Å (marne moghrebienne)

FIG. 1 — Distances réticulaires (001) de la montmorillonite  
(état naturel)  
Profil « Tirs Bled el Mouad »



1) la raie de 10 Å dans 217 b appartient à la séladonite

— dans l'horizon tirsifié, elle a augmenté à :

- 16.3 Å pour la fraction désignée « brun »
- 17.7 Å pour la fraction désignée « noir »

Précisons que, pour le dernier cas, la raie de diffraction est devenue une bande et que la valeur de 17.7 Å ne représente que son maximum d'intensité.

Dans le profil de rendzine « Maaziz », l'augmentation de la distance réticulaire n'est que très faible :

- 15.7 Å (matériau originel : basalte altéré)
- 15.7 Å (horizon de transition)
- 16.6 Å (rendzine) où il n'y a pas de différences significatives entre les fractions « noir » et « brun ».

#### b. Etat de gonflement de M par glycérolage

Dans le profil « Bled el Mouad », la raie de M est proche de la valeur théorique de 17.7 Å, à savoir :

- 18.0 Å pour le basalte altéré et le remplissage des alvéoles
- 18.4 Å pour la marne moghrebienne
- 18.4 Å pour la fraction « brun ».

Par contre, le maximum de la bande enregistrée pour la fraction « noir » se trouve à 21.0 Å.

Cette différence entre matériau originel et sol est beaucoup moins importante dans le profil « Maaziz » où la distance réticulaire de M est de 18.8 Å dans les deux horizons supérieurs et de 18.4 Å dans le basalte altéré.

#### c. Contraction de M par adsorption d'ions $K^+$ et par chauffage

Dans le tirs de la séquence « Rommani », M est moins contractée à l'état potassique que dans le basalte altéré : 13.6 Å contre 13.3 Å.

De même, la contraction de M par chauffage progressif de 200°C à 580°C est retardée dans les vertisols. La figure 2 montre une marne, une rendzine et un vertisol (nom local : bujeo) de l'Espagne du Sud de composition à peu près identiques : prédominance de M, faibles à très faibles teneurs en chlorites (raie à 14 Å), très faibles teneurs en illites (raie à 10 Å) et faibles teneurs en interstratifiés (surtout dans 277), traces d'attapulgitte en 271 (raie à 10.5 Å) [66]. Alors que dans la marne et

dans la rendzine la plus grande partie de M est déjà contractée à 200°C, dans le bujeo la contraction est empêchée : la majorité de M se trouve encore entre 17 et 12 Å.

Nous avons comparé le degré de cet empêchement de contraction à l'intérieur des séquences, ainsi que les séquences entre elles. Le TABLEAU 8 montre schématiquement, sans échelle absolue, les résultats de cette comparaison : d'une manière générale, nous constatons que :

— l'empêchement est plus fort dans les tirs que dans les sols tirsifiés ; il est le plus souvent très faible ou absent dans les sols non-tirsifiés (rendzine et sol hydromorphe).

Le complexe argilo-humique du sol cartographié comme « sol tirsifié de coteau » (« sol rendziniforme ») se comporte comme celui d'un vrai tirs ; ceci s'explique par la présence de M en voie de formation qui crée une dynamique de vertisol même sur un versant apparemment bien drainé.

Le sol châtain de « Sidi Slimane » montre un empêchement de contraction bien qu'il ne soit pas tirsifié ; vu la stabilité des complexes argilo-humiques, on pourrait envisager l'héritage d'un matériau tirsifié antérieurement, remanié dans la suite et masqué par une rubéfaction. A moins qu'il ne s'agisse plus probablement d'un sol dont le caractère vertique a échappé au cartographe.

Dans la séquence « Sidi Bennour », le sol châtain tirsifié montre un empêchement plus fort que le sol tirsifié profond, malgré son site apparemment plus sec, et sa teneur en M légèrement plus faible. Ceci pourrait être en relation avec l'état différent de M (voir présentation du profil), la teneur en argile plus élevée et peut-être aussi avec la teneur en matière organique plus forte.

— l'empêchement est plus fort dans les tirs et tirsifiés noirs que dans les tirsifications sur matériau rubéfié.

Le « tirs noir » de « Sidi Slimane » est une exception : il est jeune et peu développé, contient relativement peu de M, et son matériau originel a, avant sa mise en place, subi une histoire qui a pu altérer les surfaces de M.

## 2. Oxydation

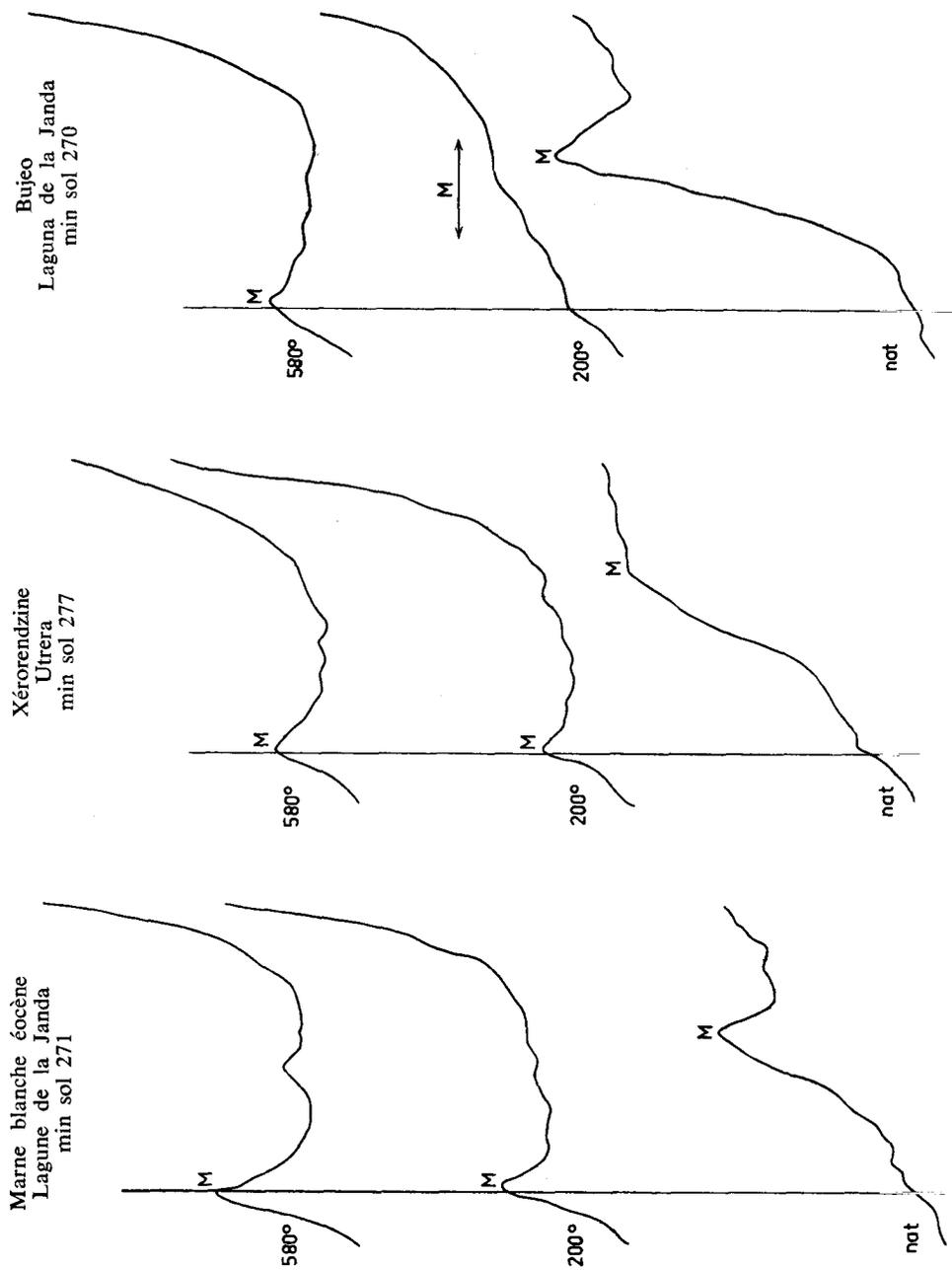
Toutes ces différences de la distance réticulaire de M laissent supposer une présence de substances organiques dans les espaces interfoliaires de M des vertisols. Nous pouvons nous attendre à une grande résistance à l'oxydation de ces substances fortement liées à M ; cette résistance sera supérieure à celle des substances qui se trouvent individualisées dans le sol. L'analyse thermique différentielle (ATD) permet d'étudier la marche de la combustion de la matière organique des sols [60] et de distinguer ainsi l'oxydation facile de la masse de matière organique individualisée de l'oxydation plus difficile des substances organiques retenues par l'argile. L'ATD montre ainsi que l'oxydation par  $H_2O_2$  est très difficile dans les tirs : il n'y a que peu de différence entre les courbes ATD sur échantillon

TABLEAU 8

Degrés d'empêchement de contraction de la montmorillonite lors du chauffage progressif

SÉQUENCE									
Rommani	Tirs de bas-fond	Sol tirsifié de coteau « Sol rend-ziniforme »							
Ben Slimane	Tirs profond								
Khénichet		Tirs très noir de bas-fond	Tirs très noir de coteau						Rendzine
Sidi Slimane			Tirs brun-noir	Sol châtain tirsifié	Tirs noir	Sol châtain			
Sidi Bennour						Sol châtain tirsifié	Sol tirsifié profond	Sol hydro-morphe	
Sables noirs du Gharb			Sable brun-noir			Sol sableux tirsifié	Sol sableux peu tirsifié		
									Augmentation de l'empêchement

FIG. 2 — Contraction de la montmorillonite (M) par chauffage progressif



oxydé et non-oxydé ; il est donc évident que la matière organique n'a été détruite que très partiellement par le traitement  $H_2O_2$ . Par contre pour la rendzine, la hauteur des pics exothermiques dus à la combustion de la matière organique est sensiblement diminuée dans l'échantillon oxydé.

D'une façon générale, il semble que dans les vertisols la combustion de la matière organique est souvent retardée, elle se prolonge vers les températures plus hautes et une partie importante de la matière organique n'est brûlée qu'à des températures très élevées. Par contre dans les formations non-vertiques, comme les rendzines, la matière organique dont la teneur est en général plus forte que dans les vertisols, semble être brûlée plus rapidement.

Par une destruction complète de la matière organique, on devrait, théoriquement, pouvoir éliminer la différence de comportement qui existe entre M dans un vertisol et M dans le matériau originel ; M dans le vertisol serait alors retransformée en son état dans le matériau originel. Cependant, en comparant, aux rayons X, les valeurs (001) de M dans un échantillon oxydé à celles d'un échantillon non-oxydé, nous avons constaté que cela est impossible ; même après traitement répété par  $H_2O_2$  l'écartement des feuillets de la montmorillonite dans un vertisol était resté plus grand que celui des feuillets de la montmorillonite dans la roche-mère ; tout au plus, nous avons réussi à diminuer légèrement cette différence, soit pour les examens à l'état naturel, soit pour ceux à l'état gonflé ou contracté.

### 3. Extraction

Afin de caractériser qualitativement l'intensité de liaison entre la matière organique et la partie minérale du sol, nous avons fait des extractions au NaOH 0.1 N [46] \* et comparé la coloration des extraits à l'intérieur de quelques séquences. Voici les différences d'intensité de coloration (après 3 semaines de contact dans des tubes à essai et trois agitations) :

Séquence « Rommani »

Sol tirsifié de coteau (2,5 %) > tirs de bas-fond (1,5 %).

Séquence « Khénichet »

tirs de coteau (2.3 %) \*\* > rendzine (1.4 %) > tirs de bas-fond (1.4 %)

Séquence « Sidi Slimane »

tirs noir (1.4 %) > sol châtain (1.7 %) = sol châtain tirsifié (1.7 %)  
= tirs brun-noir (1.5 %)

Séquence « Sidi Bennour »

Sol châtain tirsifié (2.9 %) > sol hydromorphe (1.3 %) = sol tirsifié profond (2.0 %).

\* Pour une autre méthode, voir [86].

\*\* Les % indiquent les teneurs en matière organique.

A teneur égale en matière organique nous pouvons supposer que, plus l'intensité de coloration est faible, plus la stabilité de liaison entre humus et argile est grande : en règle générale, les extraits des tirs noirs sont les moins colorés.

Dans la séquence « Khénichet » ne sont comparables que la rendzine et le tirs de bas-fond qui contiennent tous les deux 1.4 % de matière organique. Le tirs de coteau en a 2.3 %, c'est pour cela qu'il cède plus d'humus à l'extrait, tout en possédant, probablement, une plus forte stabilité de liaison que la rendzine.

Dans la séquence « Sidi Slimane », le tirs noirs fait exception : il est plus jeune et contient moins de M que les autres sols de cette séquence.

### Essai de synthèse

Après la présentation des résultats, essayons maintenant d'esquisser schématiquement le processus de la tirsification tel qu'il se greffe sur un matériau donné et tel qu'il se produit soit actuellement, soit dans le passé. En décrivant le déroulement annuel de ce processus, nous en discuterons les mécanismes. La répétition de ce cycle, soit année après année, soit avec des intervalles plus longs, aboutirait alors à la formation d'un vertisol.

#### 1. *Le matériau au départ*

Le matériau donné qui provient, soit immédiatement de l'altération d'une roche-mère, soit d'une pédogenèse antérieure à l'époque tirsifiante, doit contenir avant tout de grandes surfaces adsorbantes dans sa partie minérale. Ce sont déjà trois des sept facteurs qui doivent être inhérents au matériau pour causer le départ d'une tirsification :

- la forte teneur en argile (facteur 2),
- la présence de minéraux argileux gonflants (facteur 1) possédant des grandes surfaces internes et susceptibles d'adsorber des composés organiques [14, 33],
- la profondeur suffisante du profil, ce qui revient à une quantité absolue en argile suffisante (facteur 4).

Pour apprécier, par la suite, la coloration des vertisols, il faut dès le début tenir compte de la couleur propre du matériau sur lequel se greffe la tirsification : par exemple, un matériau fortement rubéfié donnera un « tirs rouge », tandis qu'une tirsification sur un fond blanc, sur une marne par exemple, fera particulièrement bien ressortir la couleur noire, propre à la tirsification [15].

#### 2. *Premier stade : l'hydromorphie*

Pour toute tirsification, une période d'hydromorphie prononcée est

indispensable (facteur 5). Celle-ci peut être provoquée, soit seulement par engorgement, soit par inondation complète. Ceci se produit le plus facilement dans une dépression de terrain, mais l'hydromorphie peut intéresser aussi les pentes, à condition que les facteurs mentionnés ci-dessus (facteurs 1, 2 et 4) soient fortement représentés, car ils favorisent tous le maintien d'un milieu aqueux par la rétention d'eau des argiles, notamment les gonflantes, et ceci malgré une topographie favorable au drainage.

En suivant la terminologie proposée par BOURALY [13], nous appelons l'hydromorphie extrinsèque des dépressions « exo-hydromorphie ». L'hydromorphie rendue possible par les propriétés inhérentes au matériau est désignée par le terme « endo-hydromorphie » ; cette dernière est caractéristique pour l'hydromorphie des pentes. Souvent le matériau qui subit une exo-hydromorphie possède aussi les propriétés requises pour une endo-hydromorphie ; nous parlons alors de « poly-hydromorphie ».

Les eaux qui conditionnent l'hydromorphie doivent contenir des ions  $\text{Ca}^{++}$  ou  $\text{Mg}^{++}$ , provenant de la dissolution d'une roche dont les constituants contiennent  $\text{Ca}^{++}$  et (ou)  $\text{Mg}^{++}$  (voir ci-dessus).

Le plus souvent, ces ions se trouveront sous forme de bicarbonates formés grâce à la présence du  $\text{CO}_2$  des eaux de pluie et de celui de l'action biologique dans les solutions du sol et les eaux de ruissellement.

Ce phénomène a été appelé « métabolisme (ou dynamique) du bicarbonate de Ca » ; par lui la solution du sol est tamponnée à neutralité ou faible alcalinité. On parlera de dynamique de bicarbonate de Ca « endogène », lorsque  $\text{Ca}^{++}$  et (ou)  $\text{Mg}^{++}$  proviennent de l'altération du matériau originel sur place. On parlera de dynamique de bicarbonate de Ca « exogène » ou « de nappe », lorsque Ca et Mg proviennent de l'altération d'un matériau éloigné dont les produits de décomposition se trouvent dans les eaux d'apport [73].

Cette hydromorphie provoque un gonflement des argiles, sinon une véritable suspension ; il s'y produit une orientation des feuillettes d'argiles comme dans la fosse d'un potier. Il va de soi que cette orientation est moins prononcée dans les vertisols sur les pentes (tirs de coteau). La présence d'eau déclenche des processus biologiques et chimiques particuliers à ce stade d'hydromorphie : l'anaérobie créée par la saturation en eau fait que se développe une activité microbienne caractérisée par la décomposition incomplète des résidus d'une abondante végétation herbacée ; celle-ci est herbacée parce que les vertisols se rangent parmi les sols de prairie, qui sont des sols « hydrophobes » c'est-à-dire des sols hostiles à la forêt. Les produits finaux de ce métabolisme de décomposition incomplète — acides organiques et  $\text{CO}_2$  — font apparaître une légère acidité qui renforce l'attaque des roches-mères et la libération des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ .

Dans ce milieu légèrement acide, le pH se trouvera entre le point isoélectrique des argiles et celui de substances riches en N comme les

acides aminés, provenant de la décomposition de la végétation herbacée. Le caractère amphotère de ces derniers est causé par les parties azotées qui prendront une charge positive lorsque le pH s'abaisse au-dessous de leur point isoélectrique. C'est ainsi qu'ils pourront être adsorbés par les minéraux argileux qui gardent leur charge négative dans ce milieu légèrement acide, leur point isoélectrique étant beaucoup plus bas que celui des composés azotés [74]. Ce sont surtout les minéraux montmorillonitiques qui, à cause de leur forte capacité d'échange de cations, sont connus pour leur adsorption de grands cations organiques [41,80]. M ayant surtout des surfaces intérieures, cette adsorption a lieu dans les espaces interfoliaires. Les distances réticulaires (001) s'écartent alors au-delà de  $16 \text{ \AA}^*$ , distance maximum atteinte par une argile ayant adsorbé des cations non-organiques : (001) de M saturée en  $\text{Ca}^{++}$  ou  $\text{Mg}^{++}$  (qui sont les deux cations possédant le plus grand diamètre à l'état hydraté) ne dépasse pas  $16 \text{ \AA}$  [76].

Cette adsorption de cations organiques est accompagnée de fortes colorations, souvent bleues, brunes et noires [87]. En minéralogie, on s'est servi de ce phénomène comme test simple pour détecter la présence de montmorillonite.

On peut également envisager l'adsorption de certains composants des acides humiques (Huminsäurevorstufen en allemand) qui, sans être des acides aminés, portent des centres de charge positive dans leurs parties azotées [74]; cette adsorption aura lieu lorsque la polymérisation des acides humiques se trouvera encore à un stade élémentaire.

Dans la phase liquide du système argile-eau reste la masse des substances organiques qui, ou bien ne peuvent pas être adsorbées par l'argile à cause de leur charge négative, ou bien ne peuvent pas entrer dans les espaces interfoliaires de M à cause de leurs dimensions. Parmi elles se trouveront de grands anions organiques comme les acides humiques qui pourront former des complexes (chélates) avec Fe [71], celui-ci étant rendu actif par réduction dans ce milieu anaérobie.

### 3. Deuxième stade : le début de dessèchement

Le départ de l'excès d'eau au début de la saison sèche et chaude (facteurs 6 et 7) change l'anaérobie en aérobie et déclenche un métabolisme microbien qui décompose la matière organique complètement en  $\text{CO}_2$  et

\* Nous prenons comme références les distances mesurées après séchage à l'air. Les distances atteintes en solution aqueuse sont plus grandes (voir partie méthodologique [63]).

H<sub>2</sub>O ; il n'y a plus d'acides organiques et CO<sub>2</sub> peut être évacué par l'accès de l'air. Favorisée par la présence des ions Ca<sup>++</sup> et Mg<sup>++</sup>, qui maintiennent le pH autour de 7, la décomposition aérobie consomme alors la quasi-totalité de la matière organique non-protégée par la liaison avec l'argile. Ainsi s'explique la teneur étonnamment faible en matière organique des vertisols, en comparaison avec d'autres sols noirs.

A l'oxydation échappent donc les substances déjà adsorbées au stade d'hydromorphie précédent, mais aussi celles qui se lient aux surfaces extérieures de l'argile au début du dessèchement. Différentes possibilités pourraient être envisagées \* :

— lors de l'oxydation, les hydroxydes de fer forment de fines couches donnant une charge positive à l'argile et permettant l'adsorption des anions humiques [74, 78],

— plus fréquent serait le cas où il y a d'abord liaison entre hydroxydes de Fe et anions humiques à cause de leur forte affinité [74] ; par la suite ces composés se lieront à l'argile par le phénomène de floculation de deux colloïdes à charge négative, grâce à la présence d'un cation,

— des complexes entre Fe et anions humiques sont adsorbés par les sites négatifs des surfaces d'argile à cause de la forte charge positive de leur ion central Fe<sup>+++</sup> ou Fe<sup>++</sup>,

— lorsque le dessèchement avance, il peut y avoir précipitation mécanique sur les surfaces d'argile, car le seuil de solubilité des substances humiques en solution est atteint. Par cette voie, des humates de Ca revêtiraient les particules d'argile.

Tous les corps organiques réunis aux surfaces internes et externes des minéraux argileux subissent une polymérisation progressive, et ceci sous l'action catalysatrice du fer [72]. La jonction entre les substances adsorbées dans les espaces interfoliaires et celles adsorbées par les surfaces externes est assurée par une liaison entre acides aminés déjà adsorbés au stade d'hydromorphie (voir ci-dessus) et (hydro)quinones \*\* [21]. Les très grandes molécules qui en résultent sont fortement liées aux surfaces minérales puisque leur « tête » est « coincée » entre les feuillets de M. Cette structuration sous contrainte (« Zwangsstrukturierung » en allemand) accélère encore la polymérisation. Une sorte de mycélium d'un humus,

\* Nous ne pouvons entrer ici dans une discussion détaillée des mécanismes de liaison et nous renvoyons aux manuels et articles spécialisés [48, 74, 24, 26, 10].

\*\* Les quinones et hydroquinones sont des constituants importants de la polymérisation des acides humiques.

très finement réparti sur les surfaces, englobe ainsi l'argile et maintient ses feuillets dans l'état d'orientation que ceux-ci ont obtenu lors de la phase d'engorgement ou d'inondation.

C'est un fait connu que la répartition très fine d'un corps provoque une coloration foncée ; cela sera une autre cause de la couleur noire des vertisols [74, 47].

Les conditions dans lesquelles a lieu la polymérisation verticale : présence de  $\text{Ca}^{++}$ , pH voisin de 7, catalyse de Fe, apport de résidus d'une végétation herbacée riche en N — sont proches de celles des chernozems [27, 73] dans lesquels se forme un humus du type « acides humiques gris » qui est réputé pour sa liaison étroite avec la partie minérale du sol.

Ainsi, dans les extraits d'humus par NaOH 0.1 N des vertisols marocains, nous avons trouvé aussi des minéraux argileux ; on peut même arriver à une sélection des minéraux qui sont les plus fortement liés à l'humus, en purifiant ces extraits par précipitation avec HCl et extraction par NaOH répétées alternativement : dans les préparations d'acides humiques ainsi obtenues on trouve comme contamination minérale surtout M, minéral le plus fortement retenu par l'humus des vertisols [62].

L'humus du type « gris » est encore une cause de la couleur des vertisols.

#### 4. Le produit final de la tirsification

La succession répétée de ces deux stades, hydromorphie et dessèchement chaud, mène à un vertisol aux propriétés caractéristiques connues. Ici nous ne pouvons attirer l'attention que sur quelques-unes parmi elles : L'état d'empilement orienté des feuillets de M tel qu'il est détecté par les rayons X à l'échelle atomique se traduit sur une échelle macroscopique. Ainsi s'explique la structure prismatique aux faces de clivage de préférence horizontales et verticales. Plus cette orientation est complète et plus le matériau est homogène, plus la structure prismatique devient grossière. Pour la même raison, le gonflement de M à l'échelle atomique se reflète par le foisonnement du sol au stade d'hydromorphie. Les fentes de retrait qui apparaissent lors du dessèchement ne font alors que révéler l'état ordonné préétabli par l'homogénéité et l'orientation du matériau. Lors de ces mouvements de gonflement et de retrait, de légères inégalités de terrain et des conditions hydriques se trouveront amplifiées par la pression de ce matériau orienté, provoquant ainsi le phénomène des « slickensides ».

La faible teneur en matière organique des vertisols, qui est le résultat de leur genèse particulière, diminue encore par l'aération qu'entraîne la mise en labour permanente. Cependant, la couleur noire subsiste [50], ce

qui indique que seulement les parties les plus fortement liées à l'argile sont à l'origine de la couleur vertique.

Dans un tirs de la Chaouia (domaine du Jacma, près de Berrechid), qui est labouré depuis plus de cinquante ans, une analyse, effectuée en 1909 par la Pharmacie de la Réserve à Casablanca, a trouvé 3,8 % d'humus ; une autre, faite à l'Institut Agronomique à Paris en 1912, 4,8 % ; en 1954, la teneur en humus était de 1,9 %, selon une analyse faite à Göttingen. En même temps les rendements avaient continuellement baissé, malgré une forte fumure en engrais chimiques [50]. Bien qu'il soit difficile de comparer ces résultats obtenus par des prélèvements et des méthodes qui ne sont plus guère contrôlables, la diminution de la matière organique n'en semble pas moins bien établie.

Par contre, pour les tirs brun-noirs de la région de Sidi Slimane (Gharb), il a été observé qu'ils ont perdu de leur couleur noire, par la mise en labour, pendant les trentes dernières années ; ils sont devenus plus rouges [11] ; fait qui s'expliquerait par une moins forte liaison des substances organiques avec les minéraux. En effet, dans cette région la tirsification se greffe sur un matériau rubéfié antérieurement (hamri) et ne trouve donc plus des surfaces fraîches de M. L'intensité de liaison en est diminuée. Deux résultats d'analyse de laboratoire sont en accord avec cette observation de terrain :

— l'empêchement de contraction de M lors du chauffage est moins fort pour les tirs brun-noirs (voir TABLEAU 8),

— l'extraction à la soude des substances humiques est plus facile dans les tirs brun-noirs.

Par l'action de l'homme la végétation naturelle des tirs a été détruite. Une des conséquences de cela est qu'il n'y a plus d'apport de matière organique riche en N : le surpâturage du Gharb a fait disparaître les légumineuses encore fortement représentées autour de 1910 [59].

## Conclusions

En regardant nos résultats et le processus type de la tirsification que nous venons d'esquisser, retenons les points suivants :

— La distance réticulaire (001) des minéraux montmorillonitiques, c'est-à-dire l'écartement des feuillets d'argile, est augmentée dans un matériau tirsifié par rapport à son état originel. Nous appelons cela le « vertisol-gonflement de la montmorillonite ».

— Nous supposons qu'à l'origine de ce phénomène se trouve l'adsorption par la montmorillonite de grands cations organiques, contenant N, car :

— jusqu'ici une adsorption de grands anions organiques n'a jamais été observée [32, 40, 69].

— une forte augmentation des distances (001) a été constatée après adsorption de grands cations organiques [2].

TABLEAU 9 : les facteurs ver  
Application à la classification des vertisols

Facteurs déterminant essentiellement la classification	1 Présence de minéraux argileux gonflants (surtout M)		2 Teneur en argile		3 Présence de Ca <sup>++</sup> et (ou) Mg <sup>++</sup>		4 Profondeur : ure du
Variations qualitatives des facteurs différenciant les vertisols	Surfaces de M fraîches :  tirs noirs	Surfaces de M altérées * :  tirs brun-noirs, tirs bruns, tirs rouges	Même teneur en argile à travers le profil :  vertisols modaux	Teneurs variables :  vertisols à structure peu typique ou à tendance d'hydromorphie	Dynamique de Ca <sup>++</sup> endogène  vertisols lithomorphes	Dynamique de Ca <sup>++</sup> exogène  vertisols topomorphes	Vertisols profonds
Diminution d'intensité des facteurs créant des formes de transition vers d'autres sols	Paravertisols et sols tirsifiés à faible teneurs en M ;  en climat tropical : teneurs en M dégradée, proportions croissantes de kaolinite		Paravertisols, sols sableux plus ou moins tirsifiés, sables noirs, taoug	A exohydromorphie prononcée : sols tirsifiés hydromorphes à pseudogley	Sols tirsifiés à complexe partiellement désaturé  Vertisols dégradés	Sols tirsifiés halomorphes	Sols peu
Quelques-uns des types de pédogenèse qui se développent en absence d'un ou de plusieurs facteurs vertisols	Sols alluviaux fonnés subéquatoriaux à kaolinite		Sols peu évolués		Sols désaturés	Sols halomorphes	Sols peu calcaires

\* dans ce cas particulier : revêtement des surfaces par (hydr)oxydes de Fe

s vertiques

tisols et de leurs apparentés

4 leur suffisante et du substratum	5 Hydromorphie		6 Interruption temporaire de l'hydromorphie		7 Chaleur pendant le stade de dessèchement
Vertisols peu profonds sur substratum à forte rétention d'eau	Séquences topographiques :  tirs de coteau tirs de bas-fond	Séquences climatiques **  tirs brun-noir	Sur l'ensemble du profil :  vertisols modaux	Pour le haut du profil seulement :  vertisol à gley de profondeur	Pas de distinction entre vertisols de la zone tropicale et de la zone subtropicale
sols tirsifiés peu profonds	Sols tirsifiés des versants	Sol brun subtropical tirsifié  Sol châtain tirsifié	Sols tirsifiés hydromorphes à pseudogley	Sols tirsifiés hydromorphes à gley	Vertisols et sols tirsifiés limitrophes de la zone tempérée
peu évolués et comagnésimorphes	Rendzines	Sols châtaîns et sols bruns subtropicaux	Sols hydromorphes		Sols de la zone tempérée : chernozems, chernozems dégradés

\*\* exemple d'une séquence sur matériau rubéfié.

— la légère acidité observée lors de la période d'hydromorphie [82], confère une charge positive aux acides aminés et substances apparentées, mais ne diminue que très faiblement la charge négative de la montmorillonite,

— la teneur en N des substances organiques liées à l'argile est relativement plus forte que celle de la matière organique totale du sol (exprimée par le rapport C/N) [49], voir aussi [42],

— N des vertisols est très résistant à l'oxydation [81], ce qui fait penser que les parties azotées des complexes argilo-humiques sont protégées, d'une part par l'argile et d'autre part par les éléments non-azotés des substances humiques qui se trouvent sur les surfaces externes; loin du front d'attaque, N est ainsi à l'abri de l'oxydation,

— l'adsorption, entre les feuillettes de la montmorillonite, de constituants non-azotés des acides humiques, comme les quinones, est, certes, également possible, grâce au caractère dipolaire de ces molécules, mais elle ne semble pas jouer un rôle important, vu la concentration de l'azote à proximité des surfaces de l'argile et sa résistance à l'oxydation,

— la liaison, théoriquement possible, entre anions organiques et sites d'échange positifs de l'argile est peu caractéristique pour la montmorillonite, minéral quasi omniprésent dans les vertisols, car M n'a qu'une très faible capacité d'échange d'anions; par contre, elle possède une très forte capacité d'échange de cations [77].

— Les spéro-collôïdes des acides humiques gris, rencontrés fréquemment dans les sols noirs, ne peuvent entrer dans les espaces interfoliaires de la montmorillonite [55], sans doute à cause de leurs dimensions: 40 Å de diamètre, environ, pour un poids moléculaire de 2000. Il faut donc envisager que la polymérisation de ces acides humiques a lieu sur place, c'est-à-dire après adsorption par l'argile, et qu'à la fois les cations des espaces interfoliaires et les substances adsorbées par les surfaces externes entrent dans cette polymérisation. Un « mycélium » inextricable d'humus englobe ainsi les feuillettes d'argile.

— Le schéma présenté ici n'exclut pas d'autres formes de liaison humus-argile qui n'auraient pas été observées par la méthode employée.

— Plusieurs raisons d'explication des couleurs foncées des matériaux tirsifiés peuvent être avancées :

les couleurs particulières aux différentes réactions d'adsorption de cations organiques par la montmorillonite,

la couleur foncée provoquée par la fine répartition d'un corps à savoir l'humus réparti sur les surfaces des minéraux argileux,

la couleur propre des acides humiques du type « gris ».

Dans un seul cas — à notre connaissance — la présence de  $\text{FeS}_2$  a été rapportée comme source de la coloration d'un vertisol [25].

Par contre, Mn est sans influence sur la coloration; l'examen des vertisols en Espagne du Sud et au Nord du Maroc n'a pu fournir aucun rapport significatif entre coloration et teneur en manganèse [1, 3].

— En dehors de sa fonction dans laquelle il peut remplacer  $\text{Ca}^{++}$  (facteur 3) nous ne pouvons attribuer au magnésium aucun rôle spécifique dans la tirsification. S'il est rencontré souvent dans les vertisols, il est plutôt, lors de l'altération météorique des roches, le sous-produit de la décomposition de minéraux riches en Mg (chlorite, attaplugite, augite, olivine). Or, la montmorillonite, minéral favorisant la tirsification et contenant peu de Mg, est le produit final habituel de l'altération météorique des roches dans les régions subtropicales.

— Dans les spectres aux rayons X des vertisols la raie de diffraction principale de la montmorillonite est élargie par l'adsorption de substances organiques ; la bande ainsi formée peut s'expliquer :

soit par un simple mélange entre M gonflée par les substances organiques et M non-gonflée,

soit par des interstratifications du type M gonflée — M non-gonflée [53].

Pour ce qui est du glycérolage, les valeurs anormalement élevées se comprendraient par l'action du glycérolage qui s'ajoute à celle des substances déjà adsorbées, pénétrant dans les espaces laissées vides par ces dernières.

L'empêchement de contraction des feuillets montmorillonitiques se ramène à la même cause, les substances entre les feuillets constituent un obstacle : l'effet de contraction soit par l'ion  $\text{K}^+$ , soit par la déshydratation lors du chauffage ne peut s'exercer pleinement.

Le degré de cet empêchement de contraction est fonction de l'intensité de la tirsification (TABLEAU 8) selon l'ordre suivant :

rendzine < sol tirsifié < tirs de coteau < tirs de bas-fond.

— Oxydation et extractibilité par NaOH des substances organiques adsorbées par les argiles gonflantes sont retardées et rendues difficiles à cause de la protection par l'argile.

— Les phénomènes causés par le « vertisol-gonflement de la montmorillonite » sont moins prononcés dans les tirsifications sur matériaux rubéfiés ; mais toutes les transitions avec les tirs noirs peuvent exister, dans la mesure où la rubéfaction n'a pas atteint et masqué toutes les surfaces de l'argile.

### Application des résultats à la classification des vertisols. (TAB. 9)

Dans les premières conclusions tirées des résultats (cf. pp. 56-60), différents facteurs ont été relevés qui tous étaient entrés en jeu dans la formation des vertisols présentés. La synthèse sur la formation d'un vertisol (cf. pp. 60-77) a fait comprendre comment en effet chacun de ces facteurs avait sa place particulière et irremplaçable dans le processus de la tirsification. Pour la classification des sols, l'action commune d'un assez grand nombre de facteurs présente une difficulté, comme nous l'avons exposé dans l'introduction (cf. pp. 41-43). Nous pensons que tous sont d'une importance égale et sommes donc dans l'impossibilité d'en choisir un qui, plus qu'un autre, serait responsable de la formation de ces sols ; ainsi nous trouvons justifié l'établis-

sement d'une catégorie à part ; l'usage du nom « vertisol » étant déjà très répandu, avec une signification relativement précise [27, 29], nous ne voyons pas l'utilité d'en créer un nouveau pour désigner cette catégorie à part.

L'attribution d'un sol à cette catégorie se justifiera alors dans le cas où tous ces facteurs auront contribué à sa formation. Si, lors de la formation d'un sol, un ou plusieurs des facteurs avaient diminué d'intensité, le sol qui en résulte constituera une transition vers une autre catégorie de sol ; lorsque ce ou ces facteurs auront complètement disparu, le sol aura quitté le domaine de la tirsification et il entrera dans cette autre catégorie. L'optique pédogénétique aura ainsi facilité le travail du pédologue cartographe qui doit créer des catégories et classer afin de décrire valablement la réalité complexe des sols ; ce travail de description dépendra largement des observations de terrain, confrontées avec les résultats de l'analyse morphologique qui indique les formes héritées et actuelles (importance des tirsifications héritées !), mais il dépendra aussi des résultats d'analyse de laboratoire, tels que granulométrie (facteur 2), cations échangeables (facteur 3), capacité de rétention d'eau (facteurs 1 et 2), teneur en minéraux argileux et capacité d'échange de cations (facteur 1).

Rappelons maintenant (TABLEAU 9) quelques-uns des sols présentés, en fixant d'abord notre attention sur les variations qualitatives des facteurs qui feront saisir les subdivisions à l'intérieur des vertisols. Par la suite, nous considérerons les variations quantitatives des facteurs, voire leur diminution d'intensité, qui expliqueront les transitions vers d'autres catégories de sols. Enfin nous indiquerons quelques autres types de pédogenèse qui se développent en l'absence d'un ou de plusieurs des 7 facteurs vertiques.

Quand les sols marocains ne nous fourniront pas d'exemple, nous aurons recours à des sols d'autres pays. Les noms de sol utilisés ici sans spécification de leur origine sont ceux de la classification française [7], les termes en *italiques* sont ceux de la 7th approximation [83].

Facteur 1 : présence de minéraux argileux gonflants (surtout montmorillonite) — « argile gonflante ».

Pour les surfaces de M nous étions amenés à distinguer entre surfaces fraîches d'un minéral en voie de formation et surfaces vieilles. Les premières favorisent le plus fortement la tirsification. En effet, dans les sols sur basalte, dans lesquels M est entièrement néoformée, la tirsification monte plus haut sur les versants que ne le font habituellement les tirs de coteau, et même des sols apparemment « rendziniformes » montrent le « vertisol-gonflement de M » (TABLEAU 8).

Les surfaces vieilles de M peuvent être plus ou moins altérées, du degré de cette altération dépendra aussi l'affinité entre surfaces de M et grands cations organiques, c'est-à-dire l'affinité vers la tirsification. Le revêtement des surfaces de l'argile par (hydr)oxydes de fer lors de la rubéfaction d'un matériau est une de ces altérations, qui ont tendance à diminuer l'influence du facteur « argile gonflante » ; en effet, nous avons vu que les tirs et tirsifiés brun-noirs montrent un « vertisol-gonflement de M » relativement faible ; la distinction, envisagée par exemple au niveau du sous-groupe dans la classification française, entre vertisols « noirs » et vertisols « brun-noirs », « bruns » ou même « rouges » a donc son sens, sens qui coïncidera souvent avec la distinction entre vertisols bien développés (modaux) et vertisols peu développés, précisément à cause de cette altération des surfaces de M.

Mais ces deux distinctions ne coïncideront pas toujours pour la raison suivante : comme le montrent des plaques minces de vertisols brun-noirs [66], la rubéfaction peut occuper des surfaces très réduites de l'argile ; quelques graines d'hydroxydes de Fe sur les bords extérieurs des paquets des feuillettes d'argile suffiront pour provoquer une couleur brune ou rouge, tandis que la masse de l'argile

de ce tirs cartographié « brun-noir » ou même « rouge » se comportera comme celle d'un tirs noir ; elle formera un tirs bien développé, avec un vertisol-gonflement de M et une matière organique difficilement oxydable et extractible ; ce sera donc un vertisol qui fait exception à la règle suivante : noir = bien développé, brun = moins bien développé.

Pour ce qui est de la distinction entre vertisols lithomorphes et topomorphes (au niveau de la sous-classe), qui correspond, non sans difficultés, à celle entre *aquerts* et *usters*, nous pouvons dire que la lithomorphie d'un vertisol est surtout une fonction de sa teneur en M ; plus cette teneur est élevée et mieux les surfaces de M sont fraîches, plus cette lithomorphie pourra contrebalancer une exo-hydromorphie qui fait défaut.

En effet, dès que nous voyons diminuer la teneur en M ou augmenter l'altération de ses surfaces nous n'avons plus affaire qu'à des vertisols topographiques, dans lesquels l'exo-hydromorphie des bas-fonds doit compenser l'endo-hydromorphie provoquée par l'optimum du facteur « argile gonflante » qui fait défaut ; voici les sols qui ont les teneurs en M les plus faibles :

- m M : tirs noir « Sidi Slimane ».  
sol tirsifié profond « Sidi Bennour ».
- mf M : sol châtain tirsifié « Sidi Bennour ».  
sable brun noir « Bir Rami ».
- f M : sol hydromorphe « Sidi Bennour ».
- M abs : paravertisol « Doukkala ».

En même temps avec cette diminution en M le degré de tirsification se trouve le plus en plus amoindri ; le paravertisol, dont la classification est peu certaine, constitue l'exception dont il était déjà question.

Dans les climats tropicaux, non seulement les surfaces de M et des autres minéraux 2:1, mais aussi les cristaux entiers peuvent être dégradés ; en même temps apparaîtra la kaolinite. Formée sur les versants, cette dernière sera, avec les 2:1 dégradés, érodée et transportée vers les plaines ; dans celles-ci la proportion de M non-dégradée deviendra de plus en plus faible, dans la mesure où cet apport devient plus important et le climat plus humide. Cette évolution qui se rencontre actuellement en Afrique Noire [34, 84] et qui a régné au Maroc au Tertiaire [44] créera des formes de transition vers les sols alluviaux noirs de la zone subéquatoriale [79], dans lesquels la kaolinite domine [52, 67]. Cependant, des roches-mères magmatiques basiques et ultrabasiques à altération montmorillonitique pourront laisser subsister des vertisols même en zone subéquatoriale grâce à l'optimum du 1<sup>er</sup> facteur verticale [67].

Facteur 2 : « teneur en argile ».

Une teneur en argile supérieure à 35 % sur l'ensemble du profil caractérise les vertisols modaux. L'homogénéité de la teneur en argile du haut en bas du profil, exprimant un état d'orientation des feuillets d'argiles qui est partout le même, assurera une structure prismatique bien développée, due aux faces de clivages régulières.

Des couches de sables ou de cailloutis empêchent cette orientation et diminuent la fissilité ; il en résulte une structure en très gros blocs massifs, redoutés par les agriculteurs.

L'hétérogénéité de la texture donnera lieu aussi à des mouvements d'eau accélérés ou ralentis selon l'horizon ; il en résultera une hydromorphie qui n'est plus celle propre aux vertisols, mais celle des sols hydromorphes, des pseudo-gleys ; dans ces derniers, la texture favorise par endroits la rapidité des mouvements d'eau, les

changements rapides entre saturation en eau, voire réduction, et dessèchement, voire oxydation, provoquant ainsi le dessin marbré de ces sols.

Une texture plus sableuse que celle des vertisols en général favorisera cette hydromorphie non-vertique ; rappelons que le sol hydromorphe de « Sidi Bennour » n'a que 25 % d'argile ; il en est de même des sables noirs dunaires, lorsqu'ils se trouvent en bas de la séquence ; ils montrent alors des caractères proches des sols hydromorphes (« sol sableux tirsifié » de « daya route côtière » et « sable brun-noir » de « Bir Rami »).

A des endroits moins sujets à l'hydromorphie topographique, la porosité augmentée par une texture plus sablonneuse ne permettra plus l'installation de vertisols modaux, mais seulement de sols tirsifiés ou paravertiques qui peuvent former des transitions vers des *entisols* et des *inceptisols*. Ici se placent trois de nos sols : le « sol tirsifié profond » de « Sidi Bennour », le « sol sableux peu tirsifié » de « daya route côtière » et le « paravertisol ». Même une profondeur considérable (le premier) et une forte teneur en M (le second) des 3 sols ne peuvent pas remplacer le manque d'intensité du facteur « teneur en argile ». Le drainage interne facilité de ces sols abrégera le stade de dessèchement chaud (cf. p. 70) pendant lequel l'humidité se maintient longtemps dans le sol. Si ce stade favorable à la décomposition de la matière organique est plus court, les périodes d'impossibilité de décomposition, par excès d'eau (en hiver) d'une part, par manque d'eau (en été) d'autre part, se trouveront rapprochées et la teneur en matière organique en sera augmentée. C'est le cas des « taougue », des « sables noirs », qui ont toutes les caractéristiques des vertisols, sauf la teneur en argile plus faible et la teneur en matière organique plus forte. Sur les versants, la porosité des matériaux tirsifiés sableux ne permettra que très difficilement à la tirsification de « grimper » : sur de très faibles pentes déjà, nous trouverons alors par exemple, des sols sableux rendziniformes (voir plus bas : facteur 5).

Facteur 3 : « dynamique du  $\text{Ca}^{++}$  ».

La distinction, au niveau de la sous-classe, entre vertisols lithomorphes et topomorphes va de pair avec une variation de la « dynamique du  $\text{Ca}^{++}$  » : elle sera « endogène » dans les « lithomorphes », c'est-à-dire les ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  seront fournis par l'altération du matériau originel, et elle sera « exogène » dans les « topomorphes » dans lesquels les alcalino-terreux viennent pour une grande partie des eaux d'apport.

Si en position normalement drainée, le lessivage de ces ions devient plus fort, nous nous rapprochons des sols à complexe plus ou moins désaturé qui — selon les autres conditions pédogénétiques — pourront être, par exemple, des sols isohumiques à complexe partiellement désaturés, des sols rouges méditerranéens ou des sols ferrugineux tropicaux.

En position de mauvais drainage, les eaux pourront apporter d'autres ions, faisant concurrence à la « dynamique  $\text{Ca}^{++}$  », comme par exemple  $\text{Na}^+$ . En plus de cela il pourra y avoir accumulation de sels solubles. Il s'agira alors de transitions vers les sols halomorphes (par exemple les *natraquollic* et *natraqualfic mazaquerts*).

Des vertisols fossiles qui se trouvent aujourd'hui dans des conditions climatiques plus humides deviennent des « vertisols dégradés » [51] ; dans cette dégradation, le facteur agissant principalement aura été la désaturation du complexe argilo-humique. Les chernozems dégradés de l'Allemagne du Nord, témoins d'un climat steppique, ont subi une désaturation semblable (voir aussi plus bas : facteur « chaleur »).

Facteur 4 : « profondeur suffisante » et nature du substratum ».

La profondeur du profil peut compenser dans une certaine mesure, nous l'avons vu pour le sol tirsifié profond de « Sidi Bennour », un manque de teneur en argile, mais elle ne peut pas le remplacer, car la facilité de ressuyage d'un sol sableux abrège trop la période du dessèchement chaud. Il n'en reste pas moins que ce facteur 4 représente, avec les facteurs « argile gonflante » et « teneur en argile », un renfort important pour créer des conditions d'hydromorphie dans le profil, précisément à cause de l'endohydromorphie de la masse d'argile qui est due à ces trois facteurs. La profondeur peut être partiellement remplacée, si elle fait défaut, par un substratum à forte rétention d'eau ; mais si, en même temps, la profondeur est faible et le substratum peu favorable, les sols rencontrés cesseront d'être des vertisols modaux et nous verrons apparaître des sols tirsifiés ; ils tendront vers les sols peu évolués et les sols calco-magnésimorphes (cas des sols calcaires) à mesure que ce 4<sup>e</sup> facteur verticale devient déficient.

Facteur 5 : « Hydromorphie ».

Après avoir aperçu le rôle important des facteurs 1, 2 et 4 dans la création d'une endo-hydromorphie d'un matériau, considérons maintenant l'hydromorphie qui est le résultat du climat et du relief.

A l'intérieur des hydro-topo-séquences, les conditions hydriques varient en fonction du relief : nous verrons les vertisols les mieux développés en position basse ; les tirs de coteau et les sols tirsifiés sur les versants pour passer enfin à des rendzines et des sols squelettiques ; plus le caractère « lithomorphe — endohydromorphe » du matériau d'une telle séquence sera prononcé, plus la tirsification sera en état de remonter des pentes même fortement inclinées. Dans la plaine, on peut établir des séquences semblables, en suivant les faibles différences du relief ; on trouvera la même diminution de l'intensité de la tirsification (tirs brun-noir > sol châtain tirsifié > sol châtain, dans la séquence « Sidi Slimane ») qui sera reflétée par un « vertisol-gonflement de M » décroissant ; mais il est évident que les caractères des chaînons d'une telle séquence seront beaucoup moins contrastés, le chaînon terminal formé en absence d'(exo)hydromorphie pourra être encore très proche de la tirsification et en montrer certains caractères, comme le « vertisol-gonflement de M », a fortiori lorsque le matériau possède une forte endo-hydromorphie (cas du « sol châtain » de « Sidi Slimane » qui a 60 % d'argile, mF montmorillonite, mf interss et dans lequel M avait augmenté au cours de la pédogenèse ; en effet, il pourrait s'agir d'un « sol châtain verticale »).

A l'intérieur des hydro-climat-séquences, en comparant des sols qui se trouvent en même position topographique, nous assistons à une intensité de tirsification décroissante en allant d'un climat plus humide vers un climat plus sec, pour arriver enfin à la limite du domaine de la tirsification. Ce domaine se laisse assez bien caractériser et délimiter dans le cadre des indices climatologiques comme celui d'EMBERGER [70, 93] ; mais la caractérisation de tels domaines est difficile, d'une part, parce que les vertisols peuvent, grâce aux concentrations d'eau dans les bassins collectionneurs, se nourrir des précipitations tombées ailleurs, sous un climat beaucoup plus humide et d'autre part, à cause de l'existence d'un très grand nombre de vertisols fossiles qui ne se formeraient plus aujourd'hui mais qui se maintiennent et gardent leur caractère dans un climat qui est devenu plus sec au Maroc ; ceci est fréquemment le cas en Haute Chaouïa [44], dans les Doukkala [90, 92], dans les Beni Moussa [43] et dans le Haouz [49]. Les indices climatographiques limitant la répartition des vertisols dans une province climatique donnée, la méditerranéenne, comme l'indice EMBERGER au Maroc, perdent leur validité ailleurs ; c'est ainsi que les vertisols au Nord-Cameroun se trouvent dans des régions pour lesquelles les indices EMBERGER seraient de loin supérieurs aux valeurs-limite établies pour le Maroc [4]. Retenons, pour la zone subtropicale où se trouve le Maroc, le type suivant d'une hydro-clima-séquence à intensité de tirsification décroissante : tirs brun-noir > sol châtain tirsifié > sol brun steppique tirsifié > sol brun steppique modal [93].

Facteur 6 : « Interruption » temporaire de l'hydromorphie.

Nous pouvons distinguer entre interruption sur l'ensemble du profil et interruption pour les horizons supérieurs seulement. Dans ce dernier cas, s'il y a une nappe permanente profonde, la formation d'un vertisol ne se trouvera pas empêchée, et nous aurons affaire à un vertisol à gley de profondeur. Si la nappe est moins profonde, on rencontrera des formes de transitions vers les gleys.

Dans le cas de l'interruption sur l'ensemble du profil, il y aura évidemment formation d'un vertisol modal puisque nous avons vu comment l'interruption est un des facteurs indéniables pour la genèse des vertisols. Mais il peut y avoir aussi formation d'un pseudo-gley qui est également caractérisé par l'alternance engorgement-dessèchement. Quels autres facteurs entrent en jeu dirigeant la pédogénèse soit vers le vertisol, soit vers le pseudo-gley ? Relevons ici surtout les contrastes rapides de texture, dont il était déjà question lorsque le facteur « teneur en argile » a été traité, ainsi que les variations de structure correspondantes, mais aussi la durée de l'interruption généralement plus courte pour les sols à pseudo-gley. Pour la classification, il ne sera pas toujours facile de subdiviser le sous-groupe « vertisols hydromorphes », en attribuant tel « tirs de marais » [43] ou tel « tirs de merja » aux catégories « à dessèchement sur l'ensemble de profil » = tendance vers le pseudo-gley ou « à dessèchement sur les horizons supérieurs » = tendance vers le gley.

Retenons, à titre d'exemple, une séquence à interruption d'hydromorphie décroissante : sol tirsifié > tirs > tirs de marais > sol hydromorphe.

Facteur 7 : « Chaleur » pendant l'interruption d'hydromorphie.

Nous avons vu qu'une température élevée est importante pendant la période de dessèchement qui se prolonge dans un matériau argileux, car grâce à elle la quasi-totalité de la matière organique non-adsorbée par l'argile est oxydée. Par contre, la formation des vertisols n'est pas influencée par des températures qui seraient fraîches ou chaudes pendant la période d'hydromorphie, à la seule condition qu'elles ne soient trop basses pour stopper toute activité microbienne. En effet, les vertisols formés en zone subtropicale à hiver frais et ceux formés en zone tropicale à saison des pluies chaude sont identiques.

Si en quittant les zones tropicales et subtropicales, les températures deviennent plus basses pendant la période de dessèchement, il y aura des sols dont la teneur en matière organique sera plus élevée, grâce au maintien de la matière organique individualisée ; mais la nature de leurs complexes argilo-humiques pourra être très voisine de ceux des vertisols [27] ; ceci est le cas des chernozems ; nous pensons en effet que la déficience du facteur « chaleur » est le facteur distinctif principal dans la formation des vertisols d'une part et celle des chernozems d'autre part\* ; sans pour autant oublier que d'autres facteurs entrent en jeu comme la teneur en argile plus faible, remplacée par la teneur caractéristique des loess en limon et sable très fin, et l'absence plus fréquente des minéraux montmorillonitiques. Il y aura donc également dans les chernozems une proportion plus grande en surfaces externes des complexes argilo-humiques, caractérisées par les différentes formes de liaison entre le fer et les substances humiques ; tandis que les surfaces internes intéressées par le vertisol-gonflement de la montmorillonite seront sensiblement réduites.

Lorsque par augmentation des précipitations les chernozems se trouveront soumis à une désaturation en  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ , comme en Allemagne du Nord, [54], les chernozems dégradés ainsi formés présenteront une analogie avec les vertisols dégradés du Nord-Cameroun [51] (cf. facteur 3).

Manuscrit déposé le 29.9.64

\* Rappelons que les vertisols et sols vertiques pénétrant le plus dans la zone tempérée se trouvent dans des régions connues pour leur chaleur d'été : les terres noires de Limagne [22, 23], les smonica et lacoviste de la Pannonie [54, 61].

## ملخص

إرجاع الأرض الى تيرس وترتيب حرمت الأرض

- 1 — استغل التحليل المعدني للتجزئة الصلصالية للحصول على معلومات متممة حول تكوين وطبيعة اراضي محتوية على كمية من الطين والأراضي التي تنتسب اليها.
- 2 — وعلى الخصوص فان Quasi-omniprésence للمعادن montmorillonitiques في الأراضي المحتوية على كمية من الطين والتي بها اتفاح في هذه المعادن بواسطة النفوذ السطحي للمواد الرطبة على المساحات الداخلية قد عينت.
- 3 — في ختام هذه النتائج وتلك الأخرى المحصل عليها بواسطة المنقبين الآخرين، قد اخدت سبع عوامل مبينة ارجاع الأرض الى تيرس : المحتوي من الصلصال المنتفخ والمحتوي من الصلصال وحركة  $Ca^{++}$  و  $Mg^{++}$  وعمق القطاع أو القوام الموافق للأرض المحتوية على كمية من الماء الدائم ومنع هذا الأخير والحرارة خلال هذا المنع.
- 4 — معرفة تكوين الأراضي المحتوية على كمية من الطين كان قد طبق على ترتيب هذه الأراضي وفق ترتيب من وجهة حركة الأرض.

## RÉSUMÉ

1. L'analyse minéralogique de la fraction argileuse a été utilisée pour obtenir des informations complémentaires sur la formation et la nature des vertisols et des sols qui leur sont apparentés.

2. En particulier, une quasi-omniprésence des minéraux montmorillonitiques dans les vertisols et un gonflement de ces minéraux par adsorption de substances humiques sur les surfaces internes ont été constatés.

3. En conclusion de ces résultats et de ceux obtenus par d'autres chercheurs, sept facteurs déterminant la tirsification ont été relevés : teneur en argile gonflante, teneur en argile, dynamique du  $Ca^{++}$  et du  $Mg^{++}$ , profondeur du profil ou substratum favorable, hydromorphie, interruption de celle-ci, chaleur pendant cette interruption.

4. La connaissance de la genèse des vertisols a été appliquée à la systématique de ces sols, dans le désir de les classer selon un point de vue pédogénétique.

## RESUMEN

## « Tirsificación » y clasificación de los « Vertisuelos »

1. El análisis mineralógico ha sido utilizado para obtener informaciones complementarias sobre la formación y la naturaleza de los « vertisuelos » y los suelos análogos.

2. Se ha verificado, en particular, una casi-omnipresencia de los minerales montmorilloníticos en los « vertisuelos », así como una hinchazón de estos minerales por absorción de sustancias húmicas sobre la faz interna.

3. Concluyendo de estos resultados y de los que han sido obtenidos por otros, los autores notan siete factores que determinan la « tirsificación » : contenido en arcilla hinchante, contenido en arcilla, dinámica del  $\text{Ca}^{++}$  y de  $\text{Mg}^{++}$ , hondura del perfil o substrato favorable, hidromorfia, interrupción de la misma, calor durante esta interrupción.

4. Se aplica el conocimiento de la génesis de los « vertisuelos » a la clasificación de estos suelos, deseando clasificarlos desde el punto de vista pedogenético.

## SUMMARY

## Tirsifying and classification of vertisols

1. Mineralogical analysis of the clay fraction was used to obtain complementary data on the formation and nature of vertisols and related soils.

2. In particular, the findings show montmorillonite minerals to be present nearly everywhere in vertisols ; these minerals are swollen through adsorption of humic substances on the inside surface.

3. Concluding from these results and from those of other research workers, seven factors determining tirsification were noted : swelling clay content, clay content, dynamics of  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$ , depth of profile or favourable substratum, hydromorphy, interruption of hydromorphy, heat during this interruption.

4. The knowledge of the genesis of vertisols was applied to the classification of these soils in view of their classification from the standpoint of pedogenesis.

*BIBLIOGRAPHIE*

1. ALBAREDA, J.M., F. BURRIEL & M. MUNOR TABOADELA — 1948. Manganese total en relación con el color de las tierras negras andaluzas. — *Anales del Instituto Español de Edafología, Ecología y Fisiología vegetal*, VII, vol. 3, pp. 439-488, Madrid.
2. ALEXANIAN, CH. & C. SOURISSE — 1954. Sur l'existence de très grands écarts réticulaires 001 dans les argiles organophiles. — *C.R. Acad. Sci.*, **238**, pp. 1141-1143, Paris.
3. ALVIRA ALVIRA, T. — 1949. Suelos de la zona norte del Protectorado de España en Marruecos. — *Annales de Edafología y Fisiología vegetal*, VIII, vol. 1, pp. 3-31, Madrid.
4. ATLAS DU CAMEROUN — 1960. Institut de Recherches Scientifiques du Cameroun, Yaoundé.
5. AUBERT, G. — 1954. Les sols hydromorphes d'Afrique Occidentale Française. — *Actes et C.R. Transactions V<sup>e</sup> Congrès International de la Science du Sol*, IV, pp. 447-450, Léopoldville.
6. AUBERT, G. & PH. DUCHAUFOUR — 1956. Projet de Classification des Sols. — *Rapports VI<sup>e</sup> Congrès International de la Science du Sol*, vol. E, pp. 597-604, Paris.
7. AUBERT, G. — 1963. La classification des Sols — La classification pédologique française 1962 — *Cahiers ORSTOM, Pédologie* 3, pp. 1-7, Paris.
8. AUBERT, G. — 1963. Communication orale : vertisols sans montmorillonite au Mali et au Kénia.
9. AVERY, B.W. — 1956. A classification of British Soils. — *Rapports VI<sup>e</sup> Congrès Intern. de la Science du Sol*, vol. E, pp. 279-285, Paris.
10. BEUTELSPACHER, H. — 1955. Wechselwirkung zwischen anorganischen und organischen Kolloiden des Bodens. — *Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, **69**, pp. 108-115, Weinheim.
11. BLEULER, R. — Communication orale.
12. BOULAINE, J. — 1959. Sols marrons jeunes et sols tirsifiés jeunes. — *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol*, pp. 52-57, Paris.

13. BOURALY, J. — 1960. Note sur la classification des sols hydromorphes. — Note présentée au GEPPPA (Groupe Etude Pédologie Appliquée).
14. BRINDLEY, G.W. & R.W. HOFFMANN — 1962. Orientation and packing of aliphatic chain molecules on montmorillonite. — 9th Nat. Conf. Clays and Clay Min., pp. 546-556, London.
15. BRYSSINE, G. — 1951. Note sur la coloration des sols. — Soc. Sc. Nat. Travaux de la Section de Pédologie, 2/3 ; pp. 85-96, Rabat.
16. BRYSSINE, G. — 1953. Les sols de la Station Expérimentale de Sidi Slimane (Gharb) — Rapport ronéotypé de la S.R.A.E.A., Rabat.
17. BRYSSINE, G. — 1954. Typologie des sols du Maroc. — Soc. Sc. Nat. Travaux de la section de Pédologie, 8/9, pp. 87-128, Rabat.
18. BRYSSINE, G. — 1955-56. Réflexions sur la classification des sols — Soc. Sc. Nat. Travaux de la section de Pédologie, 10/11, pp. 81-101, Rabat.
19. BRYSSINE, G. — 1963. Commentaires de la carte des sols du Gharb de P. Divoux — Rapport ronéotypé de l'INRA, Rabat.
20. BRYSSINE, G. — Les propriétés physiques des tirs du Gharb. — Les cahiers de la recherche agronomique, Rabat, (en préparation).
21. CASSEBAUM, H. — 1958. Beziehungen zwischen Redoxpotential und Dehydrasewirkung von Chinonen und Isatinen — Z.f. Elektrochemie 62, pp. 426-436, Weinheim.
22. COLLIER, D. — 1949. Contribution à l'étude des terres noires de la Limagne d'Auvergne — Constitution et genèse Annales Agr. XIX, pp. 1-77, Paris.
23. COLLIER, D. — 1963. Etude de la grande Limagne argilo-calcaire. Pédologie et agronomie de la limagne — Bull. Ass. Fr. Etude So, 9, pp. 363-374, Paris.
24. DEUEL, H. — 1960. Interactions entre les constituants organiques et minéraux du sol. — Transactions of 7th International Congress of Soil Science, 1, pp. 38-53, Madison, USA.
25. DIAS, J.S., J.C. POVOAS & J.B. MACEDO — 1959. A note on the origin of the colour of tropical black clay soils (Gravinigria). — C.R. de la 3<sup>e</sup> Conf. Interafr. des sols, 1, pp. 259-263, Dalaba.

26. DUBACH, P. & N.C. MEHTA — 1963. The chemistry of soil humic substances — *Soils and fertilizers*, **26**, pp. 293-300, Rothamsted, Angleterre.
27. DUCHAUFOUR, PH. — 1961. Classification des sols — Comparaison de la classification américaine et de la classification française — *Pédologie* **11**, pp. 138-147, Gand.
28. DUCHAUFOUR, PH. — 1961. Données nouvelles sur la classification des sols — *Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences*, **18**, pp. 1-67, Nancy.
29. DUCHAUFOUR, PH. — 1963. Soil classification : A comparison of the American and French Systems — *J. Soil Sci*, **14**, pp. 149-155, Oxford.
30. DURAND, J.H. — 1961. Les sols noirs ou foncés d'Algérie comparés aux argiles noires tropicales et aux chernozems — *Bull. Ass. Fr. Etude Sol*, **12**, pp. 477-513, Paris.
31. DUTIL, P. & G. UNY. — 1965. Caractères généraux des sols noirs de la plaine de Bone — *Bull. Ass. Fr. Etude Sol* (en préparation).
32. EMERSON, W.W. — 1955. Complex formation between montmorillonite and high polymers. — *Nature*, **176**, N. 4479, p. 461, London.
33. EMERSON, W.W. — 1960. Complexes of calcium-montmorillonite with polymers — *Nature*, **186**, pp. 573-574, London.
34. ERHART, HH, J. PIAS & N. LENEUF — 1954. Etude Pédologique du Bassin alluvionnaire du Logone-Chari. — ORSTOM, 234 pages, Paris.
35. FINCK, A. — 1963. Die dunklen Tonböden der Tropen, ihre Eigenschaften, Entstehung und Nutzung. — *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*. **1**, pp. 19-26, Göttingen.
36. FISCHER, TH. — 1910. Schwarzerde und Kalkkruste in Marokko — *Zeitschr. für prakt. Geologie* **18**, pp. 105-114, Berlin.
37. GEOFFROY, J.L. & U. MELONI — Communications orales 1964.
38. GEOFFROY, J.L. — 1964. Rapport sur Zemamra (Doukkala) avril, ONI, El Jadida.

39. GUERRA, A. & D.F. MONTURIOL — 1954. Memoria del mapa de suelos del termino municipal de Ecija (Sevilla) — Dirección General de Enseñanza Laboral e Instituto de Edafología y Fisiología vegetal del C.S.I.C., Mapas de suelos, 1, Madrid.
40. HAGIN, J. & G.B. BODMAN — 1954. Influence of the polyelectrolyte CRD-186 on aggregation and other physical properties of some California and israeli soils and some clay minerals — *Soil Science*, **78**, 367-378, New Brunswick, USA.
41. HAXAIRE, A. & J.M. BLOCH — 1956. Sorption de composés organiques azotés par la montmorillonite — Etude du mécanisme — *Bulletin groupe Français des Etudes de l'argile*, **8**, pp. 17-22, Paris.
42. HENIN, S. & L. TURC — 1949. Essais de fractionnement des matières organiques du sol. — *C.R. AC. agric.*, **35**, pp. 41-43, Paris.
43. HESS, C., G. MISSANTE & U. SCHOEN — 1964. Etude minéralogique des argiles de quelques roches-mères et sols des Beni-Moussa (Tadla) — *Al Awamia*, **10**, pp. 115-139, Rabat.
44. HESS, C., M. ICOLE & U. SCHOEN — 1964. Aspects minéralogiques de quelques pédogenèses fossiles en haute Chaouia (en impression) *Al Awamia* **12**, pp. 95-119, Rabat.
45. JASMUND, K. — 1951. Die silikatischen Tonminerale — Verlag Chemie, Weinheim, Allemagne.
46. KLAMROTH, B. — 1954. Beitrag zur Charakterisierung der organischen Substanz des Bodens. — Thèse, Göttingen.
47. KLINGE, H. — 1960. Beiträge zur Kenntnis tropischer Böden. II Bemerkungen zu den Vorkommen von Böden mit Tirsifizierung in der Alten und der Neuen Welt. — *Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde*, **89**, pp. 211-216, Weinheim, Allemagne.
48. KONOVA, M.M. — 1961. Soil organic matter. — Pergamon Press, Paris.
49. MAHLER, PH. — 1958-59. Note sur les sols tirsifiés du Haouz — *Travaux de la Section de Pédologie*, **13-14**, pp. 167-172, Rabat.
50. MANUEL, A. — Communication orale.
51. MARTIN, D. — 1962. Reconnaissances pédologiques dans le département de la Benoué — *Rapport de l'I.R.C.A.M.*, **128**, Yaoundé, Cameroun.

52. MARTIN, D., U. SCHÖEN, G. SIEFFERMANN & M. VALLERIE — Contribution à l'étude des minéraux argileux de quelques sols du Nord-Cameroun (en préparation).
53. MC ATTEE, J.L. — 1958. Random Interstratification in organophilic bentonites — Clay and Clays Minerals, 5th National Conference on clays and clay minerals 1956, Publication **566**, pp. 308-317, Urbana, USA.
54. MEYER, B. — Die Schwarzerde-Griserde-Bodenentwicklungsreihe auf Lössen im mitteleuropäischen Raum (en préparation) — Thèse d'habilitation, Göttingen.
55. MEYER, L. — 1938. Entwicklung der pflanzlichen Agrikulturchemie seit J. KÜHN und die Leistungsfähigkeit unserer Böden als Forschungsaufgabe der Gegenwart. — Kühn-Archiv, **50**, pp. 229-250, Berlin.
56. MOHR, E.C.J. & F.A. VAN BAREN — 1954. Tropical soils — A critical Study of soil genesis as related to climate, rock and vegetation — Inter-science publishers, 498 pages — pp. 411-435, London.
57. MÜCKENHAUSEN, E. — 1962. Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland. DLG Verlagsgesellschaft, 148 pages, 60 profils, Frankfurt/Main.
58. MÜCKENHAUSEN, E. — 1964. Die schweren Böden Europas — Z. Pflanzenern. Düng. Bodenkd. **104**, pp. 97-109, Weinheim.
59. MUSSARD, R. — Communication orale.
60. NETZCH - LEHNER, A. & J. KLEE — 1962. Anwendung der Differential — Thermoanalyse zu Untersuchungen von Huminsäuren und Vergleichssubstanzen. — Bayer. Landw. Jahrb, **39**, 113-121, München.
61. NEUGEBAUER, V. et H. ZAKOSEK — 1962. Die Smonica. — Notizbl. Hess. Landesamt f. Bodenforschung **90**, pp. 341-353.
62. NIEDERBUDE, E.A. — 1958. Ueber den Einfluss des Eisens und seiner Oxydverbindungen auf die Bildung und Stabilisierung von Huminsäuren. Ein Beitrag zur Frage der Pseudo-Tschernosemgenese in niedersächsischen Lössgebieten. — Dissertation. Landw. Fakultät, Göttingen.
63. ORTELLI, L. & U. SCHOEN — 1964. Remarques au sujet de la détermination de la composition minéralogique des argiles — Al Awamia, **10**, pp. 97-113, Rabat.

64. G. PAJOT — 1963. Légende et notice des sols du Pré-Rif — Rapport ronéotypé de l'INRA, Rabat.
65. PANEQUE GUERRERO, G. — 1957-1961. Composición mineralógica y genesis de algunos tipos de suelos calizos béticos I, II, III. Anales de Edafología y Fisiología vegetal, **16**, pp. 907-957 & 1115-1176, **20**, 269-297, Madrid.
66. PANEQUE GUERRERO, G., A. HIGUERAS & U. SCHOEN — Rendsinas y tierras negras del sur de España : Carácteres generales de los suelos y mineralogía de las arcillas (en préparation).
67. PAQUET, H., R. MAIGNIEN & G. MILLOT — 1961. Les argiles des sols des régions tropicales semi-humides d'Afrique occidentale Bull. Serv. Carte Géol. Als. - Lorr., **14**, pp. 111-129, Strasbourg.
68. PUJOS, A. — 1958-59. Présentation de la carte des sols du Gharb au 1/100 000 par P. DIVOUX. — Soc. Sc. Nat. Travaux de la section de pédologie, 13/14, pp. 51-95, Rabat.
69. RUEHRWEIN, R.A. & D.W. WARD — 1952. Mechanism of clay aggregation by polyelectrolytes. — Soil Science **73**, pp. 485-492, New-Brunswick, USA.
70. SAUVAGE, CH. — 1963. Etages bioclimatiques. — Atlas du Maroc, Section II, Planche n° 6B, notices explicatives.
71. SCHEFFER, F., B. ULRICH & P. HIESTERMANN — 1957. Ein methodischer Weg zur Ermittlung der Komplex-und Chelatbindungskapazität von organischen Stoffen und Böden — Z. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde, **78**, pp. 168-177, Weinheim.
72. SCHEFFER, F., B. MEYER & E.A. NIEDERBUDE — 1959. Huminstoffbildung unter katalytischer Einwirkung natürlich vorkommender Eisenverbindungen im Modellversuch. — **87**, 26-43, Weinheim Zeitschr. Pflanz. Düng. Bodkd.
73. SCHEFFER, F., H. FÖLSTER & B. MEYER — 1960. Zur Entstehung von Schwarzerden und schwarzerdeähnlichen Böden — I. Mitteilung : Der indische Regur als Beispiel für tropische Schwarzerdebildung. — Chemie der Erde, **20**, pp. 301-330, Jena, Allemagne.
74. SCHEFFER, F. & B. ULRICH — 1960. Humus und Humus-Düngung, Band I, Enke-Verlag, Stuttgart, 266 pages.

75. SCHEFFER, F., E. WELTE & B. MEYER — 1960-1962. Die Rendsinen der mitteldeutschen Berg- und Hügellandschaften (Leine-Weser-Bergland) — I. Mitteilung : Genese und Verbreitungsbedingungen der Rendsinen. — II. Mitteilung : Fraktur, Nichtkarbonatgehalt und spezifische Auflösungsgeschwindigkeit des Kalkgesteins als bestimmende Grössen der Bodenentwicklungsgeschwindigkeit. — Zeitschr. Pflzern. Düng. Bodkd. Weinheim, **90**, pp. 18-36, **98**, pp. 1-17.
76. SCHEFFER, F., H. FÖLSTER & B. MEYER — 1961. Zur Diagnostik und Systematik von Dreischicht-Tonmineralen in Böden und pedogenen Sedimenten. — Chemie der Erde, **21**, pp. 209-238, Jena.
77. SCHOEN, U. — 1953. Kennzeichnung von Tonen durch Phosphatbindung und Kationenumtausch — Z. PDB, **63**, pp. 1-17, Weinheim.
78. SCHUYLENBORGH, J.V. & P.L. ARENS — 1950-1951. The electrokinetic behaviour of freshly prepared  $\gamma$  - and  $\alpha$  FeOOH. Recueil des travaux chimiques des Pays-Bas, **69**, pp. 1757-1765.  
mêmes auteurs : The electrokinetic behaviour of freshly prepared  $\gamma$  - AlOOH,  $\alpha$  - and  $\gamma$  Al(OH)<sub>3</sub> - Rec. Trav. Chim. **70**, **11**, pp. 985-988, Amsterdam.
79. SEGALEN, P. — 1958. Les sols de l'Ouest-Cameroun — Notice sur la feuille de Njitapon — Rapport de l'I.R.CAM., p. 94, Yaoundé, Cameroun.
80. SIESKIND, O. & R. WEY — 1958. Sur l'adsorption d'amines aliphatiques par la Montmorillonite. Bull. Gr. Fr. Arg., **10**, pp. 9-14, Paris.
81. SINGH, S. — 1954. A Study of the black cotton soils with special reference to their coloration — J. Soil Sci., **7**, 43-58, Oxford.
82. SINGH, S. — 1956. The formation of dark-coloured clay-organic complexes in black soils. — J. Soil Sci., **5**, 289-299, Oxford.
83. SOIL CLASSIFICATION — A comprehensive system, 7th approximation 1960, Soil survey staff & Soil conservation service US Département of Agriculture, 265 pages.
84. SEMMEL, A. — 1963. Intramontane Ebenen im Hochland von Godjam (Aethiopien). — Erdkunde, Archiv f. wiss. Geographie, **17**, pp. 173-189, Bonn.

85. TERCINIER, G. — 1962. Les sols de la Nouvelle-Calédonie — O.R.S.T.O.M., Paris, 3<sup>e</sup> trimestre.
86. THOMANN, CH. — 1963. Quelques observations sur l'extraction de l'humus dans les sols — Méthode au pyrophosphate de sodium. — Cahiers O.R.S.T.O.M. Pédologie **3**, pp. 43-72, Paris.
87. TURNER, E.R. — 1955. The reaction between bentonite and certain naturally-occurring compounds. — J. Soil Sci., **6**, 319-326, Oxford.
88. DEL VILLAR, H. — 1937. Los suelos de la Peninsula Lusa-Ibérica, 183 pages, Madrid.
89. WATTEUW, R. — Répartition schématique des sols dans les Zaërs, — Al Awam. (en préparation), Rabat.
90. WILBERT, J. — 1960. Sols-types des Doukkala et leurs relations — Soc. Sc. Nat. Travaux de la section de Pédologie, **13-14**, pp. 9-34, Rabat.
91. WILBERT, J. — 1960. Liste d'ouvrages et articles concernant l'étude des sols et ses divers aspects au Maroc et en Afrique du Nord — Soc. Sc. Nat. Travaux de la Section de Pédologie, **13-14**, pp. 203-231, Rabat.
92. WILBERT, J. — 1962. Carte des sols des Abda - Doukkala, Notice explicative, — Rapport Ronéotypé de la Direction de la Recherche Agronomique et de l'Enseignement Agricole, Rabat.
93. WILBERT, J. — Répartition des tirs et sols tirsifiés du Maroc (en préparation). Les cahiers de la Recherche Agronomique, Rabat.
94. WILBERT, J. — Liste revue et complétée d'ouvrages et articles concernant l'étude des sols au Maroc et en Afrique du Nord (en préparation).